



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE**

OTIMIZAÇÃO INTEGRADA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

POR GOTEJAMENTO

PAULO DA COSTA MEDEIROS

CAMPINA GRANDE

JULHO / 1997

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

**OTIMIZAÇÃO INTEGRADA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO
POR GOTEJAMENTO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PAULO DA COSTA MEDEIROS

CAMPINA GRANDE

Julho de 1997

M488o Medeiros, Paulo da Costa
Otimizacao integrada em sistemas de irrigacao por
gotejamento / Paulo da Costa Medeiros. - Campina Grande,
1997.
98 f.

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

1. Irrigacao por Gotejamento - 2. Irrigacao por
Gotejamento 3. Metodos de Irrigacao 4. Dissertacao I.
Gomes, Heber Pimentel, Prof. II. Universidade Federal da
Paraiba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 626.841(043)

PAULO DA COSTA MEDEIROS

**OTIMIZAÇÃO INTEGRADA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO
POR GOTEJAMENTO**

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

HEBER PIMENTEL GOMES

Orientador

Campina Grande, Paraíba

Julho de 1997

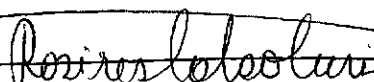
**OTIMIZAÇÃO INTEGRADA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO
POR GOTEJAMENTO**

PAULO DA COSTA MEDEIROS



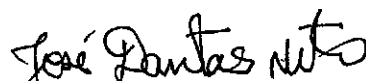
HEBER PIMENTEL GOMES

Orientador



ROSIRES CATÃO CURI

Componente da Banca



JOSÉ DANTAS NETO

Componente da Banca

Aos meus pais *João e Expedita*

e a minha querida esposa *Áurea*,

DEDICO.

Ao Nordeste brasileiro, tão carente de irrigação,

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Infinitamente sou grato a DEUS por tudo que consegui e hei de alcançar em meus objetivos.

Aos meus amáveis pais, que durante toda minha vida, me mostraram e me orientaram na importância do que é a vida.

A minha amada e amiga esposa, desde quando a conheci sempre estive ao meu lado, nos momentos difíceis e felizes de minha vida.

A todos os professores do Laboratório de Hidráulica da UFPB, em especial aos professores Márcia Maria Rios Ribeiro, Carlos de Oliveira Galvão e Raimundo Sérgio Santos Góis os quais me auxiliaram durante Graduação.

Aos colegas Marcos Tibério de Siqueira e Rossana Calvacanti Araújo os quais desde que nos conhecemos, sempre fomos unidos, contribuindo para o tão sonhado objetivo, o Mestrado em Recursos Hídricos.

Aos colegas Klebber Teodomiro Martins Formiga e Gilliano Vieira Lima Borges, pelo auxílio na confecção de várias figuras apresentadas neste trabalho.

Aos colegas e funcionários do Laboratório de Hidráulica UFPB/Campus II, representados pela pessoa exemplar Alrezinha Dantas Veiga

e a todos aqueles, que de certa forma, contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta pesquisa.

Aos meus familiares, pela ajuda e incentivos recebidos ao longo da minha vida.

Ao professor José Dantas Neto pelas informações e catálogos referentes a irrigação em geral.

Agradeço, especialmente, ao professor orientador Heber Pimentel Gomes, o qual não faltou dedicação para a realização deste trabalho.

ABSTRACT

The use of trickle irrigation has increased last years, mainly due to great economy in water consume that it cause. However, the fact of being a fixed sistem, installation high costs inhibit its utilization. Trying to get the advantages that located irrigation offers, the present work has its objective to do an adaptation in the integrated economic optimization method (applied to conventional sprinkler irrigation systems) to the trickle irrigation. This methodology intends to minimize costs of distribution net, punping energy and equipment's parcel (developed by Gomes, in 1992). The results obtained showed a consistency with the methodology used in this work, it shows its efficacy, as efficient in conventional sprinkler as in trickle.

RESUMO

O uso da irrigação por gotejamento vem crescendo nos últimos anos, principalmente pela grande economia no consumo da água que a mesma proporciona. No entanto, por ser um sistema fixo, os elevados custos de instalação tendem a inibir a utilização desta técnica. Buscando aproveitar as vantagens que a irrigação localizada oferece, o presente trabalho tem como objetivo, fazer uma adaptação no método de otimização econômica integrada (aplicada à sistemas de irrigação por aspersão convencional) à irrigação por gotejamento. Tal metodologia visa a minimização do custo-conjunto da rede de distribuição, energia de bombeamento e equipamentos das parcelas (desenvolvida por Gomes, em 1992). Os resultados obtidos foram consistentes com a teoria da referida metodologia, o que demonstra sua eficácia, não só na irrigação por aspersão convencional, como também no gotejamento.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

<u>INTRODUÇÃO</u>	1
-------------------------	---

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS GERAIS DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO... 5

2.1 - INTRODUÇÃO	5
2.2 - CARACTERÍSTICAS DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO	5
2.3 - COMPONENTES DO SISTEMA	8
2.3.1 - Tubulação de adução.....	9
2.3.2 - Cabeçal de Controle.....	9
2.3.3 - Tubulações de distribuição e das parcelas.	10
2.3.4 - Distribuição do sistema a nível de campo.....	11
2.3.5 - Gotejadores.....	13
2.3.5.1 - Tipos de gotejadores.....	13
2.3.5.2 - Característica hidráulica	15
2.4 - INSTALAÇÃO DA PARCELA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO .	17
2.4.1 - Critério de Dimensionamento.....	17
2.4.2 - Dimensionamento das Tubulações	18
2.4.2.1 - Linhas Laterais.....	18
2.4.2.2 -Tubulação de Derivação	21

CAPÍTULO III

MODELOS DE OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA APLICADOS EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADA 22

3.1 - INTRODUÇÃO	22
3.2 - METODOLOGIA PROPOSTA POR GUIMARÃES JR. (1993).....	24
3.2.1 - Introdução	24
3.2.2 - A metodologia.....	24
3.3 - MÉTODO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	26
3.3.1- Descrição do modelo.....	26
3.3.2 - Formulação matemática.	28
3.3.3 - Considerações gerais.....	30
3.4 - MÉTODO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR.....	30
3.4.1 - Descrição do modelo.....	31
3.4.2 - Formulação matemática	32
3.5 - MÉTODO GRANADOS	34
3.5.1 - Introdução	34
3.5.2 - Determinação da solução inicial	35
3.5.3 - Processo de otimização de Granados.....	35
3.6 - O MÉTODO ESCOLHIDO	40

CAPÍTULO IV

<u>OTIMIZAÇÃO INTEGRADA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO</u>	42
4.1 - INTRODUÇÃO	42
4.2 - DADOS REFERENTES ÀS PARCELAS DE IRRIGAÇÃO.....	46
4.3 - PROCESSO OPERATIVO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO INTEGRADA	48

CAPÍTULO V

<u>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS</u>	56
5.1 - GENERALIDADES	56
5.2 - DIMENSIONAMENTO DAS PARCELAS.....	61
5.3 - OTIMIZAÇÃO INTEGRADA	68
5.3.1 - Solução de contorno ou de partida.....	68
5.3.2 - Processo iterativo	71

CAPÍTULO VI

<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	91
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	95

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Atualmente para se ter uma agricultura rentável e competitiva, faz-se necessário o uso da irrigação, principalmente sendo esta aplicada em regiões semi-áridas, onde a água é escassa e muitas vezes sua qualidade não convém para a prática agrícola. Segundo Molle e Cadier (1992), a irrigação se constitui, sem dúvida, num meio de intensificação da produção na propriedade, bem como de regularização, à medida em que permite uma produção na entre-safra e de se prevenir, em parte, contra os prejuízos provocados pela grande irregularidade das chuvas.

É muito importante aplicar os conhecimentos básicos sobre o uso da água para permitir que os projetistas elaborem sistemas que cumpram os verdadeiros requerimentos dos cultivos (Lopez et al, 1992). A irrigação em culturas “nobres” ou “rentáveis” é bastante desenvolvida, técnica e economicamente. Na busca de uma atividade cada vez mais competitiva, questiona-se a viabilidade econômica de técnicas alternativas que proporcionem a minimização dos gastos financeiros na instalação dos equipamentos, água e produtos químicos (Saad, 1993).

A generalização do uso da irrigação por gotejamento só foi possível com o advento dos plásticos às tubulações (Balogh e Gergely, 1985), se expandindo para o mundo a partir de 1959 (Daker, 1984). No Brasil, as primeiras experiências com a irrigação por gotejamento ocorreram no início da década de 70, e a partir de 1975 já estava em escala industrial (Guimarães Jr.).

A economia da água, a qual a irrigação por gotejamento proporciona, vem acarretando, nos últimos anos, um crescente uso deste tipo de sistema, em relação aos demais métodos pressurizados. Segundo Guimarães Jr. (1993), o crescimento da utilização da irrigação por gotejamento em todo Globo, é decorrente principalmente, da combinação de fatores vantajosos que este tipo de irrigação apresenta, frente à irrigação convencional. Withers e Vipond (1984), comenta que os efeitos da combinação do baixo déficit de umidade do solo e da fertilização da água a ser empregada, proporcionam aumentos de até 100 % na produção, por unidade de volume de água empregada, e até 25 % na produção, por hectare. Isso sem contar com muitas outras vantagens, como o alto potencial para automação total ou parcial do sistema (Matos, 1996).

Entretanto, em se tratando de um sistema fixo, seu custo de instalação torna-se elevado, limitando-se seu uso às culturas com alta capacidade de retorno, justificando o desenvolvimento de pesquisas que resultem na minimização dos custos dos equipamentos destes sistemas.

Buscando o menor custo, relacionado à economia da água, ao custo de energia, e aos gastos de implementação e operação em sistemas de irrigação pressurizados, várias técnicas de otimização econômica vem sendo desenvolvidas.

A aplicação de metodologias de otimização em dimensionamento de redes de distribuição de água, tem merecido especial atenção nas últimas décadas. Atualmente, com a acelerada capacidade computacional, torna-se imprescindível a utilização de tais técnicas, não apenas no dimensionamento, como também, na operação de tais sistemas.

A presente pesquisa, busca o dimensionamento ótimo do sistema de irrigação por gotejamento, que envolve a minimização do custo-conjunto: rede de distribuição, energia de bombeamento e equipamentos das parcelas de irrigação.

Para atingir tal objetivo, no decorrer dos capítulos deste trabalho, procurou-se, inicialmente (capítulo II), mostrar as características da irrigação por gotejamento, através de uma visão ampla, envolvendo algumas peculiaridades na relação solo-planta e os componentes do sistema.

No capítulo III, são mostradas as metodologias de dimensionamento analisadas neste estudo, que buscam a otimização da rede de distribuição, em função da energia de bombeamento do sistema. Para tanto, escolheu-se uma delas,

que melhor se adapta à técnica de otimização integrada, detalhada no capítulo IV, a qual insere a parcela de irrigação, fechando o objetivo desta pesquisa.

O capítulo V mostra a aplicação da metodologia de otimização integrada e a análise e discussão dos resultados. As conclusões finais e algumas sugestões para pesquisas futuras, são discutidas no capítulo VI.

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS GERAIS DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

2.1 - INTRODUÇÃO

O gotejamento é um método de irrigação pressurizada de alta frequência, no qual a água é aplicada em pequenas vazões (entre 1 a 10 l/h segundo Bernardo, 1986) sobre a zona radicular da planta, mediante dispositivos denominados **gotejadores**. Estes, são instalados em tubulações flexíveis (linhas laterais), estendidas sobre o terreno, paralelamente às fileiras das plantas.

2.2 - CARACTERÍSTICAS DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

A aplicação de pequenas vazões diretamente sobre a zona radicular da planta, faz com que a irrigação por gotejamento possua algumas características peculiares, no que diz respeito à relação entre a água, o solo e a planta:

- Superfície de solo molhado

Segundo Gomes (1994), para cada planta haverá uma superfície de solo molhado ao redor do gotejador que a abastece. Por essa razão, a grande

maioria das raízes se concentram e se desenvolvem dentro de um volume de solo, denominado bulbo úmido (figura 2.1).

No bulbo úmido as raízes encontram água efetivamente retida pelo solo, o que facilita de sobremaneira o processo de absorção radicular, garantindo fluxo adequado de água para atmosfera via transpiração, de sorte a proporcionar condições para melhor desenvolvimento e produção (Vieira, 1995).

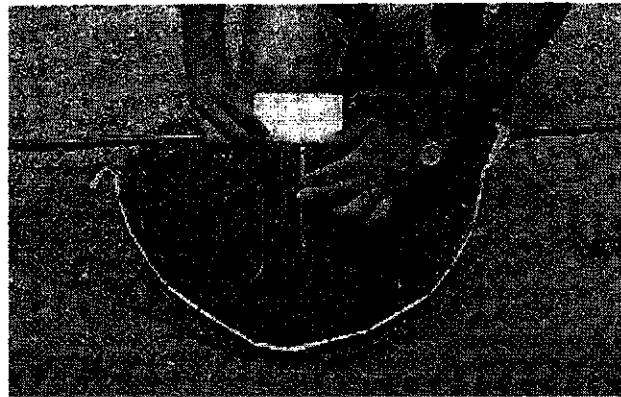


Figura 2.1 - Bulbo úmido (Lopez et al, 1992)

- Umidade do solo

Segundo Bernardo (1986), sendo um sistema de alta frequência (turno de irrigação de um a quatro dias), praticamente a umidade do solo irrigado permanece invariável, próxima à capacidade de campo.

Este aspecto, unido a uma melhor aeração do solo (devido às pequenas vazões dos gotejadores), contribui para um melhor aproveitamento de água e adubos pelas culturas irrigadas por este método.

- Efeito sobre a salinização

Os sais no bulbo úmido tendem a se concentrar e a formar uma crosta na camada periférica do mesmo. Cabello (1996), comenta que os solos lavados com água de chuva, possibilitam a eliminação da crosta salina.

Gomes (1994) cita que, na ausência de chuvas necessárias para arrastar estes sais, é recomendável aplicar doses ou lâminas suplementares de irrigação para lixiviar os sais do solo. Caso contrário, o problema da acumulação de sais neste sistema é muito mais prejudicial do que nos demais sistemas de irrigação.

- Fertirrigação

O suprimento de adubos dissolvidos aplicado pelos emissores torna-se necessário, já que a maioria das raízes da planta se concentra no bulbo úmido. Como consequência da aplicação controlada de fertilizante à planta, a cultura terá evidentemente um maior desenvolvimento vegetativo.

2.3 - COMPONENTES DO SISTEMA

A figura 2.2 mostra o esquema básico da instalação de um sistema de irrigação por gotejamento, onde se observa os componentes principais: tubulação de adução, cabeçal de controle, tubulação de distribuição e gotejadores.

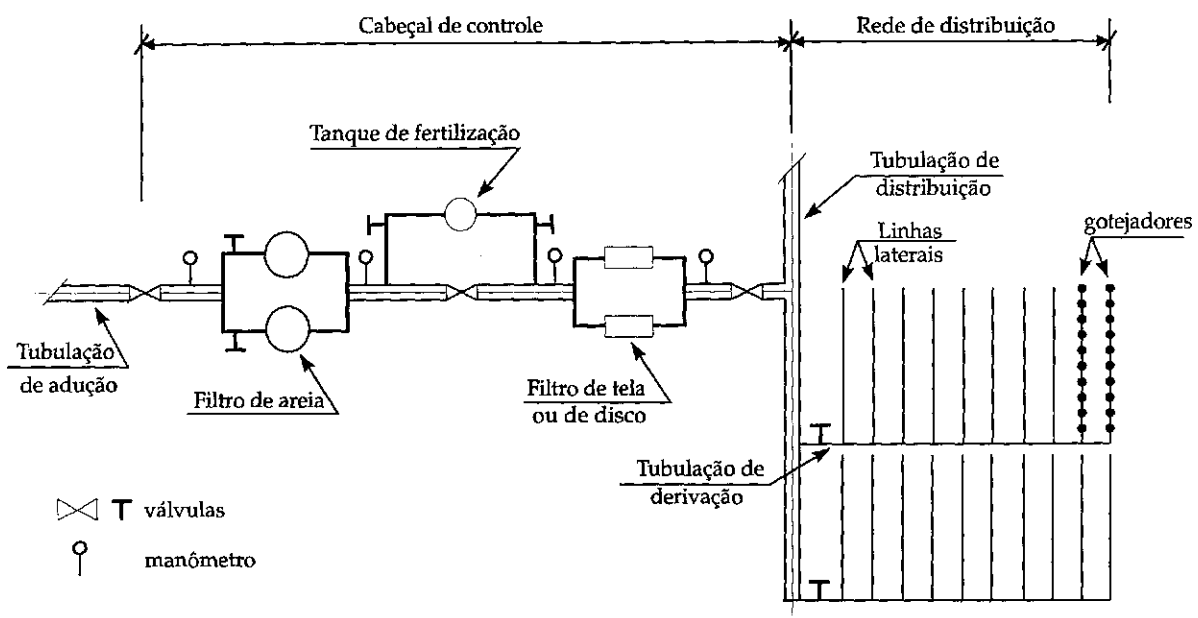


Figura 2.2 - Esquema básico de um sistema de irrigação por gotejamento (Gomes, 1994)

2.3.1 - Tubulação de adução

A tubulação de adução recebe água de uma rede coletiva, alimentada por uma estação central de bombeamento, ou de uma simples estação elevatória, que abastece independentemente o sistema. Se a água disponível está a uma cota suficientemente alta, com relação à área a irrigar, não haverá a necessidade de se dispor de um sistema de impulsão ou bombeamento.

A rede de distribuição dispõe também de válvulas reguladoras de pressão, que são imprescindíveis nos sistemas de irrigação por gotejamento, para garantir a uniformidade de vazão nos gotejadores da instalação.

2.3.2 - Cabeçal de Controle

Basicamente o cabeçal de controle consta de um ou mais filtros, um equipamento de fertilização, e as peças especiais de regulagem e controle (válvulas, ventosas, manômetros, etc.).

