

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

OTIMIZAÇÃO DE REDES RAMIFICADAS ATRAVÉS
DO MÉTODO DA PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
ROSSANA CAVALCANTI ARAÚJO SILVA

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

1997

ROSSANA CAVALCANTI ARAÚJO SILVA

**OTIMIZAÇÃO DE REDES RAMIFICADAS ATRAVÉS
DO MÉTODO DA PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR**

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

Orientador: HEBER PIMENTEL GOMES

Co-orientador: WILSON FADLO CURI

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

1997



S586o Silva, Rossana Cavalcanti Araujo
Otimizacao de redes ramificadas atraves do metodo da
programacao nao-linear / Rossana Cavalcanti Araujo Silva. -
Campina Grande, 1997.
148 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) _
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

1. Agua - Distribuicao 2. Recursos Hidricos 3.
Dissertacao I. Gomes, Heber Pimentel, Dr. II. Curi, Wilson
Fadlo, Dr. III. Título


CDU 626.824(043)

**OTIMIZAÇÃO DE REDES RAMIFICADAS ATRAVÉS DO
MÉTODO DA PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR**

ROSSANA CAVALCANTI ARAÚJO SILVA


HEBER PIMENTEL GOMES
Orientador


WILSON FADLO CURI
Co-orientador


VAJAPEYAM S. SRINIVASAN
Componente da Banca


JOSÉ DANTAS NETO
Componente da Banca

Aos meus queridos pais Antonio e Maria,

OFEREÇO

Ao meu amado esposo Josinaldo,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por seu infinito amor que nos guia ao conhecimento e a sabedoria.

Aos meus pais, Antonio Virginio Subrinho e Maria Cavalcanti Araújo, pelas lições de amor e carinho durante toda minha vida.

A meu querido esposo, Josinaldo Andrade de Medeiros Silva, que em todos os momentos da graduação e pós-graduação esteve ao meu lado, dedicando amor, paciência e ajudando incansavelmente na concretização desta pesquisa.

Aos meus familiares, especialmente a Maria do Socorro Araújo Dias, Maria das Neves Araújo Nascimento, Josefa Marly Andrade Lima e Edneide Martins do Rio.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante a vigência do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e aos professores da Área de Engenharia de Recursos Hídricos, pelo apoio e dedicação, especialmente aos professores Márcia Maria Rios Ribeiro, Carlos Galvão, Gledsneli Lins, Raimundo Sérgio Santos Góis, Vajapeyam S. Srinivasan e Rosires Catão Curi.

Aos Professores Heber Pimentel Gomes e Wilson Fadlo Curi, pela orientação e motivação.

Ao Professor José Dantas Neto, por sua dedicação e ajuda na obtenção e utilização de softwares empregados nesta pesquisa.

A memória do inesquecível Professor Manoel Gilberto de Barros, exemplo de amor, dedicação e incentivo a seus alunos.

Aos colegas de curso, Paulo da Costa Medeiros, Marcos Tibério de Siqueira e Iordan Facundo Filho, pela amizade, incentivo e experiências compartilhadas.

Aos funcionários do Laboratório de Recursos Hídricos, especialmente a dedicada bibliotecária Alrezinha Dantas Veiga pelo incentivo e ajuda inestimável, e a Vera Lúcia Alves Rodrigues e Alzira Neves de Oliveira Silva pelo apoio.

Aos amigos, Eunice Porto Câmara, Herlem Lira Henrique Torres, Klebber Teodomiro Martins Formiga, Malba Linete Batista de Araújo, Maria Betânia Almeida de Oliveira, Núbia Bezerra Monteiro, Rozilene Ferreira Silva, Soniaeli Pires de Carvalho Sá e Wasthenayda Patrício Santos, pelo incentivo e companheirismo durante todo o curso, especialmente ao amigo Douglas Silva Luna pela ajuda na conclusão desta pesquisa.

A Sra. Dionísia da Cruz Souza, mãe sábia e dedicada, e a seus filhos: Adyléa Maria de Souza, Benedito Hugo de Souza, Efigênia de Souza Cabral, Eustáquio de Souza, Evanilda de Souza, Maria Diva de Souza Estrela, Maria Lúcia de Souza Oliveira e Ritalina de Souza, pelo grande carinho dedicado.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO 11

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14

2.1 – Sistemas de Abastecimento de Água 14

2.1.1 – Redes de Distribuição 17

2.1.2 – Tubulações 20

2.1.2.1 – Tubulações de Ferro Fundido 21

2.1.2.2 - Tubulações de Ferro Dúctil 23

2.1.2.3 - Tubulações de Aço 24

2.1.2.4 - Tubulações de Concreto 26

2.1.2.5 - Tubulações de Cimento-Amianto 27

2.1.2.6 - Tubulações de PVC 30

2.1.2.7 - Tubulações de Polietileno 34

2.2 – Métodos de Dimensionamento de Redes Ramificadas 36

2.2.1 – Métodos Convencionais 37

2.2.2 – Métodos de Otimização Econômica 42

2.2.2.1 – Programação Linear 43

2.2.2.1.1 – Método da Programação Linear

Aplicado à Redes Ramificadas 46

2.2.2.2 – Programação Dinâmica	50
2.2.2.2.1 – Métodos Granados	51
2.2.2.3 – Método WADISO	53
CAPÍTULO III	
DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO NÃO- LINEAR À REDES RAMIFICADAS	56
3.1 – Introdução	56
3.2 – Programação Não-linear	59
3.3 – Formulação do Modelo de Programação Não-Linear	64
3.3.1 – Introdução	64
3.3.2 – Função Objetivo	70
3.3.3 – Restrições	72
3.4 – Programas Computacionais Utilizados	79
3.4.1 – Programa Computacional de Ajuste de Dados Experimentais	79
3.4.2 – MATLAB	80
3.4.2.1 – Arquivos M	81
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1 – Generalidades	82
4.2 – Exemplos de Aplicação	83
4.2.1 – Aplicação a um Exemplo Simulado	83
4.2.2 – Aplicação a um Exemplo Prático	99
CAPÍTULO V	
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	110

CAPÍTULO VI	
ANEXOS	113

CAPÍTULO VII	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo estabelecer uma metodologia que permita dimensionar economicamente as redes de distribuição de água ramificadas, através da programação não-linear. O emprego da programação não-linear simplifica o dimensionamento, representando com maior fidelidade o problema físico, permitindo o emprego de softwares de uso geral, tais como o MATLAB. A aplicação do método da programação não-linear apresentou resultados satisfatórios, garantindo uma redução dos custos de aproximadamente 9% quando comparado a métodos convencionais.

ABSTRACT

This dissertation has as objective to establish a methodology that allows to project the branching water distribution networks economically, through the nonlinear programming. The employment of the nonlinear programming simplifies the design, representing with larger fidelity the physical problem, allowing the employment of softwares available in the market, such like MATLAB. The utilization of this method warrants a reduction of the net cost of approximately 9%, when compared with the design of systems using conventional methods.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A aplicação de metodologias de otimização em dimensionamento de redes de distribuição de água tem merecido especial atenção nos últimos 30 anos. Vários estudos foram realizados e novos métodos desenvolvidos para torná-los cada vez mais acessíveis. Entretanto, na prática ainda são aplicadas ferramentas baseadas na experiência ou na técnica de tentativa-e-erro, que não consideram o fator econômico. Provavelmente, consiste na minoria dos projetistas, pois com o crescente avanço tecnológico é inadmissível que perca-se tempo e dinheiro com tais técnicas.

Segundo WALSKI (1995) uma importante razão que inibe o emprego de métodos de otimização é a inexistência de um problema único de dimensionamento, sendo muitas vezes complexos e particulares, cada tipo de problema traz suas hipóteses que seriam usadas no modelo de dimensionamento. Além disto, os modeladores desconhecem como são tomadas as decisões de projetos em sistemas reais, desenvolvendo modelos que não refletem a realidade. Tais

argumentos não podem servir de justificativa para exclusão dos métodos de otimização.

O objetivo desta pesquisa é o estabelecimento de um método de dimensionamento econômico para redes hidráulicas ramificadas, a partir da Programação Não-Linear.

O Capítulo II, Revisão Bibliográfica, está dividido em dois assuntos básicos para o entendimento do dimensionamento otimizado de redes de distribuição ramificadas: Sistemas de Abastecimento de Água e Métodos de Dimensionamento de Redes Ramificadas. O primeiro item menciona conceitos básicos e fatores relevantes no projeto, enfocando com mais detalhes a rede de distribuição e as tubulações, citando tipos, suas vantagens e desvantagens. No segundo item são comentados alguns métodos de dimensionamento convencionais e otimizados. Os métodos convencionais são citados sem maiores detalhes, enquanto os métodos de otimização são explicados detalhadamente, destacando os seguintes métodos: Programação Linear, Granados e WADISO.

No Capítulo III é introduzida a aplicação do modelo de otimização à redes ramificadas, utilizando o Método da Programação Não-Linear, mostrando de forma sucinta a evolução dos métodos de otimização e a razão pela qual foi escolhida a programação não-linear. Neste Capítulo tem-se a formulação do modelo não-linear e os programas utilizados para sua aplicação. Na formulação do modelo apresenta-se uma análise do comportamento do diâmetro dos tubos em relação ao

preço, baseados em catálogos de preços fornecidos pelos fabricantes, permitindo verificar a validade da formulação do método na prática.

No Capítulo IV, Resultados e Discussão, aplica-se o Método da Programação Não-Linear a dois exemplos (simulado e prático), comparando os resultados com alguns métodos otimizados e convencionais citados no Capítulo II, Revisão Bibliográfica.

O Capítulo V apresenta as principais conclusões e recomendações sobre a pesquisa e sua aplicação.

O Capítulo VI, ANEXOS, está subdividido em ANEXO A e ANEXO B. O Anexo A apresenta gráficos do diâmetro em função do preço, obtidos a partir de catálogos de preço fornecidos pelos fabricantes. O Anexo B contém os arquivos M que foram utilizados na resolução dos exemplos do capítulo IV.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os sistemas de abastecimento são responsáveis pelo fornecimento de água aos pontos de consumo. Em qualquer localidade, a existência destes sistemas é fundamental pois sua eficiência contribui para a melhoria do padrão sócio-econômico da população. Estes sistemas abrangem desde a captação num determinado manancial até a distribuição final aos consumidores.

AZEVEDO NETTO (1982) definiu um sistema de abastecimento de água como um conjunto de obras, equipamentos e serviços que tem por finalidade atender a uma determinada comunidade para fins diversos. As principais unidades destes sistemas são: captação, adução e sub-adução, tratamento, reservação, distribuição, estações elevatórias e recalque.

Na elaboração de projetos de sistemas de abastecimento são considerados diversos fatores, tais como (AZEVEDO NETTO, 1982):

- planta de levantamento planialtimétrico;
- dados e informações sobre a economia local e regional;
- dados e informações a respeito dos aspectos físicos, hidrológicos e climáticos da localidade;
- dados referentes à demografia local e regional;
- indicação das áreas da localidade atendidas pelos serviços de: água, esgotamento sanitário e pluvial, energia elétrica, sistema viário, etc.;
- levantamento das condições sanitárias da comunidade;
- levantamento completo do sistema de abastecimento público de água eventualmente existente, com indicação da capacidade nominal de cada unidade do sistema;
- avaliação do crescimento populacional;
- determinação das características qualitativas e quantitativas dos mananciais disponíveis na região;
- avaliação do volume de água necessário, para atender as demandas atuais e futuras.

Além dos fatores citados anteriormente, deve-se estabelecer parâmetros e critérios que vão guiar o andamento do projeto. Alguns elementos que devem ser fixados são (AZEVEDO NETTO, 1982):

- período de alcance das obras a serem projetadas (entre 10 e 30 anos);
- cotas de consumo diário de água per-capita;
- volumes de água para fins industriais, quando muito significativo em relação ao volume total;
- coeficientes de variação do consumo;
- número de horas de funcionamento de cada unidade do sistema.

Para dimensionar um sistema de abastecimento tem-se que definir o consumo de água. Esta informação é muito importante na elaboração do projeto, sendo função de vários fatores e variando de cidade para cidade, podendo variar até de um setor de distribuição para outro, numa mesma localidade. O consumo compreende diversos usos, tais como: perdas e desperdícios, doméstico, comercial, industrial, público e especiais (AZEVEDO NETTO, 1975).

Os principais fatores que influenciam o consumo são (AZEVEDO NETTO, 1982): clima, condição sócio-econômica da população, serviço com ou sem medição, qualidade da água fornecida, custo da água, pressão na rede distribuidora, alguns tipos de consumo (comercial, industrial e público), perdas no sistema e existência de redes de esgotos.

2.1.1 - Redes de Distribuição

A rede de distribuição pode ser definida como a unidade do sistema de abastecimento que transporta a água para os diversos pontos de consumo. É constituída por um conjunto de tubulações e peças especiais, projetadas de forma a garantir o abastecimento com vazão suficiente e pressão adequada (AZEVEDO NETTO, 1982).

A rede de distribuição é formada por condutos principais e condutos secundários. Os condutos principais, de maiores diâmetros, são os condutos encarregados da alimentação dos condutos secundários. Os condutos secundários são responsáveis pelo abastecimento direto aos pontos de consumo, possuindo diâmetros menores.

As redes de distribuição podem ser ramificadas, malhadas ou mistas (Figura 2.1). As redes ramificadas são caracterizadas por terem sentido único de escoamento, sendo composta de tubulações em forma de ramos. Quando as tubulações se comunicam uma com as outras, formando-se anéis, a rede é denominada malhada. Neste tipo de rede, a vazão pode se efetuar por diferentes sentidos, dependendo da superfície piezométrica. A rede mista é a combinação de redes malhadas e ramificadas.

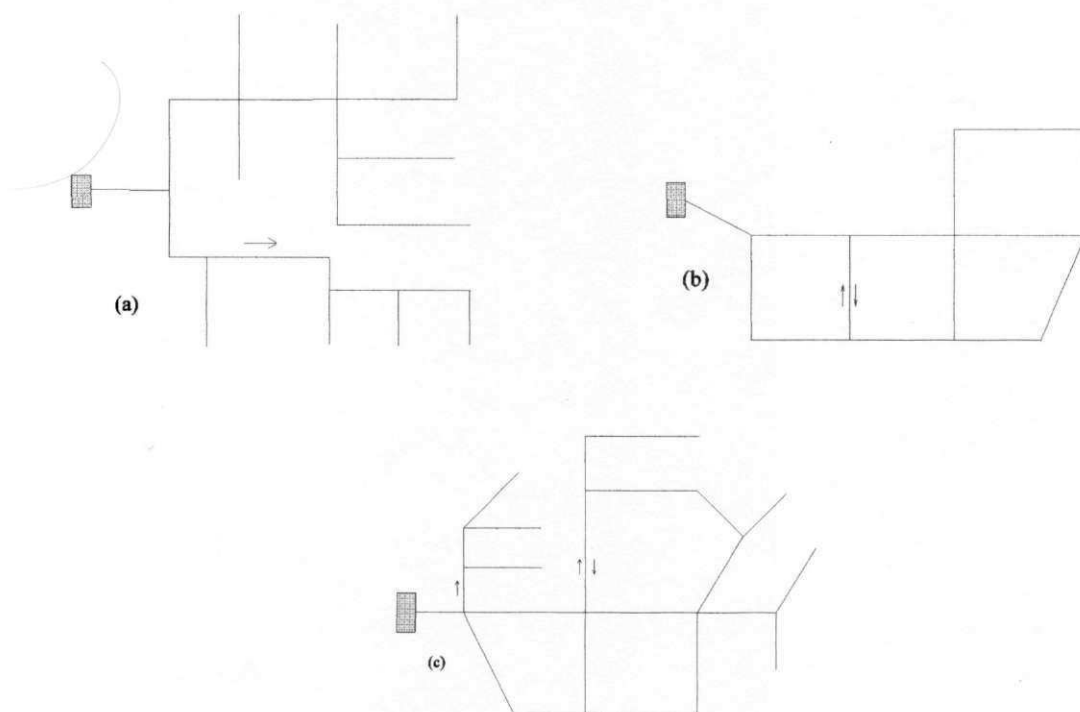


FIGURA 2.1 – Tipos de redes de distribuição.

(a) – rede ramificada; (b) – rede malhada e (c) – rede mista

As redes ramificadas são empregadas em sistemas de abastecimento na zona rural e na zona urbana de cidades de pequeno porte, além de sistemas de abastecimento d'água para perímetros de irrigação pressurizada. As principais vantagens e desvantagens das redes ramificadas são:

– Vantagens:

a. dimensionamento mais fácil. Como o sentido do escoamento da água é conhecido, a vazão transportada por cada tubo pode ser determinada com exatidão;

b. mais econômica, pois requer menores comprimentos de tubos.

– Desvantagens:

a. o fornecimento da água pode ser prejudicado caso ocorra um problema no trecho de jusante;

b. nas extremidades a água fica parada podendo propiciar contaminações.

Por proporcionar uma maior confiabilidade no abastecimento de água, as redes malhadas são bastante empregadas em abastecimento d'água em cidades de médio e grande porte, apresentando as seguintes vantagens e desvantagens:

– Vantagens:

a. um problema em determinado trecho não compromete todo fornecimento d'água;

b. melhor distribuição de pressão.

– Desvantagens:

a. o custo da rede é mais elevado pois requer maiores comprimentos de tubulação.

b. o dimensionamento não é facilmente obtido, sendo necessário utilizar técnicas de aproximação, tal como Hardy-Cross, para obter as distribuições de vazão e pressão nos trechos.

2.1.2 – Tubulações

No dimensionamento de redes de distribuição de água, é de grande importância a seleção adequada das tubulações que compõem a rede, devendo-se observar todos os fatores técnicos e econômicos que possam influenciar na escolha correta.

Num sistema de abastecimento de água, a tubulação é o conjunto de tubos, conexões e acessórios com a finalidade de transportar água de um ponto a outro. Os materiais empregados nas tubulações devem obedecer às seguintes condições (MISAWA, 1975):

- Quanto à qualidade da água: uso de materiais que não alterem a qualidade da água e que não sejam facilmente dissolvidos;
- Quanto à quantidade de água: materiais que permitam a obtenção de tubos de diâmetros ou secções de escoamento desejados, que não permitam a sensível alteração da secção de escoamento e a grande alteração da rugosidade relativa no decorrer do tempo; permitam a confecção de juntas com o mínimo vazamento; materiais que provoquem o mínimo de trincas, corrosões e outros problemas decorrentes das ações internas e externas.
- Quanto à pressão da água: materiais que permitam a obtenção de tubos com espessuras desejadas e que consigam resistir aos esforços internos e externos.

– Quanto à economia: materiais que sejam resistentes aos choques que ocorrem durante a fase de carga/descarga e assentamento; que permitam cortes e furos com relativa facilidade; materiais mais leves que facilitem o transporte e assentamento; materiais que permitam menor número de juntas ou conexões; que satisfaçam condições técnicas; sejam de menor custo; materiais duráveis, possibilitando o menor custo na operação e manutenção.

Os materiais comumente citados na literatura são: ferro fundido, ferro dúctil, aço, concreto simples e armado, cimento amianto, PVC e polietileno, cerâmicas, madeiras e outros materiais especiais.

2.1.2.1 - Tubulações de Ferro Fundido

O ferro fundido comum tem sido utilizado na fabricação de tubos para água desde o século XV, sendo até um bom tempo atrás um dos únicos elementos empregado para esta finalidade.

As tubulações de ferro fundido são empregadas em adutoras, estações de tratamento de água, redes de distribuição de água, reservatórios e estações de recalque. Segundo MISAWA (1975) tem-se a seguinte classificação de tubos de ferro fundido comum:

- De acordo com o processo de fabricação: tubos fundidos em moldes fixos (moldes horizontais ou verticais) e tubos centrifugados (50 a 600 mm);
- De acordo com o tipo de juntas: tubos lisos, tubos de ponta e bolsa, tubos em flanges e tubos de ponta e flange;
- De acordo com o revestimento: tubos com revestimento asfáltico e tubos cimentados.

As principais propriedades dos tubos de ferro fundido são (MISAWA, 1975): grande resistência à ação de cargas externas, grande resistência a corrosão, baixa resistência a ação de choques (devido a cristalização do carbono - grafite - sob a forma lamelar), fácil de instalar e resistência ao escoamento aumentada com o tempo. Estas tubulações podem ser revestidas externamente (piche) e internamente (piche ou cimento aplicado por centrifugação). A cimentação interna impede a formação de tubérculos nas paredes (tuberculização) provocada por águas de reação ácida. Apesar dos tubérculos não diminuírem a resistência dos tubos, reduzem a capacidade de escoamento (WIENDL, 1973).

As conexões especiais utilizadas são: curvas, tês, cruzetas, junções, reduções, tampões ou caps de extremidades. Os acessórios utilizados são: Registros, ventosas, hidrantes, válvulas de retenção ou contra golpes de aríete, válvulas reguladoras de pressão, comportas, válvulas de pé com crivo, etc.

2.1.2.2 - Tubulações de Ferro Dúctil

Com a necessidade de se obter um material com maior resistência mecânica, que é a principal deficiência do ferro fundido comum, pesquisadores desenvolveram o ferro dúctil. Este material é obtido com a adição de magnésio ou de cério ao ferro fundido no processo de fabricação, melhorando suas propriedades (MISAWA, 1975).

A comparação entre o ferro dúctil e o ferro fundido são descritas a seguir (MISAWA, 1975):

- Resistência à corrosão: igual (possuem praticamente o mesmo teor de carbono);
- Resistência à ruptura pela pressão interna: três vezes superior a do ferro fundido comum;
- Resistência à carga externa e a choques: maior do que o ferro fundido comum;
- Usinabilidade: a do ferro dúctil é mais difícil;
- Classificação de tubos, tipos de juntas e seu emprego são semelhantes ao do tubo de ferro fundido comum.

2.1.2.3 - Tubulações de Aço

Os tubos de aço são empregados em: adutoras de grande diâmetros, estações de recalque, nas travessias de rios, viadutos e pontes, etc., apresentando a seguinte classificação de acordo com (MISAWA, 1975):

- o processo de fabricação: tubos com chapas rebitadas, tubos com chapas soldadas (com emendas retilíneas ou com emendas espirais) e tubos tipo segmentar;
- o tipo de juntas: tubos lisos, tubos de ponta e bolsa, tubo em flanges;
- o tipo de revestimento: tubos com pinturas fosfatadas, tubos com pinturas de resinas, tubos de revestimento metálico, tubos com revestimento à base de asfalto aplicado externa e internamente, tubos com revestimento à base de asfalto aplicado externamente e com argamassa de cimento e areia, aplicado internamente, tubos com revestimento plástico.

As principais características dos tubos de aço: grande resistência à pressão interna e relativa resistência à ação da carga externa; pequena resistência à corrosão; baixa resistência à ação do choque mecânico; instalação fácil; custo maior que o tubo de concreto; resistência ao escoamento aumentada com o tempo (desvantagem sanada com o emprego de revestimento interno) e sujeito à dilatação (deve-se deixar as juntas de dilatação nos pontos necessários).

Devido à espessura relativamente pequena das paredes dos tubos de aço, no emprego deve ser dedicada grande atenção aos seguintes fatores (GARCÉS, 1976):

- A ação de cargas externas, no caso de tubulações enterradas;
- Ao efeito das reações de apoio, no caso de tubulações assentes sobre berços;
- A ação da pressão de colapso oriunda do vácuo relativo no interior da tubulação, em tubulações de sucção ou em tubulações sujeitas a descargas eventuais;
- A ação corrosiva das águas.

Precauções devem ser tomadas nas tubulações descobertas (ou aéreas), provendo-se de juntas de dilatação, para impedir-lhes a flambagem, quando os esforços térmicos (variação de temperatura) excederem o limite de resistência da parede metálica.

Na determinação da espessura da parede do tubo de aço considera-se os seguintes fatores (MISAWA, 1975):

- Pressão interna: pressão de água e golpe de aríete;
- Pressão externa: carga externa uniforme, carga de aterro e pressão de colapso;
- Cargas físicas especiais: tubos em trânsito, tubos usados como ponte e tubos sujeitos aos esforços concentrados de berços e ancoragens;
- Resistência à corrosão;
- Espessuras mínimas exigidas nas normas e especificações.

2.1.2.4 - Tubulações de Concreto

Os tubos de concreto podem ser classificados de acordo com (MISAWA, 1975):

- O processo de fabricação: concreto simples e concreto armado;
- O tipo de juntas: tubos lisos e tubos de ponta e bolsa.

