

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

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE TUBULAÇÕES
EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
HERLEN LIRA HENRIQUES TORRES

CAMPINA GRANDE

1998

HERLEN LIRA HENRIQUES TORRES

**DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE TUBULAÇÕES EM
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA**

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

HEBER PIMENTEL GOMES

Orientador

Campina Grande, Paraíba

1998

**DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG**

T693d Torres, Herlen Lira Henriques
Dimensionamento economico de tubulacoes em sistemas de irrigacao localizada / Herlen Lira Henriques Torres. - Campina Grande, 1998.
86 f. : il.

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

1. Recursos Hidricos 2. Dissertacao I. Gomes, Heber Pimentel, Dr. II. Título

CDU 626.8(043)

**DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE TUBULAÇÕES
EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA**

HERLEN LIRA HENRIQUES TORRES



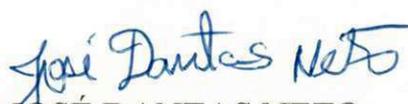
HEBER PIMENTEL GOMES

Orientador



ROSIRES CATÃO CURI

Componente da Banca



JOSÉ DANTAS NETO

Componente da Banca

“Tudo o que essa água atingir se tornará são e saudável e em toda parte aonde chegar a torrente haverá vida. Nas margens junto ao rio, de ambos os lados, crescerá toda espécie de árvores frutíferas, suas folhas não murcharão e seus frutos jamais se acabarão, cada mês darão novos frutos, pois as águas que banham as árvores saem do santuário. Seus frutos servirão de alimento, suas folhas servirão de remédio”.

Ez 47, 9b. 12

AGRADECIMENTOS

A DEUS, meu Mestre Maior, por me orientar sempre para o saber, incentivando-me para que eu consiga alcançar meus objetivos principais.

A minha tão querida mãe, Maria Lenita Lira Henriques Torres, por todo amor, carinho e dedicação que recebi durante toda a minha vida.

A meu pai, José Herberto Henriques Torres, que me deixou tantas lições de vida e a maior herança do mundo: a dignidade.

A minha noiva, Roberta Flávia V. Queiroz, pelo carinho, compreensão e ajuda para a conclusão deste trabalho.

Aos meus familiares, em especial a minha irmã, Helen Lira Henriques Torres, que tanto me incentivaram na realização desta pesquisa.

A todos os professores do Laboratório de Hidráulica da UFPB, Campus II, pelo acolhimento e ensinamentos ministrados.

Aos colegas de curso, Douglas Silva Luna, Eduardo Felipe C.C. de Oliveira, Fernando Fernandes da Silva e Soniaeli Pires de Carvalho Sá, pelo esforço em conjunto para um melhor aprendizado.

Aos demais colegas do Laboratório de Hidráulica, representados por Klebber Teodomiro Formiga e Paulo da Costa Medeiros, os quais tiveram participação importante na realização desta pesquisa.

Aos funcionários do curso de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Civil, especialmente na Área de Recursos Hídricos, pelo auxílio e dedicação ao longo deste estudo.

Em especial, ao professor orientador Heber Pimentel Gomes, por sua dedicação e empenho, sempre me auxiliando na ampliação de conhecimentos para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Com o constante crescimento da utilização da irrigação localizada, busca-se cada vez mais, uma forma de conseguir o custo mínimo conjunto, Rede de Distribuição mais Energia de Bombeamento. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova metodologia onde não existe distinção entre o cálculo da rede coletiva e da rede parcelar, considerando ainda, o efeito das perdas de carga localizadas ocorridas nos cabeçais de controle. Foram calculados dois casos, onde o primeiro consistiu no redimensionamento de uma rede que já havia sido calculada através da metodologia da otimização integrada, e o segundo foi uma comprovação para um exemplo real. Observou-se que os resultados obtidos foram satisfatórios, garantindo uma redução dos custos totais de 5 a 10% com relação às metodologias de otimização que não levam em conta os avanços alcançados nesta pesquisa.

ABSTRACT

With the constant growth in the use of the microaspiration and trickle irrigation, it has been searched for more and more, a form of getting the minimum group cost (Distribution Net and Pumping Energy). This work presents the development of a new methodology where distinction among the calculation of the collective net and of the parcel net doesn't exist, adding the effects of the located load losses happened in the control bolsters. Two cases were calculated, the first consisted on the calculation of a net that had been already calculated through the methodology of the integrated optimization, and the second of a confirmation to a real example. It was observed that the obtained results were satisfactory, guaranteeing a reduction of the total costs from 5 to 10% with relationship to the optimization methodologies that don't take into account the progresses reached on this research.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1

CAPÍTULO II

HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS

DA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

4

2.1 - ASPECTOS GERAIS

4

2.2 – VANTAGENS E LIMITAÇÕES

DA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

5

2.3 - COMPONENTES DE UM SISTEMA

DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

7

2.3.1 - Cabeçal de Controle

7

2.3.2 - Tubulação Principal

9

2.3.3 - Linhas de Derivação

9

2.3.4 - Linhas Laterais

9

2.3.5 - Emissores

9

2.4 – GOTEJAMENTO

10

2.5 - MICROASPERSÃO

12

CAPÍTULO III

HIDRÁULICA APLICADA AOS

SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA	15
3.1 - INTRODUÇÃO	15
3.2 - PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBULAÇÕES	17
3.2.1 – Fórmula de Hazen-Williams	17
3.2.2 – Fórmula de Darcy-Weissbach	18
3.2.3 – Fórmula de Manning	19
3.3 - FATORES DE CORREÇÃO DA PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBULAÇÕES COM MÚLTIPLAS SAÍDAS	20
3.4 - REGRA DOS 20%	26

CAPÍTULO IV

METODOLOGIAS PARA O DIMENSIONAMENTO DE REDES RAMIFICADAS

4.1 - INTRODUÇÃO	29
4.2 - PROGRAMAÇÃO LINEAR	29
4.3 - PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR	33
4.3.1 – Aplicação em Redes Ramificadas	37
4.4 - PROGRAMAÇÃO DINÂMICA	38
4.4.1 – Metodologia da Otimização Integrada	38

CAPÍTULO V

O MÉTODO GRANADOS	40
5.1 – INTRODUÇÃO	40
5.2 – SOLUÇÃO PRÉVIA	41
5.3 – PROCESSO ITERATIVO DE OTIMIZAÇÃO	42

CAPÍTULO VI

APLICAÇÃO DO MÉTODO ESCOLHIDO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
6.1 - INTRODUÇÃO	49
6.2 - METODOLOGIA UTILIZADA	50
6.3 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO CASO 1	52
6.4 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO CASO 2	69

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
-----------------------------------	----

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
-----------------------------------	----

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1 - Coeficiente de atrito "C" da fórmula de Hazen-Williams	18
QUADRO 3.2 - Coeficiente de atrito "η" da fórmula de Manning	20
QUADRO 3.3 - Coeficiente de redução "F" em função de N, m, e da distância da primeira derivação ao início da tubulação	25
QUADRO 5.1 - Limite de Velocidade máxima em função dos diâmetros das tubulações recomendados por Granados	42
QUADRO 6.1 - Dados referentes à Rede de Distribuição e às Parcelas (CASO 1)	53
QUADRO 6.2 - Trechos da Rede (CASO 1)	54
QUADRO 6.3 - Diâmetros, Velocidade e Vazão máxima, e preço unitário de cada diâmetro	55
QUADRO 6.4 - Cota Piezométrica de Cabeceira e excessos de pressão da solução prévia (CASO 1)	56
QUADRO 6.5 - Gradientes de câmbio C (CASO 1)	57
QUADRO 6.6 - Iterações (CASO 1)	59
QUADRO 6.7 - Comprimentos de cada trecho (CASO 1)	67

QUADRO 6.8 - Características gerais da Rede de Distribuição e das Parcelas(CASO 2)	71
QUADRO 6.9 - Trechos da Rede (CASO 2)	72
QUADRO 6.10 - Cota Piezométrica de Cabeceira e Excessos de pressão da Solução Prévia (CASO 2)	72
QUADRO 6.11 - Gradientes de Câmbio C (CASO 2)	73
QUADRO 6.12 - Iterações (CASO 2)	74
QUADRO 6.13 - Comprimentos de cada Trecho (CASO 2)	80

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Instalações de um Cabeçal de Controle	8
FIGURA 2.2 - Componentes básicos de um Sistema de Irrigação Localizada	9
FIGURA 2.3 - Gotejador de Longo Percurso	11
FIGURA 2.4 - Gotejador de Curto Percurso	11
FIGURA 2.5 - Gotejador Tipo Vórtice	11
FIGURA 2.6 - Microaspersor conectado à Linha Lateral e apoiado em uma Haste	14
FIGURA 3.1 - Variação de Perda de Carga em função da variação da Vazão circulante em uma Tubulação	21
FIGURA 5.1 - Rede de Distribuição Fictícia	43
FIGURA 5.2 - Custo Mínimo de uma Rede de Distribuição em função da Cota Piezométrica de Cabeceira	46
FIGURA 5.3 - Curva que representa a otimização conjunta Rede de Distribuição x Estação de Bombeamento	47
FIGURA 6.1 - Rede de Distribuição referente ao CASO 1	52
FIGURA 6.2 - Gráfico de Custos Totais referente ao CASO 1	68
FIGURA 6.3 - Rede de Distribuição referente ao CASO 2	70
FIGURA 6.4 - Gráfico de Custos Totais referente ao CASO 2	79

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A irrigação é uma prática utilizada para garantir a regularização da produção agrícola, principalmente em áreas onde há irregularidade no que diz respeito às chuvas. O método de irrigação localizada, em particular, vem se desenvolvendo ao longo do tempo e tendo cada vez maior utilização devido às vantagens que apresenta sobre os demais. Na irrigação localizada, a maior parte das tubulações se localiza no interior das parcelas e têm derivações de vazão, sejam elas para outras tubulações ou para emissores. Por este motivo, existe cada vez mais, uma preocupação em buscar novos métodos de dimensionamento ótimo de tubulações com vazões variáveis.

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de otimização econômica para redes de abastecimento de irrigação localizada (microaspersão e gotejamento). Será adicionado à metodologia desenvolvida por ALFREDO GRANADOS, o cálculo das linhas laterais e das linhas de derivação – com a utilização do coeficiente de Christiansen (F) e obedecendo à regra dos 20%, sendo considerado ainda no método, o cálculo das perdas de carga localizadas nos cabeçais de controle.

Inicialmente, no capítulo II, é apresentado um histórico e algumas características da irrigação localizada, apresentando suas vantagens e limitações, e mostrando também suas subdivisões - gotejamento e microaspersão - além dos componentes existentes em cada um destes sistemas.

O capítulo III faz uma revisão da hidráulica aplicada aos sistemas de irrigação localizada, falando sobre as perdas de carga por atrito em tubulações com vazão contínua e em tubulações de vazão variável, apresentando as fórmulas utilizadas em cada caso, os fatores de correção da perda de carga em tubulações com derivações, e a regra dos 20%.

O capítulo IV apresenta as metodologias existentes para o dimensionamento de redes ramificadas, entre elas, os métodos da programação linear e não linear e por fim o método da programação dinâmica, no qual está incluída a metodologia desenvolvida por GRANADOS e as variações propostas na presente tese.

O método GRANADOS, com descrição de sua solução prévia e de todo o processo iterativo é mostrado no decorrer do capítulo V, que apresenta também os gráficos de variação de custo em função da variação da cota piezométrica de cabeceira.

No capítulo VI, é desenvolvida toda a nova metodologia para dois exemplos, sendo um deles fictício, onde o objetivo é a comparação com outro método de dimensionamento otimizado já existente, e o outro consiste em um redimensionamento de um projeto real, que tem por objetivo comprovar a utilização do método para terrenos de topografia irregular.

Por fim, as conclusões e recomendações para trabalhos futuros, resultantes da análise detalhada da pesquisa são apresentadas no capítulo VII.

CAPÍTULO II

HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS DA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

2.1 – ASPECTOS GERAIS

A utilização da irrigação localizada começou a se desenvolver na Inglaterra na década de 40 e em Israel na década de 50 (Vermeiren & Jobling, 1980). No Brasil se deu a partir de 1972, com o sistema de irrigação por gotejamento em forma bastante rudimentar. O uso da microaspersão só foi desenvolvido comercialmente por volta de 1982, e tem alcançado o mesmo sucesso que em países onde a irrigação localizada já era usada tradicionalmente (Vermeiren & Jobling, 1980). Apesar de todas as dificuldades normais da implantação de uma nova tecnologia, aliada à utilização de práticas agrícolas altamente desenvolvidas, a irrigação localizada é uma excelente opção para áreas onde outros métodos apresentam limitações.

O custo de um sistema de irrigação localizada se torna elevado não somente por ser um sistema com linhas laterais fixas, mas também devido ao fato de que o número de emissores por unidade de área é bastante elevado, e o será mais ainda se o método for o gotejamento, pois este requer espaçamentos ainda menores que a microaspersão, dependendo também do

espaçamento entre as plantas. Isto justifica o desenvolvimento das inúmeras pesquisas relacionadas ao problema, tentando obter cada vez mais um custo mínimo, tanto em relação às tubulações, quanto em relação aos gastos com energia.

2.2 – VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

A irrigação localizada possui inúmeras vantagens em relação aos demais métodos de irrigação. As principais vantagens são as seguintes:

- *Regularidade do teor de umidade do solo* - É a principal vantagem do método, a condição ótima de umidade que é mantida constantemente na parte do solo que é explorada pelas plantas, faz com que haja uma alta produção e uma excelente qualidade do produto obtido para algumas culturas.
- *Alta eficiência no uso da água* - A quantidade de água aplicada, apesar de menor que o geralmente usado, é suficiente para repor a água consumida no período anterior. É molhada apenas uma fração da área total da parcela de irrigação.
- *Melhor adaptação à diferentes tipos de solo e de topografia* - Em virtude da aplicação de água ao solo em pequena intensidade, a irrigação localizada pode ser usada em terrenos com topografia irregular e/ou acidentada.
- *Utilização em solos salinizados ou com água salina* - Por ser um sistema em que a água é aplicada frequentemente, é possível a utilização de água com concentração de salinidade, sem problemas imediatos para a cultura.

Entretanto, esta vantagem deve ser usada como reserva, devido ao acúmulo de sais que normalmente irá ocorrer, como em qualquer outro método de irrigação.

- *Redução dos custos operacionais* - Por se tratar de um sistema fixo, utiliza menos mão-de-obra que os sistemas de aspersão convencional portáteis ou semi-portáteis, além do que, a pressão de operação dos sistemas de irrigação localizada gira em torno de 50 a 70% de um sistema por aspersão convencional, o que reduz ainda mais os custos de operação.
- *Facilidade de automação* -- As linhas laterais de derivação, por serem fixas, permitem uma maior facilidade de automação para o trabalho.