Após o procedimento de filtragem (retenção de areia, algas, sementes, insetos, argilas, etc.) a água deve estar com um alto grau de limpeza, evitando entupimentos nos gotejadores, os quais afetam na uniformidade e eficiência da irrigação.

2.3.3 - Tubulações de distribuição e das parcelas.

A extensão das redes de distribuição é função da superfície que se pretende beneficiar. As redes podem ser constituídas a partir de uma simples tubulação que alimenta diretamente as laterais de um sistema individual de uma parcela, até uma rede coletiva ramificada, com centenas de trechos, que abastece os múltiplos lotes de um perímetro irrigado. As metodologias de dimensionamento das redes de distribuição, serão descritas no capítulo III.

Para tubulações de pequenos diâmetros, que transportam pequenas vazões requeridas nas parcelas irrigadas, os tubos de plástico são economicamente mais competitivos e mais fáceis de instalar e transportar. As tubulações laterais são quase sempre de polietileno flexível e seus espaçamentos estão condicionados pelas distâncias entre as fileiras das culturas a irrigar (figura 2.3). Em termos econômicos, as tubulações de polietileno oferecem mais vantagens do que as de PVC para diâmetros menores do que 50 mm (mais flexíveis). Além do mais, as tubulações flexíveis de polietileno são instaladas com mais comodidade e quase não necessitam de peças de conexão (Gomes, 1994). Tibau (1984) sugere o uso da tubulações de cor preta, para evitar proliferação de algas.

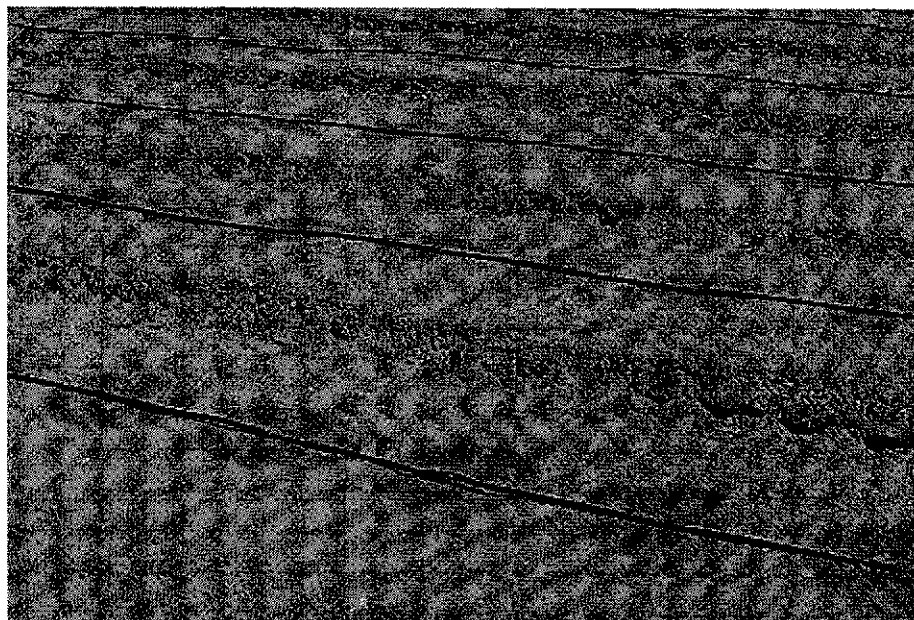


Figura 2.3 - As linhas laterais e os gotejadores apresentam-se igualmente espaçados segundo a cultura à irrigar (Lopez et al 1992)

2.3.4 - Distribuição do sistema a nível de campo

Segundo Bernardo (1986), os sistemas de irrigação por gotejamento devem ser dispostos, de modo que tenham a menor variação de nível ao longo das linhas laterais. Em terrenos mais declivosos, as linhas laterais devem ser dispostas em curva de nível.

A tomada da parcela deve ser instalada, na medida do possível: na parte mais elevada do terreno (de modo que tenha a menor variação de pressão nas entradas das linhas laterais) e que proporcione um menor comprimento da linha principal.

Guimarães Jr. (1993), cita diferentes tipos práticos de “layout” (ver figura 2.4): em **H**, que resulta um menor custo para as tubulações da parcela; em **T**, utiliza menor número de linhas de derivação e/ou principais; e os “layout’s” em **C** e em **L**, recomendados para terrenos com grandes declividades (compensação da perda de carga nas linhas laterais, devido a topografia)

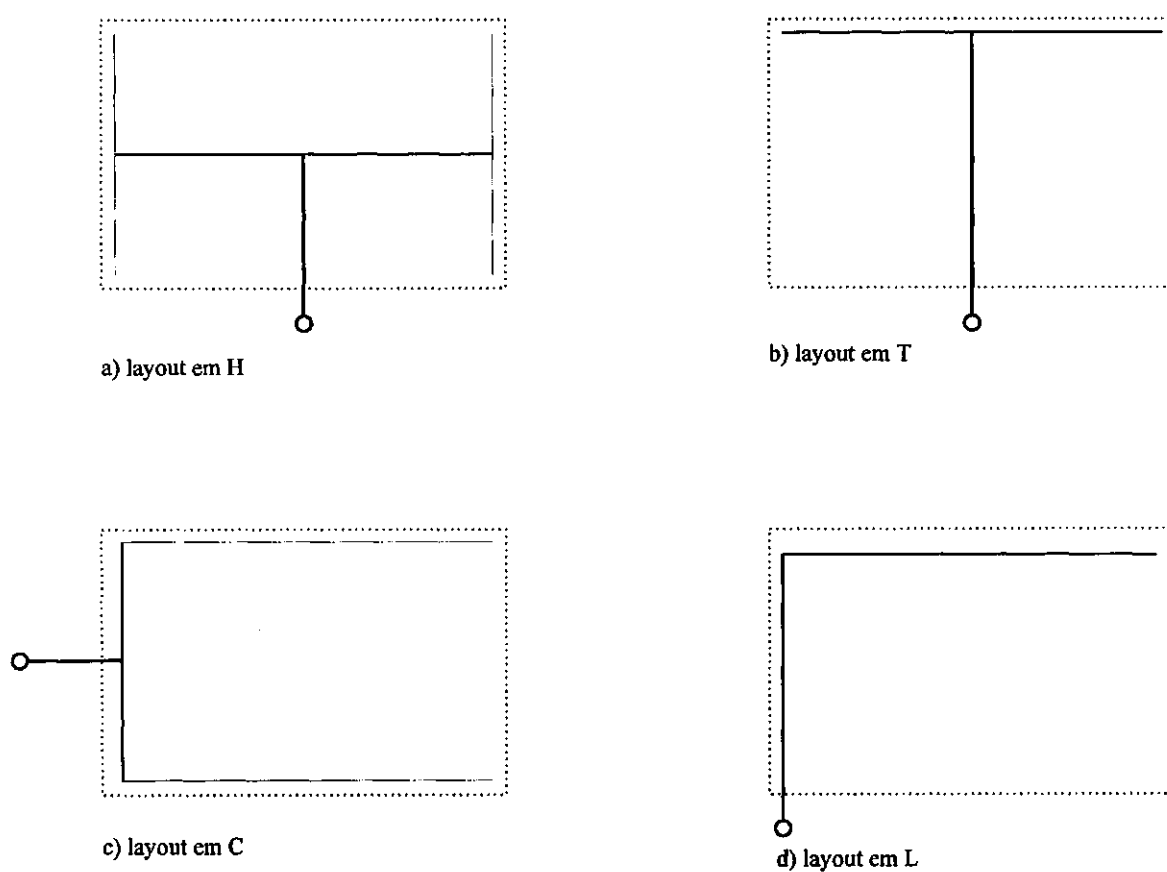


Figura 2.4 - Tipos de “layout” para uma parcela de irrigação por gotejamento

2.3.5 - Gotejadores

Os gotejadores constituem a parte mais sensível do sistema de irrigação por gotejamento, devendo assegurar o suprimento de pequenas vazões com orifício de diâmetro suficiente, que evite entupimento e proporcione uma uniformidade de irrigação aceitável. Para a ocorrência da vazão em forma de gotas, os emissores dissipam a energia, reduzindo a pressão nominal para zero (de sua entrada para sua saída).

2.3.5.1 - Tipos de gotejadores

Para assegurar as pequenas vazões de projeto, os orifícios dos gotejadores têm que ser bastante pequenos (com diâmetros variando entre 0,5 e 1,5 mm, cita Daker, 1984), o que os tornam extremamente sensíveis aos entupimentos.

A variedade de gotejadores existente no mercado é muito grande, devido a busca dos fabricantes em torná-los eficientes, resistentes e baratos. De uma maneira geral, os gotejadores podem ser classificados, segundo a forma com que a energia de pressão é dissipada, em três categorias: gotejadores de longo percurso, curto percurso e tipo vórtice.

Nos gotejadores de longo percurso, a perda de energia é produzida através de um conduto capilar de longo percurso (figura 2.5). Podem apresentar

também, formas compactas com percurso da água realizado através de trajetórias em forma de labirinto ou de espiral (figura 2.6)

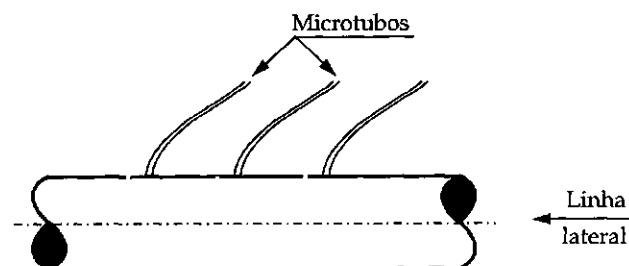


Figura 2.5- Microtubos instalados em derivação (Gomes, 1994)

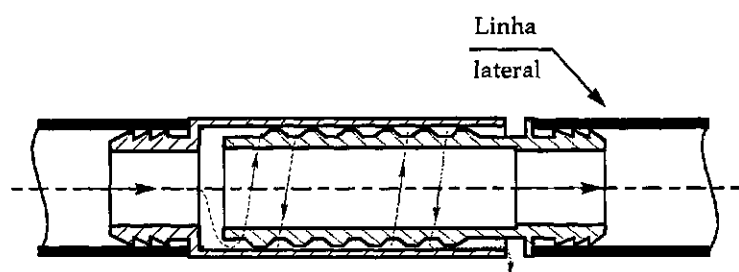


Figura 2.6- Gotejador de longo percurso tipo espiral (Gomes, 1994)

Nos gotejadores de curto percurso a dissipação da energia de pressão se realiza devido às perdas de carga por atrito (pela forma sinuosa da trajetória da água e as contrações e expansões do fluxo dentro do emissor).

O gotejador tipo vórtice apresenta uma câmara circular com entrada tangencial obtendo um movimento rotacional da água (figura 2.7).

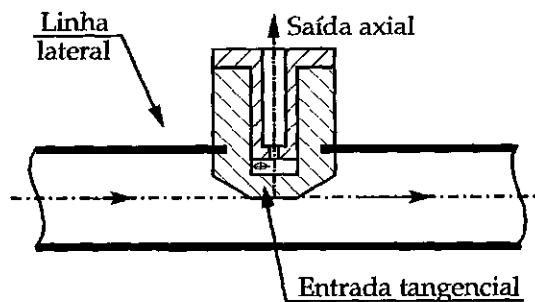


Figura 2.7- Gotejador tipo vórtice (Gomes, 1994)

Os gotejadores de longo percurso, de curto percurso e do tipo vórtice podem ser ainda autocompensantes, quando dispõem de dispositivos de autorregulação da vazão de saída d'água, perante às variações da pressão de serviço. São bastante adequados para terrenos de relevo acidentado, ou quando se pretende instalar linhas laterais de maiores comprimentos. Estes emissores possuem no seu interior uma membrana de material sintético flexível, que faz com que a seção de passagem d'água diminua com o aumento da pressão. Porém são mais caros que os outros tipos.

2.3.5.2 - Característica hidráulica

Howard (1984), Fernandez (1986) e Gomes (1994) e, citam que, o comportamento hidráulico dos gotejadores está caracterizado, de uma maneira geral, através da expressão exponencial da vazão:

$$q = K_d \cdot h^x \quad (2.1)$$

Em que:

q = vazão ou descarga do gotejador

K_d = coeficiente de proporcionalidade ou de descarga, que depende da forma e tamanho da seção transversal do gotejador

h = pressão de serviço do gotejador, em altura de coluna d'água

x = expoente de descarga do gotejador

O expoente "x", que depende do regime do fluxo d'água através do emissor, indica a relação entre a pressão de serviço do gotejador e a vazão de saída correspondente.

Quanto mais baixo for o valor de x, menor será a flutuação da vazão, perante a variação da pressão na entrada do gotejador. Se o fluxo d'água através do gotejador é realizado em regime laminar, x é igual a 1 e a vazão do gotejador varia linearmente com a pressão. Para gotejadores que funcionam em regime turbulento, x é igual a 0,5, significando que a vazão do emissor é menos sensível à variação da pressão (q varia com a raiz quadrada de h). Para um gotejador totalmente autocompensante, x assume o valor zero.

A seleção definitiva do tipo de gotejador depende de vários fatores: topografia do terreno a irrigar, qualidade da água disponível, uniformidade de

irrigação desejada, influência do custo dos gotejadores no orçamento da instalação, etc. Como orientação, deve-se selecionar um gotejador pouco sensível à variação de pressão (baixo expoente x) quando o terreno é acidentado ou quando se utilizam linhas laterais de grandes comprimentos.

Para que ocorram pequenas variações de vazão nos gotejadores será necessário dotar a instalação de excelentes gotejadores, e/ou evitar maiores perdas de carga no sistema (utilização de tubulações de maiores diâmetros e emprego de maiores quantidades de peças reguladoras de pressão).

2.4 - INSTALAÇÃO DA PARCELA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

2.4.1 - Critério de Dimensionamento

O critério hidráulico de dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento, consiste no estabelecimento das variações admissíveis de pressão na instalação, ao longo da rede de distribuição, podendo ser controlada mediante três opções: através de uma válvula situada na tomada d'água (a perda de carga admissível em toda parcela será repartida entre as linhas laterais e a tubulação de derivação); por meio de válvulas localizadas nas entradas das linhas laterais (sendo necessário limitar a variação de pressão ao longo da tubulação de derivação e por isso, toda a perda de carga admissível na parcela poderá ocorrer nas linhas laterais); ou com a instalação de gotejadores autocompensantes (garantem uma aceitável

uniformidade de descarga, mesmo que exista uma variação de pressão ao longo e entre as linhas laterais).

2.4.2 - Dimensionamento das Tubulações

O dimensionamento das tubulações de um sistema de irrigação por gotejamento, se executa seguindo o sentido inverso do fluxo d'água na rede de distribuição. Consiste no cálculo de seus diâmetros e na determinação da pressão e vazão na entrada dos condutos (linhas laterais, de derivação e os trechos da rede de distribuição), em função dos dados agronômicos básicos, do esquema da instalação e do critério de dimensionamento.

2.4.2.1 - Linhas Laterais

O dimensionamento consiste no cálculo da vazão e pressão distribuídas ao longo da tubulação lateral, com seus respectivos diâmetros e comprimentos.

As linhas laterais, com seus gotejadores, transportam a água de forma análoga às tubulações com múltiplas saídas, igualmente espaçadas. Caracterizam-se por escoar uma vazão decrescente desde sua entrada, igual à soma das descargas dos emissores da lateral, até o valor correspondente à vazão do último gotejador. Por esta razão, a perda de carga por atrito ao longo da linha lateral (sem considerar as perdas localizadas) será sempre menor do que a perda que corresponderia, no

caso em que não houvesse derivações para os gotejadores. Lopez et al (1992) cita que, a perda de carga é obtida pela expressão:

$$h_f = j L F \quad (2.2)$$

Em que:

h_f = perda de carga total na linha lateral

j = perda de carga unitária na linha lateral, considerada sem derivações para os gotejadores

L = comprimento da linha lateral

F = coeficiente de redução de Christiansen $F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2}$, onde m é o coeficiente que depende da perda de carga unitária utilizada: Hazen-Willians, 1,85; Scobey, 1,9; Darcy, 2,0 (Bernardo, 1986).

A perda de carga unitária (j) se determina em função da soma das vazões dos gotejadores da lateral e do diâmetro selecionado para a tubulação. Para essa determinação podem ser empregadas as equações de Darcy-Weissbach, Hazen-Willians, Scobey, entre outras, amplamente citadas nas bibliografias especificadas, que são suficientemente precisas para as tubulações de plástico de pequenos diâmetros.

Após a determinação da perda de carga (h_f), é necessário comprovar se o valor obtido cumpre a restrição de variação de pressão admitida na linha lateral. Para tanto, se pode utilizar a regra dos 20 % (condição empírica de que a

diferença máxima de carga entre dois gotejadores quaisquer da linha lateral, não ultrapasse 20% da pressão nominal adotada pelos mesmos).

Segundo Gomes (1994), sendo as perdas de carga localizadas ao longo das linhas laterais de difícil quantificação, seu valor individualizado na prática se supõe incluído na perda de carga contínua (utilizando-se critérios de majoração), não considerando as peças especiais de regulação e controle da rede (válvula ou hidrante localizado na entrada da linha lateral).

A distribuição da perda de carga ao longo da tubulação será aproximadamente igual a 75 % da perda de carga total, para linha lateral com um diâmetro, e cerca de 63 % caso utilize-se dois diâmetros, comercialmente consecutivos (valores obtidos experimentalmente). Portanto, a pressão requerida na entrada da linha lateral, necessária para fornecer a pressão média de funcionamento aos gotejadores, se determina através das expressões 2.3 e 2.4.

- Linha lateral com um diâmetro:

$$H = h + 0,75h_f \pm \frac{\Delta Z}{2} \quad (2.3)$$

- Linha lateral com dois diâmetros:

$$H = h + 0,63h_f \pm \frac{\Delta Z}{2} \quad (2.4)$$

Em que:

H = pressão requerida na entrada da linha lateral, em mca

h = pressão nominal dos gotejadores, em mca

h_f = perda de carga ao longo da linha lateral, em mca

$\pm \Delta Z/2$ = diferença de carga estática média devido ao desnível geométrico da linha lateral, em metros. Ascendente (+), descendente (-).