Emprega-se tubos de concreto em: captação, adutoras e estação de tratamento de água com descargas e drenos. Segundo MISAWA (1975) os tubos de concreto somente tem sido aplicados em adutoras de grande diâmetro, geralmente acima de 800 mm, uma vez que torna-se mais econômico a utilização de outros materiais no emprego de diâmetros menores. Até diâmetros de 2,40 metros, as juntas podem ser feitas com anéis de borracha. Acima desse diâmetro são estudadas soluções particulares, geralmente constituídas por juntas de chumbo.

As principais características dos tubos de concreto são (MISAWA, 1975):

- Relativa resistência à pressão interna e externa;
- Relativa resistência à corrosão (depende do PH da água, porosidade do concreto, etc.);
- Baixa resistência ao choque;

- Dificuldade de instalação (devido ao seu peso);
- Resistência ao escoamento quase permanente no decorrer do tempo;
- Podem ser considerados como sendo de pequena dilatação.

2.1.2.5 - Tubulações de Cimento-Amianto

Os tubos de cimento-amianto são fabricados com uma mistura de cimento Portland, fibras de amianto, água e possíveis aditivos. O amianto é uma substância mineral que pode ser reduzida a fibras finíssimas e resistentes. As fibras de amianto devem ser uniformemente distribuídas no material, proporcionando a mesma função da armadura de aço no concreto armado, conferindo resistência a tração que o cimento isoladamente não teria (WIENDL, 1973).

Os diâmetros dos tubos de cimento amianto são normalizados pelos diâmetros internos. Comercialmente estão disponíveis nos seguintes diâmetros: 50, 60, 70, 80, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600,... e 1200. Os comprimentos dos tubos são fabricados com 3, 4 ou 6 metros (GOMES, 1997).

A utilização destes tubos são: tubos de “pressão”, para condutos forçados, e tubos para condutos livre, tipo esgoto. Suas principais vantagens e desvantagens são (WIENDL, 1973):

- Vantagens:

- a. locais onde o concreto, o ferro fundido e o aço sejam sujeitos a condições de água ou solo agressivo (apresenta grande resistência à tração, é ainda muito resistente às ações ordinárias de solos agressivos).
 - b. pequena resistência ao escoamento da água. Não é sujeito à corrosão;
 - c. preço inferior ao do ferro fundido;
 - d. facilidade de manuseio: peso inferior ao ferro fundido, transporte mais econômico, facilidade de colocação na vala e confecção de juntas.
- Desvantagens:
- a. necessidade de maior proteção contra cargas externas;
 - b. necessidade de assentamento aprimorado.

Os tipos de juntas utilizadas em tubos de cimento-amianto são (WIENDL, 1973):

- Juntas de ponta e bolsa, com anel;
- Juntas “simplex”;
- Juntas especiais: Juntas “Gibault”.

Algumas características dos tubos de cimento-amianto são:

- Pressão de serviço: deverá ser a metade da pressão de ensaio;
- Dilatação térmica: $0,000009/^{0}C$ (uma tubulação de 100 metros de comprimento, se fosse contínua, sofreria uma dilatação de 9 milímetros, para uma variação de $10^{0}C$;
- Dilatação por absorção de água: coeficiente de dilatação por absorção de água igual a 0,001 (uma tubulação de 100 metros de comprimento quando assentada seca, poderá apresentar uma dilatação de 10 centímetros, quando saturada d'água).

Como se pode observar, os efeitos da absorção de água são muito mais importantes que os provocados pelas variações normais de temperatura.

O Quadro 2.1 fornece as pressões nominais e de trabalho para cada faixa de diâmetro e sua classe.

QUADRO 2.1 - Pressões nominais e de trabalho em Atm para os tubos de cimento-amianto (Norma ISO-160)

Diâmetro (mm)	Classe	A	B	C	D	E	F
50-100	PN	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
	PT	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
125-200	PN	6,0	12,0	18,0	25,0	30,0	35,0
	PT	3,0	6,0	9,0	12,5	15,0	17,5
250-500	PN	8,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
	PT	4,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
600-1200	PN	6,0	12,0	18,0	24,0	30,0	35,0
	PT	4,0	7,5	10,0	14,0	17,5	21,0

FONTE - GOMES, 1997. p.169.

2.1.2.6 – Tubulações de PVC

O PVC (Poly Vinyl Chloride) é um polímero, substância formada por moléculas grandes, nas quais uma ou várias unidades básicas, chamadas monômeros, se repetem inúmeras vezes. O cloreto de vinila (CH_2CHCl) é o monômero do PVC (COMPANHIA PETROQUÍMICA CAMAÇARI, 1995?)

O cloreto de vinila foi descoberto por Regnault em 1835, sendo posteriormente citado nos estudos desenvolvidos por Baumann em 1872. Apenas em 1912, Klotte patenteou a obtenção do cloreto de vinila a partir da reação entre o acetileno e o ácido clorídrico na presença do catalisador de cloreto de mercúrio. A produção industrial foi iniciada em 1931. Na Segunda Guerra Mundial, o PVC foi largamente utilizado para fins militares. Após o término da guerra, o PVC foi difundido como substituto da borracha, sendo atualmente aplicado em diversas áreas (CPC, 1995?).

Um polímero comercial puro é denominado resina. Para obter as propriedades desejadas à resina, originalmente sob forma de um pó branco e inodoro, deve-se acrescentar outras substâncias, permitindo a fabricação do produto acabado e/ou conferindo propriedades. A união da resina com aditivos resulta no composto de PVC (CPC, 1995?).

O processo mais usado atualmente é através da reação do etileno com o ácido clorídrico. O sal, encontrado na água do mar e em jazidas subterrâneas, é o

principal componente, participando com cerca de 57% do total, enquanto que o etileno, proveniente de derivados do petróleo, participa com aproximadamente 43% do total (Fig 2.2) (CPC, 1995?).

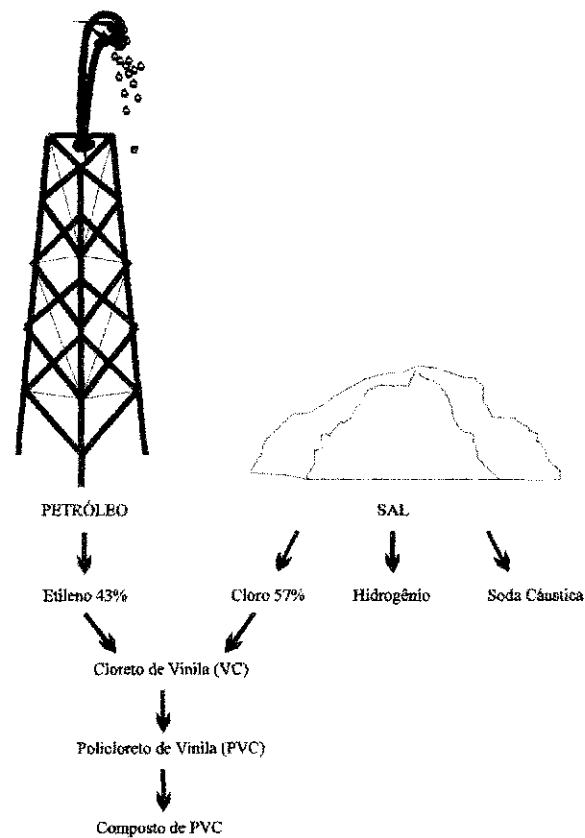


FIGURA 2.2 – Como surge o PVC

FONTE – CPC, 1994?

As tubulações de PVC, aplicadas na adução e distribuição de água, podem ser classificadas em: linha PBA, linha PBS e linha DEFOFO (CPC, 1995?).

As linhas PBA e PBS são fabricadas na cor marrom e possuem diâmetro nominal entre 40 e 300. São capazes de suportar pressões de serviço de 0,6 MPa, 0,75 MPa e 1,00 MPa. A principal diferença dessas linhas é a forma de união dos tubos. Os tubos da linha PBA são unidos por meio de juntas elásticas (ponta e bolsa dotada de anel de borracha), enquanto que os tubos da linha PBS são unidos através de juntas soldáveis com a utilização de um solvente apropriado (CPC, 1995?).

Os tubos da linha DEFOFO (diâmetros equivalentes aos dos ferros fundidos) são fabricados na cor azul, a partir do diâmetro nominal de 100 mm até 300 mm, podendo suportar pressões de até 1MPa. As suas conexões são de ferro fundido e as juntas são elásticas (CPC, 1995?).

As vantagens das tubulações de PVC utilizadas para adução e distribuição de água são (CPC, 1995?):

- Facilidade de instalação;
- Baixa rugosidade;
- Menor custo;
- Estanqueidade das juntas;
- Imunidade a corrosão;
- Melhor desempenho hidráulico.

GOMES (1997) cita algumas desvantagens das tubulações do PVC:

- A resistência mecânica diminui com o tempo e com o aumento de temperatura;
- Os engates rápidos das tubulações portáteis de plástico se rompem com facilidade.

O Quadro 2.2 mostra algumas das principais características do PVC rígido.

QUADRO 2.2 – Características do PVC rígido

Característica	Valor
massa específica	1,45 g/cm ³
temperatura de amolecimento Vicat	> 70 ⁰ C
módulo de elasticidade	2250 a 3300 MPa
coeficiente linear de dilatação térmica (30 a 50 ⁰ C)	60 a 80x10 ⁻⁶ / ⁰ C
condutividade térmica	0,15 W/mK
resistência à tração	≥ 700 kJ/m ²
alongamento a ruptura	≥ 150%

FONTE – CPC, 1995? p.4.

2.1.2.7 – Tubulações de Polietileno

As tubulações de polietileno são flexíveis e a sua utilização está limitada às linhas laterais e aos trechos das redes de distribuição de menores diâmetros dos sistemas de irrigação localizada. Comercialmente encontram-se disponíveis em rolos com diâmetros nominais de 12, 16, 20, 25, 32 e 40 mm (GOMES, 1997).

Em relação aos tubos de PVC, tem-se as seguintes vantagens e desvantagens (GOMES, 1997):

- Vantagens:

- a. mais resistentes às intempéries;
- b. mais flexíveis;
- c. fácil instalação;
- d. mais resistente a carga/descarga.

– Desvantagens:

- a. custo maior;
- b. viabilidade apenas para projetos com diâmetros menores que 50 mm.

O Quadro 2.3 mostra as espessuras dos tubos de polietileno de baixa densidade segundo a norma europeia UNE 53-131-82.

QUADRO 2.3 - Espessuras dos tubos de polietileno de baixa densidade em milímetros, segundo a norma UNE 53-131-82

Diâmetro nominal (mm)	Pressão nominal (Kg/cm ²)		
	4	6	10
10	-	-	2,0
12	-	-	2,0
16	-	2,0	2,2
20	-	2,0	2,8
25	2,0	2,3	3,5
32	2,0	2,9	4,4
40	2,4	3,7	5,5
50	3,0	4,6	6,9
63	3,8	5,8	8,6
75	4,5	6,8	10,3
90	5,4	8,2	12,3
110	6,6	10,0	15,1
125	7,4	11,4	17,1
140	8,3	12,7	19,2
160	9,5	14,6	21,9
180	10,7	16,4	24,6
200	11,9	18,2	27,3

FONTE - GOMES, 1997. p.169.

2.2 - MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE REDES

RAMIFICADAS

Rede de distribuição de água é o conjunto de tubulações e peças especiais destinadas a conduzir a água até os pontos de consumo. Em geral, constitui, em média, cerca de 70% do custo total, chegando a mais de 80% em abastecimento de pequenas coletividades (GARCÊS, 1976).

As redes de distribuição de água ramificadas são utilizadas em sistemas de abastecimento rurais, industriais e projetos de irrigação. A razão da adoção deste tipo de rede é a questão econômica. No caso de abastecimento rural, a distribuição de usuários numa área esparsa torna o sistema malhado caro (ROBINSON & AUSTIN, 1976).

O dimensionamento das redes de distribuição ramificadas é hidraulicamente indeterminado. Dada uma vazão, são vários os diâmetros de tubos que podem ser propostos, cada um dará lugar a uma velocidade e conseqüentemente uma perda de carga diferente. O desafio consiste em selecionar entre a gama de diâmetros possíveis o mais adequado (ALZAMORA & TÁRREGA, 1987).

Cada trecho de uma canalização fica caracterizado hidraulicamente por quatro variáveis, que são: velocidade média do escoamento, vazão, diâmetro e perda de carga unitária. Existem duas equações que envolvem estes quatro parâmetros (SILVESTRE, 1979):

Equação da Continuidade:

$$Q = AV \quad 2.1$$

Equação das Perdas:

$$j = \frac{\beta \cdot Q^n}{D^m} \quad 2.2$$

Como a vazão é conhecida em redes ramificadas, a indeterminação é resolvida especificando uma perda de carga conhecida (com a rugosidade do tubo), uma velocidade recomendada ou diretamente um diâmetro normalizado. Entretanto, é aconselhável resolver a indeterminação introduzindo critérios econômicos (ALZAMORA & TÁRREGA, 1987).

2.2.1 - Métodos Convencionais

A fórmula de Bresse foi a primeira encontrada na bibliografia sobre dimensionamento econômico de tubos, sendo de grande utilidade prática no dimensionamento de linhas de recalque. Ela é expressa da seguinte forma (SILVESTRE, 1979):

$$D = K(Q)^{1/2} \quad 2.3$$

Onde: Q - vazão (m³/s);

D - diâmetro (m);

K - coeficiente (adimensional).

O coeficiente K varia de 0,75 a 1,40, sendo escolhido de acordo com a experiência do projetista. Na verdade, escolher o valor deste coeficiente é equivalente a deixar a velocidade constante da equação da continuidade, obtendo-se (SILVESTRE, 1979):

$$V = \frac{4Q}{\pi.D^2} \quad 2.4$$

Substituindo a equação (2.3) na (2.4), tem-se:

$$V = \frac{4}{\pi.K^2} \quad 2.5$$

Atribuindo a equação 2.5 uma série de valores, entre 0,75 e 1,40, ao coeficiente K, determina-se as velocidades de projeto pela Fórmula de Bresse (Quadro 2.1).

**QUADRO 2.1 - Valores do Coeficiente K
(Fórmula de Bresse).**

Coeficiente K	Velocidade (m ³ /s)
0,75	2,26
0,80	1,99
0,85	1,76
0,90	1,57
0,95	1,41
1,00	1,27
1,10	1,05
1,20	0,88
1,30	0,75
1,40	0,65

Empregando a Fórmula de Bresse encontra-se um diâmetro diferente do comercialmente utilizado, portanto é necessário que o projetista adote um valor comercial mais conveniente e posteriormente ajuste os cálculos. Na prática utiliza-se o diâmetro comercial imediatamente superior para a tubulação de sucção, diminuindo desta forma a velocidade para evitar os efeitos da cavitação (SILVESTRE, 1979).

Segundo SILVESTRE (1979), a velocidade média das instalações de recalque situa-se entre 0,6 a 2,40 m/s, valores bem próximos aos encontrados pela Formula de Bresse (Quadro 2.1). Entretanto, nas instalações que funcionam algumas horas por dia é indicado velocidades superiores.

ALZAMORRA & TÁRREGA (1987) descrevem três métodos para dimensionamento das tubulações:

- Método de Enrique Mendiluce (1966), que parte da hipótese de que a variação do custo seria linear com o diâmetro. Apesar de sua simplicidade e facilidade de utilização trata-se apenas de um método aproximado;
- Método A. Melzer (1964) supõe que o custo do tubo é proporcional ao peso do mesmo;
- Método da Evolução Real dos Custos tem como fundamento que o diâmetro ótimo é aquele cuja soma dos gastos anuais de energia consumida mais o valor da anuidade amortizada dos custos da tubulação seja mínima.

Os métodos aproximados, como por exemplo: Método da Perda de Carga Unitária e o Método da Velocidade Máxima Admissível, tentam dimensionar as tubulações com o objetivo de alcançar uma rede de distribuição com o menor custo. Entretanto, não obtendo soluções de custo mínimo, pois as metodologias empregadas não consideram os preços dos tubos como variáveis de cálculo (GOMES, 1997).

O Método da Velocidade Máxima Admissível consiste em determinar o menor diâmetro comercial admissível para cada trecho da rede, respeitando um limite de velocidade máxima. Este limite é estabelecido com o objetivo de fornecer segurança à rede, uma vez que velocidades muito grandes provocam desgastes nos tubos, vibração na rede, golpes de aríete, entre outros problemas. Geralmente este método é utilizado para encontrar a solução de partida de outras metodologias (GOMES, 1997).

O Método da Perda de Carga Unitária Constante tem maior aceitação na prática do que o método descrito anteriormente, sendo empregado especialmente quando se conhece a altura manométrica de cabeceira. Neste método, o diâmetro de cada trecho é obtido de maneira que a perda de carga unitária correspondente seja aproximadamente igual à perda média disponível na artéria que contém o trecho considerado (GOMES, 1997).

BERNADO (1984) apresentou três métodos para dimensionamento de redes de distribuição de água para irrigação:

- Método das Tentativas que consiste em determinar o custo fixo anual por metro de tubulação, para todos os diâmetros possíveis, e o custo anual da energia, selecionando para cada trecho a combinação de diâmetros que represente o menor custo da soma da parcela referente a energia e a tubulação;
- O Método das Tentativas Simplificado consiste em determinar o custo anual por 100 metros de tubulação dos diversos diâmetros para cada vazão que poderá ocorrer nos diferentes trechos;
- O Método de Keller é o mais versátil e rápido, pois uma vez elaborado poderá ser usado para a seleção do diâmetro econômico para qualquer vazão. Trata-se do estabelecimento de um monograma, onde o eixo das abcissas representa a vazão e o eixo das ordenadas a perda de carga. As retas que relacionam a perda de carga com a vazão são traçadas para diferentes diâmetros. Entre estas retas é inserida uma linha tracejada que indica a diferença de perda de carga, nas diferentes vazões (SAAD, 1993).

O conceito até agora tratado é extensivo ao projeto de redes ramificadas em que a vazão de projeto em cada trecho está definida, além das pressões requeridas nos nós. Sendo necessário determinar os diâmetros e a pressão de cabeceira da rede. Nas metodologias mostradas anteriormente o problema reduzia-se a encontrar uma única incógnita (diâmetro). No entanto, aumentando-se o número de incógnitas a complexidade matemática aumenta notavelmente. Tradicionalmente utiliza-se métodos de seleção, prova e correção, seguindo do correspondente balanço hidráulico da rede, mas além destes métodos não

conseguirem o valor ótimo no aspecto econômico e serem trabalhosos à medida que aumenta o número de trechos, fornecem poucas informações adicionais.

2.2.2 - Métodos de Otimização Econômica

Otimizar é seleccionar a melhor alternativa dentro de um conjunto de possíveis soluções, atendendo a um dado critério de otimalidade.

Os métodos de otimização surgiram durante a Segunda Guerra Mundial, quando as forças armadas de diversos países formaram grupos científicos, compostos de físicos, matemáticos, engenheiros, entre outros, cujo objetivo consistia em preparar projetos para os líderes de operações militares. Logo após, essas técnicas foram aplicadas a diversas áreas, tal como: indústria, comércio, transporte, saúde, etc. Atualmente, é difícil encontrar uma área de atividade humana onde os modelos matemáticos e os métodos de investigação de operações não sejam utilizadas de alguma forma (VENTSEL, 1983). Dois aspectos contribuíram para o aperfeiçoamento das técnicas de otimização: o surgimento do computador pessoal de alta velocidade e a aplicação de técnicas numéricas.

Os métodos mais empregados e pesquisados na atualidade são os métodos baseados na programação linear, dinâmica e na enumeração exaustiva. Com destaque tem-se o Método da Programação Linear, o Método de Granados e o

Método de Wadiso, básicos para a compreensão e estudo do tema de otimização de redes de distribuição de água. Estes métodos serão descritos com mais detalhes neste item.

2.2.2.1 - Programação Linear

Entre os métodos de otimização empregada, a programação linear é o mais simples e melhor estudado. Possui grande aplicabilidade em diversas áreas, como por exemplo: engenharia, indústria, comércio, planejamento econômico, etc.

Segundo DANTAS NETO (1994) e GOTTFRIEND & WEISMAN (1973), a técnica de programação linear foi desenvolvida durante a Segunda Guerra Mundial por George B. Dantzing, com objetivo de planejar várias atividades da Força Aérea Americana, mas ficou conhecida mundialmente em 1951 com a publicação da Cowless Monograph nº 13, possibilitando seu aprimoramento e aplicação como ferramenta de pesquisas em diversas áreas.

A Programação Linear pode ser definida como um método matemático que permite encontrar a melhor solução para problemas que tenham seus processos físicos representados por funções lineares, possuindo como características a grande aplicabilidade e simplicidade (BREGALDA, 1988).

Segundo BREGALDA (1988) a tarefa da Programação Linear consiste na maximização ou minimização de uma função linear, chamada FUNÇÃO OBJETIVO, respeitando um sistema linear de igualdades ou desigualdades (RESTRICÇÕES).

A forma geral do modelo de programação linear é a seguinte (DANTAS NETO, 1994; BARTH, 1987; BONETT, JAUFFRED & JÉSUS, 1971):

– Otimizar:

$$C = c_1 \cdot X_1 + c_2 \cdot X_2 + c_3 \cdot X_3 + \dots + c_n \cdot X_n \quad 2.6$$

– Sujeito às restrições:

$$a_{11} \cdot X_1 + a_{12} \cdot X_2 + \dots + a_{1n} \cdot X_n \leq b_1 \quad 2.7$$

$$a_{21} \cdot X_1 + a_{22} \cdot X_2 + \dots + a_{2n} \cdot X_n \leq b_2$$

⋮

$$a_{m1} \cdot X_1 + a_{m2} \cdot X_2 + \dots + a_{mn} \cdot X_n \leq b_m$$

$$X_j \geq 0 \quad \forall j$$

Onde a_{ij} , b_{ij} e c_{ij} são constantes e os X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) são as variáveis de decisão do problema.

Resumidamente, a formulação consiste em achar valores não negativos das variáveis X_1, X_2, \dots, X_n que satisfaçam às restrições e que atendam ao critério de otimalidade (minimização ou maximização) da função linear.

No caso de maximização, a função objetivo representa geralmente a receita monetária, benefício, lucro, etc. Na minimização, representa custos (DANTAS NETO, 1994).

As restrições representam limitações de um modo geral (físicas, recursos humanos, monetários, fatores de produção, etc.) e exigências de condições que devem ser cumpridas no problema. Tais restrições determinam a região das soluções viáveis. A melhor das possíveis soluções, denominada solução ótima, é a que maximiza ou minimiza a função objetivo (BREGALDA, 1988).

A modelagem e o algoritmo de resolução do modelo são considerados os principais passos na solução do problema. No caso da programação linear, o algoritmo mais utilizado é o Simplex. Entretanto, a modelagem não tem uma técnica precisa, capaz de permitir o estabelecimento do modelo de um problema, sendo fundamental a experiência e a capacidade de análise e síntese do modelador (BREGALDA, 1988).

Segundo GOMES (1997) a aplicação da programação linear na otimização de redes ramificadas sob pressão foi introduzida por Karmeli et al (1968).

2.2.2.1.1 Método da Programação Linear aplicado à Rede Ramificada

Para formular o modelo de programação linear deve-se primeiramente definir as variáveis de decisão, a função objetivo, o critério de otimização e as restrições do problema físico proposto (GOMES, 1997). Para este caso específico, o objetivo principal é dimensionar uma rede de distribuição de água com o menor custo, ou seja, encontrar os diâmetros para cada trecho da rede que proporcionarão o custo mínimo do sistema.

Os diâmetros dos tubos não são diretamente envolvidos nos modelos. Utiliza-se o artifício de considerar como variável de decisão os comprimentos dos tubos, pois tanto a perda de carga quanto o custo são funções lineares do comprimento, fato que não ocorre com o diâmetro (variável implícita) (GOMES, 1997).

O método é formulado supondo que cada trecho da rede de distribuição possui vários diâmetros e que cada um deles ocupa um comprimento parcial do trecho (GOMES, 1997).

Outra variável que pode ser introduzida na formulação do problema é a altura de bombeamento. Verifica-se uma relação econômica entre a altura de bombeamento e os diâmetros dos tubos da rede de distribuição de água, pois ao aumentar a altura de bombeamento pode-se diminuir os diâmetros dos tubos, acarretando uma diminuição do custo da rede em troca de um incremento do custo

de bombeamento. Ao contrário, com a diminuição da altura de bombeamento haverá uma diminuição do consumo de energia e um aumento no custo de investimento. Deve-se, portanto, procurar o equilíbrio entre ambos custos para obter um projeto ótimo (ALZAMORA & TÁRREGA, 1987).