Em contrapartida a irrigação localizada apresenta alguns problemas que podem vir a afetar ou até inviabilizar a sua utilização, são eles:

- *Sensibilidade ao entupimento* - É este o principal problema da irrigação localizada, a ocorrência de entupimentos nos orifícios de saída de água podem vir a afetar a distribuição da água, e conseqüentemente a produção. Este problema pode ser evitado com um bom sistema de filtragem da água e um adequado manejo da irrigação.
- *Salinidade do solo* - Devido ao acúmulo gradual do volume de solo molhado, podem ocorrer problemas de salinidade na periferia do bulbo úmido. Este problema pode ser contornado com a lavagem do solo, através da aplicação de uma vazão maior que a requerida pela cultura cultivada.
- *Desenvolvimento radicular limitado* – Isto se deve ao fato de que apenas uma parte do solo ser umedecida, o que pode reduzir o rendimento da cultura, pois esta só se desenvolverá até o ponto em que o solo seja umedecido o suficiente.
- *Elevado custo inicial* - É um método de alto custo - devido a maior parcela do custo total ser relativo à rede de distribuição - e por isso só é

usado para irrigar culturas que forneçam ao produtor uma rentabilidade econômica alta.

2.3 – COMPONENTES DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

Os componentes básicos de uma instalação de irrigação localizada são identificados na figura 2.2 e são os seguintes:

1. Cabeçal de controle - Localiza-se na linha principal e é composto das seguintes partes:
 - Conjunto moto-bomba - Seja o sistema por gravidade ou por bombeamento, a idéia é fornecer água na pressão e vazão necessária ao sistema. Acrescentando as perdas de carga à pressão requerida pelos emissores.
 - Sistemas de filtragem - Parte imprescindível em um sistema de irrigação localizada, devido aos entupimentos nas saídas de água. Nos sistemas de irrigação por microaspersão a filtragem pode ser menos rigorosa que na irrigação por gotejamento, visto que estes têm menor diâmetro do bocal. Normalmente são empregados três tipos de filtros. Os filtros de areia, que servem para retenção de algas e matérias orgânicas, os de tela metálica e os de discos, que devem existir de qualquer maneira para a retenção de impurezas de maior diâmetro.
 - Sistema injetor de fertilizantes - Diversos produtos podem ser aplicados na água, como fertilizantes, inseticidas, fungicidas, herbicidas e produtos para desobstrução de gotejadores.

- Sistema de controle de vazão ou de pressão - Usados para uniformizar a aplicação da água em toda a área e composto por peças especiais, tais como válvulas, ventosas e manômetros.

Na passagem pelo cabeçal de controle, a água passa primeiro por uma válvula volumétrica, que é fechada automaticamente depois de ser usado o volume necessário. A água passa por filtros de areia e logo após injetor de fertilizante mistura à água a quantidade de adubo desejada. Sequencialmente, a água passa por filtros de tela ou disco, que servem para reter algumas impurezas que o adubo (sólido) venha a possuir. A perda de carga no cabeçal de controle é medida através de manômetros, que indicam o grau de limpeza do filtro.

A figura 2.1 ilustra um cabeçal de controle, também denominado unidade de controle, com cada um de seus equipamentos componentes, identificados através da legenda existente na figura, e a figura 2.2 os componentes básicos de um sistema de irrigação localizada.

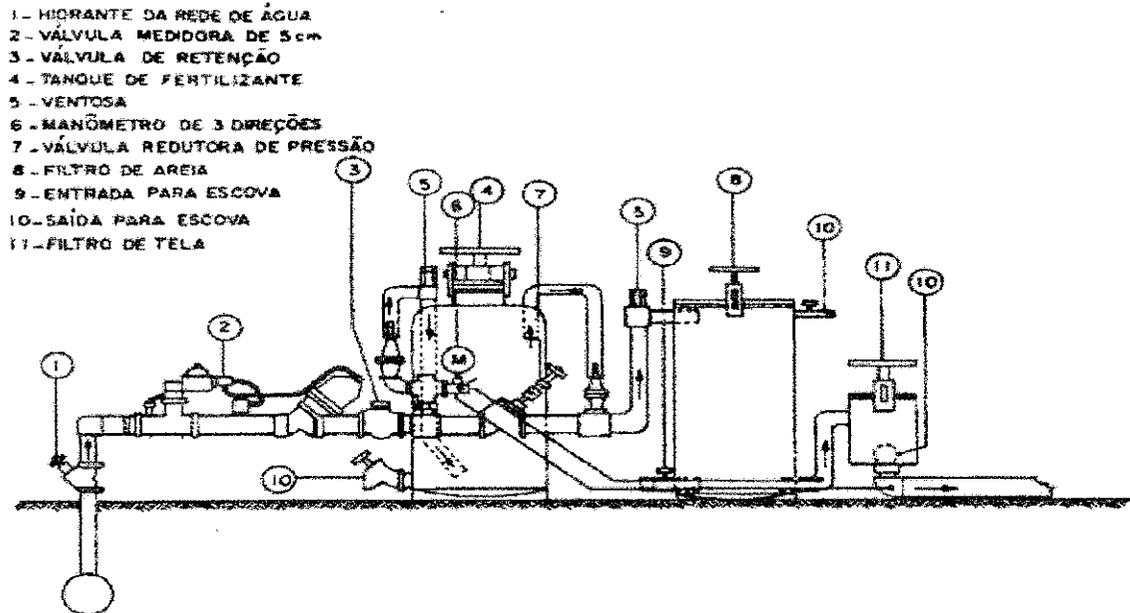


Figura 2.1 – Instalações de um cabeçal de controle

2. Tubulação principal - Faz a conexão entre o cabeçal de controle e as tubulações de derivação. Esta deve estar sempre enterrada para facilitar a movimentação de máquinas e equipamentos. Os materiais normalmente usados são o PVC e o aço galvanizado.
3. Linhas de derivação - São as linhas que interligam a linha principal e as linhas laterais. Os materiais mais comumente usado nestas tubulações é o polietileno e o PVC.
4. Linhas laterais - São compostas de polietileno ou de PVC, e têm como principal característica abastecer os emissores do sistema.

5. Emissores - Nos sistemas de irrigação localizada, os emissores podem ser compostos por orifícios, bocais, cápsulas porosas, gotejadores ou microaspersores.

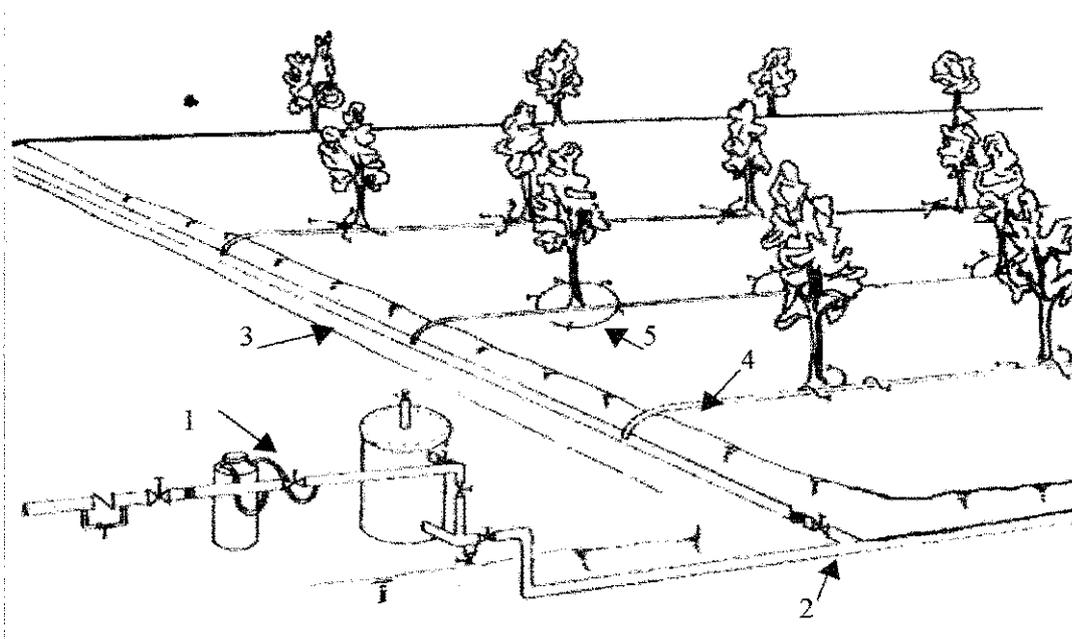


Figura 2.2 – Componentes básicos de um sistema de irrigação localizada

2.4 - GOTEJAMENTO

O gotejamento é um sistema de irrigação de alta frequência - a duração em dias entre duas irrigações sucessivas é baixa - no qual não há necessidade de molhar toda a superfície do terreno. Nesse sistema a água é aplicada diretamente sobre a zona radicular de cada planta sob forma de gotas, que são lançadas pelos gotejadores junto aos pés de cada planta.

É um sistema fixo de irrigação pressurizada, no qual as perdas de água por percolação são pequenas e as perdas por escoamento superficial e evaporação praticamente não existem.

Um sistema de irrigação por gotejamento é formado pelos seguintes componentes:

- *Gotejadores* - Os gotejadores são os dissipadores de energia de um sistema de irrigação por gotejamento. Devem reduzir a pressão de entrada, que varia de 5 a 15 mca, para zero, fazendo com que a saída d'água se processe em forma de gotas. Devem ser instalados nas linhas laterais (tubulações flexíveis estendidas paralelamente às fileiras das plantas). Por serem de diâmetro muito pequeno, estes são muito sensíveis aos entupimentos.

Os gotejadores em geral se dividem em tres categorias:

- *Gotejadores de longo percurso* ou microtubo (a dissipação de energia é feita através de um conduto capilar de longo percurso ou trajetórias em formas de labirinto ou espiral, onde a dissipação de energia se dá através do atrito);



Figura 2.3 – Gotejador de longo percurso

- *Gotejadores de curto percurso* (a perda de energia ocorre devido ao atrito entre e as contrações e expansões dentro do emissor);

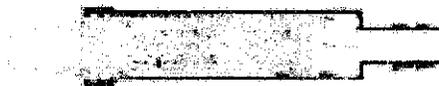


Figura 2.4 – Gotejador de curto percurso

- *Tipo Vórtice* (a dissipação de energia se dá devido ao movimento rotativo no interior do emissor).

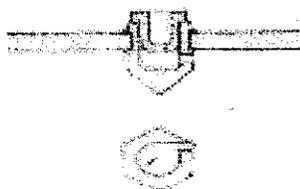


Figura 2.5 – Gotejador tipo Vórtice

Podendo todos estes tipos de gotejadores serem autocompensantes, isto é, dispostos de um dispositivo de auto-regulagem de vazão de saída da água mesmo que haja uma variação na pressão de serviço. Esta auto-regulagem de vazão é feita através de uma membrana de material sintético que diminui a seção de passagem da água com o aumento de pressão.

Os gotejadores autocompensantes têm um custo maior que os não-autocompensantes e menor vida útil. Mesmo assim têm sido mais utilizados

quando se pretende utilizar linhas laterais de maiores comprimentos ou quando a topografia da região é bastante acidentada.

Os demais componentes de um sistema por gotejamento são os mesmos descritos no item 2.3, ou seja, linhas laterais e de derivação, linha principal e cabeçal de controle.

2.5 - MICROASPERSÃO

A microaspersão é um sistema de irrigação intermediário entre a aspersão convencional e o gotejamento. Também os intervalos entre irrigações usados na microaspersão, estão entre os intervalos adotados na aspersão e no gotejamento. Por apresentar uma vazão e pressão maior que o gotejamento, este sistema é mais usado em solos com textura grossa, para que seja atingida a forma ideal do bulbo úmido e, conseqüentemente um melhor desenvolvimento radicular da cultura.

Os componentes de um sistema de irrigação por microaspersão são os seguintes:

- Microaspersores – Os microaspersores são os emissores de um sistema de irrigação por microaspersão. Operam normalmente, à pressão entre 10 e 20 mca e fornecem vazões que variam de 20 a 120 l/h. Ao contrário dos gotejadores, fazem com que a água atinja o solo molhando uma área considerável, podendo ser utilizados para irrigar mais de uma planta. Os microaspersores devem estar apoiados em hastes verticais ao terreno, a

uma altura média de 20cm, para que a água atinja uma área considerável. Os microaspersores possuem bocais com diâmetros entre 0,8 e 1,8 mm e declividades com a horizontal de 4 a 7%. O regime de fluxo pode ser turbulento ou não. O seu surgimento e desenvolvimento se deu através da tentativa de extinguir os problemas de entupimento, frequentemente ocorridos com os gotejadores, visto que estes últimos têm menor diâmetro do bocal. Os microaspersores podem ser conectados diretamente nas linhas laterais ou esta conexão pode ser feita através de pequenos tubos de polietileno, apoiados em hastes colocadas verticalmente sobre o terreno.

A figura 2.6 mostra um microaspersor apoiado em uma haste disposta sobre a linha lateral.

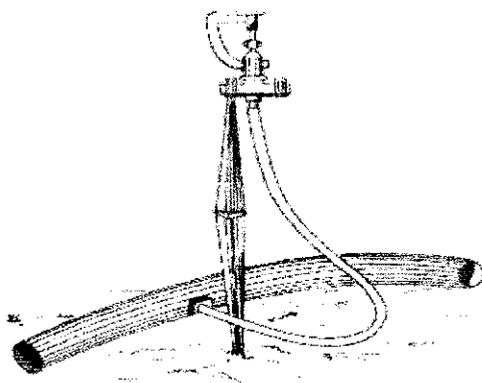


Figura 2.6 – Microaspersor conectado à linha lateral e apoiado em uma haste

Os demais componentes de uma instalação por microaspersão são os mesmos que foram apresentados no item 2.3, que são as linhas laterais e de derivação, a linha principal e o cabeçal de controle.

CAPÍTULO III

HIDRÁULICA APLICADA AOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

3.1 – INTRODUÇÃO

O escoamento de água através de tubulações de sistemas de irrigação pressurizada, desde que a seção do conduto seja uniforme, tem velocidade média praticamente constante ao longo de toda a tubulação. No entanto, nas linhas laterais, que possuem descarga em série, o fluxo é permanente e espacialmente variado.

O fluxo de água através de condutos forçados obedece basicamente às duas equações seguintes:

$$Q = A \cdot V \quad (3.1)$$

A equação da continuidade estabelece que para um escoamento permanente, a vazão permanece constante ao longo do conduto. As incógnitas da equação 3.1 correspondem a:

Q – Vazão (m^3/s)

V – Velocidade de fluxo (m/s)

A – Área do conduto (m^2)

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + J_{1-2} \quad (3.2)$$

A equação da energia ou equação de Bernoulli estabelece que em um escoamento permanente entre duas seções de um conduto, a soma das energias de pressão, potencial e cinética na seção 1 é igual a soma destas mesmas energias na seção 2 mais as perdas de energia que ocorre entre as duas seções. As incógnitas da equação 3.2 correspondem a:

$\frac{P}{\gamma}$ - Energia de pressão (mca)

Z - Energia potencial (mca)

$\frac{V^2}{2g}$ - Energia cinética (m/s)

J_{1-2} - Perda de carga entre as seções 1 e 2 (mca)

P - Pressão (Pa)

γ - Peso específico do fluido (N/m^3)

V - Velocidade média do escoamento na seção considerada (m/s).