2.4.2.2 -Tubulação de Derivação

São tubulações (normalmente de PVC rígido ou polietileno) onde são conectadas as linhas laterais.

Gomes (1994), cita que o comportamento hidráulico da tubulação de derivação é similar ao de uma linha lateral, portanto válidas as mesmas equações utilizadas em seu dimensionamento. As variáveis e parâmetros das equações 2.3 e 2.4 (H , h , h_f e $\pm \Delta Z/2$) terão os seguintes significados:

H = pressão requerida na entrada da tubulação de derivação, em mca

h = pressão requerida na entrada da linha lateral, em mca

h_f = perda de carga ao longo da tubulação de derivação, em mca

$\pm \Delta Z/2$ = diferença de carga estática média devido ao desnível geométrico da tubulação de derivação, em metros. ascendente (+), descendente (-).

CAPÍTULO III

MODELOS DE OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA APLICADOS EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADA

3.1 - INTRODUÇÃO

Otimizar, consiste na seleção dentre um conjunto de possíveis alternativas, uma que seja ótima de acordo com um dado critério. O objetivo principal dos diversos métodos de otimização de redes de distribuição de água é encontrar o menor custo do sistema, atendendo aos requerimentos hidráulicos. Dois aspectos contribuíram para o aperfeiçoamento das técnicas de otimização: o surgimento do computador de alta velocidade e a aplicação de técnicas numéricas.

No caso de redes de distribuição de água para irrigações, as condições iniciais a serem definidas são: vazão, pressão e volume (Serrano, 1990). No dimensionamento já devem ser conhecidas: cotas topográficas, condições técnicas, condições de construção, financiamento e manutenção. Deseja-se determinar: diâmetros da tubulação e cotas piezométricas dos principais pontos da rede.

Existe uma relação econômica entre a rede de distribuição e a estação de bombeamento. Quando a rede de distribuição é abastecida mediante estação de

bombeamento, o dimensionamento das tubulações depende da cota piezométrica de cabeceira. Mantendo-se constante as classes dos tubos, quanto maior for a mesma, menor será o custo da rede, já que neste caso poderão ser selecionados tubos de menores diâmetros, apesar de que os custos de energia necessária serão maiores. De maneira oposta, com a diminuição da altura de bombeamento haverá uma diminuição do consumo de energia e um aumento no custo de investimento da rede (utilização de tubulações com diâmetros de maior calibre). Portanto, deve-se encontrar o equilíbrio entre ambos custos para se obter um projeto ótimo.

Nas duas últimas décadas foram desenvolvidos vários métodos de otimização de sistemas de abastecimento d'água, que proporcionam o custo mínimo da rede de tubulações ramificadas pressurizadas, com seu sistema de bombeamento. Contudo, em sua grande maioria, são limitados, por não considerarem, em suas metodologias de cálculo, todos os fatores que influem no dimensionamento das redes.

Nesta pesquisa, foram analisadas quatro metodologias de otimização econômica de sistemas pressurizados, que envolvem uma quantidade significativa de variáveis admitidas pelos seus modelos de cálculo. A primeira se relaciona apenas com a parcela de irrigação por gotejamento. As três seguintes, buscam o custo mínimo da rede de distribuição, mais a estação de bombeamento,

fundamentadas em modelos matemáticos de programação linear, não-linear e dinâmica.

3.2 - METODOLOGIA PROPOSTA POR GUIMARÃES Jr. (1993)

3.2.1 - Introdução

A metodologia proposta por Guimarães Jr. (1993) faz uma reavaliação da metodologia recomendada por Keller e Karmeli (1975), para o projeto ótimo de uma parcela irrigada por gotejamento. Tal metodologia utiliza parâmetros relacionados com o formato e a distribuição da perda de carga nos ramais e na tubulação de derivação, tendo como base custos de equipamentos. A adaptação proposta, adiciona a determinação do ponto de tomada d'água como um novo parâmetro de otimização.

3.2.2 - A metodologia

Segundo Guimarães Jr. (1993), a metodologia proposta por Keller e Karmeli (1975), consiste num processo analítico de minimização de custo das tubulações, por unidade de área de uma parcela por gotejamento. Refere-se como parâmetros de otimização, o formato da parcela, a distribuição da perda de carga nas linhas laterais e na tubulação de derivação da mesma.

Guimarães Jr. (1993) propõe uma metodologia alternativa para a metodologia citada acima, baseada nos elementos de projeto e fatores de custos das

tubulações disponíveis no mercado. O estudo baseia-se numa parcela plana e horizontal, sendo que os efeitos das possíveis inclinações do terreno serão compensados por deslocamentos convenientes dos pontos de entrega da água nas tubulações.

Utilizou-se um modelo analítico clássico, onde as condições de otimização são determinadas a partir da minimização de funções de múltiplas variáveis, baseando-se em primeiras e segundas derivadas parciais da função objetivo, que relaciona o custo conjunto das tubulações das parcelas, para determinação do formato ótimo e da relação ótima entre as perdas nos ramais de derivação.

As variáveis do problema de otimização são: a área, variação de pressão na parcela, vazão dos gotejadores, e espaçamentos entre gotejadores e entre as linhas laterais. Os fatores de otimização são: o formato da parcela, definido pelo comprimento das linhas laterais, a relação entre as perdas de carga das tubulações da parcela, e o ponto de entrega da água nestas tubulações.

Verificou-se que a modificação do “layout” (sob as formas em “H”, “T”, “C” e “L”), juntamente com o ponto de entrega otimizado, são os fatores mais importantes no processo de otimização da parcela.

Guimarães Jr. conclui que não houve diferenças significativas nos parâmetros do modelo com os de Keller e Karmeli, em decorrência do processo de discretização dos diâmetros das tubulações.

Na sua aplicação, verificou-se que o “layout - H” proporcionou o menor custo para a instalação das parcelas. Em “T”, exigiu menor número de linhas secundárias e/ou principais. Os “layout” em “C” e em “L”, são recomendados para irrigação em encostas, com grandes declividades (compensação de perda de carga nos ramais, pela topografia do terreno).

3.3 - MÉTODO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO LINEAR

Segundo Gomes (1994), esse modelo matemático foi introduzido na otimização de redes de distribuição ramificadas, por Karmeli et al (1968). É utilizado quando o problema físico proposto pode ser expresso mediante funções e restrições lineares.

3.3.1- Descrição do modelo

Segundo Alzamora e Tárrega (1987), no modelo de programação linear, os diâmetros são variáveis implícitas do problema. Os comprimentos de diferentes diâmetros, que vão formar parte de um trecho, serão as variáveis de decisão. Como o comprimento das tubulações apresenta uma relação linear com seu custo, o modelo estabelece um problema de programação linear.

Através da relação econômica entre a altura de bombeamento e a rede de distribuição (diâmetros das tubulações), deverá haver uma função objetivo de modo que atinja um equilíbrio entre ambos os custos: energia de bombeamento e instalação da rede de distribuição, como se observa na figura 3.1.

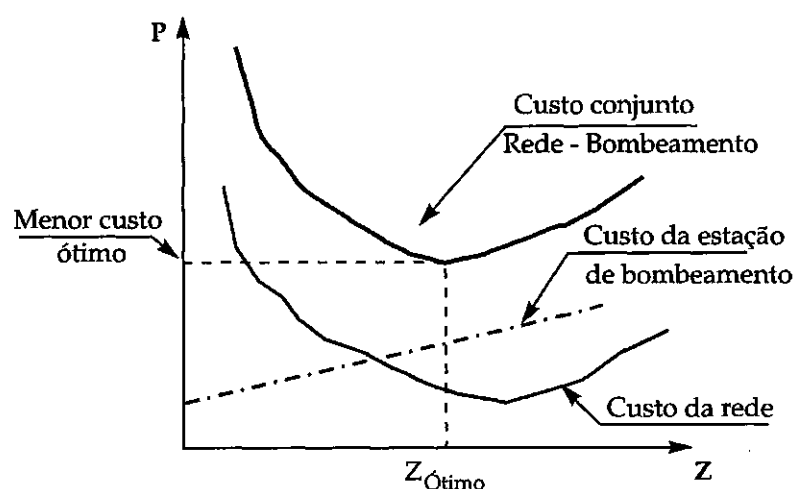


Figura 3.1: Curva que representa a otimização conjunta rede de distribuição - energia de bombeamento

O modelo determina o comprimento do tubo em cada trecho, para cada possível diâmetro. Caso um certo diâmetro não seja utilizado no trecho, este terá como solução o comprimento nulo. Permite-se assim, que o projetista possa limitar o conjunto de diâmetros possíveis, dentre os comercialmente disponíveis, evitando uma solução final constituída de diâmetros não-comerciais.

As restrições de pressão terão de satisfazer todas as condições de funcionamento de fluxo mínimo e máximo.

3.3.2 - Formulação matemática.

Segundo Gomes (1994), a formulação matemática do método apresenta a seguinte estrutura:

- Função objetivo (Fo)

$$Fo = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n l_{ij} \cdot P(D_j)_i \quad (3.1)$$

Objetiva-se minimizar o custo conjunto da energia de bombeamento mais a rede de distribuição, ou seja:

$$\text{MIN } [C_T] = \text{MIN} \left[C_h \cdot H + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a \cdot l_{ij} \cdot P(D_j)_i \right] \quad (3.2)$$

Em que:

C_T = custo total da rede de distribuição mais energia de bombeamento, em reais

C_h = custo de investimento e operação da estação de bombeamento por unidade de altura de impulsão, em reais

H = altura de impulsão da cabeceira da rede, em metros

a = fator de amortização do custo das tubulações

l_{ij} = comprimento ocupado pelo diâmetro D_j do trecho i , em metros

$P(D_j)_i$ = preço unitário do tubo de diâmetro D_j no trecho i , em reais

m = número de trechos da rede de distribuição

n = número de diâmetros comerciais atribuídos ao trecho i

- Equações de restrições impostas à função objetivo

a) As pressões nos nós terminais das parcelas não sejam inferiores às requeridas para à irrigação:

$$Z - \sum_{i=1}^k J_i \geq Z_k \quad (3.3)$$

onde:

Z = cota piezométrica de cabeceira da rede ($Z_0 + H$), em metros

Z_k = cota piezométrica requerida na tomada d'água k , em metros

$\sum_{i=1}^k J_i$ = somatório das perdas de carga na artéria correspondente ao percurso desde a cabeceira até a tomada k , em metros.

b) A soma dos comprimentos l_{ij} correspondentes aos distintos diâmetros D_j de cada trecho i , seja igual ao comprimento total de cada trecho.

$$\sum_{j=1}^n l_{ij} = L_i \quad (3.4)$$

c) Todas as variáveis de decisão devem ser positivas e não-nulas

$$l_{ij} \geq 0 \quad (3.5)$$

A solução final, proporcionará, para cada trecho i , um ou dois comprimentos (l_j) dos seus respectivos diâmetros comerciais (D_j), dentre os atribuídos. Para os diâmetros restantes seus comprimentos serão nulos.

3.3.3 - Considerações gerais

A escolha da relação de diâmetros é arbitrária, convém-se utilizar três ou quatro diâmetros comerciais consecutivos, com base na metodologia da velocidade máxima admissível.

No processo de otimização, não se considera a variação do custo das tubulações segundo as pressões de trabalho que atuam sobre elas.

Os resultados do dimensionamento da rede coletiva de distribuição em conjunto com a energia de bombeamento, alcançados através da programação linear, se aproximam bastante do custo ótimo procurado. Caso se pretenda fazer uma análise de sensibilidade do problema, verificando-se a variação do custo da rede em função da carga disponível na cabeceira, faz-se necessário executar várias vezes o modelo de otimização, para diferentes cotas de cabeceira da rede de distribuição (Gomes, 1994).

3.4 - MÉTODO BASEADO NA PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

A metodologia considera os diâmetros como variáveis explícitas. Portanto, tanto a função objetivo quanto as restrições do modelo são não-lineares.

3.4.2 - Formulação matemática

- Função objetivo (Fo):

$$Fo = \sum_{i=1}^n \cdot L_i C(D_i) \quad (3.6)$$

Adicionando o custo da energia de bombeamento à função objetivo,

tem-se:

$$\text{MIN } [C_T] = \text{MIN} \left[C_h \cdot H_a + \sum_{i=1}^n \cdot L_i C(D_i) \right] \quad (3.7)$$

C_T = custo total da rede de distribuição mais energia de bombeamento, em reais

C_h = custo unitário da energia, em reais

H_a = altura manométrica de impulsão na cabeceira da rede, em metros

L_i = comprimento do trecho i, em metros

D_i = diâmetro do tubo no trecho i, em milímetros

$C(D)$ = função que relaciona o preço do tubo com o diâmetro, em reais

- Equações de restrições impostas à função objetivo:

$$D_i \geq D_{min} \quad (3.8)$$

$$H_a + H_c - H_k - \sum_j J_i \geq P_{min} \quad (3.9)$$

$$H_a, D_i \geq 0 \quad (3.10)$$

Em que:

H_a = altura manométrica de impulsão na cabeceira da rede, em metros.

D_i = diâmetro do tubo no trecho i , em milímetros.

H_c = cota geométrica de cabeceira, em metros.

H_k = cota geométrica no nó k , em metros.

$\sum J_j$ = perda de carga na artéria j , em mca

P_{\min} = pressão mínima requerida no nó k , em mca

Os diâmetros encontrados como solução ótima são variáveis contínuas, ou seja, os valores obtidos não são encontrados comercialmente. 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.

Saad (1993) aconselha o emprego da programação linear para determinar os comprimentos de cada trecho da rede. O método é formulado supondo que cada trecho possua dois diâmetros, previamente definidos como no caso anterior, e que cada um deles ocupe 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.

3.5 - MÉTODO GRANADOS

3.5.1 - Introdução

Segundo Leal (1995), fundamentado em programação dinâmica, o método desenvolvido por Alfredo Granados (1990) considera em seu processo de otimização, a variação dos preços das tubulações em função dos seus diâmetros, classes e tipo de material. É composto de duas etapas, a primeira consiste na solução prévia (obtenção dos diâmetros mínimos admissíveis para os trechos da rede). A segunda etapa consiste na execução de um processo iterativo, que reduz gradualmente a cota piezométrica da rede de distribuição, o qual fornece os custos otimizados em função da mesma.

Segundo Ventsel (1983), a programação dinâmica é um método de otimização, especialmente adaptado à operação dos múltiplos passos. A idéia de otimização gradual, passo a passo, serve de embasamento para este método. Parte-se do princípio de 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 do que resolver, em uma só vez, um problema complexo.

3.5.2 - Determinação da solução inicial

Na solução prévia, determina-se os diâmetros mínimos admissíveis das tubulações em função das suas velocidades máximas admissíveis, com base no critério de restrição de velocidades adotado e na vazão de projeto. Posteriormente, calcula-se as perdas de carga correspondentes e a cota piezométrica de cabeceira inicial (Z_0), estritamente necessária para atender aos requerimentos de pressão nos terminais e superar as perdas de carga em toda rede.

3.5.3 - Processo de otimização de Granados

Após a solução inicial, tendo em mãos os dados da cota da cabeceira, as tubulações com seus diâmetros e classes, e o custo da rede, inicia-se a segunda etapa do método.

Utiliza-se um processo iterativo de operações, que reduz gradualmente a cota piezométrica de cabeceira, até alcançar o ponto desejado pelo projetista, ou quando este proporcione o menor custo conjunto da rede de distribuição mais a estação de bombeamento, levando-se em conta que, em cada iteração, ocorra o mínimo acréscimo de custo possível.

Para uma melhor compreensão de cada passo, referente a segunda etapa do método, tem-se na figura 3.2 uma rede de distribuição esquematizada, admitindo-se estar dimensionada de acordo com a solução prévia. Nela existem seis trechos e também seis nós, numerados de 1 a 6.

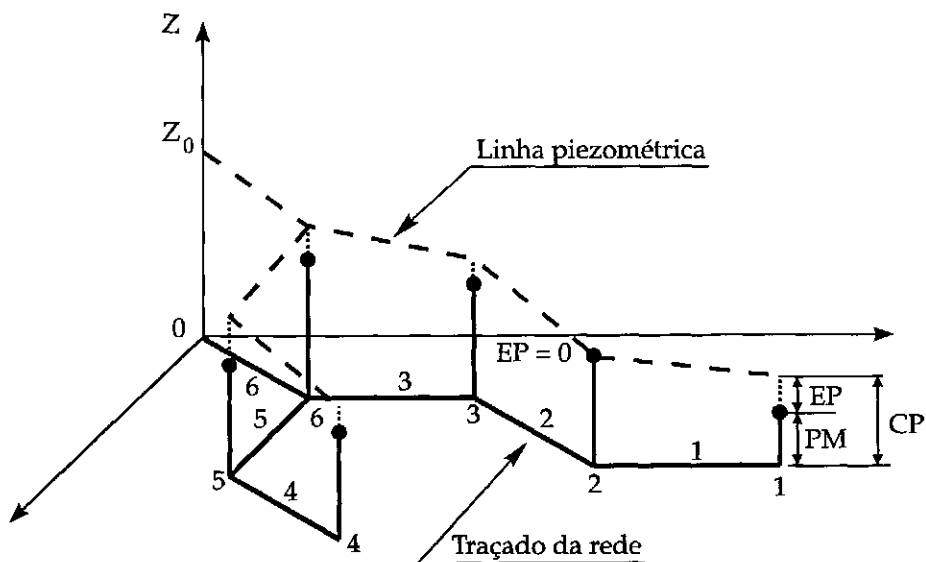


Figura 3.2 - Rede de distribuição fictícia (Gomes, 1994)

Observa-se a linha piezométrica sobre a rede, as cotas piezométricas (CP), as piezométricas mínimas (PM) e os excessos de pressão (EP), estes últimos, todos são não negativos, ou seja, $EP \geq 0$, e pelo menos em um nó (após a solução prévia), o valor de EP deve ser igual a zero.