Formulação Matemática

Com base na descrição do modelo, pode-se apresentar a formulação matemática do mesmo (ALZAMORA & TÁRREGA, 1987).

Função Objetivo:

$$CS = ChIH + \sum \sum a_{i,c} J_{ij} \quad 2.8$$

Restrições:

$$\sum L_{ij} = D_j \quad j \in J \quad 2.9$$

$$IH + ELEV_{IH} - ELEV_k - \sum \sum J_{ij} \geq PMIN_k \quad \forall k \in K \quad 2.10$$

$$IH + ELEV_{IH} - ELEV_1 \leq PMAX_1 \quad \forall 1 \in L \quad 2.11$$

$$IH, L_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \geq 0 \quad 2.12$$

Onde: *CS* - custo do sistema;

IH - altura da pressão no nó de cabeceira;

Ch - custo da elevação da vazão mais a amortização do equipamento;

L_{ij} - comprimento do tubo de diâmetro *i* no trecho *j*;

C_i - custo por metro linear do tubo de diâmetro i ;

a_i - fator de amortização anual do resto da instalação;

I_j - conjunto dos possíveis diâmetros para um determinado trecho;

J - conjunto de trechos que constituem a rede;

K - conjunto dos nós com restrições de pressão mínima;

L - conjunto dos nós com restrições de pressão máxima;

D_j - comprimento total do trecho j ;

$ELEV_{IH}$ - cota geométrica do nó de cabeceira;

$ELEV_k$ - cota geométrica do nó k ;

J_{ik} - perda de carga unitária no ~~tramo~~ i do trecho j ;

J_k - conjunto de trechos que constituem o trajeto desde a cabeceira até o nó k .

O subíndice k identifica os nós em que se deseja assegurar uma pressão de serviço PMIN, enquanto que l identifica os nós em que a pressão máxima PMAX está restringida.

Significado das equações formuladas:

- função objetivo (2.8): é o custo anual do sistema composto pela soma do custo de bombeamento e do custo da tubulação.

- restrições (2.9): asseguram que a soma dos comprimentos dos diferentes diâmetros que compõem os trechos sejam iguais aos comprimentos físicos reais dos mesmos.
- restrições (2.10): asseguram as pressões mínimas nos nós de consumo do sistema.
- restrições (2.11): garantem que as pressões máximas em todos os nós do sistema não ultrapassem os valores prefixados, impostos pela condição do projeto.
- restrições (2.12): garantem o campo de validade das variáveis (região factível) imposta pelo método.

Considerações em torno da resolução do problema:

A formulação do problema permite que em cada trecho possa aparecer qualquer diâmetro disponível comercialmente, surgindo, então, a necessidade de reduzir o tamanho do modelo para tornar viável o tempo de cálculo e a necessidade de memória. Desta forma, seleciona-se pelo menos três diâmetros comerciais a partir do diâmetro mínimo, condicionados pelo limite da velocidade máxima. A solução otimizada para cada trecho fica configurada por no máximo dois diâmetros consecutivos, encontrando valores nulos para os comprimentos restantes. Deve-se assegurar, depois desta medida, que o ótimo seja global, de tal forma que se o computador fosse livre para selecionar qualquer diâmetro da série, o resultado continuaria sendo o mesmo. Na prática, tal condição equivale a certificar na solução final que os diâmetros ótimos de cada trecho situem-se no centro da gama escolhida (ALZAMORA & TÁRREGA, 1987).

A vantagem da programação linear é que o modelo matemático é potente, de fácil utilização, tem bastante flexibilidade para ser empregado dentro de uma ampla categoria de problemas e obtém o ótimo global (GOMES, 1997; ROBINSON & AUSTIN, 1976).

As principais desvantagens são: o grande número de variáveis de decisão e equações de restrições, e diâmetros pré-fixados que não garantem a obtenção do custo mínimo do sistema na primeira etapa.

2.2.2.2 - Programação Dinâmica

A programação dinâmica é um método de otimização, especialmente adaptado a denominada operação de múltiplos passos. A idéia de otimização gradual, serve de embasamento para este método. Parte-se do princípio que a otimização de uma etapa é muito mais simples que a otimização de todo o processo, ou seja, é mais fácil resolver repetidas vezes um problema relativamente simples, que resolver uma vez um problema complexo (VENTSEL, 1983).

Na programação dinâmica é fundamental saber como planejar o problema corretamente, sem sobrecarregá-lo com detalhes supérfluos e levando em consideração todas as consequências futuras. Portanto, o sucesso deste tipo de metodologia depende da habilidade e experiência do modelador (VENTSEL, 1983).

2.2.2.2.1 - Método Granados

O Método Granados, desenvolvido na Espanha pelo Professor Alfredo Granados (1990), é um algoritmo iterativo que fornece o menor custo de uma rede ramificada de distribuição de água através da redução dos excessos de pressão existentes na rede. No processo de otimização considera-se a variação do preço das tubulações em função de seus tipos, diâmetros e classes (LEAL, 1995).

Este método pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa consiste na determinação de uma solução prévia ou inicial que fornece, para cada trecho, os menores diâmetros admissíveis, de tal forma que a pressão seja estritamente necessária para atender às pressões requeridas nos nós e superar as perdas de carga no conjunto de tubulações. O critério adotado leva em consideração as velocidades máximas e as vazões de projeto a serem transportadas. O custo da rede, em relação a solução prévia, é determinado diretamente a partir dos comprimentos das tubulações dos trechos, dos diâmetros mínimos e das classes admitidas dos tubos.

Na segunda etapa, inicia-se um processo iterativo de redução gradual da cota piezométrica de cabeceira, partindo da solução inicial, que fornecerá a cada decréscimo da cota, um novo custo ótimo da rede. Este processo termina quando é alcançada a cota de cabeceira desejada pelo projetista ou quando se atinge a cota

que proporciona o menor custo conjunto da rede de distribuição mais a estação de bombeamento.

Para reduzir gradualmente a cota de cabeceira deve-se diminuir a cada iteração a perda de carga na artéria crítica ou mais forçada da rede. Essa diminuição é realizada com o aumento do diâmetro da tubulação no trecho onde o gradiente de câmbio é menor. O gradiente de câmbio (C) de um determinado trecho representa o acréscimo de custo por diminuição de perda de carga, produzida pela mudança de seu diâmetro pelo diâmetro nominal consecutivo superior, sendo dado por:

$$C = \frac{Pt_2 - Pt_1}{J_1 - J_2} \quad 2.13$$

Onde: Pt_1 - custo total do trecho com o menor diâmetro (D_1);

Pt_2 - custo total do trecho com o diâmetro superior adjacente (D_2);

J_1 - perda de carga no trecho com o diâmetro D_1 ;

J_2 - perda de carga no trecho com o diâmetro D_2 .

Com a nova cota de cabeceira parte-se para reajustar as classes das tubulações, seus preços e seus gradientes de câmbio. O novo custo da rede será igual ao custo anterior, mais a diferença de custo proporcionado pelo aumento de diâmetro do trecho ótimo, menos a redução provocada pela mudança de classe.

Todo este processo é realizado de forma automática através do programa REDES (GOMES, 1997).

Este método também pode ser aplicado em redes malhadas pela junção com o método dos anéis de Hardy Cross (LEAL, 1995).

2.2.2.3 - Método WADISO

O Método WADISO (Water Distribution System Optimization) foi desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers, o qual utiliza técnicas de enumeração exaustiva para a elaboração das possíveis combinações de diâmetro de tubo e o método de Hardy-Cross, para o cálculo das distribuições de vazão e pressão dessas combinações (LEAL, 1995).

Além do método tentar alcançar a solução ótima (menor custo) para um sistema de distribuição, fornece um conjunto de soluções próximas da ótima, possibilitando uma maior flexibilidade para o projetista analisar e decidir qual a solução mais viável.

Os principais passos da técnica de Enumeração Exaustiva são os seguintes (LEAL, 1995):

- Escolher os diâmetro para os trechos ou grupos de trechos do sistema (mínimo, intermediários e máximo);
- Fazer uma combinação com todos os diâmetros de todos os trechos e calcular os seus custos;
- Realizar alguns testes para reduzir o número de combinações a serem balanceadas;
- Selecionar as soluções adequadas e listar em ordem crescente de custo.

A principal desvantagem desta técnica refere-se ao enorme tempo computacional requerido para encontrar a solução ótima. Este problema pode ser resolvido tentando-se minimizar o número de combinações de diâmetros, para os quais a distribuição de pressão deva ser calculada, utilizando para isto quatro medidas descritas a seguir (LEAL, 1995):

- Agrupamento de trechos: o projetista indica quais os possíveis diâmetros para cada trecho ou grupo de trecho, de acordo com as velocidades máximas e mínimas admissíveis.
- Teste sobre a lista de diâmetros: é estabelecido o menor diâmetro especificado para cada grupo e que possa atender o requisito de pressão quando combinado com os maiores diâmetros dos outros grupos. Se o menor diâmetro no grupo falhar neste teste será eliminado do grupo pois não tem condições de fornecer a

pressão requerida. Então, o segundo menor diâmetro é testado da mesma forma, segue-se repetindo este processo sucessivamente para cada grupo.

- Teste de custo: após a combinação de diâmetros que satisfaça todos os requerimentos de pressão, a mesma é colocada na lista de diâmetros funcionais de acordo com seu custo. Não será necessário calcular a distribuição de pressão para qualquer combinação candidata, que seja mais cara do que a combinação que estiver no início desta lista. Entretanto, quanto mais barata for esta combinação, mais efetiva será a redução do número de combinações candidatas, para as quais devem ser calculadas as distribuições de pressão.
- Teste de diâmetro: parte-se do princípio que se uma combinação de diâmetro não satisfaz aos requerimentos de pressão, qualquer outra combinação que tenha todos os diâmetros iguais ou menores também não irá satisfazer tais requerimentos.

Quando uma combinação passou em todos os testes, a distribuição de pressão é calculada através do Método de Hardy-Cross. Em seguida, é realizado um teste de pressão, onde a distribuição de pressão é calculada para todas as demandas, devendo satisfazer os requerimentos de cada uma delas. Quando uma combinação não passa no teste de pressão, esta é escrita na lista das combinações não funcionais. Caso contrário, ela é a nova combinação funcional de diâmetros, sendo escrita em uma lista de combinações funcionais em ordem crescente de custos. A solução ótima será a que tiver o menor custo na lista (LEAL, 1995).

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE PROGRAMACÃO

NÃO-LINEAR À REDES RAMIFICADAS

3.1 – INTRODUÇÃO

Em geral, problemas de otimização consistem na seleção, dentre um conjunto de possíveis alternativas, uma que seja ótima de acordo com um dado critério, ou seja, o objetivo básico da otimização é encontrar a melhor solução para um determinado problema. A aplicação da otimização é vasta, principalmente quando envolve o fator econômico.

O primeiro passo para a solução de um problema de otimização econômica está em determinar o conjunto de alternativas para eleger a região de possíveis soluções. Em seguida, estabelece-se um critério de otimização econômica na forma de uma função preferencial (função objetivo). O resultado ótimo pode ser determinado pela comparação dos valores da função objetivo associada às

alternativas possíveis, de forma a ser obtido o máximo ou o mínimo (DANO, 1975).

Quando o número de alternativas que constitui a região possível é limitada, a solução pode, em princípio, ser determinada pela enumeração, ou seja, listando as alternativas e comparando-as com base no critério de otimização (restrições). Em casos em que o número de alternativas é grande, a solução por enumeração exige muito tempo, pois torna-se difícil enumerar o conjunto de alternativas (DANO, 1975).

O modelo matemático da programação linear representa um grande avanço na otimização, pois as restrições podem ser elaboradas na forma de desigualdades. Mas o fato de trabalhar-se com funções lineares pode se constituir numa limitação significativa.

Na maioria dos casos, a representação de sistemas físicos reais é melhor realizada através de sistemas de equações não-lineares. Quando estes sistemas contêm não linearidades insignificantes pode-se utilizar um modelo linear para representá-lo, sem que isto prejudique a resolução do problema. Em outros casos, são necessários artifícios para se linearizar o problema.

Algumas técnicas de linearização foram desenvolvidas para tornar possível a aplicação do modelo matemático da programação linear, entre elas pode-se destacar a programação separável e a programação quadrática.

Boa parte dos problemas são altamente não lineares, não podendo ser representados por modelos lineares sem destruir a essência física que o caracteriza. Portanto, o interesse no desenvolvimento de técnicas de otimização que possam acomodar modelos contendo significativas não linearidades é de extrema importância. Um progresso adicional seria utilizar diretamente no processo de otimização as não linearidades que caracterizam o problema através da programação não-linear.

3.2 - PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

A programação não-linear é um método de otimização empregado quando o problema é expresso mediante funções e/ou restrições não lineares.

Segundo SAAD (1993), a programação não-linear difere da programação linear em cinco aspectos:

- A região factível não está limitada pelo conjunto de pontos extremos;
- O número de restrições que são exatamente satisfeitas podem ser iguais ao número de variáveis de decisão;
- Um deslocamento contínuo numa direção uniforme pode não levar a valores continuamente crescentes ou decrescentes da função objetivo;
- A região factível pode não ser um conjunto convexo;
- Um ótimo local pode não ser um ótimo global.

MATEUS & LUNA (1996) relatam que os primeiros métodos de otimização que utilizavam a programação não-linear eram bastante restritos. No final da década de 50, com a introdução das novas técnicas de resolução, a aplicação da programação não-linear tornou-se significativa, tendo a capacidade de resolver problemas complexos de muitas variáveis.

A programação não-linear é caracterizada por não possuir um único algoritmo de resolução de seus problemas.

Para aplicar a programação não-linear num determinado problema, deve-se ter o interesse em representá-lo através do desenvolvimento de um modelo científico, selecionado de acordo com a finalidade, sendo este a síntese da análise de muitas variáveis de decisão. Para isto o objetivo e as restrições do problema devem ser quantificadas, representadas por equações e inequações. Na otimização a função que representa o objetivo a ser maximizado ou minimizado denomina-se função objetivo cuja solução deve satisfazer um conjunto de restrições que determinam o conjunto das soluções viáveis. Então, define-se como solução ótima uma das melhores soluções.

A forma do modelo matemático que define a programação não-linear é a seguinte (MATEUS & LUNA, 1996):

Função Objetivo:

$$(\max)\min f(x) \quad 3.1$$

Sujeito às restrições:

$$g_i(x) \geq b_i; \leq b_i; = b_i \quad i = 1, \dots, m \quad 3.2$$

O conjunto de soluções viáveis pode ser representado por:

$$S = \{x \mid g_i(x) \geq b_i; \leq b_i; = b_i, i = 1, \dots, m\} \quad 3.3$$

A Solução viável x^* que minimiza (ou maximiza) a função $f(x)$ é denominada solução ótima.

Para que seja caracterizada como um problema típico de programação não-linear é necessário que ao menos uma das funções, $f(x)$ ou $g_i(x)$, sejam não lineares, caso contrário tem-se um modelo de programação linear.

A programação não-linear é irrestrita quando deseja-se otimizar uma função sem restrições, ou seja;

$$\min f(x) \tag{3.4}$$

$$x \in R^n$$

Quando o problema apresenta restrições denomina-se programação não-linear restrita.

Existem modelos não lineares específicos, tais como a Programação Quadrática e a Programação Geométrica.

Tem-se um caso de Programação Quadrática quando $f(x)$ é uma função quadrática em x , enquanto as restrições são funções lineares em x .

Exemplificando tem-se:

$$\max f(x) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \tag{3.5}$$

$$g_1(x) = -x_1 - x_2 - x_3 + 7 \tag{3.6}$$

$$g_2(x) = x_1 \geq 0 \tag{3.7}$$

$$g_3(x) = x_2 \geq 0 \quad 3.8$$

$$g_4(x) = x_3 \geq 0 \quad 3.9$$

Quando a função objetivo e as restrições são funções polinomiais, envolvendo potências, denomina-se tal modelo como Programação Geométrica.

Exemplificando tem-se:

$$\min f(x) = x_1^2 + x_2^2 \quad 3.10$$

$$g_1(x) = -x_1^2 - x_2^2 + 10 \geq 0 \quad 3.11$$

$$g_2(x) = -x_1^2 + x_2^2 - 3 \geq 0 \quad 3.12$$

Quando a função não-linear pode ser separada por trechos lineares, a otimização pode ser realizada pela programação separável. Tal técnica permite transformar um problema de programação não-linear em um problema de programação linear. Este tipo de programação é menos restritiva que a programação quadrática e a geométrica.

Em alguns problemas de otimização é possível utilizar a ferramenta gráfica. Entretanto, na resolução da maioria de modelos não lineares em espaço n-dimensional essa ferramenta é impraticável.

Numa determinada função $f(x)$ pode-se verificar vários pontos de máximo e mínimo, podendo estes serem globais ou locais, como verificado na Figura 3.1.

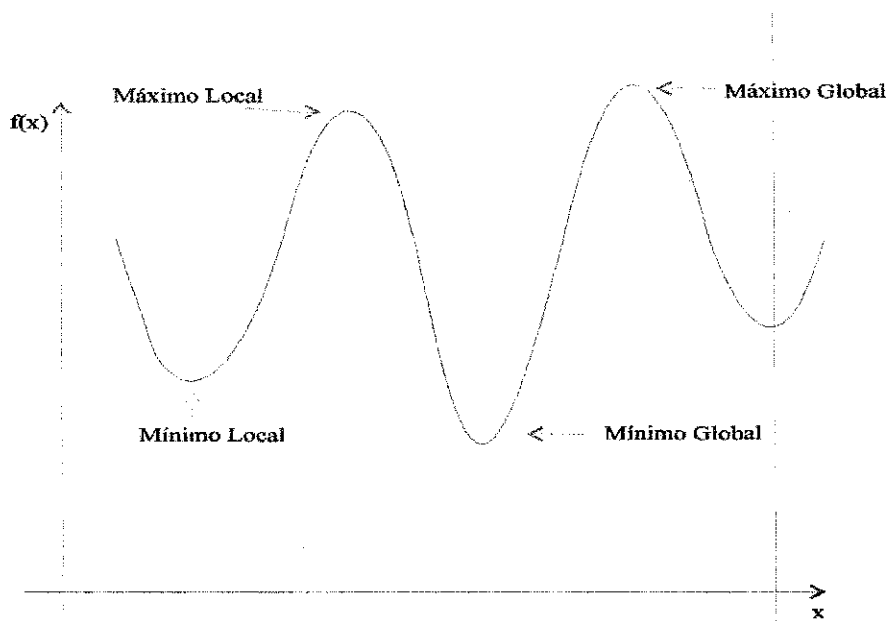


FIGURA 3.1 – Gráfico com valores máximos e mínimos, globais ou locais.

3.3 - FORMULAÇÃO DO MODELO DE PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

3.3.1 – Introdução

No dimensionamento de redes ramificadas é possível encontrar várias soluções que atendam aos requerimentos hidráulicos, mas apenas uma atende o critério de custo mínimo global. Encontrar a melhor solução é a tarefa dos métodos de otimização.

O dimensionamento otimizado de uma rede ramificada garante que a solução encontrada atenda aos critérios econômico e hidráulico, ou seja, encontra os diâmetros para cada trecho da rede, que forneçam o custo mínimo do sistema e que atendam aos requerimentos hidráulicos.

O Método da Programação Não-Linear consiste em otimizar uma função objetivo que representa o custo de uma rede ramificada, respeitando um conjunto de restrições. Uma solução ótima é aquela que dimensiona o sistema com o custo mínimo.

Os diâmetros dos trechos da rede e a altura de bombeamento são as variáveis do dimensionamento. Verifica-se uma relação entre estas duas variáveis, pois a diminuição do custo da rede com a escolha de diâmetros menores nos trechos, resultaria em maiores perdas de carga, elevando a altura de bombeamento

para manter as pressões de projeto. O consumo de energia aumenta proporcionalmente com a altura de bombeamento. Por outro lado, se houvesse uma diminuição nos custos de energia, o custo da rede aumentaria. Portanto, deve-se encontrar o equilíbrio entre ambos os custos para se obter um projeto ótimo (FIGURA 3.2).

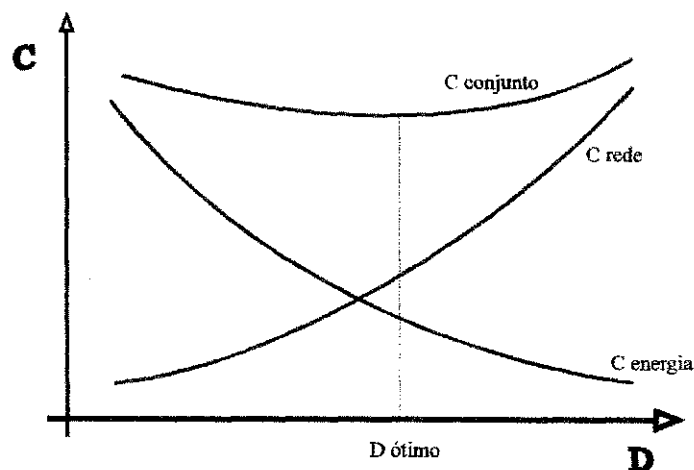


FIGURA 3.2 – Variação dos custos com o diâmetro

A Figura 3.2 mostra o comportamento antagônico da variação dos custos da rede e dos custos de energia com a variação do diâmetro.

O método da programação não-linear desenvolvido neste item parte do princípio que o preço das tubulações pode ser representada por uma equação.

HOLZAPFEL et al. (1990) em seu trabalho sobre dimensionamento de sistemas de abastecimento de água para irrigação considera que os tubos de polietileno e PVC têm o seu custo definido por:

$$CPE_j = C_o(D_j)^{P_o} \quad 3.13$$

Onde: CPE_j – custo do tubo j em unidades monetárias por metro;

D_j – diâmetro do tubo j em metros;

C_o, P_o – coeficientes de regressão;

De forma análoga, ORON & KARMELI (1979) definiram com base em catálogos de preços que o custo das tubulações pode ser expresso pela seguinte função:

$$C = a.D^2 + b.D + c \quad 3.14$$

Onde: C – custo do tubo por unidade de comprimento (umt/m);

D – diâmetro nominal (m);

a, b, c – constantes;

Nos estudos de HOLZAPFEL et al. (1990) e ORON & KARMELI (1979), observa-se que as equações dos custos dos tubos em função dos diâmetros são diferentes. Eles ajustavam os dados da variação de preço com o diâmetro, encontrando as constantes, para equações preestabelecidas, sendo o método adaptado a apenas um tipo de equação.

Durante esta pesquisa foi verificado o comportamento da variação do preço do tubo com o diâmetro, construídos gráficos e ajustados os dados as várias equações com análise estatística. O Quadro 3.1 mostra dados de preços de tubulações de ferro dúctil.

QUADRO 3.1 – Preços dos tubos de ferro dúctil

Diâmetro (mm)	Preço (pesetas/m)
60	1450
80	1839
100	2268
125	2639
150	3184
200	4291
250	5587
300	7005
350	8745
400	10392
450	12264
500	14177
600	18455

FONTE – Funditubo S/A, 1990

Com os dados do Quadro 3.1 elabora-se o Gráfico 3.1.