A velocidade média em uma rede de irrigação se situa, como máximo, em torno de 2m/s, o que gera uma energia cinética muito pequena em relação às outras energias, sendo por isso desprezada no cálculo geral da energia.

3.2 – PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBULAÇÕES

A perda de carga contínua ao longo de uma tubulação é a parte da energia que é dissipada e transformada em calor através do atrito. Em escoamentos turbulentos, a perda de carga por atrito depende das características físicas do fluido (viscosidade e massa específica) e das características geométricas do conduto (diâmetro interno e rugosidade absoluta das paredes internas do tubo).

Varias são as fórmulas usadas para o cálculo da perda de carga contínua ao longo de uma tubulação com escoamento turbulento. A utilização de uma ou de outra vai depender do nível de precisão desejado pelo projetista assim como da semelhança entre o dimensionamento em questão e as hipóteses utilizadas no desenvolvimento da fórmula. As principais fórmulas empíricas usadas para este tipo de cálculo são:

3.2.1 – FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS

A fórmula de Hazen-williams é a fórmula mais utilizada para a determinação da perda de carga contínua ao longo das tubulações principais, secundárias, e das linhas laterais em um sistema de irrigação, desde que estas linhas tenham diâmetro superior a 50mm. A perda de carga através da fórmula de Hazen-williams é dada por:

$$j = 10.66 * \left(\frac{1}{D^{4.87}} \right) * \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} \quad (3.3)$$

Onde:

j – Perda de carga unitária (m);

Q – Vazão de circulação da água (m³/s);

D – Diâmetro interno da tubulação (m);

C – Coeficiente de Hazen-Williams, que varia em função do material de que é composta a tubulação e está apresentado no quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Coeficiente de atrito “C” da fórmula de Hazen-Williams

Material da tubulação	C
Polietileno	150
PVC	145
Cimento amianto	135
Alumínio	130
Aço Galvanizado	125
Concreto	120
Ferro fundido	130

3.2.2 – FÓRMULA DE DARCY-WEISSBACH

Esta é a fórmula empírica que, atualmente, possui melhor aceitação prática, desde que o diâmetro requerido pelo trecho de tubulação seja menor que 50mm , sendo por isso também conhecida por fórmula universal da perda de carga. A fórmula de Darcy-Weissbach apresenta a seguinte expressão:

$$j = 0.81 * \frac{f}{D^5} * \frac{Q^2}{g} \quad (3.4)$$

Onde:

j – Perda de carga unitária (m);

Q – Vazão de circulação da água (m³/s);

D – Diâmetro interno da tubulação (m);

g – Aceleração da gravidade (m/s²);

f – Coeficiente de atrito (adimensional).

O coeficiente de atrito f depende do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação. A determinação direta do coeficiente de atrito f pode ser feita através do diagrama de *Moody*.

3.2.3 – FÓRMULA DE MANNING

A fórmula de Manning é mais comumente usada para dimensionamento de canais, onde a água escoar em lâmina livre. No entanto, existe uma variação desta para o caso específico de tubulações onde é representada por:

$$j = 6.36 * \frac{(n^2 * V^2)}{D^{1.33}} \quad (3.5)$$

Em que:

j – Perda de carga unitária (m);

V – Velocidade média (m/s);

D – Diâmetro interno da tubulação (m);

n – Coeficiente de atrito de Manning (adimensional);

O quadro 3.2 apresenta os intervalos dos valores do coeficiente de Manning para diferentes materiais de fabricação dos tubos.

Quadro 3.2 – Coeficiente de atrito n da
Fórmula de Manning.

Material da Tubulação	n
Poliétileno	0,007 - 0,009
PVC	0,008 - 0,010
Aço	0,009 - 0,012
Ferro Fundido	0,012 - 0,017
Ferro Fundido revestido	0,011 - 0,014
Cimento Amianto	0,010 - 0,012
Concreto	0,011 - 0,014

3.3 – FATORES DE CORREÇÃO DA PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBULAÇÕES COM MÚLTIPLAS DERIVAÇÕES

As linhas laterais e de derivação constituem um caso especial no dimensionamento de um sistema de irrigação, visto que estas possuem uma diminuição gradativa da vazão, desde a vazão total que entra na tubulação (Q) até a vazão que abastece o último trecho desta (q). Com a diminuição de vazão ocorre também uma diminuição da perda de carga na tubulação,

que será sempre menor que a perda para uma linha onde entra a mesma vazão e não existam derivações. Esta perda de carga poderia ser calculada passo a passo, o que seria muito trabalhoso, especialmente para tubulações de grande comprimento. Christiansen (1942) propôs uma solução simples e bastante precisa para tubulações com várias saídas, que se aplica com êxito no caso de linhas laterais equipadas com gotejadores e de linhas de derivação que abastecem linhas laterais.

A figura seguinte (3.1) ilustra a variação da perda de carga (h_f) em função da variação de vazão circulante (q) em cada trecho de uma linha com múltiplas saídas.

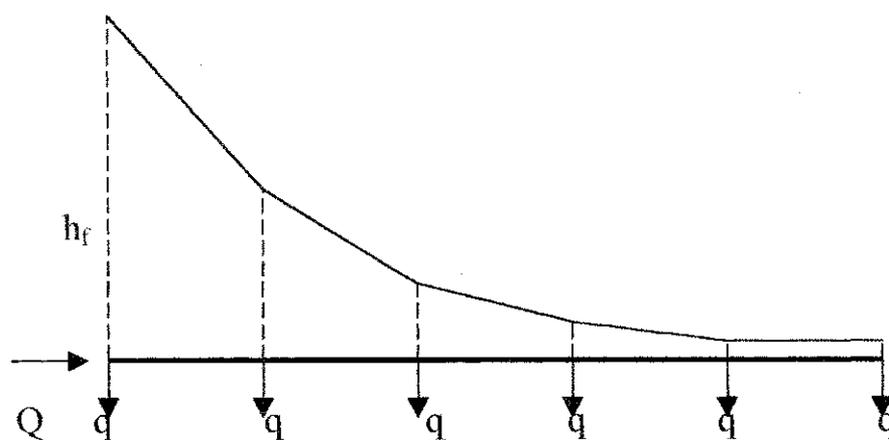


Figura 3.1 – Variação da perda de carga em função da variação da vazão circulante em uma tubulação com vazão variável.

O coeficiente de Christiansen faz a compensação das perdas de carga através de um coeficiente de redução (Coeficiente de Christiansen – F), que varia em função do número de saídas que a tubulação possui, da fórmula da perda de carga usada, e da distância entre o início da tubulação e a primeira derivação. O coeficiente de Christiansen tem valor igual a 1 (quando não existem derivações na tubulação) e diminui com o aumento do número de derivações, o que faz com que a perda de carga diminua com o aumento do número de saídas.

As fórmulas que representam o valor do coeficiente de Christiansen variam em função da distância entre o início da tubulação e a primeira derivação.

Seja uma linha lateral de comprimento L , dotada de N aspersores com espaçamento S , onde o primeiro aspersor se situa também a uma distância S da entrada da lateral. A descarga de cada aspersor pode ser considerada igual a Q/N , onde Q é a vazão total da linha lateral. As vazões de cada trecho da linha lateral, desde o final até a entrada da tubulação serão:

$$Q/N, 2Q/N, \dots, nQ/N, \dots, (N-1)Q/N \text{ e } NQ/N$$

As fórmulas que expressam as perdas de carga contínuas ao longo do conduto possuem a forma $J=k L Q^m / D^b$, em que k , m e b são constantes específicas de cada fórmula (Hazen-Williams, Darcy-Weissbach, Scobey). Com base nesta expressão geral, as perdas de carga correspondentes a cada trecho da linha lateral, que equivale a cada espaçamento (S) são iguais a:

$$k S (Q/N)^m / D^b, k S (2Q/N)^m / D^b, \dots, k S (nQ/N)^m / D^b, \dots, \\ k S (NQ/N)^m / D^b$$

A perda de carga total h_f ao longo da linha lateral será:

$$h_f = \left(k \frac{Q^m}{D^b} \right) S \frac{1}{N^m} \sum_{n=1}^N n^m \quad (3.6)$$

Na equação 3.6 o termo entre parênteses corresponde à perda de carga unitária (j), produzida pela vazão Q transportada pela linha lateral de diâmetro D , supondo que não existem derivações para os aspersores.

Como $S = L / N$, a equação 3.6 pode ser expressa também da seguinte forma:

$$h_f = jL \left(\frac{1}{N^{m+1}} \sum_{n=1}^N n^m \right) \quad 3.7$$

O termo entre parênteses, que se representa pela letra F^* , é sempre menor ou igual a 1, e depende do número de aspersores da linha lateral e do expoente “ m ” utilizado na fórmula da perda de carga contínua. A equação 3.7 é geralmente, expressa por:

$$h_f = j L F \quad 3.8$$

Em que:

h_f = Perda de carga total na linha lateral;

j = Perda de carga unitária na linha lateral sem derivações;

L = Comprimento da linha lateral;

F = Coeficiente de redução.

Como pode-se observar na fórmula 3.8, a perda de carga total ao longo da linha lateral de comprimento L , que deriva uma vazão Q para N aspersores, ao longo de uma tubulação de diâmetro D , é igual à perda contínua ao longo da mesma linha lateral, considerada sem derivações, multiplicada pelo coeficiente de redução F .

Para uma linha lateral cujo primeiro aspersor esteja situado a uma distância da entrada do conduto igual a $S/2$, o coeficiente F^{**} se obtém pela equação:

$$F^{**} = \frac{\sum_{n=1}^N n^m - \frac{1}{2N}}{1 - \frac{1}{2N}} \quad 3.9$$

O quadro seguinte (3.3) fornece os valores do coeficiente de Christiansen a serem usados para cálculos através das fórmulas de Hazen-Williams e Darcy-Weissbach em função do número de aspersores N , onde F^* é o coeficiente que deve ser utilizado quando a distância entre o início da tubulação e a primeira derivação for igual aos demais espaçamentos. Caso esta distância seja igual à metade destes espaçamentos, deve ser utilizado o F^{**} .

Quadro 3.3 – Coeficiente de redução F em função de N , m , e da distância da primeira derivação ao início da tubulação.

N	Hazen (m = 1,85)		Darcy (m = 2,0)	
	F*	F**	F*	F**
1	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,639	0,519	0,625	0,500
3	0,535	0,442	0,518	0,422
4	0,486	0,412	0,469	0,393
5	0,457	0,397	0,440	0,378
6	0,435	0,387	0,421	0,369
7	0,425	0,381	0,408	0,363
8	0,415	0,377	0,398	0,358
9	0,409	0,374	0,391	0,355
10	0,402	0,371	0,385	0,353
11	0,397	0,369	0,380	0,351
12	0,394	0,367	0,376	0,349
13	0,391	0,366	0,373	0,348
14	0,387	0,365	0,370	0,347
15	0,384	0,364	0,367	0,346
16	0,382	0,363	0,365	0,345
17	0,380	0,362	0,363	0,344
18	0,379	0,361	0,361	0,344
19	0,377	0,361	0,360	0,343
20-21	0,376	0,360	0,359	0,342
22-23	0,374	0,359	0,357	0,341
24-25	0,372	0,358	0,355	0,341
26-27	0,370	0,358	0,353	0,340
28-29	0,369	0,357	0,353	0,340
30-34	0,368	0,357	0,350	0,339
35-39	0,365	0,356	0,347	0,338
40-49	0,364	0,355	0,345	0,338
50-99	0,361	0,354	0,343	0,337
> 100	0,351	0,353	0,338	0,337

O coeficiente de Christiansen (F^* ou F^{**}), pode ainda ser corrigido através do fator ajustado de Scaloppi (F_a), que faz com que a distância entre o início da tubulação e a primeira derivação não precise ser, necessariamente igual aos demais espaçamentos ou à metade destes. A fórmula 3.10 representa o fator ajustado de Sacaloppi.

$$F_a = \frac{NF + (x - 1)}{N + (x - 1)} \quad 3.10$$

Onde:

F_a – Fator ajustado;

N – Número de derivações;

F – Coeficiente de Christiansen;

x - Distância da entrada da tubulação até a primeira derivação dividido pelo espaçamento regular entre derivações.

3.4 – REGRA DOS 20%

Devido à variação de pressão ao longo das linhas laterais e de derivação, há uma variação também nas descargas dos emissores (a não ser que estes sejam auto-compensantes), o que pode comprometer a uniformidade da irrigação. A variação de vazão máxima aceitável entre os dois extremos de uma linha lateral é igual a dez por cento da vazão nominal dos emissores (Bernardo, 1986).

Aplicando a equação da continuidade ($q=AV$) na saída do emissor, que deve ser corrigida através de um coeficiente de descarga, pois o emissor é considerado um bocal, encontra-se que:

$$q = C_d * A * V = C_d * \frac{\pi d^2}{4} * \sqrt{2gh} \quad (3.11)$$

Onde:

q – Vazão de cada emissor (m^3/s);

A – Área do bocal (m^2);

V – Velocidade média de saída da água = $\sqrt{2gh}$ (m/s);

C_d – Coeficiente de descarga do emissor;

d – Diâmetro do bocal (m);

g – Aceleração da gravidade (m/s^2);

h – Pressão de funcionamento do emissor (mca).

Relacionando a equação 3.11 entre os dois emissores mais extremos de cada linha com derivação, desde que estes tenham igual diâmetro e igual coeficiente de descarga, encontra-se que uma variação de dez por cento na vazão dos emissores corresponde a uma variação de vinte por cento na pressão dos mesmos, para emissores não auto compensantes.

$$\frac{q_1}{q_2} = \sqrt{\frac{h_1}{h_2}} \quad (3.12)$$

A *regra dos 20%* pode ser usada quando a parcela onde estão localizadas as linhas laterais é plana ou possui declividade uniforme. De acordo com a variação topográfica do terreno, a regra dos 20% pode ser expressa de quatro maneiras distintas:

- Linha lateral sem declividade ($\Delta Z = 0$)

$$h_f \leq 0,20 * h \quad (3.13)$$

- Linha lateral ascendente ($\Delta Z > 0$)

$$h_f + \Delta Z \leq 0,20 * h \quad (3.14)$$

- Linha lateral descendente ($\Delta Z < h_f$)

$$h_f - \Delta Z \leq 0,20 * h \quad (3.15)$$

- Linha lateral descendente ($\Delta Z > h_f$)

$$\Delta Z - h_f \leq 0,20 * h \quad (3.16)$$

Em que:

h_f - Perda de carga ao longo da tubulação;

h - Pressão nominal dos emissores;

ΔZ - Variação da cota de acordo com a topografia do terreno.