Para reduzir a cota Z_0 em um decréscimo de pressão (ΔZ) sem prejudicar o desempenho hidráulico da rede, necessita-se diminuir a perda de carga em algum dos trechos compreendidos entre a origem 0 até o nó 2, pois neste

percurso contém um nó onde $EP = 0$ (nó 2). Uma modificação no diâmetro de qualquer trecho localizado fora do percurso 0-2 aumentaria o custo da rede e não reduziria a cota de cabeceira, já que não se pode baixar o valor da cota piezométrica no nó com EP nulo ($CP = PM$).

A mudança de um diâmetro pelo seu consecutivo superior, representará um aumento de custo do trecho por cada metro de diminuição de perda de carga. A razão entre este acréscimo de custo e a redução da perda de carga correspondente, é chamada de **gradiente de câmbio** (C). Assim, para um determinado trecho de comprimento L , o custo, da substituição do diâmetro inicial D_1 (com custo unitário P_1 e perda de carga unitária j_1) pelo diâmetro nominal imediatamente superior D_2 (custo unitário P_2 e perda de carga unitária j_2), é expresso por:

$$C = \frac{P_2 - P_1}{j_1 - j_2} \quad (3.11)$$

Em que:

C = gradiente de câmbio, em reais por metro

P_1 = preço unitário da tubulação com diâmetro inicial, em reais

P_2 = preço unitário da tubulação com diâmetro comercial imediatamente superior, em reais

j_1 = perda de carga unitária da tubulação com diâmetro inicial, em metros

j_2 = perda de carga unitária da tubulação com diâmetro comercial imediatamente superior, em metros

Define-se por **gradiente de câmbio ótimo** (C^*), o menor valor dentre todos os gradientes de câmbio do(s) percurso(s) que contém um nó com $EP = 0$. O respectivo trecho correspondente a C^* se chama **trecho ótimo** (T^*). Portanto, na figura 3.2, para se baixar a cota de cabeceira com o menor acréscimo possível de custo da rede, aumenta-se o diâmetro do trecho de menor gradiente de câmbio (trecho ótimo) pertencente ao percurso formado pelos trechos 6, 3 e 2. Ocorre então, a redução de perda de carga que é dada pela diferença entre as que ocorrem no trecho ótimo (T^*), relativas aos diâmetros D_1 e o imediatamente superior D_2 , ou seja:

$$\Delta J = J_1 - J_2 \quad (3.12)$$

A diminuição que efetua-se na cota de cabeceira da rede (ΔZ) será o menor valor entre a redução de perda de carga disponível no trecho ótimo (ΔJ_{disp}) e o mínimo excesso de pressão (EP_{min}), existente em toda a rede (com exceção dos valores de EP dos nós situados a jusante dos trechos ótimos). Para a rede fictícia da figura 3.2, o decréscimo ΔZ será igual ao menor dos valores entre ΔJ_{disp} do trecho ótimo e EP_{min} de todos os nós da rede, com exceção dos nós que estão a jusante do trecho ótimo (nós 1 e 2). Existirão, portanto, duas alternativas:

1 - Quando $\Delta J_{disp} < EP_{min}$, o ΔZ será igual ao valor ΔJ_{disp} , e todo o trecho ótimo será ocupado pelo diâmetro de maior calibre. Com exceção do trecho ótimo (T*) e os a jusante do mesmo, a linha piezométrica da nova rede rebaixa-se em ΔZ e os novos EP's de toda a rede serão iguais aos anteriores subtraindo-se ΔJ_{disp} , que permanecem invariáveis.

2 - Quando $\Delta J_{disp} > EP_{min}$, o ΔZ será igual a EP_{min} e o trecho ótimo torna-se composto pelos dois diâmetros, o anterior e o imediatamente superior. Então, nesse trecho, o novo valor de ΔJ_{disp} será igual ao ΔJ_{disp} anterior menos EP_{min} . A nova cota piezométrica de cabeceira e os novos excessos de pressão da rede, ficarão rebaixados em EP_{min} , com exceção do trecho ótimo (T*) e dos situados a jusante do mesmo.

Com a nova cota de cabeceira da rede, reajusta-se as classes das tubulações dos trechos, seus preços e os 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 as economias relativas às mudanças de classe.

Basicamente a curva resultante das iterações comporta-se semelhantemente a figura 3.3.

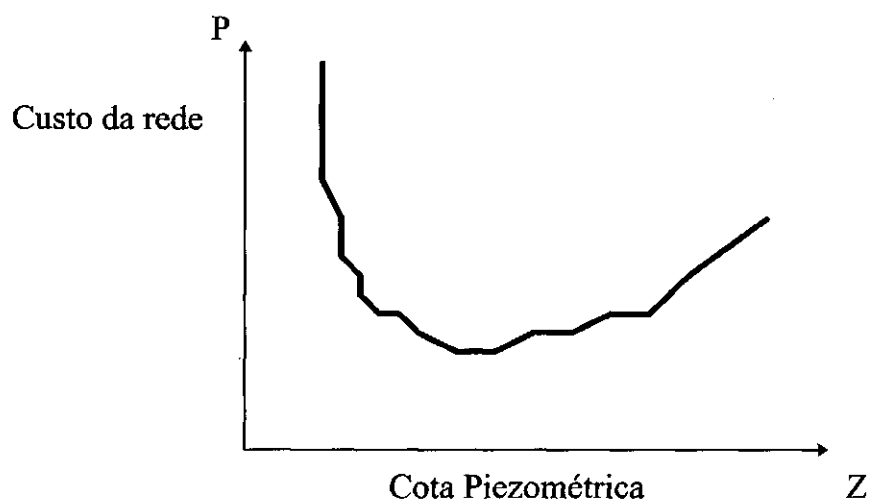


Figura 3.3 - Curva dos custos mínimos de uma rede de distribuição em função da cota piezométrica de cabeceira.

3.6 - O MÉTODO ESCOLHIDO

A metodologia proposta por Guimarães Jr (1993), além de está voltada apenas à parcela de irrigação por gotejamento, busca em seu processo de otimização, a modificação do “layout” e ponto de tomada d’água da mesma, comprometendo todo traçado da rede e conseqüentemente o das fileiras das plantas, sujeitos a modificações.

A programação linear e não-linear, apresentam as vantagens de serem modelos matemáticos potentes e com bastante flexibilidade para serem empregados dentro de uma ampla categoria de problemas. Os inconvenientes dos métodos podem ser atribuídos ao problema das classes das tubulações, que não podem ser consideradas diretamente no modelo, e na programação não-linear à limitação quanto à análise de sensibilidade dos resultados.

No entanto, para o dimensionamento da rede de distribuição, utilizou-se o método Granados, pois além de oferecer vantagens as quais carecem as outras metodologias estudadas nesta pesquisa, o mesmo foi utilizado no processo de cálculo para elaboração e aplicação do método de otimização integrada, desenvolvido por Gomes (1992), sendo o fundamento principal desta pesquisa.

CAPÍTULO IV

OTIMIZAÇÃO INTEGRADA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

4.1 - INTRODUÇÃO

De uma maneira geral os sistemas de irrigação sob pressão são compostos de três partes bem delimitadas. A primeira corresponde ao sistema de impulsão ou estação de bombeamento, a segunda consiste na rede de distribuição, que é a rede coletiva de tubulações que abastece as tomadas d'água das parcelas, e a terceira se refere às instalações das parcelas de irrigação (infra-estruturas de tubulações e equipamentos de irrigação). A figura 4.1, ilustra esses três componentes, onde a rede coletiva abastece diferentes sistemas de irrigação pressurizados (pivô-central, gotejamento e aspersão).

Na irrigação por gotejamento, o custo da instalação da parcela depende também da pressão disponível ou requerida em sua tomada. A densidade de linhas laterais nas parcelas irrigadas é acentuada, e para maiores pressões nas suas tomadas se podem instalar linhas laterais de diâmetros menores.

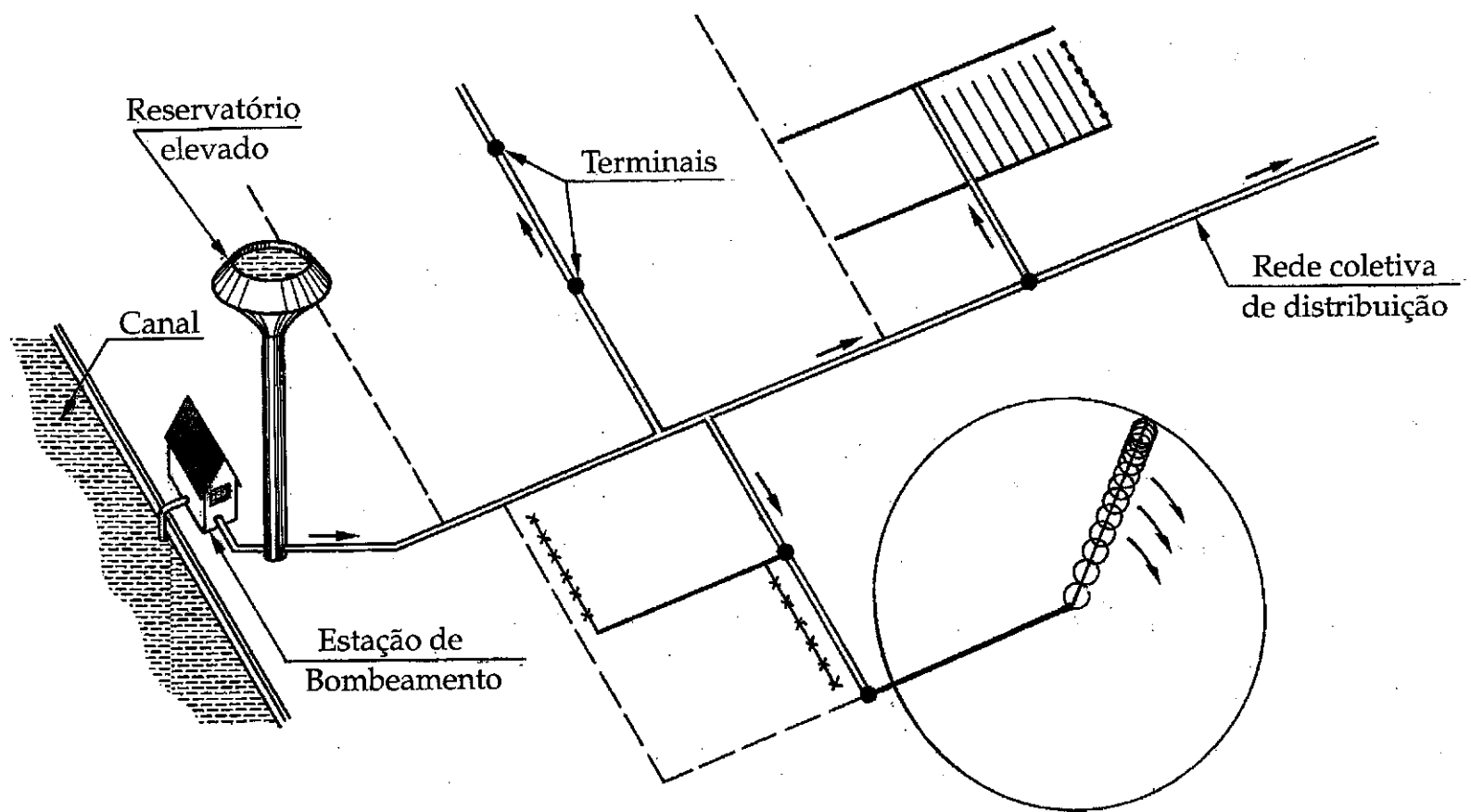


Figura 4.1 - Esquema de um perímetro de irrigação pressurizado
(estação de bombeamento, rede coletiva de distribuição e parcelas de irrigação)

Segundo Gomes (1994), os custos da rede de distribuição (com seu sistema de impulsão) e das instalações das parcelas de irrigação, dependem também das pressões disponíveis nos hidrantes ou terminais da rede de distribuição. Assim sendo, será necessário encontrar valores ótimos para as pressões nos terminais que minimize o custo total do sistema integrado, formado pela rede de distribuição, com seu sistema de impulsão, mais as instalações das parcelas de irrigação.

Com base no modelo de otimização conjunta, pode-se alcançar por tentativa, o dimensionamento da rede de distribuição e das parcelas de irrigação, de forma independente, para todas as possíveis condições de contorno do modelo (possíveis combinações de pressões nos terminais da rede). Utilizando qualquer um dos métodos de otimização existentes (Granados, Programação Linear e Não Linear, entre outros), se otimizaria a rede coletiva com as parcelas de irrigação, para todas as possibilidades de combinações de pressões nos terminais de distribuição, e alcançaria a solução de custo mínimo. Apesar de ser teoricamente possível, a solução antes mencionada é inviável em redes com mais de 5 parcelas, devido ao elevado número de combinações de pressões, necessárias para serem comprovadas. Para uma área de irrigação com 2 parcelas e 3 pressões nominais admissíveis para cada parcela, existirá 9 (3^2) combinações distintas de pressões. Para uma área de irrigação com 3 parcelas e 3 pressões nominais admissíveis para cada parcela, existirá 27 (3^3) combinações. O número de combinações necessária é

igual a p^n , onde n é o número de parcelas e p é o número de pressões admissíveis para cada parcela.

Assim, para o dimensionamento ótimo do conjunto de uma rede de distribuição mais as parcelas de irrigação, com apenas 3 pressões admissíveis para cada parcela e 5 parcelas, o número de combinações distintas de pressões é igual a 243 (3^5). Por tanto, para tal caso, mediante a metodologia, seria necessário executar o modelo de otimização das parcelas de irrigação 243 vezes, e escolher a alternativa, com a qual o custo da rede de distribuição e das parcelas de irrigação correspondesse ao mínimo.

Objetiva-se nesta pesquisa, fazer uma adaptação no método de otimização integrada dos sistemas de irrigação sob pressão (desenvolvido por Gomes em 1992 à sistemas de irrigação por aspersão convencional) à irrigação por gotejamento. O dimensionamento ótimo do sistema coletivo de irrigação por gotejamento, mediante o modelo de otimização integrada, tem como principal vantagem, conseguir o custo mínimo do sistema (equipamentos das parcelas de irrigação, rede de distribuição e energia de bombeamento), em comparação com outras metodologias de otimização já consagradas, que não consideram os custos das parcelas de irrigação, como variáveis do sistema.

4.2 - DADOS REFERENTES ÀS PARCELAS DE IRRIGAÇÃO

Na formulação do método de dimensionamento integrado, as pressões requeridas nos terminais da rede de distribuição não são dados fixos do problema e se constituem também em variáveis de decisão a determinar no processo de otimização. O método parte, dentre outros fatores, de uma série de valores discretos de pressão para cada terminal da rede de distribuição, que correspondem às várias possibilidades de projeto das instalações de irrigação para cada parcela.

Com a seleção das pressões nominais admissíveis dos gotejadores de cada parcela, determinam-se as pressões admissíveis para cada terminal da rede de distribuição. Para tanto, devem ser consideradas as perdas de carga (por atrito e localizadas) e os desníveis geométricos dentro das parcelas.

Para a obtenção do custo das tubulações das linhas laterais, estimam-se diâmetros que sejam compatíveis com as velocidades de circulação da água nestes condutos. O custo das peças de conexão pode ser computado como uma porcentagem do custo dos condutos.

A figura 4.2 mostra a curva característica da parcela, gráfico formado pela união dos pontos cujas coordenadas correspondem às pressões requeridas na tomada d'água de uma parcela por gotejamento (H), e aos respectivos custos das instalações (P) - tubos e acessórios. Cada vértice do gráfico se refere a um

determinado projeto da parcela, caracterizado pelo seu dimensionamento hidráulico.

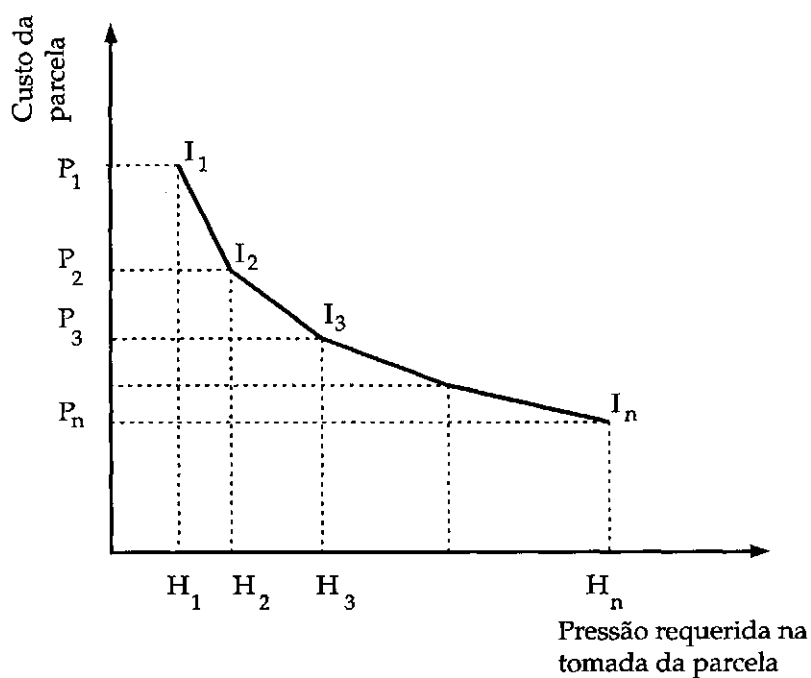


Figura 4.2 - Curva característica da parcela (Gomes,1994)

A declividade (K) de cada segmento da curva característica da parcela se determina em função das pressões requeridas nas tomadas (H_i) e dos preços (P_i) das instalações correspondentes. Assim, na curva característica da figura 4.2, para o segmento que une os vértices correspondentes aos projetos I_2 e I_3 , a declividade $K_{2,3}$ será igual a:

$$K_{2,3} = \frac{P_2 - P_3}{H_3 - H_2} \quad (4.1)$$

Em que:

P_2 = custo da instalação da parcela correspondente ao projeto I_2

P_3 = custo da instalação da parcela correspondente ao projeto I_3

H_2 = pressão requerida na tomada correspondente ao projeto I_2

H_3 = pressão requerida na tomada correspondente ao projeto I_3

Cada declividade da curva característica da parcela se denomina **gradiente de câmbio (K)** e representa o custo marginal da diminuição da pressão requerida na tomada da parcela.