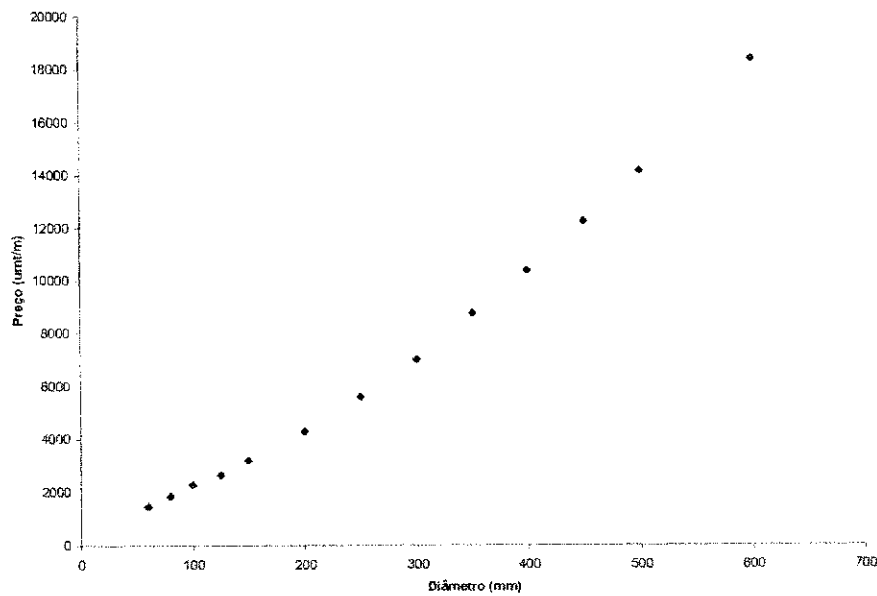


GRÁFICO 3.1 – Variação do preço com o diâmetro

O Gráfico 3.1 fornece uma idéia da equação que melhor se ajusta aos dados. Para certificar-se que o ajuste é adequado e obter os coeficientes da equação,

utiliza-se o programa computacional para ajuste de curvas em dados experimentais, desenvolvido por ZULLO JUNIOR & ARRUDA (1987). A melhor equação obtida foi:

$$C = a.D^3 + b.D^2 + c.D + d \quad 3.15$$

Onde: C – custo do tubo (umt/m);

D – diâmetro do tubo (m);

a, b, c e d – coeficientes da equação.

Os coeficientes da equação para os dados do Quadro 3.1 são:

$$a = -1,076593.10^{-5};$$

$$b = 3,768429.10^{-2};$$

$$c = 10,79945;$$

$$d = 731,6049.$$

A equação 3.15 é válida para diâmetros entre 60 mm e 600 mm. O coeficiente de correlação para este ajuste foi 1,0000. O Gráfico 3.2 mostra os dados reais e ajustados.

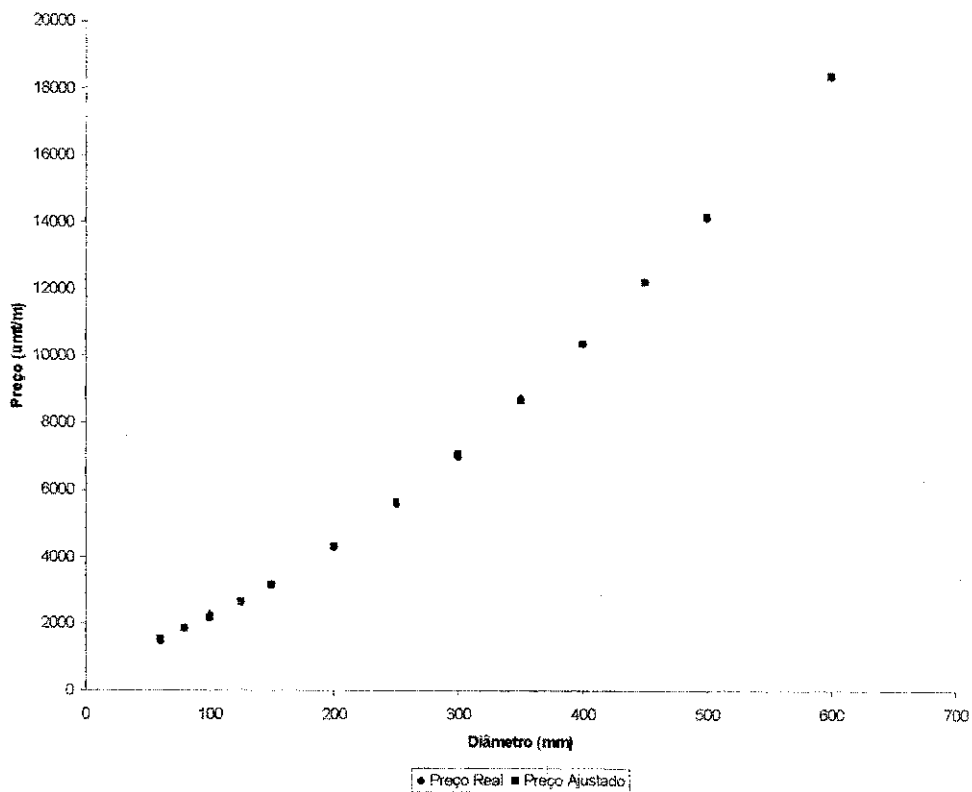


GRÁFICO 3.2 – Ajuste dos dados

Neste exemplo, fica óbvio a viabilidade da aplicação do método da programação não-linear, pois os dados fornecidos pelos fabricantes podem ser representados por equações não-lineares. A diferença entre este método e os descritos anteriormente é que a escolha da equação dependerá do melhor ajuste dos dados, estando diretamente dependente do fabricante e do tipo do tubo. O Anexo A contém alguns gráficos de variação do preço com o diâmetro.

3.3.2 – Função Objetivo

A função objetivo é formulada com base nos custos do sistema, ou seja, o custo do bombeamento e das tubulações em cada trecho da rede. Como trata-se de um problema econômico, o objetivo é a redução dos custos, então tem-se a seguinte expressão:

$$\text{Min}C_t = C_h.H_a + \sum_{ij} L_{ij}.P(D_{ij}) \quad 3.16$$

onde : C_t – Custo da rede (umt);

C_h – Custo de investimento e operação da estação de bombeamento por unidade de altura de impulsão (umt/m);

H_a – Altura manométrica ou de impulsão (m);

L_{ij} – Comprimento da tubulação entre os nós i e j (m);

D_{ij} – Diâmetro da tubulação entre os nós i e j (m);

$P(D_{ij})$ – Preço da tubulação em função do diâmetro (umt/m).

O custo de energia pode ser expresso da seguinte forma (CURI & GOMES, 1996):

$$C_h = \frac{0,736 \cdot \gamma \cdot Q}{75\eta} \cdot N_h \cdot P_e \cdot \alpha \quad 3.17$$

onde : C_h – custo de energia por metro de coluna de água (umt/m);

N_h – número de horas de utilização;

P_e – preço por unidade de energia (umt/Kwh);

α – coeficiente de atualização;

γ – peso específico da água (Kg/m³);

Q – vazão requerida (m³/s);

η – rendimento médio do bombeamento.

O preço da tubulação em função do diâmetro é obtido pelo ajuste dos pares de valores, diâmetros e respectivos preços, a uma equação matemática que os represente. Esta equação pode ser obtida através de um programa computacional de ajuste de equações, tais como o desenvolvido por ZULLO JUNIOR & ARRUDA (1986).

Com apenas a função objetivo não obtêm-se nenhum resultado coerente. Portanto, a formulação de um conjunto de restrições indicará a região de soluções viáveis.

3.3.3 - Restrições

A rede de distribuição de água tem como principal objetivo garantir o abastecimento com vazões suficientes e pressões adequadas. A avaliação correta das demandas (vazões de projeto) é muito importante. A rede de distribuição ramificada está adequadamente definida quando são estabelecidas as pressões e as vazões em cada trecho, obedecendo à condição de continuidade em todos os nós.

Por analogia as leis de Kirchoff em redes elétricas pode-se estabelecer matematicamente a continuidade nos nós da seguinte forma:

$$\sum Q_i = 0 \quad 3.18$$

A soma algébrica das vazões em cada nó da rede (convergência de três ou mais trechos da rede) será nula.

A continuidade nos nós também pode ser expressa da seguinte forma:

$$\sum Q^{entra} = \sum Q^{sai} \quad 3.19$$

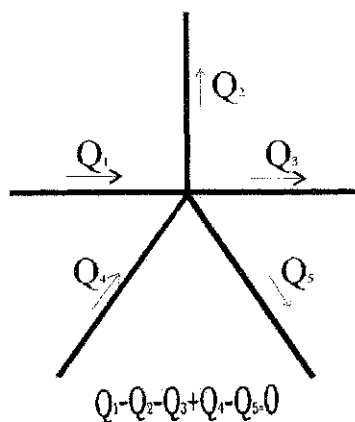


FIGURA 3.3 – Continuidade em um nó

Com a demanda de água definida em cada ponto da rede, parte-se para determinação da vazão transportada em cada trecho. Para isto enumera-se todos os trechos de acordo com o sentido crescente das vazões, de modo que o maior número seja alimentado diretamente pelo reservatório ou estação de bombeamento. Elabora-se uma planilha de cálculo com todos os trechos em ordem crescente. O cálculo da vazão de montante é iniciado das extremidades da rede, somando-se a vazão de jusante. Prossegue-se assim até determinar a maior vazão da rede, que determinará a estação de bombeamento.

Definida a vazão de cada trecho, parte-se para verificar o diâmetro mínimo obtido pelo Método da Velocidade Máxima Admissível. Este procedimento é realizado devido as velocidades altas provocarem maiores perdas de carga e riscos de danos a tubulação, tais como ruídos, vibrações na rede, golpe de ariete, etc. Os limites de velocidade máxima são definidos por critérios baseados na experiência de estudiosos e projetistas.

O Quadro 3.2 fornece os limites de velocidade máxima admissíveis, em função dos diâmetros, recomendados por Bonnet, Clement-Galant e Granados.

QUADRO 3.2 – Limites de velocidades máxima em função dos diâmetros das tubulações

Diâmetro (mm)	$V_{\text{máx}}$ (m/s)*	$V_{\text{máx}}$ (m/s)**	$V_{\text{máx}}$ (m/s)***
≤ 100	0,75	1,80	2,00
125	0,80	1,85	2,00
150	0,80	1,95	2,00
200	0,90	2,05	2,00
250	1,00	2,15	2,00
300	1,10	2,25	2,10
350	1,20	2,30	2,20
400	1,25	2,50	2,30
450	1,30	2,85	2,40
500	1,40	2,85	2,50
600	1,60	3,10	2,60
700	-	3,10	2,70
800	-	3,10	2,80
900	-	3,10	2,90
1000	-	3,10	3,00
> 1000	-	-	$2+D^1$ (m)

*Valores recomendados por Bonnet (1976?)

**Valores recomendados por Clément-Galant (1986)

***Valores recomendados por Granados (1990)

1 – Diâmetro (m).

FONTE – GARCÊS, 1976. p.75; GOMES, 1997. p.155.

No Quadro 3.2 é observado que os limites de velocidade máxima estipulados por Bonnet são menores que os apresentados por Clément-Galant e

Granados, cujos limites não diferem tanto. Este quadro mostra também uma tendência de limites maiores ou menos conservativos em estudos mais atuais.

Para selecionar o diâmetro mínimo, elabora-se uma planilha com valores de diâmetro e velocidade máxima retirados do Quadro 3.2. Através da equação da continuidade calcula-se a vazão máxima para cada diâmetro. O diâmetro mínimo em cada trecho será aquele que não ultrapasse a vazão de projeto quando comparado com a vazão máxima.

O dimensionamento estará correto se o diâmetro encontrado em cada trecho não seja inferior ao diâmetro mínimo. Desta forma, são estabelecidas as restrições de diâmetros mínimos em cada trecho:

$$D_{ij} \geq D_{ij \text{ min}} \quad 3.20$$

Outro requerimento importante no dimensionamento de redes, refere-se ao fornecimento em cada ponto da pressão mínima. Então, a altura de bombeamento menos o desnível do terreno e as perdas devem ser menores que a pressão mínima requerida:

$$H_a + H_c - H_k - \sum J_j \geq P_{\text{min } k} \quad 3.21$$

onde: H_a - altura manométrica de impulsão na cabeceira da rede;

H_c - cota geométrica de cabeceira;

H_k - cota geométrica no nó k;

ΣJ_j - perda de carga na artéria j;

$P_{min k}$ - pressão mínima requerida no nó k.

A perda de carga é definida como a energia dissipada devido ao efeito da viscosidade ou atrito interno, acompanhado do efeito da viscosidade ou atrito interno. As perdas de carga são determinadas através de fórmulas empíricas. A escolha da melhor fórmula depende da precisão desejada, condições hidráulicas, etc. Entre elas destacam-se: a Fórmula Universal da Perda de Carga, Fórmula de Hazen-Williams, Fórmula de Manning e Fórmula de Scimemi (GOMES, 1997).

Por se tratar de fórmulas empíricas sempre haverá um certo grau de incerteza nos resultados, independente da fórmula utilizada.

Deve-se também estabelecer as restrições de não-negatividade, portanto as variáveis do problema devem obedecer a seguinte restrição:

$$H_o, D_i \geq 0 \quad 3.22$$

Os diâmetros encontrados como solução ótima são variáveis contínuas, ou seja, os valores obtidos não são encontrados comercialmente. Segundo WASLKI (1980), do ponto de vista hidráulico, este fato não é um problema significativo, visto que um tubo de diâmetro contínuo pode ser interpretado como um tubo equivalente de duas seções comerciais. Portanto, uma forma de realizar o ajuste é desdobrar o diâmetro teórico em dois diâmetros comerciais: um imediatamente superior e outro imediatamente inferior. Em seguida, para encontrar

os comprimentos dos diâmetros no trecho, de forma que a perda de carga seja equivalente a do diâmetro fictício, calculam-se a perda de carga unitária dos diâmetros comerciais adotados. Então, tem-se as seguintes relações:

$$L_1 = \frac{L(j - j_2)}{j_1 - j_2} \quad 3.23$$

$$L_2 = L - L_1 \quad 3.24$$

- onde :
- L - comprimento total do trecho;
 - L_1 - comprimento correspondente ao diâmetro comercial imediatamente inferior;
 - L_2 - comprimento correspondente ao diâmetro comercial imediatamente superior;
 - j - perda de carga unitária referente ao diâmetro fictício;
 - j_1 - perda de carga unitária referente ao diâmetro imediatamente inferior;
 - j_2 - perda de carga unitária referente ao diâmetro imediatamente superior.

Outra opção é o emprego da programação linear ou não-linear para determinar os comprimentos de cada trecho da rede. O método é formulado supondo que cada trecho possui dois diâmetros previamente definidos, como no caso

anterior, e que cada um dos diâmetros ocupa um comprimento parcial. O objetivo é encontrar os comprimentos para cada trecho que forneçam o custo mínimo da rede de distribuição. O emprego da programação linear torna-se possível pois tanto a perda de carga quanto o custo são funções lineares do comprimento.

3.4 - PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

3.4.1 - Programa Computacional de Ajuste de Dados Experimentais

A representação analítica de dados é de grande utilidade na apresentação e análise de trabalhos científicos. Obter uma equação que represente os dados, nem sempre é uma tarefa fácil e rápida, portanto são implementados, em programas específicos, métodos numéricos para o ajuste de curvas.

O programa computacional para ajuste de curvas empregado neste trabalho foi desenvolvido por ZULLO JR. & ARRUDA (1986). Consiste de um programa computacional destinado ao ajuste, análise estatística, simulação e traçado gráfico, com aplicações em diversas áreas.

As equações disponíveis neste programa são (ZULLO JR. & ARRUDA, 1986): linear, senoidal, exponencial, recíproca, hiperbólica, hiperbólica retangular, monomolecular, logística, logística negativa, gompertz, alométrica linear, alométrica curvilínea, quadrática, cúbica, exponencial quadrática, exponencial cúbica e normal.

3.4.2 - MATLAB

O MATLAB (Matriz Laboratory ou laboratório de matrizes) é um poderoso software de computação numérica, de análise e visualização de dados. Utilizado em diversas aplicações científicas e de engenharia, por usuários das áreas industriais, governamentais e acadêmicas (HANSELMAN & LITTLEFIELD, 1997).

Em atividades acadêmicas pode ser empregado em disciplinas de processamento de dados digitais, teoria de controle, álgebra linear, sinais e sistemas, métodos numéricos, matemática aplicada, etc.

No final da década de 70 foi escrita a primeira versão do MATLAB na Universidade do Novo México e na Universidade de Stanford, sendo destinada a cursos de teoria matricial, álgebra linear e análise numérica (HANSELMAN & LITTLEFIELD, 1997).

Com o MATLAB pode-se resolver problemas numéricos complexos sem efetivamente escrever um programa numa determinada linguagem, como Fortran, Pascal ou C, além de resolver problemas complexos em pouco tempo (SIGMON, 1989).

O MATLAB é uma poderosa ferramenta, que pode executar as mais simples operações matemáticas, como adição, subtração, multiplicação e divisão, como possuir características de uma linguagem de programação avançada, com a

vantagem da facilidade e simplicidade de utilização (HANSELMAN & LITTLEFIELD, 1997).

3.4.2.1 - Arquivos M

O MATLAB permite colocar seus comandos e funções em um arquivo de texto simples, permitindo o software executar os comandos de acordo com as instruções contidas no arquivo M. Estes arquivos são denominados arquivos M porque a sua extensão é terminada em “m” (SIGMON, 1989; HANSELMAN & LITTLEFIELD, 1997).

Existem dois tipos de arquivos M ou M-FILES: arquivo de instrução (Script file) e arquivo de função (function file) (SIGMON, 1989).

Os arquivos M de instrução permitem colocar os comandos MATLAB em arquivos de texto simples. O termo instrução refere-se ao fato de que o MATLAB simplesmente segue as instruções contidas no arquivo (HANSELMAN & LITTLEFIELD, 1997).

O MATLAB apresenta uma estrutura que permite criar funções específicas para determinados problemas em arquivos M de funções.

A busca das instruções e funções é realizada quando digita-se o nome do arquivo M no prompt do MATLAB (HANSELMAN & LITTLEFIELD, 1997).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - GENERALIDADES

Para aplicação do Método da Programação Não-Linear foram escolhidas duas redes: uma rede fictícia e uma rede real. A rede fictícia, composta de cinco trechos, foi selecionada do livro “Engenharia de Irrigação” (GOMES, 1997). A rede ramificada real, composta de quarenta trechos, situa-se no setor 14/1 do perímetro Senador Nilo Coelho, selecionada do Relatório “Desempenho Hidráulico da Irrigação do Setor 14/1 do Perímetro Senador Nilo Coelho: Diagnóstico e Soluções” (GOMES, 1996).

As redes foram dimensionadas utilizando o Método da Programação Não-linear. Para analisar os resultados obtidos, foram selecionados outros métodos. No exemplo da rede fictícia foram selecionados os seguintes métodos: Método da Perda Unitária Constante, Método da Programação Linear e o Método Granados. Entretanto, para a rede real foi utilizado apenas o Método Granados.

4.2 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.2.1 – Aplicação a um exemplo simulado

A rede esquematizada na Figura 4.1, distribui para uma área irrigada por aspersão. A rede será composta por tubos de cimento-amianto (coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams igual a 140). A descarga e a pressão requerida na entrada de cada lateral são iguais, respectivamente, a $17,8 \text{ m}^3/\text{h}$ e $33,5 \text{ mca}$. A perda singular situadas nas tomadas das linhas laterais é de $1,5 \text{ mca}$. A altura manométrica disponível para recalcar a vazão máxima requerida pela rede é igual a 46 mca .

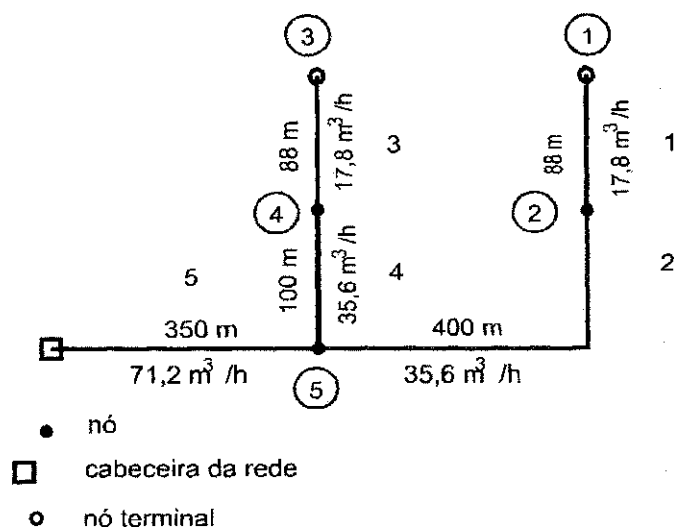


FIGURA 4.1- Esquema da rede de distribuição
FONTE - GOMES, 1997.

QUADRO 4.1 – Dados referentes aos nós da rede de distribuição do exemplo 1.

Nós	Cota do terreno (m)	Pressão mínima requerida (mca)	Cota piezométrica mínima (m)	Vazão mínima requerida (m ³ /h)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	106	35	141	17,8
2	104	35	139	17,8
3	104	35	139	17,8
4	103	35	138	17,8
5	102	-	-	-

No Quadro 4.1, a coluna (3) é obtida pela soma da pressão de projeto (33,5 mca) mais as perdas singulares na entrada das laterais (1,5 mca). A pressão piezométrica mínima em cada nó (coluna 4) é a soma da cota do terreno (coluna 2) e da pressão requerida (coluna 3).

Determina-se a pressão piezométrica de cabeceira pela soma da cota de cabeceira (100 m) mais a altura manométrica disponível (46 m).

QUADRO 4.2 - Dados de comprimento e vazões dos trechos da rede de distribuição do exemplo 1.

Trecho (1)	Comprimento (m) (2)	Vazão (m ³ /h) (3)
1	88	17,8
2	400	35,6
3	88	17,8
4	100	35,6
5	350	71,2

FONTE - GOMES, 1997

O Quadro 4.2 mostra os dados básicos dos trechos da rede de distribuição. Na coluna 3 são obtidas as vazões transportadas em cada trecho. Observa-se que a vazão transportada pelo trecho 2 é a soma das vazões requeridas na entrada de cada lateral nos nós 1 e 2, obedecendo a Equação da Continuidade. Da mesma forma, a vazão no trecho 4 é a soma das vazões na entrada dos nós 3 e 4. Conseqüentemente, a vazão no trecho 5 será a soma das vazões transportadas pelos trechos 2 e 4.

Para dimensionar a rede de forma a otimizar os custos é necessário que sejam conhecidos os valores dos preços em função de cada diâmetro. O Quadro 4.3 fornece os dados de preços de tubos de cimento-amianto, onde se verifica a variação dos preços em relação ao diâmetro.

QUADRO 4.3 - Preços dos tubos de cimento-amianto considerados no exemplo 1

Diâmetro (mm)	Preços (umt/m)
60	644
70	825
80	918
100	1.249
125	1.791
150	2.503
175	3.370

FONTE - GOMES, 1997

Com os dados do Quadro 4.3 é obtido o Gráfico 4.1.

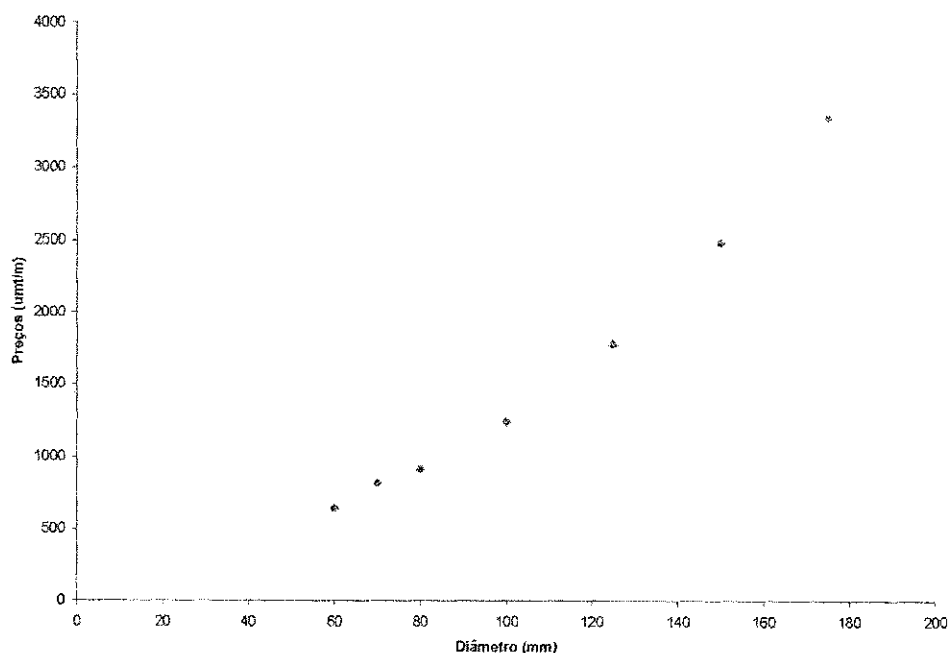


GRÁFICO 4.1 – Variação do preço com o diâmetro (exemplo 1)

Observando o Gráfico 4.1 pode-se ter uma idéia do modelo que melhor se ajusta aos dados. Para certificar-se qual o ajuste é adequado e os coeficientes da equação, utiliza-se o programa computacional para ajuste de curva em dados experimentais, desenvolvido por ZULLO JUNIOR & ARRUDA (1987).

$$C = a.D^2 + b.D + c \quad 4.1$$

Onde: C – custo do tubo;

D – diâmetro do tubo;

a, b e c – coeficientes da equação.