O valor de 20% para esta variação é arbitrário, pode-se utilizar valores maiores quando a cultura a irrigar não é muito exigente com relação à uniformidade da irrigação.

CAPÍTULO IV

METODOLOGIAS PARA O DIMENSIONAMENTO DE REDES RAMIFICADAS

4.1 – INTRODUÇÃO

Com o objetivo de minimizar os custos relativos à instalação de redes de distribuição de sistemas de irrigação pressurizada e à estação de bombeamento, são utilizados vários métodos de otimização que proporcionam o custo conjunto mínimo. No entanto, nem todos estes métodos consideram todos os fatores que influem no dimensionamento de redes de distribuição. O presente capítulo mostra algumas metodologias de otimização econômica para sistemas de irrigação pressurizada.

4.2 - PROGRAMACÃO LINEAR

A programação linear é, sem dúvida, a técnica mais conhecida e usada na busca de soluções em problemas de otimização. Este modelo foi introduzido na otimização de redes ramificadas por Karmelli et al (1968). Hoje a programação linear está se expandindo progressivamente para outros setores da engenharia.

A programação linear é um planejamento de atividades utilizado quando existem relações lineares entre as variáveis, funções e restrições que descrevem o problema. Apesar desta restrição, a programação linear apresenta inúmeras vantagens, como: Flexibilidade de adaptação a uma grande variedade de problemas; Fácil entendimento; Disponibilidade em pacotes computacionais.

A fase de formulação é uma das etapas mais importantes na busca de soluções otimizadas pela programação linear, sendo as vezes necessário a reformulação da função objetivo ou de algumas restrições visando tornar a representação matemática mais próxima da realidade.

Em particular, o problema proposto pode ser resolvido através da programação linear, visto que o comprimento das tubulações apresenta uma relação linear com o preço das mesmas. No entanto, não é considerada a variação de custo de acordo com a classe dos tubos a serem usados. Assim, deve-se buscar uma relação econômica ótima entre a altura de bombeamento e a rede de distribuição. O resultado será composto por trechos com um ou dois diâmetros. Os diâmetros que não forem usados terão como resultado final o comprimento igual a zero.

Segundo Gomes (1997), a função objetivo (que visa a minimização do custo conjunto rede de distribuição mais energia de bombeamento) e as equações de restrição são representadas pela seguinte formulação matemática:

Função objetivo

$$MIN [C_T] = MIN \left[C_h \cdot H + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a \cdot l_{ij} \cdot P(D_j)_i \right] \quad (4.1)$$

Equações de restrição

$$l_{ij} \geq 0 \quad (4.2)$$

Todos os comprimentos de tubulações devem ser não negativos;

$$\sum_{i=1}^n l_{ij} = L_i \quad (4.3)$$

O comprimento total de cada trecho deve ser igual a soma dos comprimentos l_{ij} referentes aos diferentes diâmetros;

$$Z - \sum_{i=1}^k J_i \geq Z_k \quad (4.4)$$

As pressões nos finais das linhas laterais não devem ser inferiores às pressões requeridas para à irrigação;

Os significados das variáveis descritas nas fórmulas anteriores são os seguintes:

C_T = custo conjunto da rede de distribuição mais energia de bombeamento (R\$);

C_h = custo de investimento e operação da estação de bombeamento por unidade de altura de impulsão (R\$);

H = altura manométrica (m);

a = fator de amortização do custo das tubulações;

l_{ij} = comprimento ocupado pelo tubo de diâmetro D_j no trecho i (m);

$P(D_j)_i$ = preço unitário do tubo de diâmetro D_j no trecho i (R\$);

m = número de trechos existentes na rede de distribuição;

n = número de diâmetros comerciais que serão atribuídos ao trecho i ;

Z = cota piezométrica na cabeceira da rede ($Z_0 + H$);

Z_k = cota piezométrica requerida no final das linhas laterais;

$\sum_{i=1}^k J_i$ = somatório das perdas de carga por atrito na artéria correspondente ao percurso desde a cabeceira até o final da linha lateral.

A Programação linear não considera, na otimização de redes de distribuição, a variação do preço dos tubos de acordo com a variação das classes (pressão de trabalho à qual está submetida a tubulação). Por isso, deve-se adotar os preços das classes esperadas em função da pressão estática média.

4.3 - PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

A programação não linear é usada quando a função objetivo e as restrições do modelo são não lineares. Foi desenvolvida para que não fosse necessário linearizar as funções para poder usar a programação linear, representando com maior fidelidade o problema físico (Silva, 1997).

Ainda segundo Silva (1997), a programação não linear nasceu a partir dos trabalhos de Kuhn e Tucker (1941), e posteriormente se desenvolveu para muitas áreas de pesquisa, entre elas, o cálculo do custo ótimo de uma rede ramificada para distribuição de água.

Assim como na programação linear, o primeiro passo para a formulação de um modelo é definir as variáveis de decisão, a função objetivo, e as restrições do problema (Gomes, 1994).

Para se obter um projeto de custo mínimo, é necessário que se encontre o equilíbrio entre os custos dos diâmetros dos trechos e os custos da energia de bombeamento, ou seja, nem sempre uma solução composta pelos menores diâmetros possíveis é a que apresenta menor custo conjunto Rede de Distribuição mais Energia de Bombeamento.

Inicialmente, deve-se decidir qual o tipo de função que melhor representa a variação do preço da tubulação com o diâmetro. A partir daí, define-se a função objetivo e as restrições à ela impostas, que são:

Função objetivo

$$MIN [C_T] = MIN \left[C_h \cdot H + \sum_{i=1}^n (L_i \cdot C(D_i)) \right] \quad (4.5)$$

Equações de restrição

$$H, D_i \geq 0 \quad (4.6)$$

A altura de impulsão na cabeceira da rede, assim como todos os diâmetros dos trechos devem ser não negativos;

$$D_i \geq D_{\min} \quad (4.7)$$

Os diâmetros do tubo em todos os trechos, deve ser maior ou igual ao diâmetro mínimo possível para esse tubo;

$$H + H_c - H_k - \sum j_i \geq P_{\min} \quad (4.8)$$

As pressões nos finais das linhas laterais menos as perdas de carga não devem ser inferiores às pressões mínimas requeridas para a irrigação.

O significado das variáveis descritas nas fórmulas acima são os seguintes:

C_T = custo conjunto da rede de distribuição mais energia de bombeamento (R\$);

C_h = custo de investimento e operação da estação de bombeamento por unidade de altura de impulsão, ou seja, custo unitário da energia (R\$/m);

H = altura manométrica de impulsão na cabeceira da rede (m);

L_i = comprimento do trecho i (m);

D_i = Diâmetro do tubo no trecho i ;

$C(D)$ = Função que relaciona o preço de determinado tubo com o seu diâmetro (R\$/m);

H_c = Cota geométrica de cabeceira;

H_k = Cota geométrica no nó “ k ”;

$\sum_{i=1}^k J_i$ = somatório das perdas de carga por atrito na artéria correspondente ao percurso desde a cabeceira até o final da linha lateral;

P_{min} = Pressão mínima requerida no nó “ k ”.

Visto que a metodologia da programação não linear considera os diâmetros como variáveis explícitas, os diâmetros encontrados como soluções ótimas não são diâmetros comerciais, por isso deve-se usar um diâmetro imediatamente superior e outro imediatamente inferior ao encontrado. Para encontrar os comprimentos equivalentes a cada diâmetro no trecho, devemos calcular a perda de carga unitária dos diâmetros comerciais adotados e comparar com a perda de carga equivalente ao diâmetro adotado.

4.3.1 – APLICAÇÃO EM REDES RAMIFICADAS

A otimização de redes ramificadas através da programação não linear foi pesquisada e utilizada por Silva (1997), que dimensionou uma rede ramificada de distribuição coletiva do Perímetro de Irrigação “Senador Nilo Coelho”, em Petrolina, BA.

Os diâmetros dos trechos da rede e a altura de bombeamento, que são variáveis do dimensionamento, se relacionam de forma não linear. Verifica-se que a diminuição do custo da rede com a utilização de diâmetros menores resulta em maiores perdas de carga, elevando a altura de bombeamento para poder manter as pressões de projeto, o que faz com que o custo relativo à energia aumente. De forma análoga, se houvesse uma redução dos custos da energia, o custo da rede aumentaria. Desta forma, o que a otimização busca é o equilíbrio entre os dois referidos custos (Silva, 1997).

Segundo Silva (1997), as diferenças entre os custos totais calculados através do Método da Programação Não-Linear e do Método Granados - que será exposto no capítulo V - são insignificantes (em torno de 0,002388%).

4.4 - PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Partindo-se do princípio que é mais fácil otimizar uma etapa do que todo o processo de uma só vez, originou-se a programação dinâmica, que segundo Ventsel (1983) é um método de otimização especialmente adaptado à operação de múltiplos passos.

A grande vantagem da programação dinâmica é que nesta a função objetivo e as restrições podem ser não lineares e até mesmo descontínuas.

A programação dinâmica propõe a seguinte linha de raciocínio:

- Divide-se o problema geral em estágios;
- Determina-se o ótimo para cada estágio;
- Relaciona-se o ótimo de um estágio a outro através de uma função recursiva;
- Percorre-se todos os estágios para determinar um ponto ótimo de operação.

4.4.1 – METODOLOGIA DA OTIMIZAÇÃO INTEGRADA

A metodologia da otimização integrada aplicada à sistemas de irrigação localizada, proposta por Medeiros (1997) faz uma adaptação ao método desenvolvido por Gomes (1992), em que se busca a minimização do custo conjunto – Rede de Distribuição, Energia de Bombeamento, e Equipamentos das Parcelas para sistemas de irrigação localizada.

Segundo Medeiros, a metodologia da otimização integrada apresenta como vantagem sobre os outros métodos de cálculo, como por exemplo o método das velocidades máximas admissíveis, uma melhor distribuição de pressão no interior das tubulações, fazendo com que não haja tubulações forçadas pelo excesso de pressão.

A metodologia da otimização integrada pode alcançar, por tentativa, o dimensionamento da rede de distribuição e da parcelas de irrigação, de forma independente, para todas as possíveis condições de contorno (pressões nos terminais da rede). Utilizando um dos métodos de otimização já existentes (Granados, Programação Linear e Programação Não-Linear), otimiza-se a rede coletiva com as parcelas de irrigação, para todas as possibilidades de combinações de pressão nos terminais de distribuição, alcançando-se assim, a solução de custo mínimo.

CAPÍTULO V

O MÉTODO GRANADOS

5.1 - INTRODUÇÃO

O método desenvolvido por Alfredo Granados (1990) é um método de cálculo iterativo baseado na programação dinâmica, onde elimina-se os excessos de pressão disponíveis até atingir a cota de menor custo ou a cota desejada pelo projetista. Em seu processo, Granados considera a variação dos preços das tubulações em função dos seus diâmetros, classes e tipo de material (Leal, 1995).

O sistema é composto por duas etapas de cálculo. Na primeira etapa, determina-se uma solução prévia, onde se obtém os diâmetros mínimos admissíveis para cada trecho da rede. A Segunda etapa consiste na execução de uma série de iterações, onde se reduz gradualmente a cota piezométrica da rede de distribuição, até que seja encontrado o custo ótimo para a rede em questão.

5.2 - SOLUÇÃO PRÉVIA

A solução prévia é determinada pelo método das velocidades máximas admissíveis, onde se encontra os menores diâmetros para a rede, pois quanto maior for a velocidade de circulação da água menor será o diâmetro necessário para conduzir a vazão, sendo por isto, a solução de menor custo para a instalação.

Quando um sistema é dimensionado pelo método da velocidade máxima, as perdas de carga por atrito e as pressões de trabalho nos condutos são máximas, encarecendo o custo da energia e aumentando o risco da ocorrência de problemas mecânicos nas tubulações. Por isto, existe um limite de velocidade em função dos diâmetros, do custo e dos riscos que se queira admitir.

As tubulações de menores diâmetros são as que apresentam maiores possibilidades de golpes de aríete devido ao seu constante manejo, por isso são as de menores velocidades máximas admissíveis, pois possuem maiores riscos de ruptura.

Quadro 5.1 - Limites de velocidade máxima em função dos diâmetros das tubulações recomendados por Granados:

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

Após terem sido determinado os diâmetros mínimos, calculam-se as perdas de carga correspondentes e a cota piezométrica estritamente necessária para atender aos requisitos de pressão nos nós terminais, superando as perdas de carga em toda a rede.

5.3 – PROCESSO ITERATIVO DE OTIMIZAÇÃO

Através de um processo iterativo de operações, se reduz a cota piezométrica de cabeceira até alcançar o ponto desejado pelo projetista ou ponto de menor custo para a rede de distribuição mais a estação de bombeamento, obedecendo à restrição de que em cada iteração ocorra o mínimo acréscimo de custo possível.

Exemplificando os passos referentes à segunda etapa do método Granados, a figura 5.1 mostra uma rede de distribuição esquematizada dimensionada de acordo com a solução prévia. Nela existem seis trechos e seis nós, numerados de 1 a 6, e a origem, que está localizada no ponto 0.

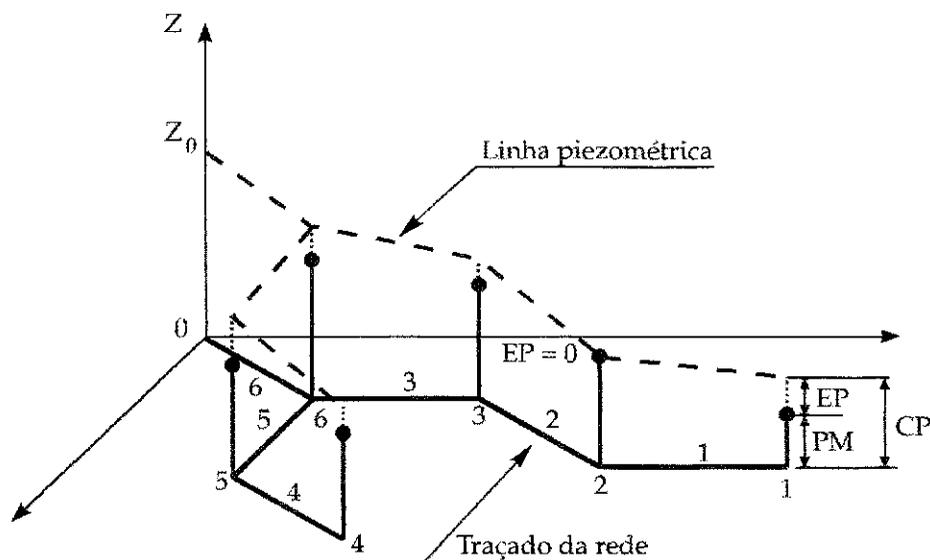


Figura 5.1 - Rede de distribuição fictícia (Gomes, 1997)

A figura 5.1 mostra também: a linha piezométrica sobre a rede, as cotas piezométricas (CP), as piezométricas mínimas (PM) e os excessos de pressão (EP). Os excessos de pressão devem ser todos não negativos, ou seja, $EP \geq 0$, e pelo menos em um nó, o valor de EP deve ser igual a zero.