4.3 - PROCESSO OPERATIVO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO INTEGRADA

O processo operativo do método de otimização integrada se baseia no sistema Granados de otimização de redes e sua metodologia se divide também em duas etapas. A primeira consiste na determinação de uma solução prévia, que proporciona o custo ótimo da rede de distribuição mais as instalações das parcelas de irrigação, à cota piezométrica de cabeceira (Z_0), na situação mais desfavorável de carga. A segunda etapa compreende uma seqüência de cálculos iterativos na qual, a partir da solução prévia, se baixa gradualmente a cota piezométrica de cabeceira e se obtém, para cada decréscimo de carga, um novo custo ótimo da rede de distribuição mais as instalações das parcelas de irrigação.

Para a obtenção da solução prévia se determinam, com base no método da velocidade máxima admissível, os mínimos diâmetros admissíveis das tubulações da rede de distribuição e das parcelas de irrigação (que terão as máximas pressões admissíveis em suas tomadas). Posteriormente, calculam-se as perdas de carga ao longo da rede e a referente cota piezométrica (Z_0), estritamente necessária para atender aos requerimentos de pressão nos terminais e superar as perdas de carga de toda a rede.

A segunda etapa do método consiste na execução de um processo iterativo de cálculo, no qual se reduz, passo a passo, a cota piezométrica de cabeceira, com o mínimo acréscimo de custo possível da rede de distribuição, mais as instalações das parcelas de irrigação, até alcançar a cota estabelecida pelo projetista.

Seja a rede de distribuição esquematizada na figura 3.2, que abastece seis parcelas de irrigação, e que está dimensionada de acordo com a solução prévia descrita anteriormente.

Para baixar a cota piezométrica de cabeceira da solução prévia (Z_0), com o menor aumento de custo possível da rede de distribuição, mais as instalações das parcelas de irrigação, é necessário diminuir a perda de carga (aumento do diâmetro da tubulação) em algum dos trechos compreendidos no percurso entre a origem da rede até o nó 2 (menor C), ou baixar a pressão requerida no nó 2

(modificação no projeto da parcela 2). A modificação de qualquer trecho situado fora do percurso 0-2 encareceria a rede sem permitir a redução da pressão na cabeceira.

A modificação do projeto da parcela origina um aumento do custo da instalação da mesma, que se mede através do gradiente de câmbio da parcela (K). O decréscimo de pressão no nó 2 deve ser igual à diferença de carga (ΔH) entre a pressão (H_0) na tomada da parcela 2, correspondente ao projeto inicialmente adotado (com os diâmetros mínimos admissíveis) e a pressão (H_1) na tomada, relativa ao projeto consecutivo inferior (com diâmetros comerciais imediatamente superiores). O decréscimo (ΔH) se efetua a um custo igual a $K_2 \cdot \Delta H$.

A comparação entre o gradiente de câmbio C^* , correspondente ao trecho ótimo do percurso 0-2, e o gradiente de câmbio K_2 , correspondente à parcela de irrigação situada a jusante do terminal 2, decide onde deverá ser efetuada a modificação no sistema integrado (diâmetro da tubulação da rede de distribuição ou instalação da parcela) para que o decréscimo de pressão na cabeceira (ΔZ) se realize com o menor aumento de custo possível. Tem-se então as seguintes condições:

1 - Caso o valor de C^* seja menor do que K_2 , o decréscimo de pressão na cabeceira (ΔZ) se efetuará com a mudança de diâmetro no trecho ótimo (T^*) do percurso 0-2 da rede de distribuição. Neste caso, substituindo-se o

diâmetro D_0 (diâmetro mínimo), por seu consecutivo superior (D_1), obtém-se uma redução na perda de carga do trecho ótimo (ΔJ). Neste caso, ΔZ será o menor valor entre a melhora da perda de carga (ΔJ) e o mínimo excesso de pressão (EP_{\min}) existente em toda a rede (excetuando os valores de EP de todos os nós situados a jusante do trecho ótimo).

1.a - Caso o valor de ΔJ disponível do trecho ótimo seja menor do que EP_{\min} , ΔZ será igual ao valor ΔJ e todo o trecho ótimo ficará ocupado pelo diâmetro de maior calibre. Os novos excessos de pressão de toda a rede serão iguais aos anteriores menos ΔZ , excetuando os excessos correspondentes ao trecho ótimo e aos trechos situados a jusante deste, que permanecem invariáveis.

1.b - Caso ΔJ disponível do trecho ótimo seja maior que EP_{\min} , o decréscimo de pressão na cabeceira será igual a EP_{\min} e o trecho ótimo estará composto pelos dois diâmetros (o anterior e o consecutivo superior). Em tal caso e para este trecho, o novo valor de ΔJ disponível será igual ao ΔJ_{disp} anterior, menos ΔZ . Os excessos de pressão da rede sofrerão um rebaixamento igual a EP_{\min} , exceto no trecho ótimo e nos situados a jusante do mesmo.

2 - Caso o valor do gradiente de câmbio (K_2) seja menor do que o valor do gradiente de câmbio ótimo (C^*), o decréscimo de pressão na cabeceira da rede de distribuição será efetuado com a modificação do projeto da instalação da

parcela I_2 . Neste caso, obtém-se uma melhora de pressão no nó 2 igual a $H_0 - H_1$, onde H_0 é a pressão na cabeceira para o projeto da parcela I_0 e H_1 é a pressão para o projeto I_1 .

O decréscimo de pressão (ΔZ) a ser efetuado na cabeceira da rede será o menor valor entre a melhora de pressão no nó 2 ($H_0 - H_1$) e o mínimo excesso de pressão, existente em toda a rede de distribuição.

2.a - Caso o valor da melhora da pressão (ΔH) no nó 2 seja menor do que EP_{\min} , o decréscimo de pressão na cabeceira será igual a ΔH e os novos excessos de pressão de toda a rede serão iguais aos anteriores menos ΔH .

2.b - Caso EP_{\min} seja menor do que ΔH , o decréscimo de pressão na cabeceira será igual a EP_{\min} e os novos excessos de pressão de toda a rede serão iguais aos anteriores menos EP_{\min} , excetuando o nó 2, cujo excesso de pressão passará a ser positivo e igual a $\Delta H - EP_{\min}$.

Definida a nova cota de cabeceira da rede, será necessário reajustar a classe de cada trecho, o preço e o gradiente de câmbio. O novo custo da rede de distribuição será igual ao preço anterior mais a diferença de custo correspondente ao aumento de diâmetro (do trecho ótimo ou das tubulações parcelares - mudança de projeto da parcela), menos as economias relativas às modificações de classe.

O par de valores decorrente da nova cota piezométrica, e do novo custo do sistema integrado de irrigação, representa um novo ponto na curva que proporciona o custo ótimo da rede de distribuição mais as instalações das parcelas de irrigação em função da cota piezométrica de cabeceira.

A figura 4.3 mostra o esquema da rede de distribuição com a nova cota de cabeceira (Z_1), decorrente da primeira iteração citada anteriormente. Segundo se observa na figura, existem dois nós com excessos de pressão nulos (nós 2 e 4), pertencentes a distintos ramais ou artérias, formando uma disposição em paralelo. Neste caso, para baixar a cota piezométrica de cabeceira, sem afetar os dois nós de EP nulos situados em paralelo, será necessário modificar o diâmetro em algum dos trechos comuns, situados a montante da totalidade dos respectivos nós (trecho 6 da figura 4.3), ou modificar simultaneamente os trechos ótimos pertencentes aos percursos não comuns 6-4 e 6-2. Além disso, é necessário considerar a possibilidade de aliviar as pressões nos nós 2 e 4, modificando os projetos de suas instalações parcelares. Portanto, existirão várias combinações entre o gradiente de câmbio ótimo resultante (C^*) e os gradientes de câmbio K_2 e K_4 . Tal combinação é denominada gradiente de câmbio ótimo conjunto (CK), ou seja, a combinação que proporciona o menor custo marginal do decréscimo de pressão na cabeceira da rede de distribuição. Neste caso do exemplo da figura 4.3, será o menor dos valores entre: C_6 , C_3+C_4 , K_2+K_4 , C_3+K_4 e C_4+K_2 .

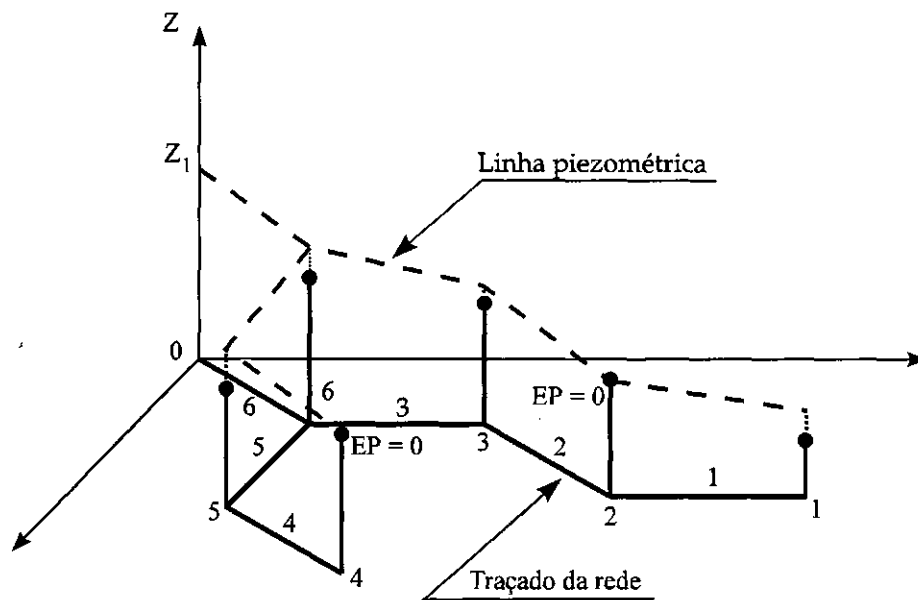


Figura 4.3 - Linha piezométrica sobre a rede de distribuição à cota de cabeceira Z_1 , apresentando dois EP's nulos.

Definida a nova cota piezométrica de cabeceira (Z_2), se calcula o novo custo ótimo da rede de distribuição mais as instalações das parcelas de irrigação. Para tanto é necessário considerar as economias obtidas com as mudanças de classe dos tubos e o aumento de custo devido o aumento do diâmetro das tubulações (do trecho e/ou parcelares).

O processo operativo do método segue a metodologia antes exposta, baixando a cota piezométrica de cabeceira em decréscimos de carga, até alcançar a cota estabelecida pelo projetista.

O método proporciona como resposta, para cada cota piezométrica de cabeceira, o diâmetro ou os diâmetros que irão compor cada trecho da rede de

distribuição, as classes das tubulações, os projetos das instalações das parcelas de irrigação e o custo ótimo correspondente do conjunto formado pela rede de distribuição mais as instalações das parcelas.

Para a obtenção da otimização integrada (que considera também o custo da energia de bombeamento), basta acrescentar à curva de ótimos da rede de distribuição mais as instalações das parcelas de irrigação, a curva de custos da energia de bombeamento, em função da cota piezométrica ou manométrica a elevar na cabeceira do sistema.

CAPÍTULO V

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 - GENERALIDADES

São muitos os cálculos necessários para o dimensionamento econômico das redes de distribuição através do método Granados. No entanto, existem programas aplicados a microcomputadores que automatizam os algoritmos de cálculo, necessários para os dimensionamentos das redes através do referido método.

Neste trabalho foram utilizados os softwares REDES (Gomes, 1996) e SIR (Gomes, 1992), de otimização de sistemas pressurizados de distribuição de água (em linguagem BASIC), sendo que neste último, é incluído a parte parcelar no dimensionamento do sistema. Ambos são baseados no algoritmo do método Granados (Granados, 1990).

Para a aplicação da metodologia apresentada nesta pesquisa (capítulo IV), foi utilizada a rede de distribuição esquematizada na figura 5.1, a qual mostra 4 parcelas planas, com o mesmo “layout”, porém distribuídas em um terreno de relevo heterogêneo, funcionando simultaneamente. Na figura 5.2, observa-se o

“layout” ou esquema básico das parcelas, e no quadro 5.1, são apresentados os dados gerais das mesmas. No quadro 5.2, estão os dados gerais da rede de distribuição, necessários para a aplicação da metodologia, já apresentada no capítulo anterior desta dissertação.

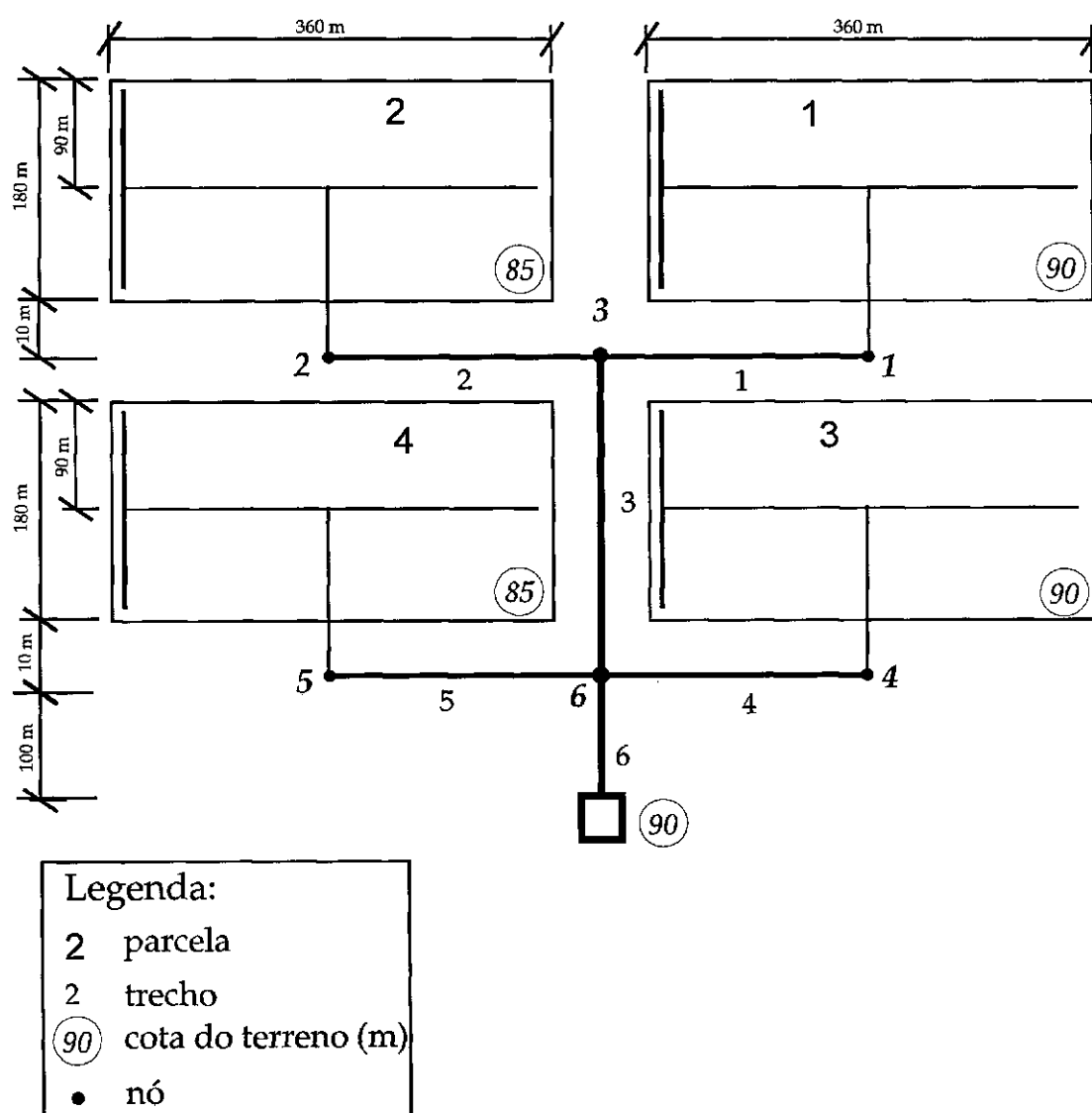


Figura 5.1 - Rede de distribuição referente à aplicação da metodologia de otimização integrada.

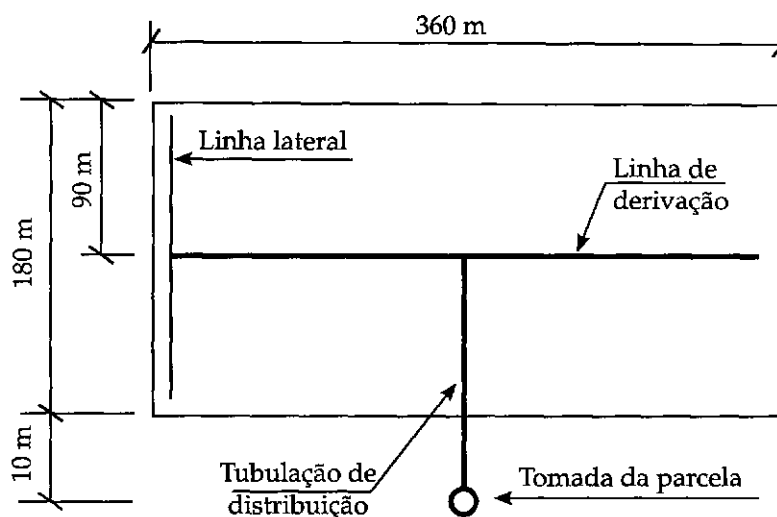


Figura 5.2 - Esquema da parcela de irrigação da rede de distribuição.