Os coeficientes da equação para os dados do exemplo são:

$$a = 0,1209;$$

$$b = -5,0720;$$

$$c = 546,4474.$$

A equação 4.1 é válida para diâmetros entre 60 mm e 175 mm. O coeficiente de correlação para este ajuste foi 0,9998.

Para a resolução do problema, deve-se partir da solução prévia, a qual foi encontrada utilizando o Método da Velocidade Máxima Admissível, segundo o Quadro 4.4.

QUADRO 4.4 - Limites de velocidade máxima em função dos diâmetros das tubulações

Diâmetro (mm)	$V_{\text{máx}}$ (m/s)*
≤100	2,00
125	2,00
150	2,00
200	2,00
250	2,00
300	2,10
350	2,20
400	2,30
450	2,40
500	2,50
600	2,60
700	2,70
800	2,80
900	2,90
1000	3,00
> 1000	2+D (m)

* velocidades máximas admissíveis segundo Granados

FONTE - GOMES, 1997.

Com os dados do quadro anterior e os diâmetros utilizados neste exemplo elabora-se um quadro que determina a velocidade e a vazão máxima que cada diâmetro pode suportar.

QUADRO 4.5 - Limites de velocidade e vazão máximas para cada diâmetro considerado no exemplo 1.

Diâmetro (mm)	$V_{\text{máx}}$ (m/s)	$Q_{\text{máx}}$ (m ³ /h)
60	2,00	20,35
70	2,00	27,69
80	2,00	36,17
100	2,00	56,52
125	2,00	88,31
150	2,00	127,23
175	2,00	173,18

Como a vazão de cada trecho é conhecida (Quadro 4.2), determina-se o diâmetro mínimo em cada trecho.

QUADRO 4.6 - Diâmetro mínimo em cada trecho da rede (exemplo 1)

Trecho	Diâmetro (mm)
1	60
2	80
3	60
4	80
5	125

Como o objetivo do trabalho é encontrar o menor custo para o dimensionamento da rede de distribuição ramificada, a função objetivo será minimizada.

Função Objetivo:

$$MinCT = C_1.L_1 + C_2.L_2 + C_3.L_3 + C_4.L_4 + C_5.L_5 \quad 4.2$$

Onde: CT – custo total da rede ramificada;

C_j – equação que relaciona o custo em função do diâmetro em cada trecho j ;

L_j – comprimento do trecho j .

A função objetivo é obtida pela soma dos custos de todos os trechos.

Sujeita às restrições:

- O diâmetro encontrado por trecho não pode ser inferior ao diâmetro mínimo:

$$D_1 \geq 60 \text{ mm}; \quad 4.3$$

$$D_2 \geq 80 \text{ mm}; \quad 4.4$$

$$D_3 \geq 60 \text{ mm}; \quad 4.5$$

$$D_4 \geq 80 \text{ mm}; \quad 4.6$$

$$D_5 \geq 125 \text{ mm}. \quad 4.7$$

- Restrições que garantem a pressão mínima requerida nos pontos de tomada de água:

A pressão no terminal 1 corresponde a cota piezométrica na cabeceira da rede menos o somatório das perdas de carga na artéria, relativo ao percurso desde a cabeceira até o terminal 1.

A cota piezométrica de cabeceira (146 m) é obtida pela soma da cota do terreno (100 m) e da pressão disponível para recalcar a vazão máxima requerida pela rede (46 mca).

O somatório das perdas de carga na artéria do terminal 1 corresponde as perdas nos trechos 5, 2 e 1.

A piezométrica mínima do terminal 1 é dada pela soma da cota do terreno e da pressão requerida. Então:

$$\text{Terminal 1: } 146 - (J_5 + J_2 + J_1) \geq 141 \quad 4.8$$

Considerando a equação de Hazen-Williams para perda de carga tem-se:

$$J_j = 10,66 (1/D_j^{4,87}) \cdot (Q_j/C)^{1,852} \cdot L_j \quad j=1,2,5 \quad 4.9$$

Onde: J_j – perda de carga;

D_j – diâmetro;

Q_j – vazão transportada ;

L_j – comprimento do trecho.

j – trecho considerado.

Da mesma forma, elabora-se para o terminal 3:

$$\text{Terminal 3: } 146 - (J_5 + J_4 + J_3) \geq 139$$

4.10

Neste exemplo observa-se que basta elaborar restrições para os nós mais desfavoráveis, terminais 1 e 3, pois a cota piezométrica mínima requerida é superior aos nós 2 e 4 e o terreno está em aclive em relação a cabeceira da rede.

Concluindo, o modelo pode ser representado por:

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \text{MinCT} = & 0,1209.(D_1^2.L_1 + D_2^2.L_2 + D_3^2.L_3 + D_4^2.L_4 + D_5^2.L_5) \\ & - 5,0720.(D_1.L_1 + D_2.L_2 + D_3.L_3 + D_4.L_4 + D_5.L_5) \end{aligned}$$

Sujeito às restrições:

$$D_1 \geq 60 \text{ mm}; D_2 \geq 80 \text{ mm}; D_3 \geq 60 \text{ mm}; D_4 \geq 80 \text{ mm}; D_5 \geq 125 \text{ mm.}$$

$$\text{Terminal 1: } 146 - (J_5 + J_2 + J_1) \geq 141$$

$$\text{Terminal 3: } 146 - (J_5 + J_4 + J_3) \geq 139$$

Desenvolvida a formulação do modelo, parte-se para sua solução através de um pacote computacional de uso geral, tal como o MATLAB. No Anexo B encontram-se os arquivos M do MATLAB elaborados para este exemplo.

Os resultados obtidos após a execução do programa estão mostrados na coluna 2 do Quadro 4.7. Como o programa encontra os diâmetros não comerciais, deve-se desdobrar o diâmetro encontrado em dois diâmetros comerciais equivalentes, um imediatamente superior e outro inferior (coluna 3).

QUADRO 4.7 - Resultados obtidos pelo Método da Programação Não-Linear (exemplo 1)

Trechos (1)	Diâmetros (mm) (2)	Diâmetros comerciais (mm) (3)
1	105,1327	100 125
2	125,9977	125 150
3	74,8500	70 80
4	89,4445	80 100
5	152,9797	150 175

Para determina-se o comprimento de cada trecho pela perda de carga equivalente, tem-se para o trecho 1:

$$D = 105,1327 \text{ mm}; \quad Q = 17,8 \text{ m}^3/\text{h}; \quad C = 140; \quad L = 88 \text{ m}$$

$$D_1 = 100 \text{ mm}; \quad Q = 17,8 \text{ m}^3/\text{h}; \quad C = 140; \quad L_1 = ?$$

$$D_2 = 125 \text{ mm}; \quad Q = 17,8 \text{ m}^3/\text{h}; \quad C = 140; \quad L_2 = ?$$

Encontra-se a perda de carga equivalente para os diâmetros D , D_1 e D_2 , pela fórmula de Hazen-Williams:

$$j = 10,66 \cdot \frac{1}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad 4.11$$

Substituindo os valores encontra-se:

$$j = 0,0035218 \text{ m/m}$$

$$j_1 = 0,0044994 \text{ m/m}$$

$$j_2 = 0,0015159 \text{ m/m}$$

As perdas de cargas totais no trecho obedecem a seguinte equação,

$$j \cdot L = j_1 \cdot L_1 + j_2 \cdot L_2 \quad 4.12$$

Mas a soma dos comprimentos do trecho deve ser igual ao comprimento total:

$$L = L_1 + L_2 \quad 4.13$$

Substituindo a equação 4.13 em 4.12, tem-se:

$$j \cdot L = j_1 \cdot L_1 + j_2 \cdot (L - L_1) \quad 4.14$$

Obtendo-se:

$$L_1 = \frac{L(j - j_2)}{j_1 - j_2} \quad 4.15$$

Substituindo os valores encontram-se,

$$L_1 = 59 \text{ m,}$$

$$L_2 = 29 \text{ m.}$$

Repete-se este procedimento para os trechos 2, 3, 4 e 5. O Quadro 4.8 mostra os resultados finais deste processo. Este procedimento pode ser incorporado na otimização.

QUADRO 4.8 – Resultados obtidos pelo Método da Programação Não-Linear com comprimentos obtidos pelo procedimento da perda de carga equivalente (exemplo 1)

Trechos	Diâmetros (mm)	Comprimentos (m)	Piez. Disponível (mca)
1	100	59	141,05
	125	29	
2	125	370	141,35
	150	30	
3	70	35	139,08
	80	53	
4	80	36	140,67
	100	64	
5	150	284	143,44
	175	66	

Com os dados do Quadro 4.8, calcula-se o custo total da rede:

$$C_t = 59*1.249 + 29*1.791 + 370*1.791 + 30*2.503 + 35*825 + 53*918 \quad 4.16$$

$$+ 36*918 + 64*1.249 + 284*2.503 + 66*3.370$$

$$C_t = 1.987.175 \text{ unidades monetárias}$$

Outro procedimento de otimização trata-se de agregar o conceito do método da programação linear para encontrar os comprimentos de cada trecho.

A função objetivo será formulada em função dos comprimentos dos trechos a serem determinados. Para este exemplo o modelo pode ser representado da seguinte forma:

Função Objetivo

$$\begin{aligned} \text{Min Ct} = & (1.249 L_{1,100} + 1.791 L_{1,125} + 1.791 L_{2,125} + & 4.17 \\ & + 2.503 L_{2,150} + 825 L_{3,70} + 918 L_{3,80} + \\ & 918 L_{4,80} + 1.249 L_{4,100} + 2.503 L_{5,150} + \\ & 3.370 L_{5,175}) \end{aligned}$$

Restrições:

$$L_{ij} \geq 0 \quad 4.18$$

$$L_{1,100} + L_{1,125} = 88 \quad 4.19$$

$$L_{2,125} + L_{2,150} = 400 \quad 4.20$$

$$L_{3,70} + L_{3,80} = 88 \quad 4.21$$

$$L_{4,80} + L_{4,100} = 100 \quad 4.22$$

$$L_{5,150} + L_{5,175} = 350 \quad 4.23$$

Terminal 1:

$$146 - (J5 + J2 + J1) \geq 141 \quad 4.24$$

Terminal 3:

$$146 - (J5 + J4 + J3) \geq 139$$

4.25

O Quadro 4.9 mostra os resultados obtidos pelo Método da Programação Não-Linear, com o procedimento otimizado para determinar os diâmetros e comprimentos

QUADRO 4.9 – Resultados do Método da Programação Não-Linear com o procedimento da programação linear (exemplo 1).

Trechos	Diâmetros (mm)	Comprimentos (m)	Piez. Disponível (mca)
1	125	88	141,30
2	125	400	141,43
3	80	88	139,08
4	80	47	140,24
	100	53	
5	150	303	143,62
	175	47	

Com os dados do Quadro 4.9, calcula-se o custo total da rede:

$$Ct = 88*1.791 + 400*1791 + 88*918 + 47*918 + 53*1.249 + 303*2.503 + 47*3.370 + 4.26$$

$$Ct = 1.980.934 \text{ unidades monetárias}$$

Considerando os custos totais obtidos pelos dois procedimentos, verifica-se uma diferença de 0,315 %, podendo ser considerado desprezível. Obviamente o segundo procedimento sempre apresentará melhores resultados.

Para comparar os resultados obtidos com outros métodos, foram escolhidos o Método da Perda de Carga Unitária, Método Granados e Método da Programação Linear. O Método da Velocidade Máxima Admissível não foi considerado pelo fato que a pressão disponível na cota de cabeceira é fixa. Os resultados obtidos pelos métodos estão mostrados nos Quadros 4.10, 4.11 e 4.12.

QUADRO 4.10 – Resultados obtidos aplicando-se o Método da Perda de Carga Unitária Constante (exemplo 1).

Trechos	Diâmetros (mm)	Comprimento (m)	Piezom. disponível (mca)
1	80	88	141,04
2	150	400	142,22
3	60	7	139,02
	70	81	
4	100	100	141,49
5	150	350	143,13

Considerando o Quadro 4.10, o custo total da rede pelo Método da Perda de Carga Unitária Constante é de 2.154.267 unidades monetárias.

QUADRO 4.11 - Resultados obtidos aplicando-se o Método da Programação Linear (exemplo 1).

Trechos	Diâmetros (mm)	Comprimento (m)	Piezom. disponível (mca)
1	125	88	141,30
2	125	400	141,43
3	80	88	139,08
4	80	47	140,24
	100	53	
5	150	303	143,62
	175	47	

Considerando o Quadro 4.11, o custo total da rede pelo Método da Programação Linear é de 1.980.934 unidades monetárias.

QUADRO 4.12 - Resultados obtidos aplicando-se o Método Granados (exemplo 1)

Trechos	Diâmetros (mm)	Comprimento (m)	Piezom. disponível (mca)
1	125	88	141,04
2	125	400	141,17
3	80	88	139,08
4	80	47	140,24
	100	53	
5	150	302	143,36
	175	48	

Considerando o dados do Quadro 4.12, o custo total da rede pelo Método Granados é de 1.981.801 unidades monetárias.

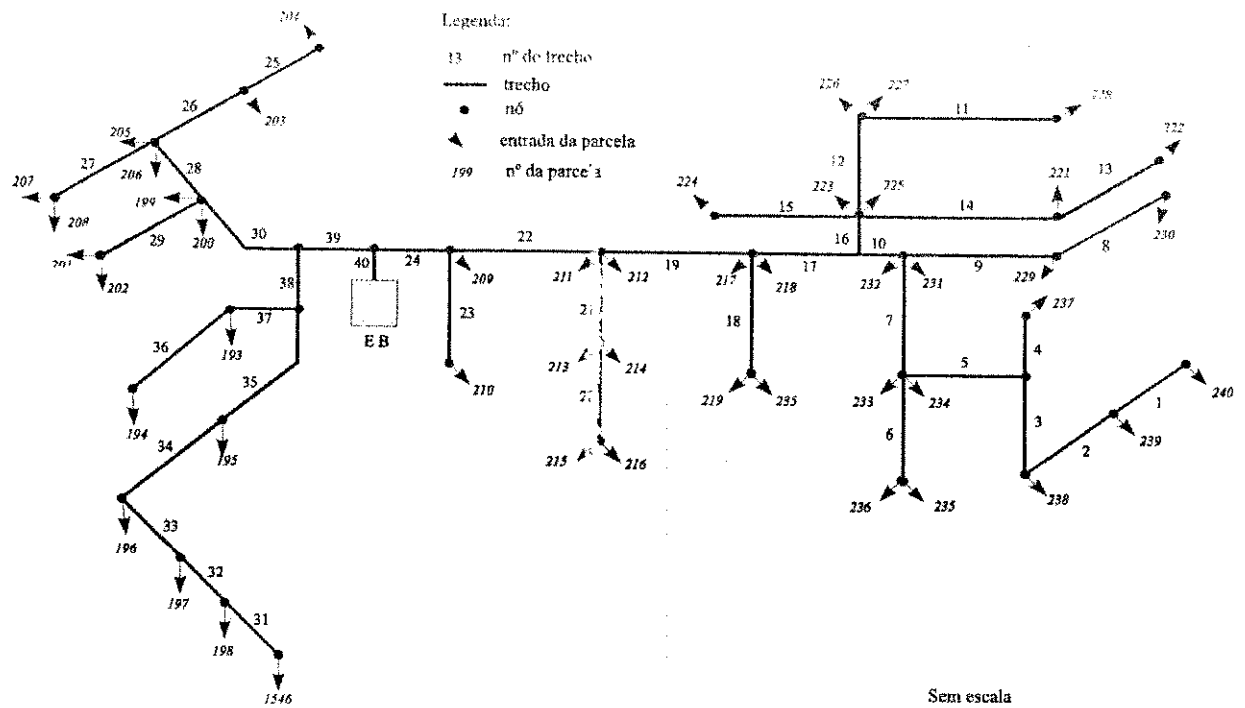
Comparando os resultados obtidos pelo Método da Programação Não-Linear com os Métodos Granados e da Programação Linear, obtêm-se ao primeiro uma diferença no comprimento dos tubos nos trechos 4 e 5 que resultam numa diferença desprezível de 0,04%, enquanto que ao segundo observa-se os mesmos resultados. Quando a comparação é feita ao método da perda de carga unitária constante, observa-se que os resultados diferem bastante. Nota-se que o emprego de métodos de otimização gera uma economia de aproximadamente 9%.

4.2.2 – Aplicação a um exemplo prático

A rede ramificada selecionada está situada no setor 14/1 do Perímetro Irrigado do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho (Figura 4.2). Este perímetro foi projetado pelo consórcio entre as empresas de consultoria ENCO (brasileira) e TAJAL (israelense), cuja operação parcial iniciou-se em 1984.

O perímetro de irrigação possui 31 setores pressurizados, projetados para fornecer água com pressão adequada aos seus lotes irrigados, de acordo com as condições de operação (vazão, altura manométrica, tempo de funcionamento, etc.). Os projetos hidráulicos-agronômicos dos seus lotes fornecem as condições de operação de cada setor do perímetro.

A irrigação de culturas permanentes chega a quase 70% e o restante é dedicado a culturas de ciclo curto, ou seja, culturas temporárias.



Traçado da rede coletiva do setor 14/1 do Perímetro Nilo Coelho

FIGURA 4.2 - Rede Coletiva do Setor 14/1 do Perímetro Nilo Coelho

FONTE – GOMES, 1996

No quadro 4.13 estão os dados básicos da rede coletiva de distribuição necessários para o dimensionamento da rede.

QUADRO 4.13 - Dados referentes à rede coletiva de distribuição do Setor 14/1 do perímetro Senador Nilo Coelho

Trecho	Comprimento (m)	Vazão do trecho (m ³ /h)	Pressão requerida (m)	Cota do terreno (m)
1	250	58,8	50	386,4
2	310	117,6	50	387,9
3	160	176,4	50	389,5
4	70	58,8	50	391,0
5	220	235,2	50	390,6
6	310	161,7	50	389,3
7	300	514,5	50	391,9
8	320	58,8	50	389,5
9	220	117,6	50	391,5
10	210	599,8	50	393,6
11	320	88,2	50	391,3
12	220	235,2	50	393,0
13	320	58,8	50	389,5
14	310	117,6	50	391,4
15	300	58,8	50	393,9
16	50	529,2	50	393,3
17	230	1.023,1	50	393,3
18	310	117,6	50	392,2
19	450	1.232,9	50	393,7
20	310	117,6	50	393,6
21	300	245,0	50	393,5
22	530	1.522,9	50	393,4
23	230	58,8	50	395,1
24	450	1.617,0	50	396,2
25	150	58,8	50	403,4
26	350	122,5	50	403,3
27	320	142,1	50	401,3
28	450	382,2	50	403,2
29	310	142,1	50	400,2
30	310	521,4	50	402,4
31	300	78,4	50	392,1
32	280	186,2	50	392,1
33	310	245,0	50	394,9
34	210	313,6	50	397,7
35	350	382,2	50	399,0
36	310	73,5	50	399,9
37	150	132,3	50	400,5
38	70	514,5	50	401,3
39	110	911,4	50	402,4
40	10	2528,4	50	401,2

O preço dos tubos em relação aos diâmetros admitidos na solução deste problema encontram-se no Quadro 4.14.

QUADRO 4.14 - Preço unitário dos tubos de fibrocimento (exemplo 2)

Diâmetros (mm)	Preços (umt/m)
100	624
125	858
150	1053
200	1590
250	2129
300	2743
350	3530
400	4636
450	6088
500	7433
600	9000
700	10500
800	11800

FONTE: GOMES, 1997

Com os dados do Quadro 4.14 elabora-se o Gráfico 4.2.

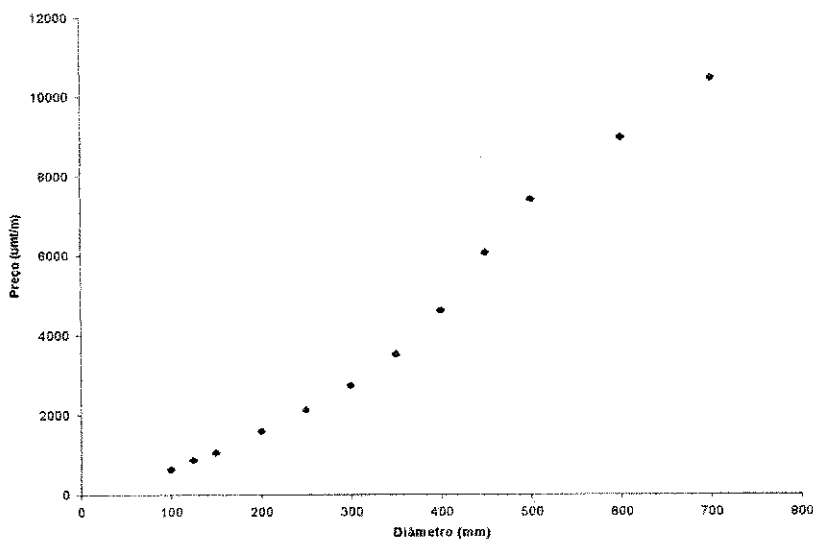


GRÁFICO 4.2 – Variação do preço com o diâmetro (Exemplo 2)

Da mesma forma que o exemplo anterior, com o Gráfico 4.2 pode-se ter uma idéia da equação que melhor se ajusta aos dados. Para certificar qual se o ajuste é adequado e os coeficientes da equação, utiliza-se o programa computacional para ajuste de equações em dados experimentais, desenvolvido por ZULLO JUNIOR & ARRUDA (1987).

$$C = a.D^2 + b.D + c \quad 4.27$$

Onde: C – custo do tubo;

D – diâmetro do tubo;

a , b e c – coeficientes da equação.

Os coeficientes da equação para os dados do exemplo são:

$$a = 3,89366.10^{-3};$$

$$b = 13,74085;$$

$$c = -1176,155.$$

A equação 4.27 é válida para diâmetros entre 100 mm e 800 mm. O coeficiente de correlação para este ajuste foi 0,9934.

Para o cálculo da energia de bombeamento foram considerados os seguintes dados:

- horas anuais de bombeamento: 3.600;
- custo do Kwt (umt): 0,310;

- coeficiente de atualização da energia: 30,6;
- cota de captação bombeamento (m): 430,2;
- rendimento do conjunto motor bomba (%): 80;
- vazão total (m³/h): 2528,4

Substituindo os dados acima na equação 3.17, tem-se o custo de energia por metro de coluna de água (CURI & GOMES, 1996):

$$C_h = \frac{0,736 \cdot \gamma \cdot Q}{75 \eta} \cdot N_h \cdot P_e \cdot \alpha$$

$$Ch = 294.208,6694 \text{ unidades monetárias/m}$$

QUADRO 4.15 - Limites de velocidade e vazão máximas para cada diâmetro considerado no exemplo 2

Diâmetro (mm)	V _{máx} (m/s)*	Q _{máx} (m ³ /h)
100	2,00	56,55
125	2,00	88,36
150	2,00	127,19
200	2,00	226,19
250	2,00	353,43
300	2,10	534,38
350	2,20	761,99
400	2,30	1040,50
450	2,40	1374,13
500	2,50	1767,15
600	2,60	2646,48
700	2,70	3740,69
800	2,80	5066,76

* Velocidade máxima admissível segundo Granados.

**QUADRO 4.16 - Diâmetro mínimo em cada trecho da rede
(exemplo 2)**

Trecho	Comprimento (m)	Vazão do trecho (m ³ /h)	Diâmetro mínimo (mm)
1	250	58,8	125
2	310	117,6	150
3	160	176,4	200
4	70	58,8	125
5	220	235,2	250
6	310	161,7	200
7	300	514,5	300
8	320	58,8	125
9	220	117,6	150
10	210	599,8	350
11	320	88,2	125
12	220	235,2	250
13	320	58,8	125
14	310	117,6	150
15	300	58,8	125
16	50	529,2	300
17	230	1.023,1	400
18	310	117,6	150
19	450	1.232,9	450
20	310	117,6	150
21	300	245,0	250
22	530	1.522,9	500
23	230	58,8	125
24	450	1.617,0	500
25	150	58,8	125
26	350	122,5	150
27	320	142,1	200
28	450	382,2	300
29	310	142,1	200
30	310	521,4	300
31	300	78,4	125
32	280	186,2	200
33	310	245,0	250
34	210	313,6	250
35	350	382,2	300
36	310	73,5	125
37	150	132,3	200
38	70	514,5	300
39	110	911,4	400
40	10	2528,4	600

O procedimento é idêntico ao exemplo anterior, difere apenas no acréscimo da variável altura de bombeamento. A função objetivo para este exemplo está localizada no Anexo B, página 136, e as equações de restrições, da página 136 a 139.