Para reduzir a cota piezométrica (Z_0) obtida na solução prévia em um decréscimo de pressão (ΔZ) sem prejudicar o desempenho hidráulico da rede, faz-se necessário a diminuição da perda de carga em algum dos trechos compreendidos entre a origem 0 e o nó 2, pois este percurso contém um nó onde $EP = 0$ (nó 2). Caso a modificação ocorra no diâmetro de

qualquer trecho localizado fora do percurso entre o nó 0 e o nó 2, o custo da rede aumenta e não haverá redução da cota de cabeceira, já que não se pode baixar o valor da cota piezométrica no nó com EP nulo ($CP = PM$). Como se deseja baixar a cota de cabeceira com o menor acréscimo de custo para a rede de distribuição, o aumento do diâmetro da tubulação deve acontecer no trecho em que esta mudança proporcione um menor aumento do custo da rede.

A mudança de um diâmetro pelo seu consecutivo superior, representará um aumento de custo do trecho. Relacionando este acréscimo de custo com a redução da perda de carga correspondente devido ao aumento do diâmetro, encontra-se o *gradiente de câmbio* (C).

O *gradiente de câmbio* (C) representa o custo da diminuição da perda de carga quando se substitui o diâmetro de um trecho pelo imediatamente superior. Assim sendo, para um trecho de comprimento L, que tem por diâmetro encontrado na solução prévia o valor D_1 com custo P_1 , o *gradiente de câmbio* (C), que substitui D_1 por D_2 é dado por:

$$C = \frac{P_2 - P_1}{J_1 - J_2} \quad (5.1)$$

Ao menor gradiente de câmbio do(s) percurso(s) que contém um nó com $EP = 0$ dá-se o nome de *gradiente de câmbio ótimo* (C^*). O trecho correspondente ao *gradiente de câmbio ótimo* é chamado *trecho ótimo* (T^*). Para se baixar a cota de cabeceira com o menor acréscimo possível de

custo da rede (figura 5.1), 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:

$$\Delta J = J_1 - J_2 \quad (5.2)$$

A diminuição a ser efetuada 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).

No caso em que $\Delta J_{disp} < EP_{min}$, a diminuição da cota de cabeceira (ΔZ) será igual ao valor ΔJ_{disp} , e todo o trecho ótimo será ocupado pelo diâmetro consecutivo superior. A linha piezométrica da rede será rebaixada em ΔZ e os novos EP's de toda a rede serão iguais aos anteriores subtraindo-se ΔJ_{disp} , com exceção do trecho ótimo (T^*) e os a jusante do mesmo, que permanecem invariáveis. Quando ocorrer de $\Delta J_{disp} > EP_{min}$, a diminuição da cota de cabeceira (ΔZ) será igual a EP_{min} e o trecho ótimo torna-se composto pelos dois diâmetros, o já existente e o imediatamente

superior. O valor de ΔJ_{disp} neste trecho passa a ser 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.

Depois de obtida a nova cota de cabeceira da rede, deve-se reajustar as classes das tubulações em cada trecho, seus preços e os seus gradientes de câmbio. O custo da rede passa a ser 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, quando houver.

Depois de feitas todas as iterações, pode-se observar de que forma se comporta a curva que mostra o custo da rede em função da variação da cota piezométrica:

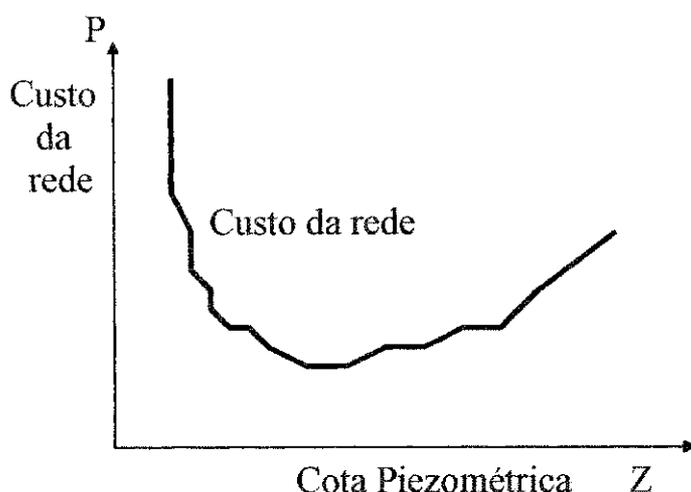


Figura 5.2 - Custos mínimos de uma rede de distribuição em função da cota piezométrica de cabeceira (Gomes, 1997).

Adicionando a esta curva (figura 5.2) os custos relativos à estação de bombeamento, encontra-se como curva resultante o custo conjunto Rede-Bombeamento, que é representado pela figura abaixo:

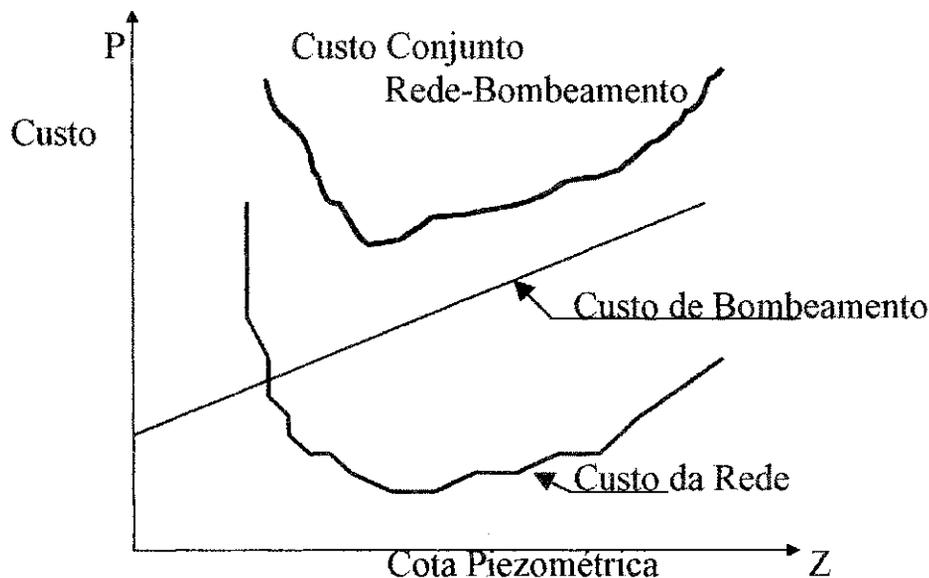


Figura 5.3 – Curva que representa a otimização conjunta Rede de distribuição X estação de bombeamento (Gomes, 1997).

Segundo Gomes (1997), o custo da energia de bombeamento capitalizada (E), por metro de altura manométrica, é determinado através da seguinte expressão:

$$E = W N P \alpha \quad (5.3)$$

Em que:

W = potência em Kw para cada metro de elevação;

N = número de horas por ano de utilização da estação de bombeamento;

P = preço do Kwh de energia elétrica;

α = coeficiente de atualização do custo anual de energia elétrica.

O valor do custo da energia (E), corresponde a economia de energia alcançada por metro de redução da cota de cabeceira. O custo conjunto ótimo será encontrado quando o valor de “ E ” somado ao valor da rede de distribuição proporcionar o menor custo total. A cota que proporciona o custo ótimo para a rede será a cota de cabeceira ótima.

A figura 5.3 mostra que mesmo o custo mínimo da rede sendo o encontrado na solução prévia, o custo mínimo conjunto pode estar localizado em outra cota piezométrica, pois ao diminuir a cota piezométrica os custos relativos à energia também serão diminuídos, o que altera o resultado do custo conjunto Rede de distribuição – estação de bombeamento.

CAPÍTULO VI

APLICAÇÃO DO MÉTODO ESCOLHIDO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a resolução de dois problemas de dimensionamento de redes através da nova metodologia, onde não há distinção entre a rede parcelar e a rede coletiva. O primeiro consiste em uma rede que abastece quatro parcelas planas (em cotas diferentes) irrigadas por gotejamento e dezoito trechos de tubulação (rede coletiva + rede parcelar). O segundo caso é composto por uma rede que abastece três parcelas com topografia irregular, sendo duas delas por microaspersão e uma por gotejamento, a rede é composta por 12 trechos de tubulação.

Foi utilizada na resolução dos dois exemplos a planilha eletrônica EXCEL, com o auxílio do software REDES(Gomes, 1996) que serve para a otimização de sistemas pressurizados de distribuição de água.

Dividindo um sistema de irrigação em rede de distribuição e estação de bombeamento, busca-se obter o custo ótimo conjunto. Segundo Gomes (1997), os custos conjuntos (rede de distribuição + energia de bombeamento) não serão sempre os que oferecerem menores diâmetros às

redes, visto que quanto menores os diâmetros, maior será a necessidade de energia para o transporte da água.

6.2 - METODOLOGIA UTILIZADA

Com o objetivo de dimensionar da forma mais econômica possível todas as tubulações de um sistema de irrigação localizada (rede coletiva + rede parcelar), e baseado no método GRANADOS de otimização, foi desenvolvida uma nova metodologia.

Esta nova metodologia, além de considerar os trechos de tubulação com variação de vazão (linhas de derivação e linhas laterais) como trechos sem derivações, ou seja, como trechos de vazão constante, fazendo assim com que não exista diferença entre a rede coletiva e a rede de distribuição de um sistema de irrigação, adiciona as perdas de carga localizadas nos cabeçais de controle, garantindo pressão e vazão suficientes no final da rede (final de cada linha lateral).

As variáveis envolvidas no processo de dimensionamento através do método GRANADOS são:

- O custo dos tubos (função do tipo de material, do diâmetro e da pressão nominal);
- A perda de carga por atrito (função do tipo de tubulação, do diâmetro e da vazão circulante em cada trecho);
- As cotas altimétricas;

- As condições de contorno (pressão e vazão no final da rede);
- Os gastos atualizados com energia.

À estas variáveis já existentes na metodologia proposta por GRANADOS, serão adicionadas mais duas, são elas:

- A correção da variação de vazão nas linhas laterais e nas linhas de derivação;
- As perdas de carga localizadas nos cabeçais de controle.

A primeira etapa do método consiste na determinação de uma solução prévia, através do método das velocidades máximas admissíveis, onde se obtém o custo mínimo da rede de distribuição (sem considerar o custo relativo à energia), pois se obtém os mínimos diâmetros, inclusive para as linhas laterais, já estando incluídas as perdas de carga localizadas nos cabeçais de controle. A segunda etapa do método é compreendida por uma sequência de iterações, onde a cota piezométrica de cabeceira é baixada a cada passo, fazendo com que o custo relativo à energia de bombeamento também diminua. Com a diminuição do custo relativo à energia de bombeamento deve haver um mínimo acréscimo do custo da rede. Serão feitas iterações até que seja encontrado o custo ótimo conjunto (rede de distribuição + energia de bombeamento)

6.3 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO CASO 1

O sistema a ser dimensionado está disposto na figura 6.1., sendo composto por quatro parcelas planas, com o mesmo layout, porém em cotas diferentes.

Na figura 6.1, as linhas laterais são representadas por linhas tracejadas. A numeração existente em cima e à direita de cada parcela representa a cota da mesma, enquanto que a numeração abaixo e à direita representa o número de cada parcela, enquanto que os demais números representam os trechos de tubulações que compõem a rede.

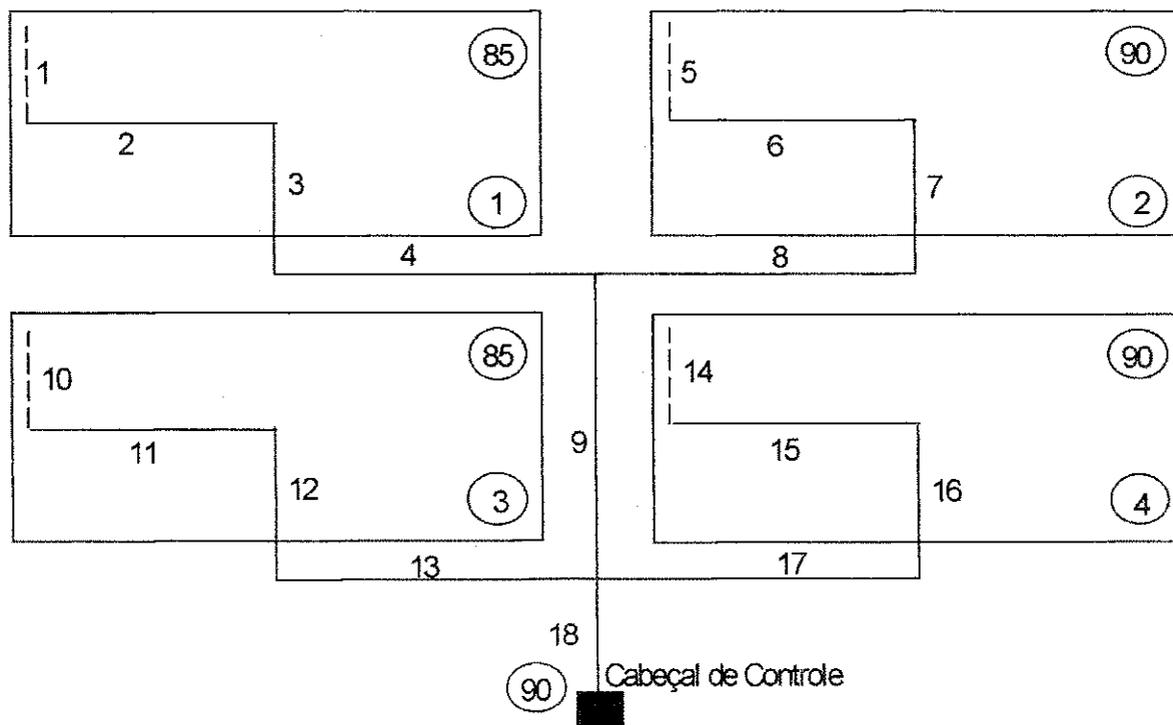


Figura 6.1 - Rede de distribuição referente ao CASO 1

Cada parcela possui área de 6.48 ha e é composta por 240 linhas laterais com 90m de comprimento, o que totaliza um número de emissores igual a 21600. Todos os demais dados relativos à rede de distribuição e às parcelas estão especificados no quadro 6.1.

Quadro 6.1 - Dados referentes à rede de distribuição e às parcelas (CASO 1).

Área total a ser irrigada	25,92ha
Número de linhas laterais	960
Número de gotejadores por parcela	21600
Número total de gotejadores	86400
Área da parcela	6,48ha
Espaçamento entre gotejadores	1,00m
Espaçamento entre linhas laterais	3,00m
Vazão do gotejador	3,80 l/h
Pressão nominal do gotejador	10,00mca
Perda localizada no cabeçal de controle	5,00mca
Número de horas anuais de bombeamento	2000
Custo do Kwh	0,05 reais
Coefficiente de atualização de energia	20
Rendimento do conjunto motor-bomba	75%

O quadro 6.2 mostra cada um dos trechos da rede, com seus comprimentos reais e fictícios, suas vazões e pressões, e cotas piezométricas.