Quadro 5.1 - Dados gerais da parcela padrão

Área	6,48 ha
Espaçamento entre gotejadores	1,00 m
Espaçamento entre linhas laterais	3,00 m
Vazão do gotejador	3,80 l/h
Vazão necessária na tomada da parcela	22,80 l/s
Pressão nominal do gotejador	10,00 mca
Número de laterais	240
Comprimento de cada linha lateral	90,00 m
Número de gotejadores	21600
Perda localizada (válv. reg. pressão) na tomada da parcela	5,00 mca
Número de horas anuais de bombeamento	2000
Custo do Kwh	0,05 reais
Coefficiente de atualização de energia	20,00
Rendimento esperado do conjunto motor-bomba	75 %

Quadro 5.2 - Dados gerais da rede coletiva de distribuição da figura 5.1

Área total a ser irrigada	25,92 ha
Número de laterais	960
Número de gotejadores	86400
Vazão no trecho 1	22,80 l/s
Vazão no trecho 2	22,80 l/s
Vazão no trecho 3	45,60 l/s
Vazão no trecho 4	22,80 l/s
Vazão no trecho 5	22,80 l/s
Vazão no trecho 6	91,20 l/s

O quadro 5.3, mostra os preços das tubulações de diferentes diâmetros e pressões nominais (PN). Observa-se neste quadro, uma tubulação de 400 mm de diâmetro. Como a mesma não é disponível no mercado, seu custo foi estimado a partir da extrapolação da curva **custo versus diâmetro** (ver figura 5.3), uma vez que o referido diâmetro não será utilizado no processo de cálculo, apenas o seu custo (estimado) foi aplicado ao dimensionamento para obtenção do gradiente de câmbio C, conforme a teoria da metodologia de Granados descrita no item 3.5.

Quadro 5.3 - Preços das tubulações *

Diâmetro nominal mm	Diâmetro interno mm	Preço por metro reais
POLIETILENO		
PN40		
12	9,60	0,22
16	13,40	0,28
20	17,00	0,40
25	21,00	0,59
32	27,00	0,92
PVC		
PN40		
35	35,70	1,96
50	48,10	2,59
75	72,50	4,79
100	97,60	8,60
125	120,00	13,11
150	144,00	18,88
PN60		
100	112,60	13,58
150	162,20	24,91
200	212,00	42,32
250	261,60	63,07
PN80		
35	34,30	-
50	46,70	3,55
75	70,50	7,11
100	94,40	13,62
PN125		
100	108,40	24,30
150	156,40	42,22
200	204,20	70,57
250	252,00	105,20
300	299,80	149,43
400	394,00	**238,00

* Dados fornecidos pela ASBRASIL (1996)

** Dado estimado, em virtude do diâmetro não ser comercializado (ver figura 5.3)

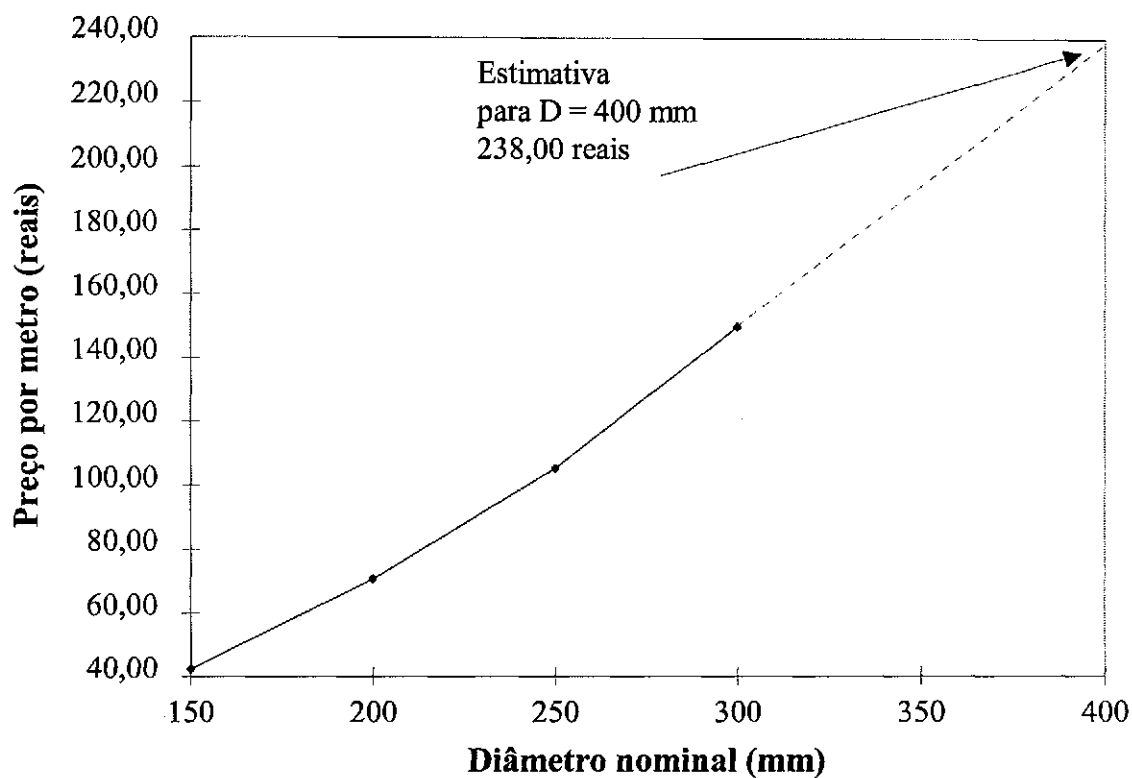


Figura 5.3 - Estimativa para obtenção do preço do diâmetro nominal de 400 mm (PN125) - PVC)

5.2 - DIMENSIONAMENTO DAS PARCELAS

Como os lotes, ou parcelas, apresentam as mesmas dimensões, topografia e “layout”, o dimensionamento hidráulico dos mesmos dependerá da pressão disponível nas suas cabeceiras. Esta, por sua vez, será uma variável de decisão, a mais, no método de otimização integrada, apresentado neste trabalho.

O quadro 5.4, apresenta as velocidades e vazões máximas em função dos diâmetros das tubulações.

Quadro 5.4 - Velocidades e vazões máximas em função dos diâmetros das tubulações *

Diâmetro nominal	Pressão nominal	Diâmetro interno	Preço por metro	Velocidade máxima	Vazão	
mm	mca	mm	reais	m/s	m ³ /s	l/s
12	40	9,60	0,22	2,00	0,0001	0,14
16	40	13,40	0,28	2,00	0,0003	0,28
20	40	17,00	0,40	2,00	0,0005	0,45
25	40	21,00	0,59	2,00	0,0007	0,69
32	40	27,00	0,92	2,00	0,0011	1,15
35	40	35,70	1,96	2,00	0,0020	2,00
50	40	48,10	2,59	2,00	0,0036	3,63
50	80	46,70	3,55	2,00	0,0034	3,43
75	40	72,50	4,79	2,00	0,0083	8,26
75	80	70,50	7,11	2,00	0,0078	7,81
100	40	97,60	8,60	2,00	0,0150	14,96
100	60	112,60	13,58	2,00	0,0199	19,92
100	80	94,40	13,62	2,00	0,0140	14,00
100	125	108,40	24,30	2,00	0,0185	18,46
125	40	120,00	13,11	2,00	0,0226	22,62
150	40	144,00	18,88	2,00	0,0326	32,57
150	60	162,20	24,91	2,00	0,0413	41,33
150	125	156,40	42,22	2,00	0,0384	38,42
200	60	212,00	42,32	2,00	0,0706	70,60
200	125	204,20	70,57	2,00	0,0655	65,50
250	60	261,60	63,07	2,00	0,1075	107,50
250	125	252,00	105,20	2,00	0,0998	99,75
300	125	299,80	149,43	2,10	0,1482	148,24
400	125	394,00	238,00	2,30	0,2804	280,42

* Valores recomendados por Granados (Gomes, 1994)

Com os dados dos quadros 5.1, 5.3 e 5.4, e baseado na metodologia de Granados, foram dimensionadas as parcelas, em função da pressão requerida na tomada d'água, buscando soluções que proporcionassem custos otimizados das mesmas. Determinou-se inicialmente a solução prévia, utilizando a metodologia da velocidade máxima admissível. Posteriormente, aplicou-se a metodologia de Granados para o dimensionamento das parcelas, conforme descrito no capítulo III (item 3.5).

Para o cálculo das perdas de carga unitárias ao longo da mangueira, foi utilizada a equação de Hazen-Williams. Os resultados foram acrescidos em 10%, para levar em conta as perdas localizadas.

Os resultados do dimensionamento são mostrados no quadro 5.5, onde se encontram, segundo a pressão requerida na tomada da parcela, os projetos otimizados das parcelas.

O tipo de gotejador utilizado foi o autocompensante (pressão nominal 10 mca), podendo ser adotados menores diâmetros para as laterais, dispensando praticamente a utilização de válvulas reguladoras de pressão na parcela de irrigação.

Quadro 5.5 * - Dados obtidos com o dimensionamento ótimo das parcelas, segundo o método Granados.

Projeto 1
Pressão na cabeceira da parcela = 20 mca
Linha lateral
Composta por dois diâmetros:
Diâmetro nominal (D1) = 12 mm / PN 40
Comprimento = 78 metros
Diâmetro nominal (D2) = 16 mm / PN 40
Comprimento = 12 metros
Perda na linha lateral = 6,69 mca
Linha de derivação
Diâmetro nominal (D) = 100 mm / PN 60
Comprimento = 180 metros
Perda linha de derivação = 1,11 mca
Linha principal
Diâmetro nominal (D) = 150 mm / PN 60
Comprimento = 100 metros
Perda na linha principal = 2,20 mca
Perda de carga total (hf) = 10 mca
Custo total = 10.511,80 reais

Quadro 5.5 * - continuação

<p>Projeto 2</p> <p>Pressão na cabeceira da parcela = 15 mca</p> <p>Linha lateral Composta por dois diâmetros: Diâmetro nominal (D1) = 12 mm / PN 40 Comprimento = 12 metros Diâmetro nominal (D2) = 16 mm / PN 40 Comprimento = 78 metros Perda na linha lateral = 3,13 mca</p> <p>Linha de derivação Diâmetro nominal (D) = 100 mm / PN 60 Comprimento = 180 metros Perda linha de derivação = 1,11 mca</p> <p>Linha principal Diâmetro nominal (D) = 150 mm / PN 60 Comprimento = 100 metros Perda na linha principal = 0,76 mca</p> <p>Perda de carga total (hf) = 5 mca</p> <p>Custo total = 11.462,20 reais</p>
--

<p>Projeto 3</p> <p>Pressão na cabeceira da parcela = 13 mca</p> <p>Linha lateral Composta por dois diâmetros: Diâmetro nominal (D1) = 16 mm / PN 40 Comprimento = 14 metros Diâmetro nominal (D2) = 20 mm / PN 40 Comprimento = 76 metros Perda na linha lateral = 0,76 mca</p> <p>Linha de derivação Diâmetro nominal (D) = 100 mm / PN 60 Comprimento = 180 metros Perda linha de derivação = 1,11 mca</p> <p>Linha principal Diâmetro nominal (D) = 150 mm / PN 60 Comprimento = 100 metros Perda na linha principal = 1,13 mca</p> <p>Perda de carga total (hf) = 3 mca</p> <p>Custo total = 13.823,80 reais</p>
--

Quadro 5.5 * - continuação

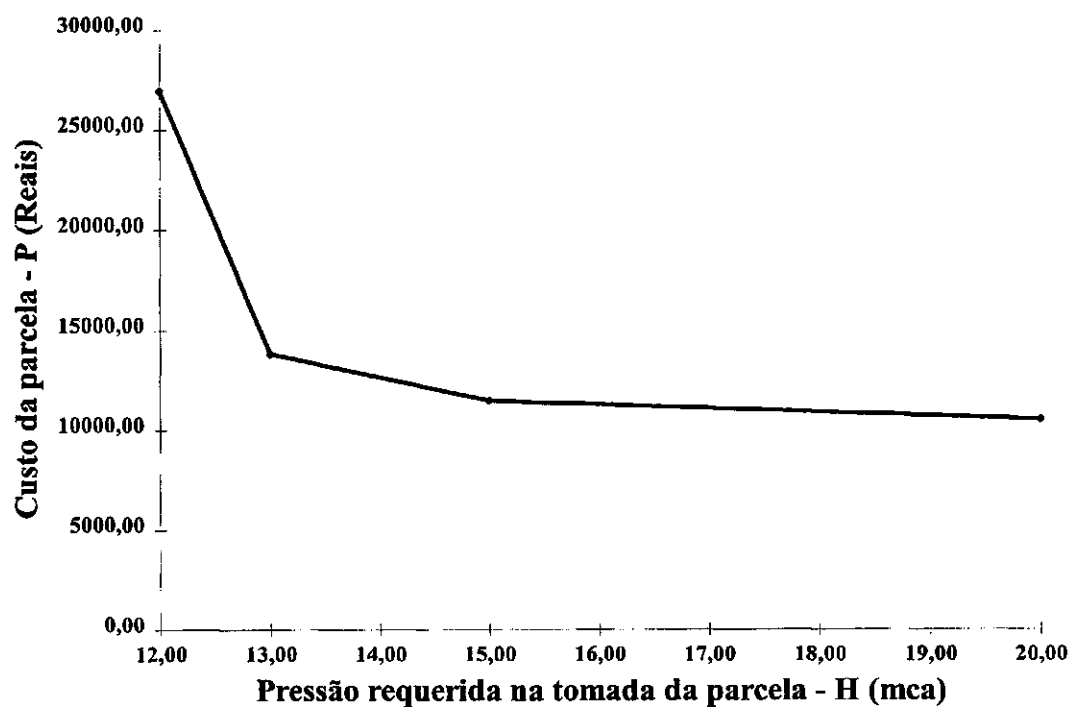
<p>Projeto 4 Pressão na cabeceira da parcela = 12 mca</p> <p>Linha lateral Diâmetro nominal (D) = 32 mm / PN 40 Comprimento = 90 metros Perda na linha lateral = 0,04 mca</p> <p>Linha de derivação Composta por dois diâmetros: Diâmetro nominal (D1) = 100 mm / PN 40 Comprimento = 135 metros Diâmetro nominal (D2) = 150 mm / PN 60 Comprimento = 45 metros Perda linha de derivação = 1,09 mca</p> <p>Linha principal Diâmetro nominal (D) = 150 mm / PN 60 Comprimento = 100 metros Perda na linha principal = 0,86 mca</p> <p>Perda de carga total (hf) = 2 mca</p> <p>Custo total = 26.926,90 reais</p>

* Quando a tubulação apresenta dois diâmetros, utilizou-se os índices 1 e 2 (diâmetro consecutivo superior).

Após a determinação dos custos parcelares, obteve-se os gradientes de câmbio K (ver quadro 5.6), segundo o método descrito no capítulo IV (equação 4.1). Com os mesmos, confeccionou-se a curva característica da parcela, conforme mostrada na figura 5.4.

Quadro 5.6 - Gradientes de câmbio parcelares - K

Pressão na cabeceira da rede - H	Custo da parcela	Gradiente K
mca	reais	reais/m
20,00	10.511,80	-
15,00	11.462,20	190,08
13,00	13.823,80	1.180,80
12,00	26.926,90	13.103,10

**Figura 5.4 - Curva característica da parcela**

Com base nos dados do quadro 5.6 e a figura 5.4, observa-se uma não linearidade da curva característica, caracterizada pela queda brusca do custo dos equipamentos da parcela, com o aumento de pressão de 12 a 15 mca, e uma discreta suavidade no traçado entre 15 e 20 mca. A partir da cota de cabeceira 15 mca, houve uma tendência a horizontalidade, tornando a curva assintótica com o aumento de pressão.

Verifica-se que, quanto maior a pressão disponível na cabeceira da parcela, menor será o custo de investimento da mesma. As pressões requeridas nos terminais da rede de distribuição condicionam também o dimensionamento e o custo da rede coletiva e da energia de bombeamento. Conforme visto no capítulo III (com relação aos métodos de otimização de redes de distribuição), mantendo-se constante as classes das tubulações, o custo ótimo da rede de distribuição diminui ao se aumentar a cota piezométrica na cabeceira da rede. Essa cota de cabeceira, por sua vez, depende das perdas de carga nas tubulações, dos desníveis geométricos e das pressões requeridas nos terminais da rede coletiva de distribuição. Assim sendo, para uma cota piezométrica determinada na cabeceira da rede de distribuição, o custo desta diminuirá ao baixar-se as pressões requeridas nos terminais mais forçados ou desfavoráveis da rede.

Portanto, percebe-se a importância de se analisar a relação entre os dados das parcelas (quadro 5.6 e figura 5.4), os da rede de distribuição e os da energia de bombeamento, para a obtenção da solução que forneça o custo ótimo que integra tais componentes.

5.3 - OTIMIZAÇÃO INTEGRADA

5.3.1 - Solução de contorno ou de partida

De acordo com a metodologia descrita no capítulo IV, determina-se inicialmente a solução prévia. Utilizou-se o método da velocidade máxima admissível (ver quadro 5.7), que se caracteriza pela determinação do menor diâmetro comercial admissível das tubulações, de maneira que a velocidade correspondente não ultrapasse o limite preestabelecido (para minimizar o efeito de possíveis golpes de aríete).

Para a obtenção da solução prévia se determinam os mínimos diâmetros admissíveis das tubulações, que irão compor cada trecho da rede de distribuição, e se definem os projetos das instalações das parcelas de irrigação que requerem as máximas pressões admissíveis nas suas tomadas d'água (no caso das parcelas da figura 5.1, será o projeto 1 com pressão admissível de 20 mca, conforme o quadro 5.5). Estas máximas pressões são derivadas das elevadas perdas de carga provocadas pela alternativa mais barata da parcela, ou seja, com a utilização de menores diâmetros para as tubulações (linhas laterais, de derivação e principais).

As elevadas perdas de carga ao longo das tubulações, podem comprometer a uniformidade da irrigação por gotejamento, sendo este, portanto, o motivo que se optou pela utilização de gotejadores autocompensantes.