Através da programação não-linear são obtidos os resultados mostrados no Quadro 4.17.

QUADRO 4.17 - Resultados obtidos pelo Método da Programação Não-Linear (exemplo 2)

Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Pressão disponível (mca)
1	125	9	50,0
	150	241	
2	150	50	50,0
	200	260	
3	200	160	50,8
4	125	70	50,0
5	250	220	51,4
6	200	310	51,2
7	300	300	51,4
8	125	89	50,0
	150	231	
9	150	220	50,5
10	350	210	53,0
11	125	53	50,0
	150	267	
12	250	220	53,1
13	125	9	50,0
	150	311	
14	150	288	50,0
	200	22	
15	125	223	50,0
	150	77	
16	300	50	54,1
17	400	230	54,7
18	150	310	51,6
19	450	450	56,5
20	150	310	51,6

Continuação

Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Pressão disponível (mca)
21	250	300	58,1
22	500	530	60,2
23	125	230	58,9
24	500	450	61,0
25	200	150	50,0
26	250	350	50,3
27	200	320	50,7
28	300	450	51,1
29	200	310	54,6
30	300	172	54,7
	350	138	
31	125	298	50,0
	150	2	
32	200	280	57,1
33	250	310	57,6
34	250	210	56,8
35	300	350	57,8
36	125	310	51,6
37	200	150	57,5
38	300	70	57,6
39	400	110	57,3
40	600	10	59,4

A cota de piezométrica de cabeceira ótima, obtida com a aplicação do software MATLAB, foi de 460,62 m.

O custo total da rede, obtido pelos dados do Quadro 4.17 e pela soma do custo de energia, é de 44.597.535,90 unidades monetárias.

QUADRO 4.18 - Resultados obtidos pelo método Granados (exemplo 2)

Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Pressão disponível (mca)
1	125	8	50,00
	150	242	
2	150	12	50,00
	200	298	
3	200	160	50,17
4	150	70	50,00
5	250	220	50,61
6	200	310	50,61
7	300	281	50,87
	350	19	
8	125	20	50,00
	150	300	
9	150	211	50,00
	200	9	
10	350	210	52,32
11	125	13	50,00
	150	307	
12	250	220	52,41
13	125	8	50,00
	150	312	
14	150	243	50,00
	200	67	
15	125	141	50,00
	150	159	
16	300	50	53,48
17	400	230	54,05
18	150	310	50,93
19	450	450	55,85
20	150	310	50,64
21	250	300	57,47
22	500	530	59,57
23	125	230	58,23
24	500	450	60,34
25	200	150	50,00
26	200	100	50,31
	250	250	
27	200	320	51,01

Continuação

Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Pressão disponível (mca)
28	300	450	51,42
29	200	310	55,00
30	350	310	55,05
31	125	246	50,00
	150	54	
32	200	280	56,38
33	250	310	56,92
34	250	210	56,20
35	300	350	57,12
36	125	310	50,92
37	200	150	56,87
38	300	70	57,02
39	400	110	56,68
40	700	10	58,73

A cota de piezométrica de cabeceira ótima, obtida com a aplicação do programa REDES, foi de 460,68 m.

Com os dados do quadro 4.18 e o custo de energia foi obtido o custo total da rede de 44.598.600 unidades monetárias.

Observa-se neste exemplo que a diferença entre os custos totais do Método da Programação Não-Linear e GRANADOS são mínimas, em torno de 0,002388 %, comprovando a eficiência do Método da Programação Não-Linear.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os métodos convencionais dimensionam a rede de distribuição de água ramificadas não considerando o fator econômico, ou melhor a minimização dos custos do sistema. Para considerar o custo mínimo do sistema é necessário o emprego de técnicas de otimização.

Os métodos de otimização dimensionam a rede com o menor custo e em tempo reduzido, além da flexibilidade de alterar e acrescentar qualquer variável de dimensionamento sem a necessidade de refazer todo o problema.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, mostram que os métodos otimizados apresentam melhores resultados, ou seja, o custo é consideravelmente menor em relação aos métodos convencionais.

O Método da Programação Não-Linear desenvolvido nesta pesquisa apresenta as seguintes vantagens:

- não há necessidade do desenvolvimento de um software específico para o seu emprego, basta utilizar um pacote computacional que resolva problemas de programação não-linear;
- é uma técnica de fácil utilização e compreensão;
- obtêm-se menor custo do sistema em relação aos métodos convencionais;
- didático, pois a medida que é desenvolvido, possibilita a compreensão clara de todo o sistema.

As principais vantagens do Método da Programação Não-Linear em relação ao Método da Programação Linear são:

- requer menor tempo computacional na resolução do dimensionamento;
- redução considerável do número de variáveis de decisão e equações de restrições empregadas no modelo;
- os diâmetros não são pré-fixados;
- considera a natureza não linear das funções representativas do dimensionamento;

A aplicação do método foi apenas para redes ramificadas, podendo ser facilmente empregado em redes malhadas. Na literatura existem duas técnicas básicas para a aplicação dos métodos da Programação Linear e Gradientes em redes malhadas, que podem ser expandidos para o Método da Programação Não-Linear. A

primeira técnica chama-se Gradiente da Programação Linear, baseia-se na incorporação da solução da vazão no processo de otimização (ALPEROVITS & SHAMIR, 1977). A segunda técnica consiste em transformar a rede malhada em uma rede ramificada, arbitrando inicialmente as vazões e corrigindo sucessivamente por Hardy-Cross até que o sistema esteja equilibrado (LEAL, 1995).

Outra abordagem que não foi considerada nesta pesquisa, trata-se da consideração do preço dos tubos em relação as classes, podendo ser incorporado em um novo estudo utilizando o Método da Programação Não-Linear.

CAPÍTULO VI

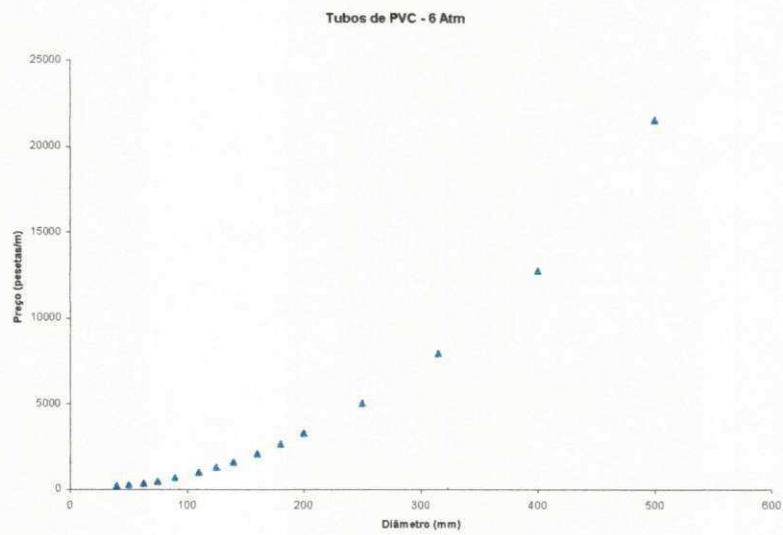
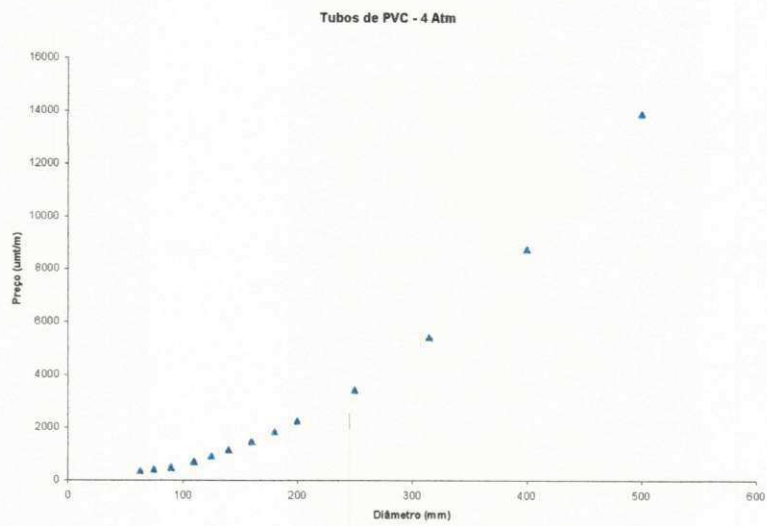
ANEXOS

ANEXO A

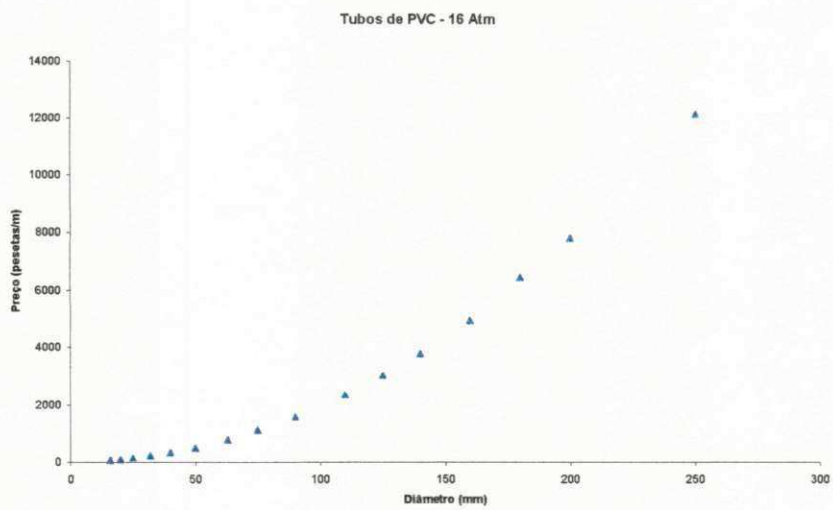
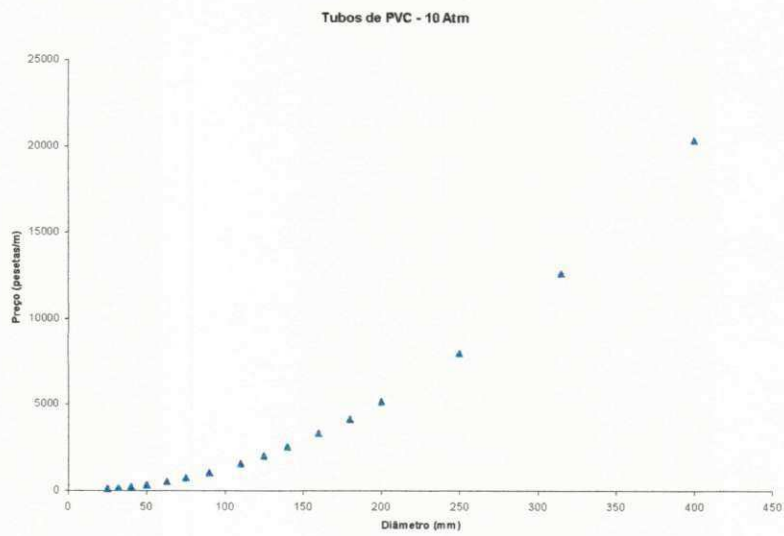
Este ANEXO apresenta as curvas do preço do tubo em função do diâmetro, para diferentes tipos de materiais e classes. Os dados foram retirados de listas de preços fornecidas pelos fabricantes.

Observa-se nestas curvas que é perfeitamente possível estabelecer um ajuste dos dados a uma determinada equação, a partir de qualquer programa de ajuste de curvas.

- Tubos de PVC:

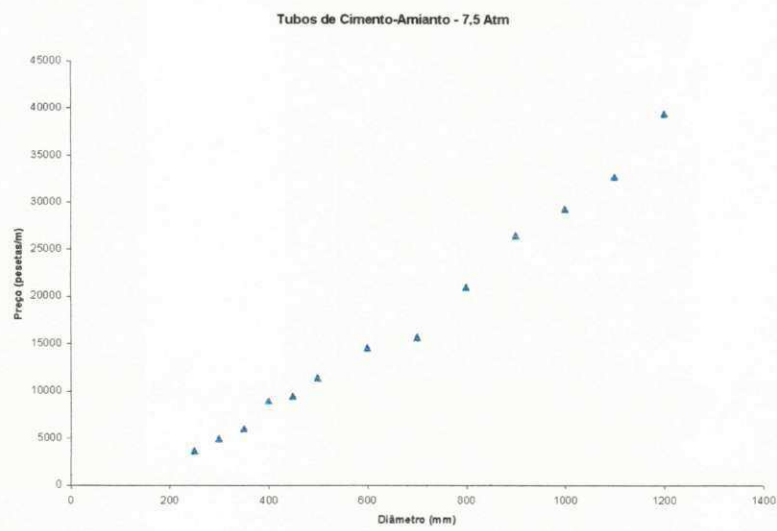
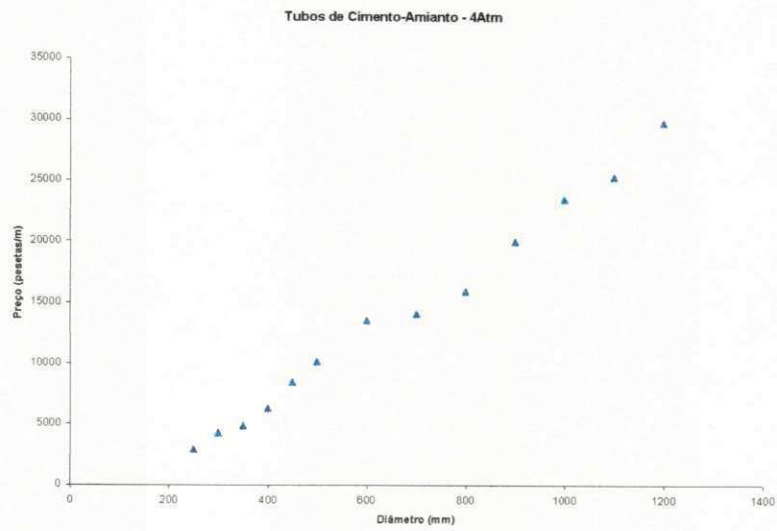


Fonte: URAPLAST, 1990

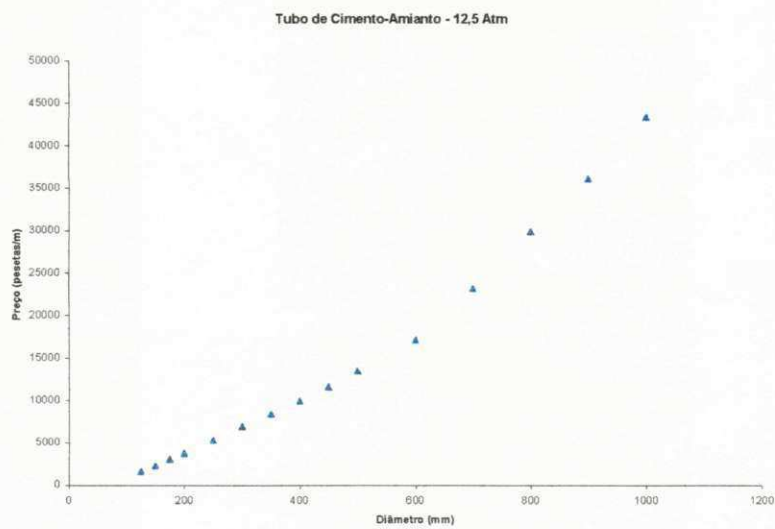
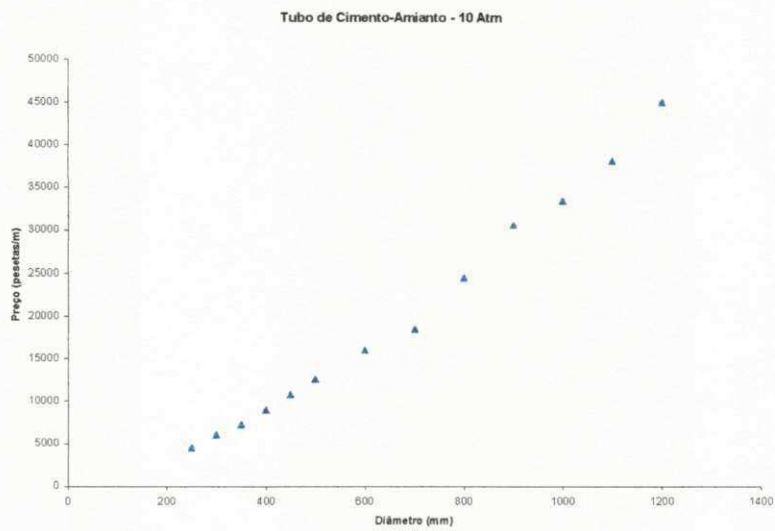


Fonte: URAPLAST, 1990

- Tubos de Cimento-Amianto – Norma UNE-ISO:

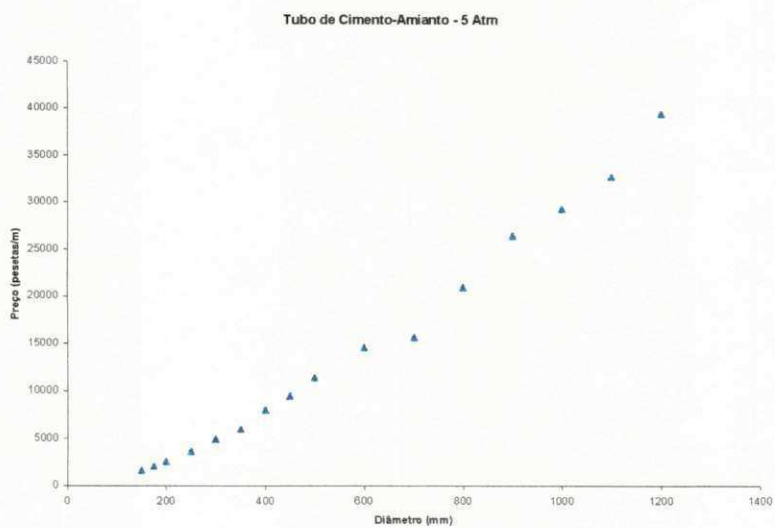
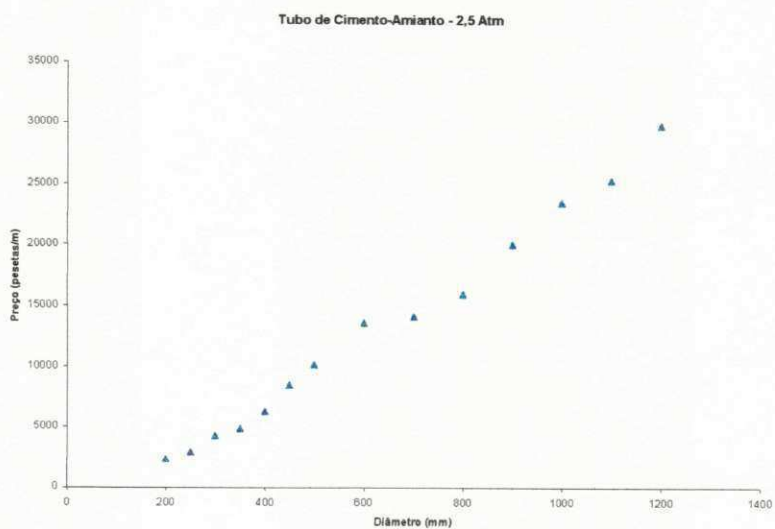


Fonte: URALITA, 1990

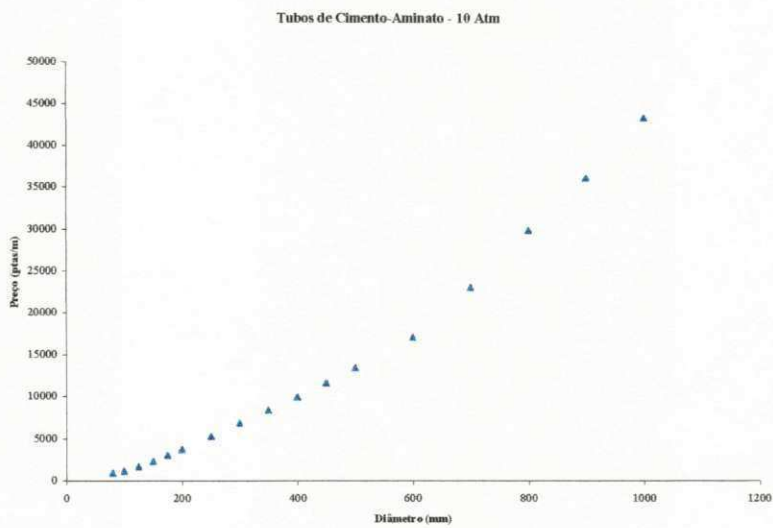
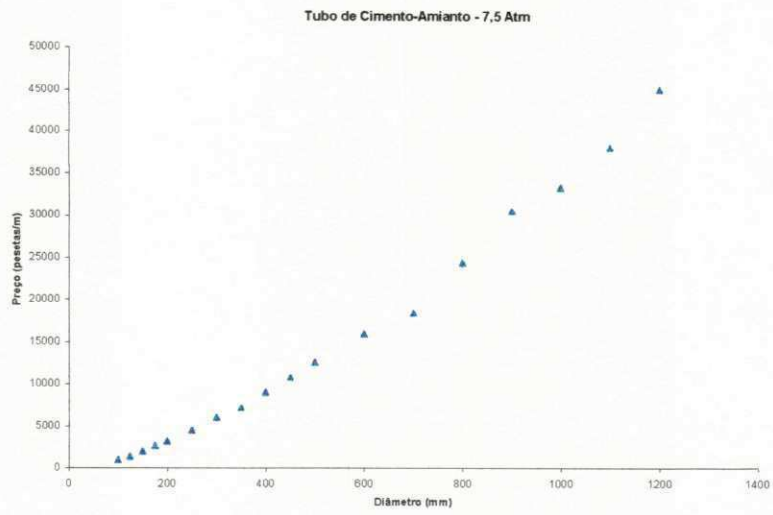


Fonte: URALITA, 1990

- Tubos de Cimento-Amianto – Norma Norma MOPU:

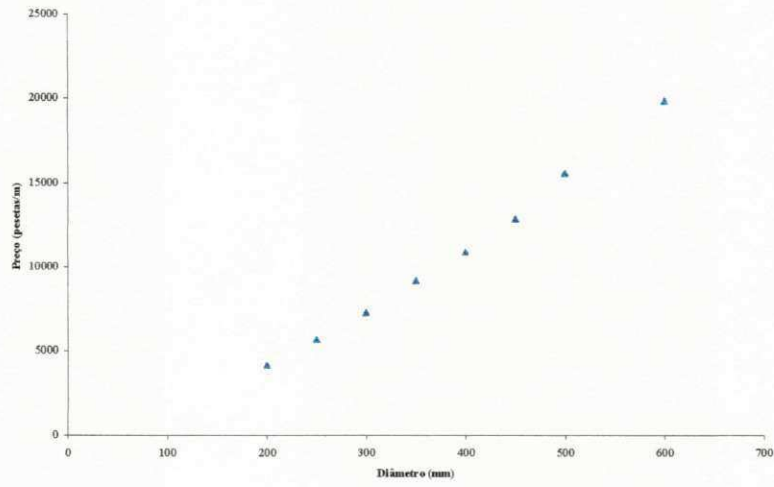


Fonte: URALITA, 1990

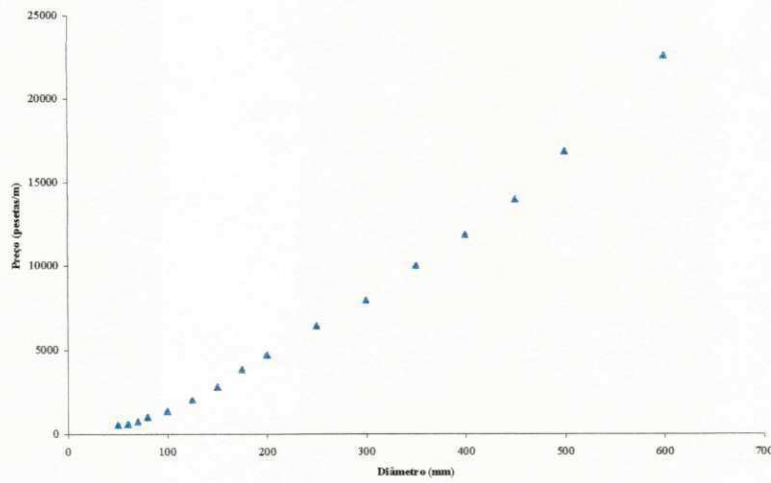


Fonte: URALITA, 1990

Tubo de Cimento-Aminato - 12,5 Atm

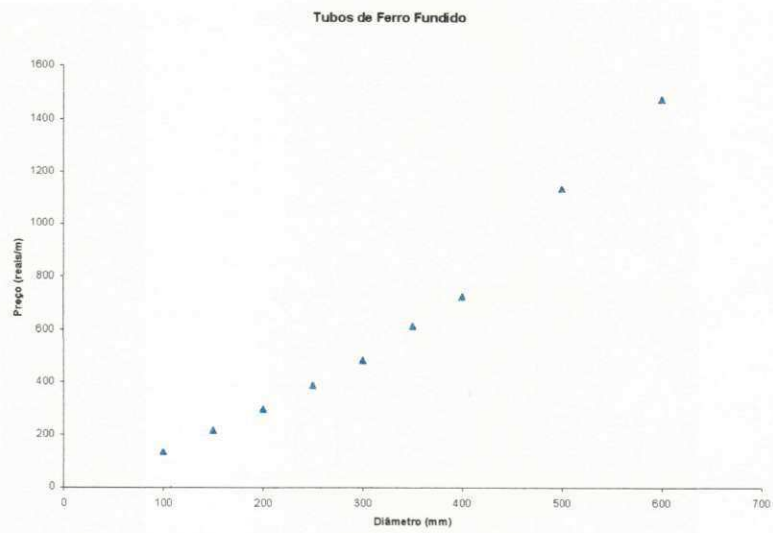


Tubo de Cimento-Amianto - 15 Atm

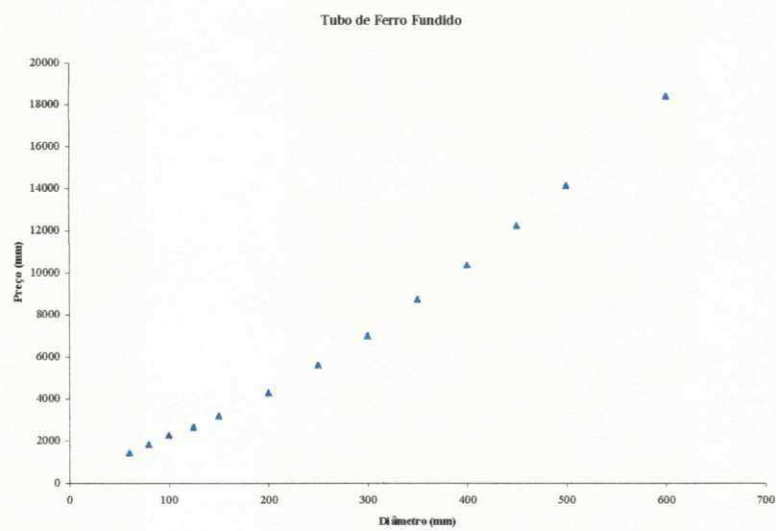


Fonte: URALITA, 1990

- Tubos de Ferro Fundido:

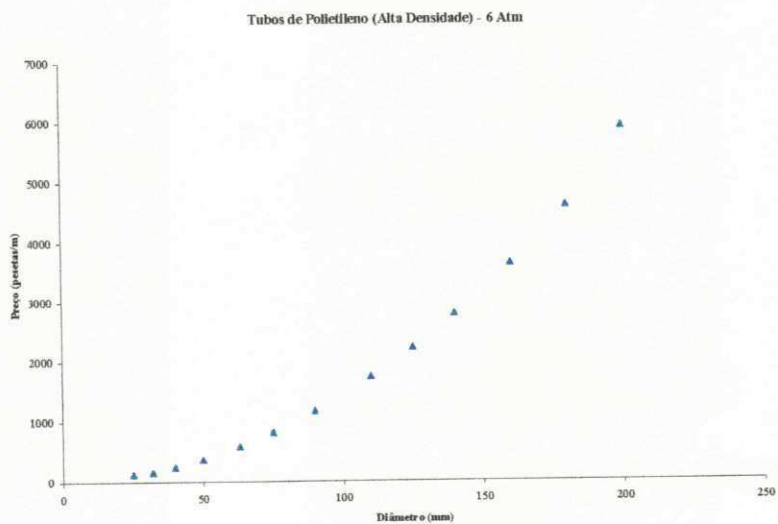
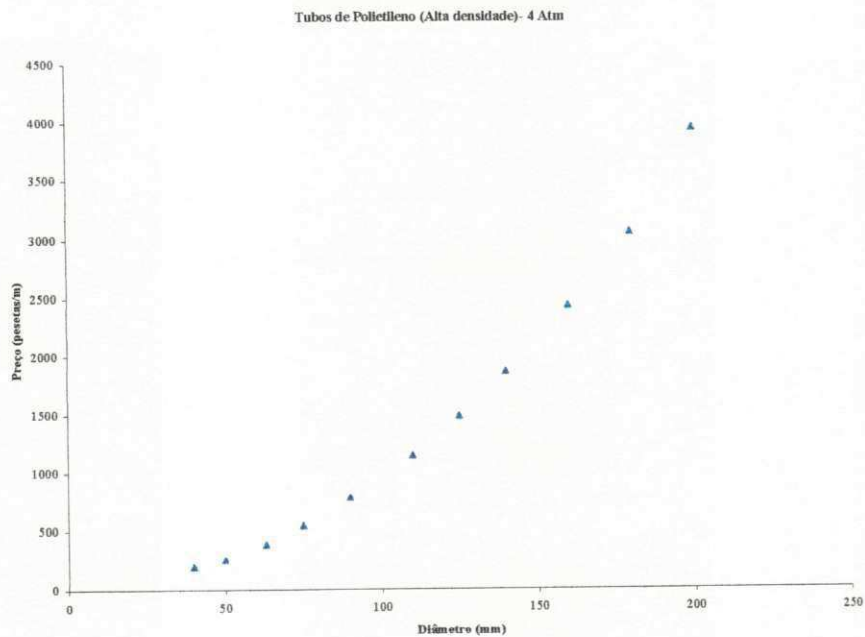


Fonte: CONEXO, 1996



Fonte: Funditubo, 1990

- Tubos de Polietileno de Alta Densidade:



Fonte: URALITA, 1990

ANEXO B

Este ANEXO apresenta os arquivos M ou m-files que foram utilizados na resolução dos exemplos do Capítulo IV, Resultados e Discussão.

Os arquivos M do exemplo 1 são:

- Mincst.m (Script file);
- Fcg.m (Function file).

Para o exemplo 2 tem-se os seguintes m-files:

- Minc1.m m (Script file ;
- Fcg2.m (Function file);
- Fc.m (Function file).

Exemplo 1

```
% Script File Minest.m do Exemplo 1
```

```
% Valor inicial das variáveis
```

```
x = [100,100,100,100,100];
```

```
% Lower bounds
```

```
vlb = [60,80,60,80,125];
```

```
% Upper bounds
```

```
vub = [175,175,175,175,175];
```

```
% Opção
```

```
options= [];
```

```
% Minimização da função
```

```
x = constr('fcg',x,options,vlb,vub)
```

```
[f, g] = fcg(x);
```

```
% Function file Fcg.m
```

```
function [f,g] = fcg (x)
```

```
% Variáveis de decisão:
```

```
d1=x(1);
```

```
d2=x(2);
```

```
d3=x(3);
```

```
d4=x(4);
```

```
d5=x(5);
```

```
% Comprimentos totais do trecho:
```

```
l1=88;
```

```
l2=400;
```

```
l3=88;
```

```
l4=100;
```

```
l5=350;
```

```
% Função objetivo a ser minimizada:
```

```
%f=((0.1209782*d1^2-5.072027*d1)*l1 - (0.1209782*d2^2-  
5.072027*d2)*l2+(0.1209782*d3^2-5.072027*d3)*l3+(0.1209782*d4^2-  
5.072027*d4)*l4+(0.1209782*d5^2-5.072027*d5)*l5)
```

```
% Equações de restrições:
```

```
g(1) = (0.0002765/(d5/1000)^4.87+0.0000875/(d2/1000)^4.87+  
0.00000533/(d1/1000)^4.87)-5;
```

```
g(2) = (0.0002765/(d5/1000)^4.87+0.0000219/(d4/1000)^4.87+  
0.00000533/(d3/1000)^4.87)-7;
```

Exemplo 2

```
% Script File Minct1.m
```

```
% Exemplo 2
```

```
% PRIMEIRA ETAPA - AS VARIÁVEIS SÃO OS DIÂMETROS
```

```
% Valor inicial das variáveis
```

```
x=[300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,  
300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,300,  
300,300,300,50];
```

```
% Lower Bounds
```

```
vlb=[125,150,200,125,250,200,300,125,150,350,125,250,125,150,125,300,400,150,  
450,150,250,500,125,500,125,150,200,300,200,300,125,200,250,250,300,125,200,  
300,400,600,0];
```

```
% Upper Bounds
```

```
vub=[800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,  
.800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,800,  
800,800,800,300];
```

```
% Options
```

```
options= [];
```

```
% Minimizar a Função Objetivo
```

```
x = constr('feg2',x,options,vlb,vub)
```

```
[f, g] = feg2(x);
```

```
% SEGUNDA ETAPA - AS VARIÁVEIS SÃO OS COMPRIMENTOS
```

```
% Ajuste dos diâmetros
```

```
for i=1:40  
    if (x(i)<=100)  
        d(i,1)=100;  
        c(i,1)=624;  
        c(i,2)=0;  
    elseif ((100<=x(i))&(x(i)<125))  
        d(i,1)=100;
```

```

c(i,1)=624;
d(i,2)=125;
c(i,2)=858;
elseif ((125<=x(i))&(x(i)<150))
d(i,1)=125;
c(i,1)=858;
d(i,2)=150;
c(i,2)=1053;
elseif ((150<=x(i))&(x(i)<200))
d(i,1)=150;
c(i,1)=1053;
d(i,2)=200;
c(i,2)=1590;
elseif ((200<=x(i))&(x(i)<250))
d(i,1)=200;
c(i,1)=1590;
d(i,2)=250;
c(i,2)=2129;
elseif ((250<=x(i))&(x(i)<300))
d(i,1)=250;
c(i,1)=2129;
d(i,2)=300;
c(i,2)=2743;
elseif ((300<=x(i))&(x(i)<350))
d(i,1)=300;
c(i,1)=2743;
d(i,2)=350;
c(i,2)=3530;
elseif ((350<=x(i))&(x(i)<400))
d(i,1)=350;
c(i,1)=3530;
d(i,2)=400;
c(i,2)=4636;
elseif ((400<=x(i))&(x(i)<450))
d(i,1)=400;
c(i,1)=4636;
d(i,2)=450;
c(i,2)=6088;
elseif ((450<=x(i))&(x(i)<500))
d(i,1)=450;
c(i,1)=6088;
d(i,2)=500;
c(i,2)=7433;
elseif ((500<=x(i))&(x(i)<600))
d(i,1)=500;

```



```
options(13)= [40];
```

```
% Minimizar a função
```

```
x = constr('fc',x,options,vlb,vub)
```

```
[f, g] = fc(x);
```


% Function file Fcg2.m

function [f,g] = fcg2 (x)

% Variáveis de decisão:

d1=x(1);d2=x(2);d3=x(3);d4=x(4);d5=x(5);d6=x(6);d7=x(7);d8=x(8);d9=x(9);
d10=x(10);d11=x(11);d12=x(12);d13=x(13);d14=x(14);d15=x(15);d16=x(16);
d17=x(17);d18=x(18);d19=x(19);d20=x(20);d21=x(21);d22=x(22);d23=x(23);
d24=x(24);d25=x(25);d26=x(26);d27=x(27);d28=x(28);d29=x(29);d30=x(30);
d31=x(31);d32=x(32);d33=x(33);d34=x(34);d35=x(35);d36=x(36);d37=x(37);
d38=x(38);d39=x(39);d40=x(40);h=x(41);

% Comprimentos

l1=250;l2=310;l3=160;l4=70;l5=220;l6=310;l7=300;l8=320;l9=220;l10=210;
l11=320;l12=220;l13=320;l14=310;l15=300;l16=50;l17=230;l18=310;l19=450;
l20=310;l21=300;l22=530;l23=230;l24=450;l25=150;l26=350;l27=320;l28=450;
l29=310;l30=310;l31=300;l32=280;l33=110;l34=210;l35=350;l36=310;l37=150;
l38=70;l39=110;l40=10;

% Vazões nos trechos

Q1=58.8 ;Q2=117.6;Q3=176.4;Q4=58.8;Q5=235.2;Q6=161.7;Q7=514.5;Q8=58.8;
Q9=117.6;Q10=599.8;Q11=88.2;Q12=255.2;Q13=58.8;Q14=117.6;Q15=58.8;
Q16=529.2;Q17=1023.1;Q18=117.6;Q19=1232.9;Q20=117.6;Q21=245;
Q22=1522.9;Q23=58.8;Q24=1617;Q25=58.8;Q26=122.5;Q27=142.1;Q28=382.2;
Q29=142.1;Q30=521.4;Q31=78.4;Q32=186.2;Q33=245;Q34=313.6;Q35=382.2;
Q36=73.5;Q37=132.3;Q38=514.5;Q39=911.4;Q40=2528.4;

% Constantes

k=10.66;
c=140;
b=3600;

% Perdas de Carga

j1=(k*(Q1/(b*c))^1.852);j2=(k*(Q2/(b*c))^1.852);j3=(k*(Q3/(b*c))^1.852);
j4=(k*(Q4/(b*c))^1.852);j5=(k*(Q5/(b*c))^1.852);j6=(k*(Q6/(b*c))^1.852);
j7=(k*(Q7/(b*c))^1.852);j8=(k*(Q8/(b*c))^1.852);j9=(k*(Q9/(b*c))^1.852);
j10=(k*(Q10/(b*c))^1.852);j11=(k*(Q11/(b*c))^1.852);
j12=(k*(Q12/(b*c))^1.852);j13=(k*(Q13/(b*c))^1.852);
j14=(k*(Q14/(b*c))^1.852);j15=(k*(Q15/(b*c))^1.852);

$j16=(k*(Q16/(b*c))^{1.852});j17=(k*(Q17/(b*c))^{1.852});$
 $j18=(k*(Q18/(b*c))^{1.852});j19=(k*(Q19/(b*c))^{1.852});$
 $j20=(k*(Q20/(b*c))^{1.852});j21=(k*(Q21/(b*c))^{1.852});$
 $j22=(k*(Q22/(b*c))^{1.852});j23=(k*(Q23/(b*c))^{1.852});$
 $j24=(k*(Q24/(b*c))^{1.852});j25=(k*(Q25/(b*c))^{1.852});$
 $j26=(k*(Q26/(b*c))^{1.852});j27=(k*(Q27/(b*c))^{1.852});$
 $j28=(k*(Q28/(b*c))^{1.852});j29=(k*(Q29/(b*c))^{1.852});$
 $j30=(k*(Q30/(b*c))^{1.852});j31=(k*(Q31/(b*c))^{1.852});$
 $j32=(k*(Q32/(b*c))^{1.852});j33=(k*(Q33/(b*c))^{1.852});$
 $j34=(k*(Q34/(b*c))^{1.852});j35=(k*(Q35/(b*c))^{1.852});$
 $j36=(k*(Q36/(b*c))^{1.852});j37=(k*(Q37/(b*c))^{1.852});$
 $j38=(k*(Q38/(b*c))^{1.852});j39=(k*(Q39/(b*c))^{1.852});$
 $j40=(k*(Q40/(b*c))^{1.852});$

% Função Objetivo

$f=13.74085*(d1*I1+d2*I2+d3*I3+d4*I4+d5*I5+d6*I6+d7*I7+d8*I8+d9*I9+$
 $d10*I10+d11*I11+d12*I12+d13*I13+d14*I14+d15*I15+d16*I16+d17*I17+$
 $d18*I18+d19*I19+d20*I20+d21*I21+d22*I22+d23*I23+d24*I24+d25*I25+$
 $26*I26+d27*I27+d28*I28+d29*I29+d30*I30+d31*I31+d32*I32+d33*I33+$
 $d34*I34+d35*I35+d36*I36+d37*I37+d38*I38+d39*I39+d40*I40)+$
 $0.003893669*(d1^2*I1+d2^2*I2+d3^2*I3+d4^2*I4+d5^2*I5+d6^2*I6+d7^2*I7+$
 $d8^2*I8+d9^2*I9+d10^2*I10+d11^2*I11+d12^2*I12+d13^2*I13+d14^2*I14+$
 $d15^2*I15+d16^2*I16+d17^2*I17+d18^2*I18+d19^2*I19+d20^2*I20+d21^2*I21+$
 $d22^2*I22+d23^2*I23+d24^2*I24+d25^2*I25+d26^2*I26+d27^2*I27+d28^2*I28+$
 $d29^2*I29+d30^2*I30+d31^2*I31+d32^2*I32+d33^2*I33+d34^2*I34+d35^2*I35+$
 $d36^2*I36+d37^2*I37+d38^2*I38+d39^2*I39+d40^2*I40)+294208.6694*h;$

% Restrições

$g(1)=(j1/((d1/1000)^{4.87}))*I1+(j2/((d2/1000)^{4.87}))*I2+(j3/((d3/1000)^{4.87}))*I3+$
 $(j5/((d5/1000)^{4.87}))*I5+(j7/((d7/1000)^{4.87}))*I7+(j10/((d10/1000)^{4.87}))*I10+$
 $(j17/((d17/1000)^{4.87}))*I17+(j19/((d19/1000)^{4.87}))*I19+$
 $(j22/((d22/1000)^{4.87}))*I22+(j24/((d24/1000)^{4.87}))*I24+$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87}))*I40-h+36.2;$
 $g(2)=(j2/((d2/1000)^{4.87}))*I2+(j3/((d3/1000)^{4.87}))*I3+(j5/((d5/1000)^{4.87}))*I5+$
 $(j7/((d7/1000)^{4.87}))*I7+(j10/((d10/1000)^{4.87}))*I10+$
 $(j17/((d17/1000)^{4.87}))*I17+(j19/((d19/1000)^{4.87}))*I19+$
 $(j22/((d22/1000)^{4.87}))*I22+(j24/((d24/1000)^{4.87}))*I24+$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87}))*I40-h+37.7;$
 $g(3)=(j3/((d3/1000)^{4.87}))*I3+(j5/((d5/1000)^{4.87}))*I5+(j7/((d7/1000)^{4.87}))*I7+$
 $(j10/((d10/1000)^{4.87}))*I10+(j17/((d17/1000)^{4.87}))*I17+$
 $(j19/((d19/1000)^{4.87}))*I19+(j22/((d22/1000)^{4.87}))*I22+$
 $(j24/((d24/1000)^{4.87}))*I24+(j40/((d40/1000)^{4.87}))*I40-h+39.3;$
 $g(4)=(j4/((d4/1000)^{4.87}))*I4+(j5/((d5/1000)^{4.87}))*I5+(j7/((d7/1000)^{4.87}))*I7+$

$(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 43.7;$
 $g(16) = (j16/((d16/1000)^{4.87})) * 116 + (j17/((d17/1000)^{4.87})) * 117 +$
 $(j19/((d19/1000)^{4.87})) * 119 + (j22/((d22/1000)^{4.87})) * 122 +$
 $(j24/((d24/1000)^{4.87})) * 124 + (j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 43.1;$
 $g(17) = (j17/((d17/1000)^{4.87})) * 117 + (j19/((d19/1000)^{4.87})) * 119 +$
 $(j22/((d22/1000)^{4.87})) * 122 + (j24/((d24/1000)^{4.87})) * 124 +$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 43.1;$
 $g(18) = (j18/((d18/1000)^{4.87})) * 118 + (j19/((d19/1000)^{4.87})) * 119 +$
 $(j22/((d22/1000)^{4.87})) * 122 + (j24/((d24/1000)^{4.87})) * 124 +$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 42;$
 $g(19) = (j19/((d19/1000)^{4.87})) * 119 + (j22/((d22/1000)^{4.87})) * 122 +$
 $(j24/((d24/1000)^{4.87})) * 124 + (j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 43.1;$
 $g(20) = (j20/((d20/1000)^{4.87})) * 120 + (j21/((d21/1000)^{4.87})) * 121 +$
 $(j22/((d22/1000)^{4.87})) * 122 + (j24/((d24/1000)^{4.87})) * 124 +$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 43.4;$
 $g(21) = (j21/((d21/1000)^{4.87})) * 121 + (j22/((d22/1000)^{4.87})) * 122 +$
 $(j24/((d24/1000)^{4.87})) * 124 + (j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 43.5;$
 $g(22) = (j22/((d22/1000)^{4.87})) * 122 + (j24/((d24/1000)^{4.87})) * 124 +$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 43.2;$
 $g(23) = (j23/((d23/1000)^{4.87})) * 123 + (j24/((d24/1000)^{4.87})) * 124 +$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 44.9;$
 $g(24) = (j24/((d24/1000)^{4.87})) * 124 + (j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 46;$
 $g(25) = (j25/((d25/1000)^{4.87})) * 125 + (j26/((d26/1000)^{4.87})) * 126 +$
 $(j28/((d28/1000)^{4.87})) * 128 + (j30/((d30/1000)^{4.87})) * 130 +$
 $(j39/((d39/1000)^{4.87})) * 139 + (j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 53.2;$
 $g(26) = (j26/((d26/1000)^{4.87})) * 126 + (j28/((d28/1000)^{4.87})) * 128 +$
 $(j30/((d30/1000)^{4.87})) * 130 + (j39/((d39/1000)^{4.87})) * 139 +$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 53.1;$
 $g(27) = (j27/((d27/1000)^{4.87})) * 127 + (j28/((d28/1000)^{4.87})) * 128 +$
 $(j30/((d30/1000)^{4.87})) * 130 + (j39/((d39/1000)^{4.87})) * 139 +$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 51.1;$
 $g(28) = (j28/((d28/1000)^{4.87})) * 128 + (j30/((d30/1000)^{4.87})) * 130 +$
 $(j39/((d39/1000)^{4.87})) * 139 + (j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 53;$
 $g(29) = (j29/((d29/1000)^{4.87})) * 129 + (j30/((d30/1000)^{4.87})) * 130 +$
 $(j39/((d39/1000)^{4.87})) * 139 + (j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 50;$
 $g(30) = (j30/((d30/1000)^{4.87})) * 130 + (j39/((d39/1000)^{4.87})) * 139 +$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 52.2;$
 $g(31) = (j31/((d31/1000)^{4.87})) * 131 + (j32/((d32/1000)^{4.87})) * 132 +$
 $(j33/((d33/1000)^{4.87})) * 133 + (j34/((d34/1000)^{4.87})) * 134 +$
 $(j35/((d35/1000)^{4.87})) * 135 + (j38/((d38/1000)^{4.87})) * 138 +$
 $(j39/((d39/1000)^{4.87})) * 139 + (j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 41.9;$
 $g(32) = (j32/((d32/1000)^{4.87})) * 132 + (j33/((d33/1000)^{4.87})) * 133 +$
 $(j34/((d34/1000)^{4.87})) * 134 + (j35/((d35/1000)^{4.87})) * 135 +$
 $(j38/((d38/1000)^{4.87})) * 138 + (j39/((d39/1000)^{4.87})) * 139 +$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87})) * 140 - h + 41.9;$