A terceira coluna do quadro 6.2 apresenta os comprimentos fictícios (L_{fic}) referentes a cada trecho. Nos casos em que os trechos de tubulação apresentam derivações (linhas laterais e de derivação), o comprimento fictício é dado pelo produto do comprimento real (L) pelo coeficiente de redução de Christiansen (F^*), que está disposto no quadro 3.3.. No caso em

que a vazão seja constante ao longo do trecho, o comprimento fictício é igual ao comprimento real.

Quadro 6.2 – Trechos da rede (CASO 1).

Trecho	L (m)	L fic (m)	Q (l/s)	Q m³/s	Q m³/h	cota terreno	Pres. Req	Piez. Min (mca)
18	100	100	91,2	0,0912	328,32	90	10	100
17	180	180	22,8	0,0228	82,08	90	10	100
16	100	100	22,8	0,0228	82,08	90	10	100
15	180	63,18	11,4	0,0114	41,04	90	10	100
14	90	31,59	0,095	0,000095	0,342	90	10	100
13	180	180	22,8	0,0228	82,08	85	10	95
12	100	100	22,8	0,0228	82,08	85	10	95
11	180	63,18	11,4	0,0114	41,04	85	10	95
10	90	31,59	0,095	0,000095	0,342	85	10	95
9	180	180	45,6	0,0456	164,16	90	10	100
8	180	180	22,8	0,0228	82,08	90	10	100
7	100	100	22,8	0,0228	82,08	90	10	100
6	180	63,18	11,4	0,0114	41,04	90	10	100
5	90	31,59	0,095	0,000095	0,342	90	10	100
4	180	180	22,8	0,0228	82,08	85	10	95
3	100	100	22,8	0,0228	82,08	85	10	95
2	180	63,18	11,4	0,0114	41,04	85	10	95
1	90	31,59	0,095	0,000095	0,342	85	10	95

Os diâmetros mínimos utilizados no caso 1, assim como as velocidades e vazões máximas a circular nos mesmos, e os preços unitários de cada um deles estão dispostos no quadro 6.3. Em função destas vazões máximas e das vazões a serem transportadas, encontram-se os resultados do dimensionamento correspondentes à solução prévia.

Quadro 6.3 – Diâmetros, velocidade e vazão máximas e preço unitário de cada diâmetro.

Diâm (mm)	D int.(mm)	Área(m)	Vmax(m/s)	Qmax(m/h)	Preço (R\$/m)
12	9,6	7,24E-05	2	0,52	0,22
16	13,4	0,000141	2	1,02	0,28
20	17	0,000227	2	1,63	0,40
25	21	0,000346	2	2,49	0,59
32	27	0,000573	2	4,12	0,92
50	46,7	0,001713	2	12,33	3,55
75	70,5	0,003904	2	28,11	7,11
100	94,4	0,006999	2	50,39	13,58
150	156,4	0,019212	2	138,32	42,22
200	204,2	0,032749	2	235,80	70,57
250	252	0,049876	2	359,11	105,20
300	299,8	0,070592	2	508,26	149,43

A partir das vazões à transportar e dos diâmetros mínimos, determinam-se as perdas de carga contínuas ao longo dos trechos. Depois de adicionadas as parcelas referentes às perdas de carga localizadas nos cabeçais de controle, encontram-se as perdas de cargas acumuladas (ΣJ), enquanto que os excessos de pressão fictícia são obtidos mediante as diferenças entre as cotas piezométricas fictícias e as cotas piezométricas mínimas. O valor absoluto do maior excesso de pressão fictícia será a cota piezométrica de cabeceira da solução prévia. Diminuindo-se este valor do excesso de pressão fictício de cada trecho da rede, encontram-se os excessos de pressão dos pontos finais de cada trecho da rede. Todos estes cálculos estão apresentados no quadro 6.4.

Os cabeçais de controle estão localizados na entrada de cada parcela, por isso as perdas de carga localizadas são inseridas no trecho de entrada da parcela. Estes valores são apresentados no quadro 6.4. Neste exemplo,

considerou-se a perda de carga localizada no cabeçal de controle referente à cada parcela sendo igual a 5 mca.

Quadro 6.4 – Cota piezométrica de cabeceira e excessos de pressão da solução prévia (CASO 1).

Trecho	D(mm)	Dint(mm)	J(mca)	Jloc(mca)	SomJ(mca)	CPf (m)	PM(m)	Epf (m)	EP (m)
18	250	252	1,03	-	1,03	-1,03	100	-101,03	18,33
17	150	156,4	1,46	-	2,49	-2,49	100	-102,49	16,87
16	150	156,4	0,81	5	8,30	-8,30	100	-108,30	11,06
15	100	94,4	1,65	-	9,95	-9,95	100	-109,95	9,41
14	12	9,6	7,97	-	17,92	-17,92	100	-117,92	1,43
13	150	156,4	1,46	-	2,49	-2,49	95	-97,49	21,87
12	150	156,4	0,81	5	8,30	-8,30	95	-103,30	16,06
11	100	94,4	1,65	-	9,95	-9,95	95	-104,95	14,41
10	12	9,6	7,97	-	17,92	-17,92	95	-112,92	6,43
9	200	204,2	1,43	-	2,47	-2,47	100	-102,47	16,89
8	150	156,4	1,46	-	3,92	-3,92	100	-103,92	15,44
7	150	156,4	0,81	5	9,73	-9,73	100	-109,73	9,63
6	100	94,4	1,65	-	11,39	-11,39	100	-111,39	7,97
5	12	9,6	7,97	-	19,36	-19,36	100	-119,36	0,00
4	150	156,4	1,46	-	3,92	-3,92	95	-98,92	20,44
3	150	156,4	0,81	5	9,73	-9,73	95	-104,73	14,63
2	100	94,4	1,65	-	11,39	-11,39	95	-106,39	12,97
1	12	9,6	7,97	-	19,36	-19,36	95	-114,36	5,00

O quadro 6.5 indica os valores dos gradientes de câmbio (C) para cada trecho da rede, correspondentes à gama de diâmetros utilizados nas iterações da segunda etapa do método.

Quadro 6.5 - Gradientes de Câmbio C (CASO 1).

Trecho	D (mm)	D int(mm)	J (mca)	D J	P (R\$)	C(R\$/m)
1	12	9,6	7,97	-	19,80	-
	16	13,4	1,57	6,400	25,20	0,84
	20	17	0,49	1,078	36,00	10,02
	25	21	0,18	0,317	53,10	53,96
	32	27	0,05	0,124	82,80	238,79
2	100	94,4	1,65	-	2444,40	-
	150	156,4	0,14	1,513	7599,60	3406,63
	200	204,2	0,04	0,103	12702,60	49576,69
	250	252	0,01	0,025	18936,00	251767,06
3	150	156,4	0,81	-	4222	-
	200	204,2	0,22	0,588	7057	4820,33
	250	252	0,08	0,141	10520	24479,27
	300	299,8	0,03	0,045	14943	97779,49
4	150	156,4	1,46	-	7599,60	-
	200	204,2	0,40	1,059	12702,60	4820,33
	250	252	0,14	0,255	18936,00	24479,27
	300	299,8	0,06	0,081	26897,40	97779,49
5	12	9,6	7,97	-	19,80	-
	16	13,4	1,57	6,400	25,20	0,84
	20	17	0,49	1,078	36,00	10,02
	25	21	0,18	0,317	53,10	53,96
	32	27	0,05	0,124	82,80	238,79
	50	46,7	0,0036	0,048	319,50	4908,68
	75	70,5	0,0005	0,003	639,90	102997,73
6	100	94,4	1,65	-	2444,40	-
	150	156,4	0,14	1,513	7599,60	3406,63
	200	204,2	0,04	0,103	12702,60	49576,69
	250	252	0,01	0,025	18936,00	251767,06
7	150	156,4	0,81	-	4222,00	-
	200	204,2	0,22	0,588	7057,00	4820,33
	250	252	0,08	0,141	10520,00	24479,27
	300	299,8	0,03	0,045	14943,00	97779,49
8	150	156,4	1,46	-	7599,60	-
	200	204,2	0,40	1,059	12702,60	4820,33
	250	252	0,14	0,255	18936,00	24479,27
	300	299,8	0,06	0,081	26897,40	97779,49
9	200	204,2	1,43	-	12702,60	-
	250	252	0,51	0,919	18936,00	6780,96
	300	299,8	0,22	0,294	26897,40	27085,71
	400	394	0,06	0,163	42840,00	98050,91
10	12	9,6	7,97	-	19,80	-
	16	13,4	1,57	6,400	25,20	0,84
	20	17	0,49	1,078	36,00	10,02
	25	21	0,18	0,317	53,10	53,96
	32	27	0,05	0,124	82,80	238,79

Quadro 6.5 - Continuação

Trecho	D (mm)	D int(mm)	J (mca)	D J	P (R\$)	C(R\$/m)
11	100	94,4	1,65	-	2444,40	-
	150	156,4	0,14	1,513	7599,60	3406,63
	200	204,2	0,04	0,103	12702,60	49576,69
	250	252	0,01	0,025	18936,00	251767,06
12	150	156,4	0,81	-	4222	-
	200	204,2	0,22	0,588	7057	4820,33
	250	252	0,08	0,141	10520	24479,27
	300	299,8	0,03	0,045	14943	97779,49
13	150	156,4	1,46	-	7599,60	-
	200	204,2	0,40	1,059	12702,60	4820,33
	250	252	0,14	0,255	18936,00	24479,27
	300	299,8	0,06	0,081	26897,40	97779,49
14	12	9,6	7,97	-	19,80	-
	16	13,4	1,57	6,400	25,20	0,84
	20	17	0,49	1,078	36,00	10,02
	25	21	0,18	0,317	53,10	53,96
	32	27	0,05	0,124	82,80	238,79
	50	46,7	0,0036	0,048	319,50	4908,68
15	100	94,4	1,65	-	2444,40	-
	150	156,4	0,14	1,513	7599,60	3406,63
	200	204,2	0,04	0,103	12702,60	49576,69
	250	252	0,01	0,025	18936,00	251767,06
16	150	156,4	0,81	-	4222,00	-
	200	204,2	0,22	0,588	7057,00	4820,33
	250	252	0,08	0,141	10520,00	24479,27
	300	299,8	0,03	0,045	14943,00	97779,49
17	150	156,4	1,46	-	7599,60	-
	200	204,2	0,40	1,059	12702,60	48 20,
	250	252	0,14	0,255	18936,00	24479,27
	300	299,8	0,06	0,081	26897,40	97779,49
18	200	204,2	2,88	-	7057,00	-
	250	252	1,03	1,844	10520,00	1878,38
	300	299,8	0,44	0,590	14943,00	7502,96

O quadro 6.6 apresenta todas as variações que ocorreram em cada iteração, a cota de cabeceira(Z_i) e o custo ótimo da rede de distribuição correspondente. O quadro apresenta ainda, em cada iteração, o(s) diâmetro(s) de cada trecho, o gradiente de câmbio (C), o excesso de pressão (EP), a perda de carga ocasionada pelo diâmetro usado, e a pressão disponível no final de cada trecho.

Em cada iteração deve-se verificar qual a(s) artéria(s) mais desfavorável(is), qual o menor gradiente de câmbio desta artéria, comparar o ΔJ (variação de perda de carga) correspondente aos excessos de pressão em trechos que estejam localizados à jusante, e então diminuir este valor da cota piezométrica de cabeceira encontrada na iteração anterior.

Quadro 6.6 - Iterações (CASO 1)

Sol. Prévia Zo (m) = 119,36					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	18,33	0,590	118,33
17	150	4820,33	16,87	1,059	116,87
16	150	4820,33	11,06	0,588	111,06
15	100	3406,63	9,41	1,513	109,41
14	12	0,84	1,43	6,400	101,43
13	150	4820,33	21,87	1,059	116,87
12	150	4820,33	16,06	0,588	111,06
11	100	3406,63	14,41	1,513	109,41
10	12	0,84	6,43	6,400	101,43
9	200	6780,96	16,89	0,919	116,89
8	150	4820,33	15,44	1,059	115,44
7	150	4820,33	9,63	0,588	109,63
6	100	3406,63	7,97	1,513	107,97
5	12	0,84	0,00	6,400	100,00
4	150	4820,33	20,44	1,059	115,44
3	150	4820,33	14,63	0,588	109,63
2	100	3406,63	12,97	1,513	107,97
1	12	0,84	5,00	6,400	100,00
C rede =		80365,80			
C energia =		70065,86			
C total =		150431,66			

Quadro 6.6 - Continuação

Iteração 1 Z1 (m) = 117,92					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	16,89	0,590	116,89
17	150	4820,33	15,44	1,059	115,44
16	150	4820,33	9,63	0,588	109,63
15	100	3406,63	7,97	1,513	107,97
14	12	0,84	0,00	6,400	100,00
13	150	4820,33	20,44	1,059	115,44
12	150	4820,33	14,63	0,588	109,63
11	100	3406,63	12,97	1,513	107,97
10	12	0,84	5,00	6,400	100,00
9	200	6780,96	15,46	0,919	115,46
8	150	4820,33	14,00	1,059	114,00
7	150	4820,33	8,19	0,588	108,19
6	100	3406,63	6,54	1,513	106,54
5	12 e 16	0,84	0,00	4,970	100,00
4	150	4820,33	19,00	1,059	114,00
3	150	4820,33	13,19	0,588	108,19
2	100	3406,63	11,54	1,513	106,54
1	12	0,84	3,57	6,400	98,57
C rede =		80367,01			
C energia =		66643,01			
C total =		147010,02			

Iteração 2 Z2 (m) = 114,36					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	13,33	0,590	113,33
17	150	4820,33	11,87	1,059	111,87
16	150	4820,33	6,06	0,588	106,06
15	100	3406,63	4,41	1,513	104,41
14	12 e 16	0,84	0,00	2,835	100,00
13	150	4820,33	16,87	1,059	111,87
12	150	4820,33	11,06	0,588	106,06
11	100	3406,63	9,41	1,513	104,41
10	12	0,84	1,43	6,400	96,43
9	200	6780,96	11,89	0,919	111,89
8	150	4820,33	10,44	1,059	110,44
7	150	4820,33	4,63	0,588	104,63
6	100	3406,63	2,97	1,513	102,97
5	12 e 16	0,84	0,00	1,404	100,00
4	150	4820,33	15,44	1,059	110,44
3	150	4820,33	9,63	0,588	104,63
2	100	3406,63	7,97	1,513	102,97
1	12	0,84	0,00	6,400	95,00
C rede =		80373,03			
C energia =		58132,84			
C total =		138505,87			