Após a determinação dos mínimos diâmetros admissíveis para as tubulações dos trechos da rede de distribuição e a obtenção das máximas pressões requeridas nas tomadas das parcelas (terminais da rede de distribuição), calculam-se as perdas de carga ao longo da rede (utilizou-se a equação de Hazen-Williams) e a cota piezométrica (Z_0), estritamente necessária para atender aos requerimentos de pressão nos terminais e superar as perdas de carga de toda a rede. O quadro 5.7, mostra a obtenção das cotas piezométricas da rede de distribuição de acordo com a solução prévia.

Quadro 5.7 - Obtenção da cota piezométrica da solução prévia da rede de distribuição

Trecho	Comprimento	Vazão no trecho	Diâmetro nominal	Pressão nominal	Perda localizada	Jo	Cota do terreno	Pressão requerida	Piezométrica mínima-PM	Jo acumulado	Piezométrica disponível	Excesso de pressão-EP
m	m	l/s	mm	mca	mca	mca	m	mca	mca	mca	mca	mca
6	100	91,20	250	125	---	1,03	90	---	90,00	1,03	91,03	27,89
4	180	22,80	150	125	5,00	6,46	90	20	110,00	7,49	117,49	1,43
5	180	22,80	150	125	5,00	6,46	85	20	105,00	7,49	112,49	6,43
3	180	45,60	200	125	---	1,43	90	---	90,00	2,47	92,47	26,46
1	180	22,80	150	125	5,00	6,46	90	20	110,00	8,92	118,92	0,00
2	180	22,80	150	125	5,00	6,46	85	20	105,00	8,92	113,92	5,00

5.3.2 - Processo iterativo

O quadro 5.8 mostra os valores dos gradientes de câmbio C , de cada trecho da rede de distribuição, correspondentes aos diâmetros empregados nas iterações da segunda etapa da metodologia de otimização integrada.

Nos quadros das iterações (quadros 5.9-a ao 5.9-f) são apresentados todos os resultados das variáveis do método, necessários para fornecer em cada iteração, o custo ótimo integrado, com a cota piezométrica de cabeceira (Z_i) correspondente (determinados de acordo com a metodologia descrita no capítulo IV). Neles estão: os trechos da rede (T); os comprimentos (L); os diâmetros (D_{int} e D_{ext}); as pressões requeridas nos nós (P_{req}); os gradientes de câmbio C (fundamentados no custo dos trechos da rede) e K (referente aos projetos parcelares); os excessos de pressão nos nós (EP); as diferenças de perda (ΔJ 's); e as pressões disponíveis nos nós (P_{disp}).

Logo abaixo de cada iteração, estão descritas algumas informações relacionadas ao referido processo, onde observam-se os custos otimizados da rede de distribuição, dos equipamentos das parcelas de irrigação, da energia de bombeamento e o custo ótimo total, o qual corresponde à soma dos custos dos três componentes do sistema.

Quadro 5.8 - Gradientes de câmbio C

Trecho	Comprimento (m)	Vazao (m ³ /s)	Coef. rugosidade	diâmetro nominal (mm)	Diâmetro interno (mm)	Velocidade (m/s)	Perda de carga ao longo do conduto - J (m)	Δ J (m)	Preço / m (reais)	Preço total (reais)	Gradiente de câmbio-C (reais/m)
1	180	0,0228	145	150	156,40	1,19	1,46	-	42,22	7.599,60	-----
				200	204,20	0,70	0,40	1,06	70,57	12.702,60	4.820,33
				250	252,00	0,46	0,14	0,25	105,20	18.936,00	24.479,27
				300	299,80	0,32	0,06	0,08	149,43	26.897,40	97.779,49
2	180	0,0228	145	150	156,40	1,19	1,46	-	42,22	7.599,60	-----
				200	204,20	0,70	0,40	1,06	70,57	12.702,60	4.820,33
				250	252,00	0,46	0,14	0,25	105,20	18.936,00	24.479,27
				300	299,80	0,32	0,06	0,08	149,43	26.897,40	97.779,49
3	180	0,0456	145	200	204,20	1,39	1,43	-	70,57	12.702,60	-----
				250	252,00	0,91	0,51	0,92	105,20	18.936,00	6.780,96
				300	299,80	0,65	0,22	0,29	149,43	26.897,40	27.085,71
4	180	0,0228	145	150	156,40	1,19	1,46	-	42,22	7.599,60	-----
				200	204,20	0,70	0,40	1,06	70,57	12.702,60	4.820,33
				250	252,00	0,46	0,14	0,25	105,20	18.936,00	24.479,27
				300	299,80	0,32	0,06	0,08	149,43	26.897,40	97.779,49
5	180	0,0228	145	150	156,40	1,19	1,46	-	42,22	7.599,60	-----
				200	204,20	0,70	0,40	1,06	70,57	12.702,60	4.820,33
				250	252,00	0,46	0,14	0,25	105,20	18.936,00	24.479,27
				300	299,80	0,32	0,06	0,08	149,43	26.897,40	97.779,49
6	100	0,0912	145	250	252,00	1,83	1,03	-	105,20	10.520,00	-----
				300	299,80	1,29	0,44	0,59	149,43	14.943,00	7.502,96
				400	394,00	0,75	0,12	0,33	238,00	23.800,00	27.160,89

Vê-se também, abaixo dos quadros 5.9-a a 5.9-f, as informações relacionadas com as mudanças hidráulicas que sofrerá o sistema de abastecimento no processo iterativo: a artéria mais desfavorável; o gradiente de câmbio a ser utilizado (C, K ou CK); e o decréscimo de cota da cabeceira.

As iterações de cálculo do quadro 5.9 baixam, passo a passo, a cota piezométrica de cabeceira, até que se atinja o valor ótimo, que relaciona o custo da rede mais as instalações das parcelas, e o custo da energia capitalizada do bombeamento, por metro de altura de elevação.

A cota piezométrica de cabeceira da solução prévia (Z_0) é igual a 118,92 metros, e o custo ótimo correspondente, será (ver quadro 5.9-a):

Parcelas de irrigação:

$$10.511,80 \text{ reais} \times 4 \text{ parcelas} = 42.047,20 \text{ reais};$$

Rede de distribuição:

$$\begin{aligned} & (180 \text{ m} \times 42,22 \text{ reais/m}) + (180 \text{ m} \times 42,22 \text{ reais/m}) + (180 \text{ m} \times 70,57 \text{ reais/m}) \\ & + (180 \text{ m} \times 42,22 \text{ reais/m}) + (180 \text{ m} \times 42,22 \text{ reais/m}) + (100 \text{ m} \times 105,20 \text{ reais/m}) \\ & = 53.621,00 \text{ reais}; \end{aligned}$$

Energia de bombeamento:

$$E = \frac{(0,736 \times 91,2 \text{ l/s}) \times (2000 \text{ h} \times 0,05 \times 20)}{75 \times 0,75} \times (118,92 \text{ m} - 90 \text{ m}) = 69.027,38 \text{ reais}$$

Tem-se então, segundo a solução prévia, para a cota de 118,92 m, um custo ótimo integrado de 164.695,58 reais.

Inicia-se então, o processo iterativo de rebaixamento da cota de cabeceira da rede, com o menor acréscimo de custo possível. Para tanto, verifica-se que na solução prévia existirá, pelo menos, um excesso de pressão (EP) nulo. No caso da rede da figura 5.1, este estará no nó 1, trecho 1 (coluna 8, quadro 5.9-a). A partir do mesmo, faz-se então uma análise em sua artéria (sendo então, esta a mais desfavorável) de qual o gradiente de câmbio (C, K ou CK) será o menor.

A artéria mais desfavorável será a formada pelos trechos 1,3 e 6, e o gradiente de câmbio ótimo será o parcelar, na tomada 1, K1 (190,08 reais/m), que corresponderá ao menor acréscimo de custo, por diminuição de cota na cabeceira da rede (aumento de diâmetro das tubulações da parcela 1).

Conforme a metodologia apresentada no capítulo IV, sendo o gradiente parcelar o ótimo, deve-se analisar o menor valor, entre a diferença de pressão na mudança do projeto parcelar (5 m), e o menor excesso de pressão da rede (1,43 m). Neste caso, o EP mínimo foi o menor entre as alternativas, e

conseqüentemente a pressão na cabeceira da rede diminuirá em 1,43 m (menor decréscimo), o qual proporcionará o menor aumento no custo conjunto da rede, mais a energia de bombeamento, mais o custo dos equipamentos das parcelas.

O custo total (ao passar da solução prévia para a 1ª iteração), terá a diminuição da energia de bombeamento, mais os acréscimos referente a parcela 1 ($K_1 \times \Delta H$), onde ΔH representa a diferença de pressão correspondente a mudança de projeto parcelar (5 mca entre a mudança de 190,08 reais/m para 1180,80 reais/m). Têm-se então, para a 1ª iteração, a rede com a cota de 117,49 m, com o custo total do sistema integrado, igual a 162.233,14 reais (quadro 5.9-b), que é inferior ao obtido na solução prévia.

Nesta iteração (quadro 5.9-b), observa-se o EP nulo no nó 4. A artéria a ser analisada será então a formada pelos os trechos 4 e 6. O gradiente ótimo foi o K_4 (projeto parcelar na tomada 4), significando que haverá uma mudança no projeto da parcela 3 (ver figura 5.1), cujo gradiente de câmbio passará de 190,08 reais/m para 1180,80 reais/m (novo K , ver quadro 5.6). O decréscimo de cota da cabeceira da rede, será o EP mínimo (3,57 m). A rede terá um encarecimento na parte parcelar de $\Delta H \times K_4$, ou seja 5 m x 190,08 reais/m, e uma diminuição de custo na energia de bombeamento. Tem-se então o custo total da rede, de 154.663,37 reais, com a cota de cabeceira baixando para 113,92 m (117,49m - 3,57m), conforme se observa no quadro 5.9-c (2ª iteração).

Com a nova cota de cabeceira do sistema (113,92 m), haverá dois EP's nulos, nos nós 1 (artéria 1-3-6) e 2 (artéria 2-3-6). Com a execução do processo iterativo (na segunda iteração), através da análise dos CK's, considerando agora as duas artérias, verificou-se que o ótimo será o K1 + K2, ou seja, a modificação nos dois projetos parcelares referentes às tomadas 1 e 2, respectivamente.

O menor decréscimo de carga, que será efetuado na segunda iteração, será o EP mínimo (1,43 m), nos nós 4 e 5, conforme pode ser observado no resultado do quadro 5.9-c. A modificação no custo total é referente a diminuição do custo da energia de bombeamento, em conjunto com o aumento dos custos das parcelas correspondente a 2 m x 1180,80 reais/m, mais 5m x 190,08 reais/m.

A nova cota de cabeceira será 112,49 m (ver 3ª iteração), com o custo-conjunto de 154.562,53 reais (quadro 5.9-d) Observa-se que nesta cota, as artérias mais desfavoráveis são a 5-6 e 4-6 (EP's nulos nos nós 4 e 5). O CK ótimo, será a modificação nos projetos K4 e K5, ocasionando um aumento no custo parcelar de 1180,80 reais/m x 2 m, mais 190,80 reais/m x 5 m. O decréscimo de cota de cabeceira da rede será 0,57 m (EP mínimo no nó 1).

Tem-se, então, a nova cota da cabeceira de 111,92 m (4ª iteração, quadro 5.9-e), com o custo do sistema integrado de 156.514,16 reais. Este custo é maior do que o encontrado na iteração anterior.

Após a realização de mais uma iteração (5ª iteração, figura 10-f), a cota de cabeceira da rede passa para 110,86 m, com o custo conjunto de 159.093,91 reais. Sendo observado mais um aumento no custo total, verifica-se que, com a diminuição de cota, da 3ª iteração em diante, ocorrerá sempre um aumento no mesmo, isto é, a cada iteração, ocorrerá um afastamento do objetivo da metodologia, o custo ótimo global. Por tanto, não sendo necessário a realização de mais iterações, verifica-se o custo ótimo correspondente à cota de cabeceira de 112,49 m.

A metodologia mostra que na cota 112,49 m (quadro 5.9-d), o custo conjunto mínimo otimizado é igual a 154.573,33 reais, correspondente a soma entre a rede de distribuição (53.621,00 reais), energia de bombeamento (53.681,53 reais) e equipamentos da parcelas de irrigação (47.270,80 reais).

**Iterações para obtenção do custo ótimo conjunto:
Redes de distribuição, tubulações parcelares e energia de bombeamento**

Quadro 5.9 - a : Solução Prévia

Zo = 118,92 m

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	L	P req	Dnom	Dint	C	K	EP	Δ J	Pdisp
	m	mca	mm	mm	reais/m	reais/m	m	m	mca
6	100	-	250	252,00	7.502,96	-	27,89	0,59	27,89
5	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	6,43	1,06	26,43
4	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	<u>1,43</u>	1,06	21,43
3	180	-	200	204,20	6.780,96	-	26,46	0,92	26,46
2	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	5,00	1,06	25,00
1	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	0,00	1,06	20,00
custo das parcelas =				42.047,20	reais	Artéria mais desfav.		1-3-6	
custo da rede =				53.621,00	reais	Menor gradiente		K1	
custo de energia =				69.027,38	reais	Decréscimo		EP min =1,43 m	
custo total =				164.695,58	reais				

Quadro 5.9 - b : 1ª Iteração

Z1 = 118,92 m - 1,43 m = 117,49 m

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	L	P req	Dnom	Dint	C	K	EP	Δ J	Pdisp
	m	mca	mm	mm	reais/m	reais/m	m	m	mca
6	100	-	250	252,00	7.502,96	-	26,46	0,59	26,46
5	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	5,00	1,06	25,00
4	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	0,00	1,06	20,00
3	180	-	200	204,20	6.780,96	-	25,03	0,92	25,03
2	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	<u>3,57</u>	1,06	23,57
1	180	20	150	156,40	4.820,33	1180,80	3,57	1,06	18,57
custo das parcelas =				42.997,60	reais	Artéria mais desfav.		4-6	
custo da rede =				53.621,00	reais	Menor gradiente		K4	
custo de energia =				65.614,54	reais	Decréscimo		EPmín 2 e 3 =	
custo total =				162.233,14	reais			= 3,57 m	

Quadro 5.9 - c : 2ª Iteração

$$Z2 = 117,49 \text{ m} - 3,57 \text{ m} = 113,92 \text{ m}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	L	P req	Dnom	Dint	C	K	EP	ΔJ	Pdisp
	m	mca	mm	mm	reais/m	reais/m	m	m	mca
6	100	-	250	252,00	7.502,96	-	22,89	0,59	22,89
5	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	<u>1,43</u>	1,06	21,43
4	180	20	150	156,40	4.820,33	1180,80	<u>1,43</u>	1,06	16,43
3	180	-	200	204,20	6.780,96	-	21,46	0,92	21,46
2	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	0,00	1,06	20,00
1	180	20	150	156,40	4.820,33	1180,80	0,00	1,06	15,00
custo das parcelas =				43.948,00	reais	Artéria mais desfav.		1-3-6 e 2-3-6	
custo da rede =				53.621,00	reais	Menor gradiente		K1+K2	
custo de energia =				57.094,37	reais	Decréscimo		$\Delta H1=1,43 \text{ m}$	
custo total =				154.663,37	reais				

Quadro 5.9 - d : 3ª Iteração

$$Z3 = 113,92 \text{ m} - 1,43 \text{ m} = 112,49 \text{ m}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	L	P req	Dnom	Dint	C	K	EP	Δ J	Pdisp
	m	mca	mm	mm	reais/m	reais/m	m	m	mca
6	100	-	250	252,00	7.502,96	-	21,46	0,59	21,46
5	180	20	150	156,40	4.820,33	190,08	0,00	1,06	20,00
4	180	20	150	156,40	4.820,33	1180,80	0,00	1,06	15,00
3	180	-	200	204,20	6.780,96	-	20,03	0,92	20,03
2	180	20	150	156,40	4.820,33	1180,80	3,57	1,06	18,57
1	180	20	150	156,40	4.820,33	13103,10	<u>0,57</u>	1,06	13,57
custo das parcelas =				47.260,00	reais	Artéria mais desfáv.		5-6 e 4-6	
custo da rede =				53.621,00	reais	Menor gradiente		K4+K5	
custo de energia =				53.681,53	reais	Decréscimo		EPmín 1= 0,57m	
custo total =				154.562,53	reais				

Quadro 5.9 - e : 4ª Iteração

$$Z4 = 112,49 \text{ m} - 0,57 \text{ m} = 111,92 \text{ m}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	L	P req	Dnom	Dint	C	K	EP	ΔJ	Pdisp
	m	mca	mm	mm	reais/m	reais/m	m	m	mca
6	100	-	250	252,00	7.502,96	-	20,89	0,59	20,89
5	180	20	150	156,40	4.820,33	1180,80	4,43	1,06	19,43
4	180	20	150	156,40	4.820,33	13103,10	1,43	1,06	14,43
3	180	-	200	204,20	6.780,96	-	19,46	0,92	19,46
2	180	20	150	156,40	4.820,33	1180,80	3,00	1,06	18,00
1	180	20	150	156,40	4.820,33	13103,10	0,00	<u>1,06</u>	13,00
custo das parcelas =				50.572,00	reais	Artéria mais deslav.		1-3-6	
custo da rede =				53.621,00	reais	Menor gradiente		C1	
custo de energia =				52.321,16	reais	Decréscimo		$\Delta J = 1,06 \text{ m}$	
custo total =				156.514,16	reais				

Quadro 5.9 - f: 5ª Iteração

$$Z5 = 111,92 \text{ m} - 1,06 \text{ m} = 110,86 \text{ m}$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	L	P req	Dnom	Dint	C	K	EP	Δ J	Pdisp
	m	mca	mm	mm	reais/m	reais/m	m	m	mca
6	100	-	250	252,00	7.502,96	-	19,83	0,59	19,83
5	180	20,00	150	156,40	4.820,33	1180,80	3,37	1,06	18,37
4	180	20,00	150	156,40	4.820,33	13103,10	0,37	1,06	13,37
3	180	-	200	204,20	6.780,96	-	18,40	0,92	18,40
2	180	20,00	150	156,40	4.820,33	1180,80	1,94	1,06	16,94
1	180	20,00	200	204,20	24.479,27	13103,10	0,00	0,25	13,00

custo das parcelas =	50.572,00	reais
custo da rede =	58.730,55	reais
custo de energia =	49.791,36	reais
custo total =	159.093,91	reais

O quadro 5.10 e a figura 5.5, mostram, os custos de todas as iterações, para o sistema de distribuição da figura 5.1. Através dos mesmos, observa-se que o custo da rede coletiva só sofreu modificações, após a obtenção do custo ótimo (permanece constante até a cota de cabeceira de 111,92 mca). Como era de se esperar, vê-se a linearidade crescente da curva do custo de energia de bombeamento, à medida que se aumenta a cota de cabeceira da rede de distribuição. Verifica-se também que o custo dos equipamentos parcelares influenciaram a curva do custo integrado, até atingir o custo ótimo global.