$g(33)=(j33/((d33/1000)^{4.87}))*133+(j34/((d34/1000)^{4.87}))*134+$
 $(j35/((d35/1000)^{4.87}))*135+(j38/((d38/1000)^{4.87}))*138+$
 $(j39/((d39/1000)^{4.87}))*139+(j40/((d40/1000)^{4.87}))*140-h+44.7;$
 $g(34)=(j34/((d34/1000)^{4.87}))*134+(j35/((d35/1000)^{4.87}))*135+$
 $(j38/((d38/1000)^{4.87}))*138+(j39/((d39/1000)^{4.87}))*139+$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87}))*140-h+47.5;$
 $g(35)=(j35/((d35/1000)^{4.87}))*135+(j38/((d38/1000)^{4.87}))*138+$
 $(j39/((d39/1000)^{4.87}))*139+(j40/((d40/1000)^{4.87}))*140-h+48.8;$
 $g(36)=(j36/((d36/1000)^{4.87}))*136+(j37/((d37/1000)^{4.87}))*137+$
 $(j38/((d38/1000)^{4.87}))*138+(j39/((d39/1000)^{4.87}))*139+$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87}))*140-h+49.7;$
 $g(37)=(j37/((d37/1000)^{4.87}))*137+(j38/((d38/1000)^{4.87}))*138+$
 $(j39/((d39/1000)^{4.87}))*139+(j40/((d40/1000)^{4.87}))*140-h+50.3;$
 $g(38)=(j38/((d38/1000)^{4.87}))*138+(j39/((d39/1000)^{4.87}))*139+$
 $(j40/((d40/1000)^{4.87}))*140-h+51.1;$
 $g(39)=(j39/((d39/1000)^{4.87}))*139+(j40/((d40/1000)^{4.87}))*140-h+52.2;$
 $g(40)=(j40/((d40/1000)^{4.87}))*140-h+51;$

% Function file Fc.m

function [f,g] = fc (x)

% Variáveis (comprimentos)

l1=x(1);l2=x(2);l3=x(3);l4=x(4);l5=x(5);l6=x(6);l7=x(7);l8=x(8);l9=x(9);
l10=x(10);l11=x(11);l12=x(12);l13=x(13);l14=x(14);l15=x(15);l16=x(16);
l17=x(17);l18=x(18);l19=x(19);l20=x(20);l21=x(21);l22=x(22);l23=x(23);
l24=x(24);l25=x(25);l26=x(26);l27=x(27);l28=x(28);l29=x(29);l30=x(30);
l31=x(31);l32=x(32);l33=x(33);l34=x(34);l35=x(35);l36=x(36);l37=x(37);
l38=x(38);l39=x(39);l40=x(40);l41=x(41);l42=x(42);l43=x(43);l44=x(44);
l45=x(45);l46=x(46);l47=x(47);l48=x(48);l49=x(49);l50=x(50);l51=x(51);
l52=x(52);l53=x(53);l54=x(54);l55=x(55);l56=x(56);l57=x(57);l58=x(58);
l59=x(59);l60=x(60);l61=x(61);l62=x(62);l63=x(63);l64=x(64);l65=x(65);
l66=x(66);l67=x(67);l68=x(68);l69=x(69);l70=x(70);l71=x(71);l72=x(72);
l73=x(73);l74=x(74);l75=x(75);l76=x(76);l77=x(77);l78=x(78);l79=x(79);
l80=x(80);h=x(81);

% Vazões nos trechos

Q1=58.8 ;Q2=117.6;Q3=176.4;Q4=58.8 ;Q5=235.2;Q6=161.7;Q7=514.5;
Q8=58.8;Q9=117.6;Q10=599.8;Q11=88.2;Q12=235.2;Q13=58.8;Q14=117.6;
Q15=58.8;Q16=529.2;Q17=1023.1;Q18=117.6;Q19=1232.9;Q20=117.6;Q21=245;
Q22=1522.9;Q23=58.8;Q24=1617;Q25=58.8;Q26=122.5;Q27=142.1;Q28=382.2;
Q29=142.1;Q30=521.4;Q31=78.4;Q32=186.2;Q33=245;Q34=313.6;Q35=382.2;
Q36=73.5;Q37=132.3;Q38=514.5;Q39=911.4;Q40=2528.4;

% Constantes

k=10.66;
c=140;
b=3600;

% Perdas de Carga

j1=(k*(Q1/(b*c))^1.852);j2=(k*(Q2/(b*c))^1.852);j3=(k*(Q3/(b*c))^1.852);
j4=(k*(Q4/(b*c))^1.852);j5=(k*(Q5/(b*c))^1.852);j6=(k*(Q6/(b*c))^1.852);
j7=(k*(Q7/(b*c))^1.852);j8=(k*(Q8/(b*c))^1.852);j9=(k*(Q9/(b*c))^1.852);
j10=(k*(Q10/(b*c))^1.852);j11=(k*(Q11/(b*c))^1.852);
j12=(k*(Q12/(b*c))^1.852);j13=(k*(Q13/(b*c))^1.852);
j14=(k*(Q14/(b*c))^1.852);j15=(k*(Q15/(b*c))^1.852);
j16=(k*(Q16/(b*c))^1.852);j17=(k*(Q17/(b*c))^1.852);
j18=(k*(Q18/(b*c))^1.852);j19=(k*(Q19/(b*c))^1.852);
j20=(k*(Q20/(b*c))^1.852);j21=(k*(Q21/(b*c))^1.852);

$j22=(k*(Q22/(b*c))^{1.852});j23=(k*(Q23/(b*c))^{1.852});$
 $j24=(k*(Q24/(b*c))^{1.852});j25=(k*(Q25/(b*c))^{1.852});$
 $j26=(k*(Q26/(b*c))^{1.852});j27=(k*(Q27/(b*c))^{1.852});$
 $j28=(k*(Q28/(b*c))^{1.852});j29=(k*(Q29/(b*c))^{1.852});$
 $j30=(k*(Q30/(b*c))^{1.852});j31=(k*(Q31/(b*c))^{1.852});$
 $j32=(k*(Q32/(b*c))^{1.852});j33=(k*(Q33/(b*c))^{1.852});$
 $j34=(k*(Q34/(b*c))^{1.852});j35=(k*(Q35/(b*c))^{1.852});$
 $j36=(k*(Q36/(b*c))^{1.852});j37=(k*(Q37/(b*c))^{1.852});$
 $j38=(k*(Q38/(b*c))^{1.852});j39=(k*(Q39/(b*c))^{1.852});$
 $j40=(k*(Q40/(b*c))^{1.852});$

% custos

$c1=858;c2=1053;c3=1053;c4=1590;c5=1590;c6=2129;c7=858;c8=1053;c9=2129;$
 $c10=2743;c11=1590;c12=2129;c13=2743;c14=3530;c15=858;c16=1053;c17=1053;$
 $c18=1590;c19=3530;c20=4636;c21=858;c22=1053;c23=2129;c24=2743;c25=858;$
 $c26=1053;c27=1053;c28=1590;c29=858;c30=1053;c31=2743;c32=3530;c33=4636;$
 $c34=6088;c35=1053;c36=1590;c37=6088;c38=7433;c39=1053;c40=1590;$
 $c41=2129;c42=2743;c43=7433;c44=9000;c45=858;c46=1053;c47=7433;$
 $c48=9000;c49=1053;c50=1590;c51=1590;c52=2129;c53=1590;c54=2129;$
 $c55=2743;c56=3530;c57=1590;c58=2129;c59=2743;c60=3530;c61=858;$
 $c62=1053;c63=1590;c64=2129;c65=2129;c66=2743;c67=2129;c68=2743;$
 $c69=2743;c70=3530;c71=858;c72=1053;c73=1590;c74=2129;c75=2743;$
 $c76=3530;c77=4636;c78=6088;c79=9000;c80=10500;$

% diâmetros

$d1=125;d2=150;d3=150;d4=200;d5=200;d6=250;d7=125;d8=150;d9=250;$
 $d10=300;d11=200;d12=250;d13=300;d14=350;d15=125;d16=150;d17=150;$
 $d18=200;d19=350;d20=400;d21=125;d22=150;d23=250;d24=300;d25=125;$
 $d26=150;d27=150;d28=200;d29=125;d30=150;d31=300;d32=350;d33=400;$
 $d34=450;d35=150;d36=200;d37=450;d38=500;d39=150;d40=200;d41=250;$
 $d42=300;d43=500;d44=600;d45=125;d46=150;d47=500;d48=600;d49=150;$
 $d50=200;d51=200;d52=250;d53=200;d54=250;d55=300;d56=350;d57=200;$
 $d58=250;d59=300;d60=350;d61=125;d62=150;d63=200;d64=250;d65=250;$
 $d66=300;d67=250;d68=300;d69=300;d70=350;d71=125;d72=150;d73=200;$
 $d74=250;d75=300;d76=350;d77=400;d78=450;d79=600;d80=700;$

% Custo total

$b1=c1*i1+c2*i2+c3*i3+c4*i4+c5*i5+c6*i6+c7*i7+c8*i8+c9*i9+c10*i10+c12*i12$
 $+c13*i13+c14*i14+c15*i15+c16*i16+c17*i17+c18*i18+c19*i19+c20*i20+c21*i21$
 $+c22*i22+c23*i23+c24*i24+c25*i25+c26*i26+c27*i27+c28*i28+c29*i29+c30*i30$
 $+c31*i31+c32*i32+c33*i33+c34*i34+c35*i35+c36*i36+c37*i37+c38*i38+c39*i39$
 $+c40*i40;$

$$b2=c41*141+c42*142+c43*143+c44*144+c45*145+c46*146+c47*147+c48*148+c49*149+c50*151+c51*152+c53*153+c54*154+c55*155+c56*156+c57*157+c58*158+c59*159+c60*160+c61*161+c62*162+c63*163+c64*164+c65*165+c66*166+c67*167+c68*168+c69*169+c70*170+c71*171+c72*172+c73*173+c74*174+c75*175+c76*176+c77*177+c78*178+c79*179+c80*180;$$

% Função Objetivo

$$f=b1+b2+294208.6694*h;$$

% Restrições

$$\begin{aligned} g(1)=11+12-250;g(2)=13+14-310;g(3)=15+16-160;g(4)=17+18-70;g(5)=19+110-220; \\ g(6)=111+112-310;g(7)=113+114-300;g(8)=115+116-320;g(9)=117+118-220; \\ g(10)=119+120-210;g(11)=121+122-320;g(12)=123+124-220;g(13)=125+126-320; \\ g(14)=127+128-310;g(15)=129+130-300;g(16)=131+132-50;g(17)=133+134-230; \\ g(18)=135+136-310;g(19)=137+138-450;g(20)=139+140-310;g(21)=141+142-300; \\ g(22)=143+144-530;g(23)=145+146-230;g(24)=147+148-450;g(25)=149+150-150; \\ g(26)=151+152-350;g(27)=153+154-320;g(28)=155+156-450;g(29)=157+158-310; \\ g(30)=159+160-310;g(31)=161+162-300;g(32)=163+164-280;g(33)=165+166-310; \\ g(34)=167+168-210;g(35)=169+170-350;g(36)=171+172-310;g(37)=173+174-150; \\ g(38)=175+176-70;g(39)=177+178-110;g(40)=179+180-10; \\ m1=(j1/((d1/1000)^4.87))^11+(j1/((d2/1000)^4.87))^12; \\ m2=(j2/((d3/1000)^4.87))^13+(j2/((d4/1000)^4.87))^14; \\ m3=(j3/((d5/1000)^4.87))^15+(j3/((d6/1000)^4.87))^16; \\ m4=(j4/((d7/1000)^4.87))^17+(j4/((d8/1000)^4.87))^18; \\ m5=(j5/((d9/1000)^4.87))^19+(j5/((d10/1000)^4.87))^110; \\ m6=(j6/((d11/1000)^4.87))^111+(j6/((d12/1000)^4.87))^112; \\ m7=(j7/((d13/1000)^4.87))^113+(j7/((d14/1000)^4.87))^114; \\ m8=(j8/((d15/1000)^4.87))^115+(j8/((d16/1000)^4.87))^116; \\ m9=(j9/((d17/1000)^4.87))^117+(j9/((d18/1000)^4.87))^118; \\ m10=(j10/((d19/1000)^4.87))^119+(j10/((d20/1000)^4.87))^120; \\ m11=(j11/((d21/1000)^4.87))^121+(j11/((d22/1000)^4.87))^122; \\ m12=(j12/((d23/1000)^4.87))^123+(j12/((d24/1000)^4.87))^124; \\ m13=(j13/((d25/1000)^4.87))^125+(j13/((d26/1000)^4.87))^126; \\ m14=(j14/((d27/1000)^4.87))^127+(j14/((d28/1000)^4.87))^128; \\ m15=(j15/((d29/1000)^4.87))^129+(j15/((d30/1000)^4.87))^130; \\ m16=(j16/((d31/1000)^4.87))^131+(j16/((d32/1000)^4.87))^132; \\ m17=(j17/((d33/1000)^4.87))^133+(j17/((d34/1000)^4.87))^134; \\ m18=(j18/((d35/1000)^4.87))^135+(j18/((d36/1000)^4.87))^136; \\ m19=(j19/((d37/1000)^4.87))^137+(j19/((d38/1000)^4.87))^138; \\ m20=(j20/((d39/1000)^4.87))^139+(j20/((d40/1000)^4.87))^140; \\ m21=(j21/((d41/1000)^4.87))^141+(j21/((d42/1000)^4.87))^142; \\ m22=(j22/((d43/1000)^4.87))^143+(j22/((d44/1000)^4.87))^144; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_{23} &= (j_{23}/((d_{45}/1000)^{4.87})) * 145 + (j_{23}/((d_{46}/1000)^{4.87})) * 146; \\
m_{24} &= (j_{24}/((d_{47}/1000)^{4.87})) * 147 + (j_{24}/((d_{48}/1000)^{4.87})) * 148; \\
m_{25} &= (j_{25}/((d_{49}/1000)^{4.87})) * 149 + (j_{25}/((d_{50}/1000)^{4.87})) * 150; \\
m_{26} &= (j_{26}/((d_{51}/1000)^{4.87})) * 151 + (j_{26}/((d_{52}/1000)^{4.87})) * 152; \\
m_{27} &= (j_{27}/((d_{53}/1000)^{4.87})) * 153 + (j_{27}/((d_{54}/1000)^{4.87})) * 154; \\
m_{28} &= (j_{28}/((d_{55}/1000)^{4.87})) * 155 + (j_{28}/((d_{56}/1000)^{4.87})) * 156; \\
m_{29} &= (j_{29}/((d_{57}/1000)^{4.87})) * 157 + (j_{29}/((d_{58}/1000)^{4.87})) * 158; \\
m_{30} &= (j_{30}/((d_{59}/1000)^{4.87})) * 159 + (j_{30}/((d_{60}/1000)^{4.87})) * 160; \\
m_{31} &= (j_{31}/((d_{61}/1000)^{4.87})) * 161 + (j_{31}/((d_{62}/1000)^{4.87})) * 162; \\
m_{32} &= (j_{32}/((d_{63}/1000)^{4.87})) * 163 + (j_{32}/((d_{64}/1000)^{4.87})) * 164; \\
m_{33} &= (j_{33}/((d_{65}/1000)^{4.87})) * 165 + (j_{33}/((d_{66}/1000)^{4.87})) * 166; \\
m_{34} &= (j_{34}/((d_{67}/1000)^{4.87})) * 167 + (j_{34}/((d_{68}/1000)^{4.87})) * 168; \\
m_{35} &= (j_{35}/((d_{69}/1000)^{4.87})) * 169 + (j_{35}/((d_{70}/1000)^{4.87})) * 170; \\
m_{36} &= (j_{36}/((d_{71}/1000)^{4.87})) * 171 + (j_{36}/((d_{72}/1000)^{4.87})) * 172; \\
m_{37} &= (j_{37}/((d_{73}/1000)^{4.87})) * 173 + (j_{37}/((d_{74}/1000)^{4.87})) * 174; \\
m_{38} &= (j_{38}/((d_{75}/1000)^{4.87})) * 175 + (j_{38}/((d_{76}/1000)^{4.87})) * 176; \\
m_{39} &= (j_{39}/((d_{77}/1000)^{4.87})) * 177 + (j_{39}/((d_{78}/1000)^{4.87})) * 178; \\
m_{40} &= (j_{40}/((d_{79}/1000)^{4.87})) * 179 + (j_{40}/((d_{80}/1000)^{4.87})) * 180; \\
g(41) &= m_1 + m_2 + m_3 + m_5 + m_7 + m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 36.2; \\
g(42) &= m_2 + m_3 + m_5 + m_7 + m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 37.7; \\
g(43) &= m_3 + m_5 + m_7 + m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 39.3; \\
g(44) &= m_4 + m_5 + m_7 + m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 40.8; \\
g(45) &= m_5 + m_7 + m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 40.4; \\
g(46) &= m_6 + m_7 + m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 39.1; \\
g(47) &= m_7 + m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 41.7; \\
g(48) &= m_8 + m_9 + m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 39.3; \\
g(49) &= m_9 + m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 41.3; \\
g(50) &= m_{10} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 43.4; \\
g(51) &= m_{11} + m_{12} + m_{16} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 41.1; \\
g(52) &= m_{12} + m_{16} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 42.8; \\
g(53) &= m_{13} + m_{14} + m_{16} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 39.3; \\
g(54) &= m_{14} + m_{16} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 41.2; \\
g(55) &= m_{15} + m_{16} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 43.7; \\
g(56) &= m_{16} + m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 43.1; \\
g(57) &= m_{17} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 43.1; \\
g(58) &= m_{18} + m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 42; \\
g(59) &= m_{19} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 43.5; g(60) = m_{20} + m_{21} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 43.4; \\
g(61) &= m_{21} + m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 43.3; \\
g(62) &= m_{22} + m_{24} + m_{40} - h + 43.2; \\
g(63) &= m_{23} + m_{24} + m_{40} - h + 44.9; g(64) = m_{24} + m_{40} - h + 46; \\
g(65) &= m_{25} + m_{26} + m_{28} + m_{30} + m_{39} + m_{40} - h + 53.2; \\
g(66) &= m_{26} + m_{28} + m_{30} + m_{39} + m_{40} - h + 53.1; \\
g(67) &= m_{27} + m_{28} + m_{30} + m_{39} + m_{40} - h + 51.1; \\
g(68) &= m_{28} + m_{30} + m_{39} + m_{40} - h + 53; g(69) = m_{29} + m_{30} + m_{39} + m_{40} - h + 50; \\
g(70) &= m_{30} + m_{39} + m_{40} - h + 52.2;
\end{aligned}$$

$$g(71) = m_{31} + m_{32} + m_{33} + m_{34} + m_{35} + m_{38} + m_{39} + m_{40} - h + 41.9;$$

$$g(72) = m_{32} + m_{33} + m_{34} + m_{35} + m_{38} + m_{39} + m_{40} - h + 41.9;$$

$$g(73) = m_{33} + m_{34} + m_{35} + m_{38} + m_{39} + m_{40} - h + 44.7;$$

$$g(74) = m_{34} + m_{35} + m_{38} + m_{39} + m_{40} - h + 47.5;$$

$$g(75) = m_{35} + m_{38} + m_{39} + m_{40} - h + 48.8;$$

$$g(76) = m_{36} + m_{37} + m_{38} + m_{39} + m_{40} - h + 49.7;$$

$$g(77) = m_{37} + m_{38} + m_{39} + m_{40} - h + 50.3;$$

$$g(78) = m_{38} + m_{39} + m_{40} - h + 51.1; g(79) = m_{39} + m_{40} - h + 52.2; g(80) = m_{40} - h + 51;$$

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPEROVITS, E., SHAMIR, U. Design of optimal water distribution system. *Water Resources Research*. v.13, n.6, p.885-900, december 1977.
- ALZAMORA, F. M., TÁRREGA, F. S. *Curso de ingeniería hidraulica aplicada a los sistemas de distribución de agua: catedra de mecanica de fluidos*. Madrid: Universidade Politécnica de Valência, 1987.
- AZEVEDO NETTO, J. M., ALVAREZ, G. A. *Manual de hidráulica Vol. II*. 7.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 124p.
- AZEVEDO NETTO, J. M. ^{et al.} *Projeto de si. temas de distribuição de água*. São Paulo: CETESB, 1975. 335p.
- BARTH, Flavio Terra. *Modelos de gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel: ABRH, 1987. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos).
- BERNADO, Salassier. *Manual de irrigação*. 3.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1984. 463p.
- BONETT, A. M., JAUFFRED, F. J., JÉSUS, J. A. *Programacion lineal: gráficos*. Mexico: Representaciones y Servicios de Ingenieria, 1971, 720p.
- BREGALDA, P. F., OLIVEIRA, A. F. de, BORNSTEIN, C. T. *Introdução à programação linear*. 3.ed. Rio de Janeiro: Campus, 1988.
- COMPANHIA PETROQUÍMICA DE CAMAÇARI. *Sistemas em PVC na construção civil*. São Paulo: CPC, 1995?. 45p. (Cartilha).

- CURI, W. F., GOMES, H. P. *Um dimensionamento ótimo para redes de distribuição de água*. In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 1996, Salvador.
- DACACH, Nelson Gandur. *Sistemas urbanos de água*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 490p.
- DANO, Sven. *Nonlinear and dynamic programming: an introduction*. New York: Springer – Verlag – Wien, 1975.
- DANTAS NETO, José. *Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo; em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água*. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, 1994. 125p. (Tese, Doutorado em Agronomia).
- FUNDITUBO S.A. *Canalizações fundição ductil*. Espanha: Funditubo. outubro 1990. (Lista de Preços).
- ^{EZ} GARCÉS, Lucas Nogueira. *Elementos de engenharia hidráulica e sanitária*. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 355p.
- GOMES, Heber Pimentel. *Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento*. 2.ed. João Pessoa: Ed. Universitária/UFPB, 1997. 344p.
- GOMES, Heber Pimentel. *Desempenho hidráulico da irrigação do setor 14/1 do perímetro Senador Nilo Coelho: Diagnóstico e Soluções*. Campina Grande, 1996.(Relatório)
- GOTTFRIED, B. S., WEISMAN, J. *Introduction to optimization theory*. New Jersey: Prentice-Hall, 1973. 571p.

- HANSELMAN, Duane, LITTLEFIELD, Bruce. *MATLAB*: versão do estudante: guia do usuário. Trad. Hércules Pereira Neves. São Paulo: Makron Books, 1997. 305p. (Tradução de: The student edition of MATLAB).
- HOLZAPFEL, E. A., MARIÑO, M. A., VALENZUELA, A. Drip Irrigation nonlinear optimization model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.116, n.4, p.479-493, july/august 1990.
- LEAL, Antonio Farias. *Estudo comparativo de métodos de otimização de redes malhadas pressurizadas*. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1995. 141p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).
- MATEUS, G. R., LUNA, H. P. *Programação não linear*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 289p.
- MISAWA, Tetsuaki. Tubulação utilizada em sistema de abastecimento de água. In: AZEVEDO NETTO, J. M. et al. *Projeto de sistemas de distribuição de água*. São Paulo: CETESB, 1975. Cap.3, p.53-90.
- ORON, G., KARMELI, D. Procedure for the economical evaluation of water networks' parameters. *Water Resources Bulletin*, vol.15, n.4, p.1050-1059, august 1979.
- ROBINSON, R. B., AUSTIN, T. A. Cost Optimization of Rural Water Systems. *Journal of the Hydraulics Division*. vol.102, n.Hy9, p.1119-1134, august 1976.
- SAAD, João Carlos Cury. *Otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação utilizando programação não-linear*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, 1993. 114p. (Tese, Doutorado em Agronomia).
- SIGMON, Kermit. *MATLAB primer*. Gainesville: Department of Mathematics University of Florida, 1989.

- SILVESTRE, Paschoal. *Hidráulica geral*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- URALITA S. A. *Fibrocimento: tubos e juntas de presión*. Espanha: Uralita. abril 1990. (Lista de Preços).
- URAPLAST S. A. *Tuberia presión PVC: plasticos obra civil*. Espanha: Uraplast. octubre 1990. (Lista de Preços).
- URAPLAST S. A. *Tuberia presión polietileno baya e alta densidad: plasticos obra civil*. Espanha: Uraplast/Uralita. (Lista de Preços).
- VENTSEL, Elena S., *Investigacion de Operaciones: problemas, principios e metodologia*. Russia: Editorial Mir Moscú, 1983.
- WALSKI, T. M. Optimization and pipe-sizing decisions. *Jornal of Water Resources Planning and Management*, v.121, n.4, p.340-343, july/august 1995.
- WALSKI, T. M. Discussion: Procedure for the economic evaluation of water networks' parameters. *Water Resources Bulletin*, v.16, n.4, p.756-757, august 1980.
- WIENDL, Wolfgang G. *Tubulações para água*. São Paulo: Centro Tecnológico de Saneamento Básico, 1973. 339p.
- ZULLO JUNIOR, J., ARRUDA, F. B. *Programa Computacional para ajuste de equações em dados experimentais*. Campinas, Instituto Agronômico, 1986. 23p. (Boletim Técnico n.113).