Quadro 6.6 - Continuação

Iteração 3 Z3 (m) = 112,95					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	11,92	0,590	111,92
17	150	4820,33	10,47	1,059	110,47
16	150	4820,33	4,66	0,588	104,66
15	100	3406,63	3,00	1,513	103,00
14	12 e 16	0,84	0,00	1,430	100,00
13	150	4820,33	15,47	1,059	110,47
12	150	4820,33	9,66	0,588	104,66
11	100	3406,63	8,00	1,513	103,00
10	12	0,84	0,03	6,400	95,03
9	200	6780,96	10,49	0,919	110,49
8	150	4820,33	9,03	1,059	109,03
7	150	4820,33	3,22	0,588	103,22
6	100	3406,63	1,57	1,513	101,57
5	16	10,02	0,00	1,078	100,00
4	150	4820,33	14,03	1,059	109,03
3	150	4820,33	8,22	0,588	103,22
2	100	3406,63	6,57	1,513	101,57
1	12 e 16	0,84	0,00	4,996	95,00
C rede =		80376,58			
C energia =		54781,59			
C total =		135158,17			

Iteração 4 Z4 (m) = 112,92					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	11,89	0,590	111,89
17	150	4820,33	10,44	1,059	110,44
16	150	4820,33	4,63	0,588	104,63
15	100	3406,63	2,97	1,513	102,97
14	12 e 16	0,84	0,00	1,400	100,00
13	150	4820,33	15,44	1,059	110,44
12	150	4820,33	9,63	0,588	104,63
11	100	3406,63	7,97	1,513	102,97
10	12	0,84	0,00	6,400	95,00
9	200	6780,96	10,46	0,919	110,46
8	150	4820,33	9,00	1,059	109,00
7	150	4820,33	3,19	0,588	103,19
6	100	3406,63	1,54	1,513	101,54
5	16 e 20	10,02	0,00	1,048	100,00
4	150	4820,33	14,00	1,059	109,00
3	150	4820,33	8,19	0,588	103,19
2	100	3406,63	6,54	1,513	101,54
1	12 e 16	0,84	0,00	4,966	95,00
C rede =		80376,93			
C energia =		54709,99			
C total =		135086,93			

Quadro 6.6 - Continuação

Iteração 5 Z5 (m) = 112,49					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	11,46	0,590	111,46
17	150	4820,33	10,01	1,059	110,01
16	150	4820,33	4,20	0,588	104,20
15	100	3406,63	2,54	1,513	102,54
14	12 e 16	0,84	0,00	0,970	100,00
13	150	4820,33	15,01	1,059	110,01
12	150	4820,33	9,20	0,588	104,20
11	100	3406,63	7,54	1,513	102,54
10	12 e 16	0,84	0,00	5,970	95,00
9	200	6780,96	10,03	0,919	110,03
8	150	4820,33	8,57	1,059	108,57
7	150	4820,33	2,76	0,588	102,76
6	100	3406,63	1,11	1,513	101,11
5	16 e 20	10,02	0,00	0,618	100,00
4	150	4820,33	13,57	1,059	108,57
3	150	4820,33	7,76	0,588	102,76
2	100	3406,63	6,11	1,513	101,11
1	12 e 16	0,84	0,00	4,536	95,00
C rede =		80390,08			
C energia =		53683,75			
C total =		134073,84			

Iteração 6 Z6 (m) = 111,88					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	10,84	0,590	110,84
17	150	4820,33	9,39	1,059	109,39
16	150	4820,33	3,58	0,588	103,58
15	100	3406,63	1,92	1,513	101,92
14	12 e 16	0,84	0,00	0,352	100,00
13	150	4820,33	14,39	1,059	109,39
12	150	4820,33	8,58	0,588	103,58
11	100	3406,63	6,92	1,513	101,92
10	12 e 16	0,84	0,00	5,352	95,00
9	200	6780,96	9,41	0,919	109,41
8	150	4820,33	7,95	1,059	107,95
7	150	4820,33	2,14	0,588	102,14
6	100	3406,63	0,49	1,513	100,49
5	20	53,96	0,00	0,317	100,00
4	150	4820,33	12,95	1,059	107,95
3	150	4820,33	7,14	0,588	102,14
2	100	3406,63	5,49	1,513	100,49
1	12 e 16	0,84	0,00	3,918	95,00
C rede =		80397,84			
C energia =		52208,83			
C total =		132606,67			

Quadro 6.6 - Continuação

Iteração 7 Z7 (m) = 111,56					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	10,53	0,590	110,53
17	150	4820,33	9,07	1,059	109,07
16	150	4820,33	3,26	0,588	103,26
15	100	3406,63	1,61	1,513	101,61
14	12 e 16	0,84	0,00	0,035	100,00
13	150	4820,33	14,07	1,059	109,07
12	150	4820,33	8,26	0,588	103,26
11	100	3406,63	6,61	1,513	101,61
10	12 e 16	0,84	0,00	5,035	95,00
9	200	6780,96	9,09	0,919	109,09
8	150	4820,33	7,64	1,059	107,64
7	150	4820,33	1,83	0,588	101,83
6	100	3406,63	0,17	1,513	100,17
5	25	238,79	0,00	0,124	100,00
4	150	4820,33	12,64	1,059	107,64
3	150	4820,33	6,83	0,588	101,83
2	100	3406,63	5,17	1,513	100,17
1	12 e 16	0,84	0,00	3,601	95,00
C rede =		80415,74			
C energia =		51452,56			
C total =		131868,30			

Iteração 8 Z8 (m) = 111,52					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	10,49	0,590	110,49
17	150	4820,33	9,03	1,059	109,03
16	150	4820,33	3,23	0,588	103,23
15	100	3406,63	1,57	1,513	101,57
14	16	10,02	0,00	1,078	100,00
13	150	4820,33	14,03	1,059	109,03
12	150	4820,33	8,23	0,588	103,23
11	100	3406,63	6,57	1,513	101,57
10	12 e 16	0,84	0,00	5,000	95,00
9	200	6780,96	9,06	0,919	109,06
8	150	4820,33	7,60	1,059	107,60
7	150	4820,33	1,79	0,588	101,79
6	100	3406,63	0,14	1,513	100,14
5	25	238,79	0,00	0,089	100,00
4	150	4820,33	12,60	1,059	107,60
3	150	4820,33	6,79	0,588	101,79
2	100	3406,63	5,14	1,513	100,14
1	12 e 16	0,84	0,00	3,566	95,00
C rede =		80424,3			
C energia =		51367,89			
C total =		131792,19			

Quadro 6.6 - Continuação

Iteração 9 Z9 (m) = 111,43					
Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(m)	D J (m)	Pd (m)
18	250	7502,96	10,40	0,590	110,40
17	150	4820,33	8,95	1,059	108,95
16	150	4820,33	3,14	0,588	103,14
15	100	3406,63	1,48	1,513	101,48
14	16	10,02	0,00	0,989	100,00
13	150	4820,33	13,95	1,059	108,95
12	150	4820,33	8,14	0,588	103,14
11	100	3406,63	6,48	1,513	101,48
10	12 e 16	0,84	0,00	4,911	95,00
9	200	6780,96	8,97	0,919	108,97
8	150	4820,33	7,51	1,059	107,51
7	150	4820,33	1,70	0,588	101,70
6	100	3406,63	0,05	1,513	100,05
5	32	4908,68	0,00	0,048	100,00
4	150	4820,33	12,51	1,059	107,51
3	150	4820,33	6,70	0,588	101,70
2	100	3406,63	5,05	1,513	100,05
1	12 e 16	0,84	0,00	3,477	95,00
C rede =		80446,57			
C energia =		51155,72			
C total =		131602,29			

Iteração 10 Z10 (m) = 110,45					
Trecho	D(mm)	C(utm/m)	EP	D J	Pd
18	250	7502,96	9,41	0,590	109,41
17	150	4820,33	7,96	1,059	107,96
16	150	4820,33	2,15	0,588	102,15
15	100	3406,63	0,49	1,513	100,49
14	20	53,96	0,00	0,317	100,00
13	150	4820,33	12,96	1,059	107,96
12	150	4820,33	7,15	0,588	102,15
11	100	3406,63	5,49	1,513	100,49
10	12 e 16	0,84	0,00	3,922	95,00
9	200	6780,96	7,98	0,919	107,98
8	150	4820,33	6,52	1,059	106,52
7	150	4820,33	0,71	0,588	100,71
6	100	3406,63	0,00	0,524	100,00
5	32	4908,68	0,00	0,048	100,00
4	150	4820,33	11,52	1,059	106,52
3	150	4820,33	5,71	0,588	100,71
2	100	3406,63	4,06	1,513	99,06
1	12 e 16	0,84	0,00	2,488	95,00
C rede =		80458,15			
Energia =		48795,13			
Total =		129253,28			

Quadro 6.6 - Continuação

Iteração 11 Z11 (m) = 110,13

Trecho	D(mm)	C(utm/m)	EP	D J	Pd
18	250	7502,96	9,09	0,590	109,09
	150	4820,33	7,14	1,059	107,14
16	150	4820,33	1,83	0,588	101,83
15	100	3406,63	0,17	1,513	100,17
14	25	238,79	0,00	0,124	100,00
13	150	4820,33	12,64	1,059	107,64
12	150	4820,33	6,83	0,588	101,83
11	100	3406,63	5,17	1,513	100,17
10	12 e 16	0,84	0,00	3,922	95,00
9	200	6780,96	7,66	0,919	107,66
8	150	4820,33	6,20	1,059	106,20
7	150	4820,33	0,39	0,588	100,39
6	100	3406,63	0,00	0,524	100,00
5	32	4908,68	0,00	0,048	100,00
4	150	4820,33	11,20	1,059	106,20
3	150	4820,33	5,39	0,588	100,39
2	100	3406,63	3,74	1,513	98,74
1	12 e 16	0,84	0,00	2,488	95,00
C rede =		80875,89			
Energia =		48438,68			
Total =		129314,57			

A 11⁰ iteração mostra o aumento do custo conjunto, ou seja, a partir da cota 110,45m, o custo (rede de distribuição + energia de bombeamento) passa a aumentar, pois haverá grande aumento na parcela correspondente ao custo relativo à rede, visto que a densidade de tubulações em um sistema fixo de irrigação no interior das parcelas é muito alta, e uma pequena diminuição na parcela do custo correspondente à energia de bombeamento.

Após efetuadas todas as iterações, obtemos uma cota de cabeceira para a rede (denominada cota ótima) igual a 110,45m, onde os custos relativos à rede de distribuição, à energia de bombeamento e o custo conjunto são respectivamente: R\$ 80.458,15, R\$ 48.795,13, e R\$ 129.253,28.

Os trechos 1 e 10, que correspondem à linhas laterais, são compostos por dois diâmetros e por isso devem ser determinados os comprimentos relativos a cada um destes diâmetros. Este cálculo se dá através das seguintes fórmulas:

$$L_i = \frac{L(j - j_{ii})}{(j_i - j_{ii})} \quad 6.1$$

$$L_{ii} = L - L_i \quad 6.2$$

Onde:

L_i – Comprimento do trecho correspondente ao diâmetro D_i (diâmetro menor);

L_{ii} – Comprimento do trecho correspondente ao diâmetro D_{ii} (diâmetro maior);

L – Comprimento total do trecho com dois diâmetros;

j_i – Perda de carga no trecho correspondente ao diâmetro D_i ;

j_{ii} – Perda de carga no trecho correspondente ao diâmetro D_{ii} .

O quadro 6.7 mostra os comprimentos correspondentes à cada trecho da rede de distribuição.

Quadro 6.7 – Comprimentos de cada trecho (CASO 1).

Trecho	Diâmetro(mm)	Comprimento(m)
1	12	35
	16	55
2	100	180
3	150	100
4	150	180
5	32	90
6	100	180
7	150	100
8	150	180
9	200	180
10	12	55
	16	35
11	100	180
12	150	100
13	150	180
14	20	90
15	100	180
16	150	100
17	150	180
18	250	100

O gráfico que representa a variação dos custos da rede, da energia e conjunto em função da cota piezométrica de cabeceira está disposto na figura seguinte, onde o custo conjunto (vermelha) é obtido através do somatório do custo da rede (azul) mais o custo da energia (verde).

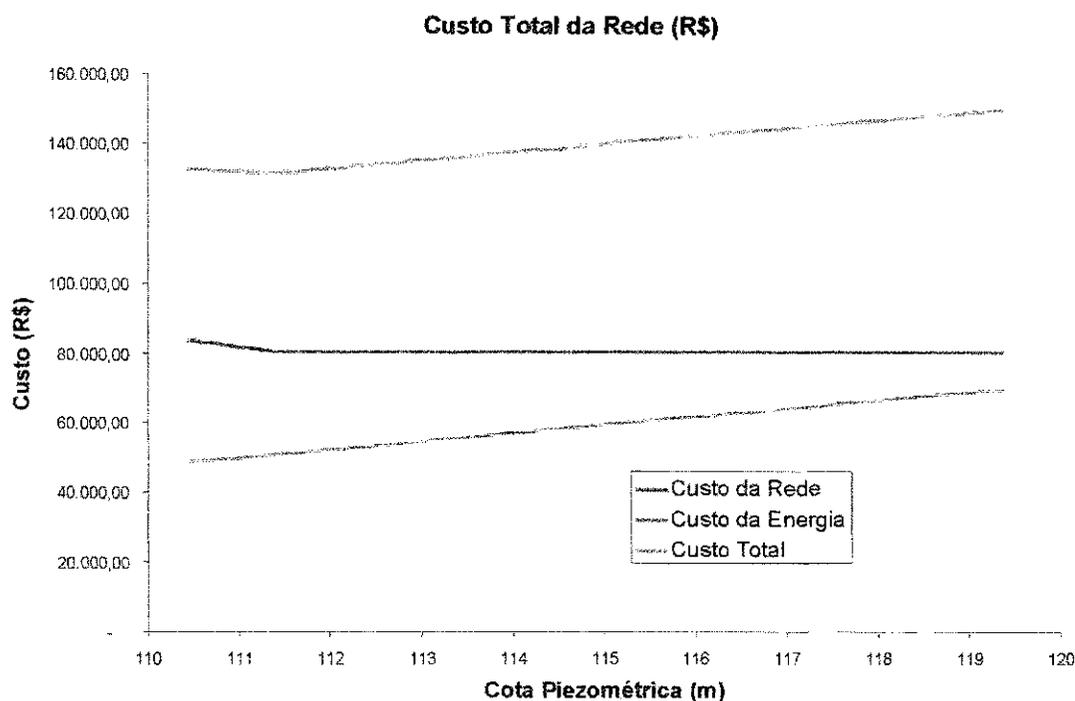


Figura 6.2 – Gráfico de custos totais referente ao caso 1

Fazendo uma comparação com a metodologia da otimização integrada (Medeiros, 1997), onde foi otimizado o custo relativo a cada parcela, e posteriormente, o custo relativo à rede de distribuição de forma independente, obteve-se uma diminuição de cota de 2,04m, e consequentemente, uma diminuição do custo conjunto de R\$4814,69.