Quadro 5.10 - Resumo dos custos obtidos de acordo com a metodologia de otimização integrada, segundo a cota piezométrica da cabeceira da rede

Cota (em m)	Custo (em Reais)			
	Rede de distribuição	Equip. parcelas	Energia bomb.	total
118,92	53.621,00	42.047,20	69.027,38	164.695,58
117,49	53.621,00	42.997,60	65.614,54	162.233,14
113,92	53.621,00	43.948,00	57.094,37	154.663,37
112,49	53.621,00	44.260,00	52.681,53	154.562,53
111,92	53.621,00	50.572,00	52.321,16	156.514,16
110,86	58.730,55	50.572,00	49.791,36	159.093,91

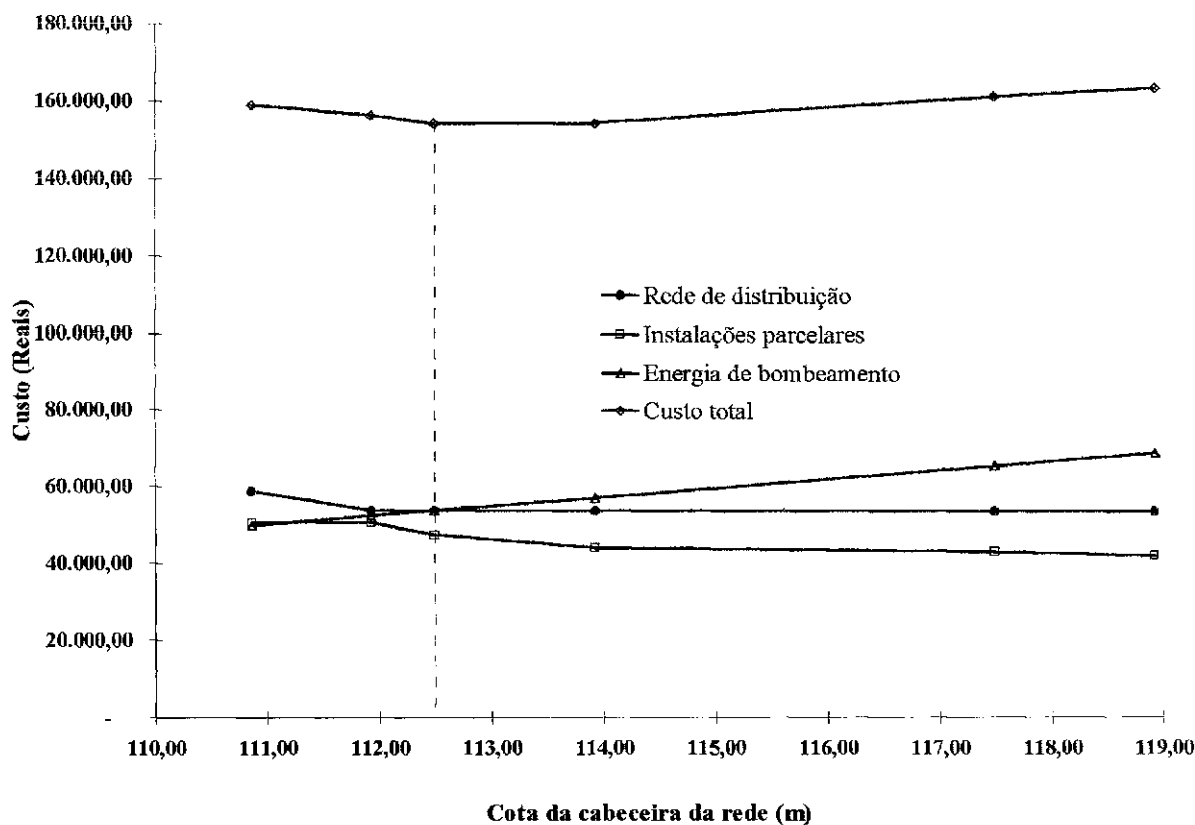


Figura 5.5 - Curva do custo conjunto (rede de distribuição + equipamentos das parcelas de irrigação + energia de bombeamento), versus cota piezométrica disponível na origem do sistema.

O quadro 5.9-d (obtenção do valor ótimo do custo conjunto) apresenta os valores das pressões disponíveis nas tomadas das parcelas. A partir destas, pode-se assegurar que os projetos parcelares otimizados do sistema de distribuição, são os ilustrados no quadro 5.11.

Quadro 5.11 - Projetos parcelares a serem utilizados de acordo com a solução otimizada (cota da cabeceira da rede 112,49 m)

Parcelas	Projeto	Pressão na tomada da parcela - H (mca)
1	3	13
2	1	20
3	2	15
4	1	20

Em resumo, o projeto que representa o custo ótimo do sistema integrado na condição de contorno referente à cota de cabeceira da rede de distribuição em 112,49 metros, será:

Parcelas de irrigação (ver figura 5.2 e quadro 5.5):

Parcela 1

- Cota do terreno: 90 m
- Pressão requerida tomada d'água: 13 mca, utilização do projeto 3 (ver quadro 5.5).
- Linha lateral composta por 2 diâmetros:
 - 16 mm (PN 40), com 14 m
 - 20 mm (PN 40), com 76 m
 Perda de carga ao longo da linha lateral: 0,76 mca
- Linha de derivação, com diâmetro de 100 mm (PN 60), com 180 m
 - Perda de carga ao longo da linha de derivação: 1,11 mca

- Linha principal, com diâmetro de 150 mm (PN 60), com 100 m

Perda de carga ao longo da linha principal: 1,13 mca

- Perda de carga total (hf): 3 mca
- Custo: 13.823,80 reais

Parcela 2

- Cota do terreno: 85 m
- Pressão requerida tomada d'água: 20 mca, utilização do projeto 1 (ver quadro 5.5).

- Linha lateral composta por 2 diâmetros:

12 mm (PN 40), com 78 m

16 mm (PN 40), com 12 m

Perda de carga ao longo da linha lateral: 6,69 mca

- Linha de derivação, com diâmetro de 100 mm (PN 60), com 180 m

Perda de carga ao longo da linha de derivação: 1,11 mca

- Linha principal, com diâmetro de 150 mm (PN 60), com 100 m

Perda de carga ao longo da linha principal : 2,20 mca

- Perda de carga total (hf): 10 mca
- Custo: 10.511,80 reais

Parcela 3

- Cota do terreno: 90 m
- Pressão requerida tomada d'água: 15 mca, utilização do projeto 2
(ver quadro 5.5).
- Linha lateral composta por 2 diâmetros:
 - 12 mm (PN 40), com 12 m
 - 16 mm (PN 40), com 78 mPerda de carga ao longo da linha lateral: 0,04 mca
- Linha de derivação, com diâmetro de 100 mm (PN 60), com 180 m
Perda de carga ao longo da linha de derivação: 1,09 mca
- Linha principal, com diâmetro de 150 mm (PN 60), com 100 m
Perda de carga ao longo da linha principal: 0,86 mca
- Perda de carga total (hf): 5 mca
- Custo: 11.462,20 reais

Parcela 4

- Cota do terreno: 85 m
- Pressão requerida tomada d'água: 20 mca, utilização do projeto 1
(ver quadro 5.5).

- Linha lateral composta por 2 diâmetros:

12 mm (PN 40), com 78 m

16 mm (PN 40), com 12 m

Perda de carga ao longo da linha lateral: 6,69 mca

- Linha de derivação, com diâmetro de 100 mm (PN 60), com 180 m

Perda de carga ao longo da linha de derivação: 1,11 mca

- Linha principal, com diâmetro de 150 mm (PN 60), com 100 m

Perda de carga ao longo da linha principal : 2,20 mca

- Perda de carga total (hf): 10 mca

- Custo: 10.511,80 reais

Rede de distribuição (ver figura 5.1 e quadro 5.9-d)

Trecho 1:

Tubulação com diâmetro de 150 mm (PN 125), com comprimento de 180m

Trecho 2:

Tubulação com diâmetro de 150 mm (PN 125), com comprimento de 180m.

Trecho 3:

Tubulação com diâmetro de 200 mm (PN 125), com comprimento de 180m.

Trecho 4:

Tubulação com diâmetro de 150 mm (PN 125), com comprimento de 180m.

Trecho 5:

Tubulação com diâmetro de 150 mm (PN 125), com comprimento de 180m.

Trecho 6:

Tubulação com diâmetro de 250 mm (PN 125), com comprimento de 100m.

Custo das tubulações da rede de distribuição: 53.621,00 reais

Energia de bombeamento

Altura manométrica: $112,49 \text{ m} - 90 \text{ m} = 22,49 \text{ m}$

Custo capitalizado da energia 53.681.53 reais.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O dimensionamento ótimo dos sistemas coletivos de irrigação por gotejamento, mediante o modelo de otimização conjunta, proposto nesta tese, tem como principal vantagem conseguir uma melhor economia no custo total do sistema, em comparação com os custos obtidos com dimensionamentos efetuados através de outros métodos de otimização já consagrados, que não consideram os custos das parcelas de irrigação, como variáveis do sistema.

A relação entre as pressões requeridas na cabeceira da parcela e seu referido custo de instalação é um fator fundamental no dimensionamento do sistema integrado. O método de otimização integrada dos sistemas de irrigação pressurizados facilita a decisão a tomar com respeito a este aspecto.

Referindo-se a aplicação da metodologia, as linhas laterais direcionaram o custo da parcela nas 4 propostas de pressões na cabeceira das mesmas. Devido as linhas laterais serem em grande número, comparadas com as linhas de derivação e principal.

O tipo de gotejador utilizado foi o autocompensante. Em tal caso poderão ser adotados menores diâmetros para as laterais e praticamente não se necessitará de válvulas reguladoras de pressão na parcela de irrigação. A viabilidade econômica desta alternativa se verifica comparando-se o aumento de custo decorrente da utilização dos gotejadores autocompensantes, com a economia proporcionada pelas tubulações de maiores diâmetros sem válvulas reguladoras de pressão.

Diante da heterogeneidade do terreno (cotas diferenciadas para cada parcela), o método permite otimizar o sistema de distribuição que alimenta um número ilimitado de parcelas (com várias propostas de dimensionamento), obtendo assim a otimização integrada das mesmas em conjunto com a rede de distribuição mais energia de bombeamento do sistema.

Além das economias alcançadas com a otimização conjunta, o modelo tem outras vantagens. A primeira importância relevante, é que com a otimização conjunta se obtém um dimensionamento ótimo integrado nas redes coletiva e privadas e na energia de bombeamento, evitando assim, a separação existente entre o dimensionamento da rede coletiva e das parcelas de irrigação. A outra vantagem é que, com a otimização conjunta, a rede de distribuição ficará hidráulicamente equilibrada, pois não haverá artérias demasiadamente forçadas, nem artérias com grandes excessos de pressão. Dessa maneira garantem-se as

pressões mínimas em todos terminais da rede e se evita o inconveniente da utilização dos limitadores de carga (válvulas reguladoras de pressão), nos terminais com excessos de pressão acentuados.

A flexibilidade do modelo de otimização conjunta é praticamente ilimitada, em se tratando do dimensionamento de sistemas coletivos por gotejamento. O projetista pode eleger, várias condições de projeto, nas parcelas de irrigação, na rede coletiva, e no sistema de bombeamento.

Para a aplicação do modelo de otimização integrada em outros métodos de irrigação pressurizada, pode-se utilizar a mesma metodologia do sistema operacional, desenvolvido por Gomes em 1992 (para irrigação por aspersão convencional), considerando a variação do custo das parcelas de irrigação segundo a pressão que às alimentam.

Nesta pesquisa, a metodologia de otimização integrada foi aplicada à irrigação por gotejamento, em se tratando de um sistema fixo (irrigação localizada), o projeto está condicionado pelo espaçamento do cultivo, pela área da parcela e pela vazão e pressão nominal do gotejador. O custo da parcela de irrigação varia com a pressão em sua cabeceira, segundo as perdas de carga nas tubulações, que refletem os menores e maiores diâmetros das linhas principais e secundárias da parcela.

Tendo-se verificado a eficiência da metodologia de otimização integrada, sugere-se buscar, em trabalhos posteriores, a verificação na hipótese de

sua aplicação à outros sistemas de irrigação pressurizada (pivô central, canhão hidráulico, microaspersão, etc.).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFIA CITADA

- ALZAMORA, F. M.; TÁRREGA, F. S.. **Dimensionamento Econômico de Tuberias de Presion**, Cuso de Ingenieria Hidraulica, Aplicada a Los Sistemas de Distribucion de Agua, Universidad Politecnica de Valencia. Madrid, 1987. 8 Sec.
- BALOGH, J. ; GERGELY, I.. **Basic Aspects of Trickling Irrigation**, Budapest, 1985. 8 p.
- BERNARDO, Salassier. **Manual de Irrigação**, Viçosa: Ed. Universitária / UFV, 1986.
- CABELLO, Fernando Pizarro. **Riegos Localizados de Alta Frecuencia**. Goteo, Microaspersión, Exudación. 3 ed. Ed. Mundi-Prensa, 1996.
- DAKER, Alberto. **A Água na Agricultura**, vol. 3, 6 ed. , Ed. Freitas Bastos, 1984. p.218-219.
- FERNANDEZ, J. B.. **Diseño Hidraulico en Instaciones de riego a Presión (Aspersión y Goteo)**. XI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Campinas, 1996. p. 40-41.
- GOMES, Heber Pimentel. **Dimensionamento Optimo del Conjunto Red Coletiva y Privadas Del Riego por Aspersion**. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, 1992.

- GOMES, Heber Pimentel. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento.** João Pessoa: Ed. Universitária/UFPB, 1994..
- GRANADOS, A. **Infraestructura de Regadios, Redes Coletivas de riego a Presión.** Servicio de Publicación de la E. T. S. I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, 1990.
- GUIMARÃES jr., João Abmer. **Dimensionamento Econômico de uma Parcela de Irrigação por Gotejamento,** Tese de Mestrado, Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, , 1993.
- GUIMARÃES ET AL **Dimensionamento de uma Parcela por Gotejamento,** XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia agrícola, Viçosa-MG, 1995.
- HOWARD, P. W.. **Trickle Irrigation,** National Engineering Handbook, Water Resources Publications, Highlands Ranches Colorado, USA. 1984.
- KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle Irrigation Design.** Rain Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975.
- LEAL, Antônio Farias. **Estudo comparativo de Métodos de Otimização de Redes Malhadas Pressurizadas.** Tese de Mestrado, Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1995.
- LOPEZ ET AL, **Riego Localizado.** Centro Nacional de Tecnologia de Regadios. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, 1992.
- MATOS, José de Arimatea. **Características Hidráulicas e de Distribuição de Água do Microaspersor Dan Sprinkler 2001.** Tese de Mestrado, Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1996.

MOLLE, F. e CADIER, E. **Manual do pequeno açude**. SUDENE, TAPI, ORSTOM. Recife, 1992. 190p.

SAAD, João Carlos Cury. **Otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação por microaspersão utilizando programação não-linear**. Tese de Doutorado, Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz" da USP, 1993. 114 p.

SERRANO, José Gaecía. **Sistemas Hidraulicos a Presion**, Aspectos Práticos de su Diseño y Explotación. Universidade Politecnica de Valencia, 1990. 122p.

TIBAU, Artur Oberlaender. **Técnicas Modernas de Irrigação**. 5a edição, Ed. Nobel, 1984, Sao Paulo. 190 p.

VENTSEL, E. S., **Investigation de Operaciones, Problemas Principios Metodologia**. Ed. Mir, Moscou, 1983. 113p.

VIEIRA, Dirceu Brasil. **As Técnicas de Irrigação**. 2 ed. São Paulo. Ed. Globo, 1995. 179p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BASTOS, Edna. **Manual de Irrigação**. Técnicas Para Instalação de Qualquer Sistema na Lavoura, 3 ed. São Paulo. Ed. Ícone, 1991. 53p.

BENAMI, A.; OFEN, A.. **Irrigations Engeneering**. Sprinkler, Trickler, Surface Irrigation. Published by Irrigation Engineering Scientific Publications in cooperation with the International Information Center, 1984. p.158, 163.

- CAVERO, F. J.; HERNADEZ, J.. **Evaluacion y Viabilidad Economica Del Riego Por Aspersión en um Secano Arido de Aragon**. Ed. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid, 1988.
- COSTA, E. F.; VIEIRA, R. F.; VIANA, P. A. **Quimigação, Aplicações de Produtos Químicos e Biológicos via Irrigação**. EMBRAPA-SPI, 1996. 79p.
- KARMELI, D.; PERI, G.; TODES, M.. **Irrigation Systems: Design and Operation**. Oxford University, 1985. 20p. 8 cap.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. Van Nostrand Reinhold. 1990.
- OLLITA, Antônio Fernando Lordelo. **Os Métodos de Irrigação**. Ed. Nobel, São Paulo 1986. 142p.
- WASKI, Thomas M. **Optimization and pipe-sizing decisions**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 121, n. 4, p. 340-343, jun./ag. 1995.
- WITHERES, Bruce; VIPOND, Stanlay. **Irrigação Projeto e Prática**. 2 ed. São Paulo. Ed. Nobel, 1984. 52 p.
- YAGÜE, J. L. F.; ROCHE, J. C.. **Curso Elemental de Riego**. Ed. Ministerio da Agricultura, Pesca y Alimentacion. Madrid, 1990. p. 199-200.