Esta diminuição representa uma economia de 3,60% para uma rede de apenas 4 parcelas de tamanho médio. Quanto maior forem as parcelas, maior será a economia, visto que o sistema usado para a irrigação é fixo e a quantidade de tubulações no interior das parcelas é muito grande.

6.4 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO CASO 2

A rede que representa o segundo problema em que foi aplicada a nova metodologia é um caso real de projeto de irrigação no município de Mossoró-RN onde o objetivo principal é a comprovação do método para terrenos com topografia irregular. O sistema é formado por três parcelas, sendo uma delas irrigada por gotejamento e duas por microaspersão. A rede é composta por doze trechos e está localizada em terreno com relevo irregular, onde o cabeçal de controle se localiza na posição mais baixa do terreno e a última parcela está na posição mais alta. Devido à simetria existente em cada uma das parcelas, e com o objetivo de ter tubulações de menores diâmetros e minimizar os custos relativos aos cabeçais de controle, optou-se pela utilização de uma sub-unidade por turno de irrigação.

A parcela irrigada por gotejamento tem área total igual a 6,0ha com espaçamento entre linhas laterais igual a dois metros e espaçamento entre gotejadores igual a meio metro. A cultura de cultivo é o melão.

As duas parcelas irrigadas por microaspersão têm área (2,5ha) e layout iguais, no entanto culturas e conseqüentemente espaçamentos diferentes. Em uma das parcelas a cultura de cultivo é a graviola e o espaçamento entre linhas laterais e microaspersores é igual a seis metros. Na outra parcela a cultura cultivada é a manga, e o espaçamento utilizado entre linhas laterais é igual a dez metros e entre microaspersores igual a cinco metros.

A figura 6.3 apresenta a rede de distribuição do caso 2, onde as linhas laterais estão diferenciadas das demais tubulações por serem representadas por linhas pontilhadas. O número situado em baixo e à direita de cada parcela representa o número da mesma, enquanto que as linhas com direção variável representam as curvas de nível distribuídas sobre o terreno.

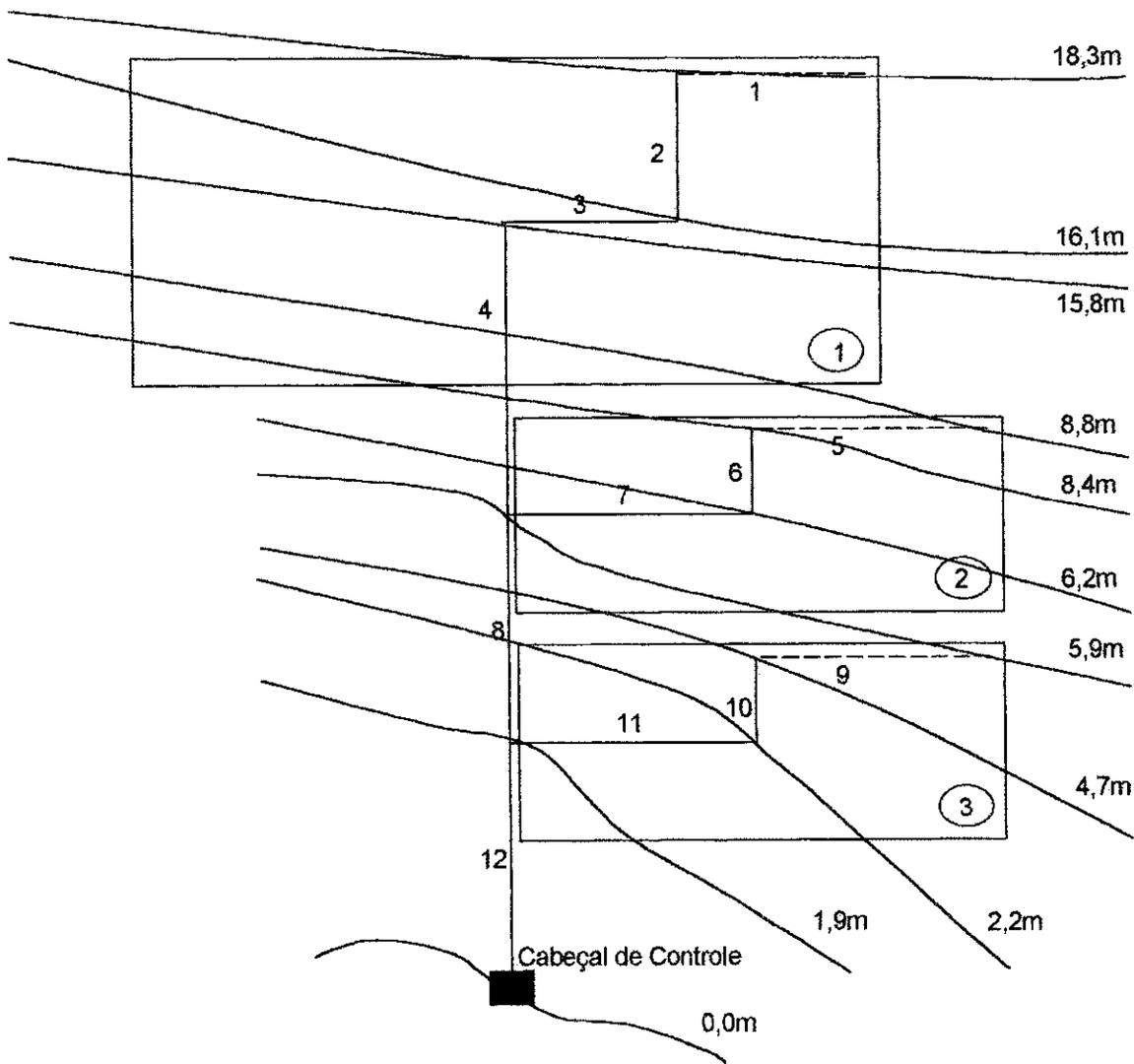


Figura 6.3 – Rede de distribuição referente ao CASO 2

O quadro 6.8 apresenta todas as características relativas à rede de distribuição e a cada uma das parcelas de irrigação.

Quadro 6.8 - Características gerais da rede e das parcelas (CASO 2).

CARACTERÍSTICAS DAS PARCELAS	PARCELA 1	PARCELA 2	PARCELA 3
Cultura	Melão	Graviola	Manga
Sistema	Gotejamento	Microaspersão	Microaspersão
Área da parcela (ha)	6,00	2,50	2,50
Emissores em operação simultânea	15000	347	250
Espaçamento entre emissores (m)	0,50	6,00	5,00
Espaçamento entre linhas laterais (m)	2,00	6,00	10,00
Pressão de serviço do emissor (mca)	10,00	25,00	30,00
Vazão do emissor (l/h)	2,34	30,00	41,00
CARACTERÍSTICAS DA REDE			
Perda localizada no cabeçal de controle	5,00mca		
Custo do Kwh (R\$)	0,07		
Coefficiente de atualização de energia	20		
Número de horas anuais de bombeamento	3240		
Rendimento do conjunto Motor-Bomba	75%		

O quadro 6.9 apresenta cada um dos trechos da rede, especificando em cada trecho, o comprimento, as vazões e pressões, e as cotas piezométricas mínimas requeridas.

Os comprimentos fictícios são determinados através da multiplicação do comprimento real pelo coeficiente de redução de Christiansen (quando houver variação de vazão no trecho) ou são iguais aos comprimentos reais (quando não houver variação de vazão no trecho).

Quadro 6.9 - Trechos da rede (CASO 2).

Trecho	L (m)	L fic(m)	Q (l/s)	Q m³/s	Q m³/h	cota (m)	Pres. Req	Piez. Min (mca)
12	60	60,00	15,36	0,01536	55,3	1,9	30	31,9
11	133	133,00	2,86	0,00286	10,3	2,2	30	32,2
10	50	20,10	2,86	0,00286	10,3	4,7	30	34,7
9	125	46,50	0,29	0,00029	1,0	5,9	30	35,9
8	120	120,00	12,50	0,01250	45,0	5,9	25	30,9
7	133	133,00	2,92	0,00292	10,5	6,2	25	31,2
6	50	18,95	2,92	0,00292	10,5	8,4	25	33,4
5	125	47,00	0,16	0,00016	0,6	8,8	25	33,8
4	152	152,00	9,58	0,00958	34,5	15,8	10	25,8
3	108	108,00	9,58	0,00958	34,5	16,1	10	26,1
2	76	27,44	9,58	0,00958	34,5	18,3	10	28,3
1	100	35,10	0,13	0,00013	0,5	18,3	10	28,3

Assim como para o problema 1, todos os diâmetros a serem utilizados no caso 2, assim como a velocidade e vazão máxima a circular e os preços unitários dos mesmos, estão dispostos no quadro 6.3.

Assim como no caso 1, o quadro 6.10 apresenta todos os cálculos referentes à perda de carga contínua e localizada, e aos excessos de pressão em cada trecho da rede.

Quadro 6.10 – Cota piezométrica de cabeceira e excessos de pressão da solução prévia (CASO 2).

Trecho	D(mm)	Dint(mm)	J(mca)	Jlocaliz(mca)	SomJ	CPf	FM(mca)	Epf	EP(mca)
12	150	156,4	0,23	8	8,23	-8,23	31,9	-40,13	22,58
11	100	94,4	0,27	-	8,50	-8,50	32,2	-40,70	22,01
10	100	94,4	0,04	-	8,54	-8,54	34,7	-43,24	19,47
9	16	13,4	18,27	-	26,81	-26,81	35,9	-62,71	0,00
8	100	94,4	3,73	-	11,96	-11,96	30,9	-42,86	19,85
7	50	46,7	8,61	-	20,57	-20,57	31,2	-51,77	10,94
6	50	46,7	1,23	-	21,80	-21,80	33,4	-55,20	7,51
5	16	13,4	6,14	-	27,94	-27,94	33,8	-61,74	0,97
4	100	94,4	2,88	-	14,85	-14,85	25,8	-40,65	22,07
3	100	94,4	2,05	-	16,90	-16,90	26,1	-43,00	19,72
2	100	94,4	0,52	-	17,42	-17,42	28,3	-45,72	17,00
1	12	9,6	15,83	-	33,25	-33,25	28,3	-61,55	1,16

Os valores dos gradientes de câmbio (C) correspondentes a cada diâmetro que pode ser utilizado em cada trecho da rede são indicados no quadro 6.11.

Quadro 6.11 – Gradientes de câmbio C (CASO 2).

Trecho	D (mm)	D int(mm)	J(m)	D J	P (R\$)	C(R\$/m)
1	12	9,6	15,833	-	22,00	-
	16	13,6	2,903	12,930	28,00	0,46
	20	17	0,979	1,924	40,00	6,24
	25	21	0,350	0,629	59,00	30,19
	32	27	0,103	0,247	92,00	133,58
2	100	94,4	0,521	-	1032,08	-
	150	156,4	0,045	0,476	3208,72	4571,13
	200	204,2	0,012	0,032	5363,32	66523,69
	250	252	0,004	0,008	7995,20	337829,59
3	100	94,4	2,050	-	1466,64	-
	150	156,4	0,175	1,874	4559,76	1650,18
	200	204,2	0,048	0,127	7621,56	24015,05
	250	252	0,017	0,031	11361,60	121956,48
4	100	94,4	2,885	-	2064,16	-
	150	156,4	0,247	2,638	6417,44	1650,18
	200	204,2	0,067	0,179	10726,64	24015,05
	250	252	0,024	0,043	15990,40	121956,48
5	16	13,6	5,711	-	35,00	-
	20	17	1,926	3,784	50,00	3,96
	25	21	0,688	1,238	73,75	19,18
	32	27	0,202	0,486	115,00	84,89
	50	46,7	0,014	0,188	443,75	1745,01
	75	70,5	0,002	0,012	888,75	36615,15
6	50	46,7	1,227	-	177,50	-
	75	70,5	0,165	1,062	355,50	167,63
	100	94,4	0,040	0,125	679,00	2582,77
	150	156,4	0,003	0,036	2111,00	39308,92
7	50	46,7	8,611	-	472,15	-
	75	70,5	1,159	7,453	945,63	63,53
	100	94,4	0,280	0,879	1806,14	978,87
	150	156,4	0,024	0,256	5615,26	14898,08
8	100	94,4	3,728	-	1629,60	-
	150	156,4	0,319	3,409	5066,40	1008,19
	200	204,2	0,087	0,232	8468,40	14672,20
	250	252	0,031	0,056	12624,00	74510,33
9	16	13,6	16,997	-	35,00	-
	20	17	5,734	11,264	50,00	1,33
	25	21	2,049	3,685	73,75	6,45
	32	27	0,603	1,446	115,00	28,52

Quadro 6.11 - Continuação

10	100	94,4	0,041	-	679,00	-
	150	156,4	0,003	0,037	2111,00	38512,65
	200	204,2	0,001	0,003	3528,50	560475,34
	250	252	0,000	0,001	5260,00	2846281,58
11	100	94,4	0,269	-	1806,14	-
	150	156,4	0,023	0,246	5615,26	15482,08
	200	204,2	0,006	0,017	9385,81	225311,09
	250	252	0,002	0,004	13991,60	1144205,20
12	150	156,4	0,234	-	2533,20	-
	200	204,2	0,064	0,170	4234,20	10017,88
	250	252	0,023	0,041	6312,00	50874,16
	300	299,8	0,010	0,013	8965,80	203210,70

Cada iteração apresentada no quadro 6.12 mostra todas as variações referentes às cotas de cabeceira, custos ótimos, diâmetros, gradientes de câmbio, excessos de pressão, perdas de carga e pressão disponível em cada trecho.

Quadro 6.12 - Iterações (CASO 2).

Sol. Prévia Z_0 (m) = 62,71

Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(mca)	D J	Pd(mca)
12	150	10017,88	22,58	0,17	54,48
11	100	15482,08	22,01	0,25	54,21
10	100	38512,65	19,47	0,04	54,17
9	16	1,33	0,00	11,26	35,90
8	100	1008,19	19,85	3,41	50,75
7	50	63,53	10,94	7,45	42,14
6	50	167,63	7,51	1,06	40,91
5	16	3,96	0,97	3,78	34,77
4	100	1650,18	22,07	2,64	47,87
3	100	1650,18	19,72	1,87	45,82
2	100	4571,13	17,00	0,48	45,30
1	12	0,46	1,16	12,93	29,46
C rede =	10116,98				
Energia =	57170,57				
Total =	67287,55				

Quadro 6.12 - Continuação

Iteração 1 Z1(m)= 61,74

Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(mca)	D J	Pd(mca)
12	150	10017,88	21,60		53,50
11	100	15482,08	21,04		53,24
10	100	38512,65	18,49		53,19
9	16 e 20	1,33	0,00		35,90
8	100	1008,19	18,88		49,78
7	50	63,53	9,97		41,17
6	50	167,63	6,54		39,94
5	16	3,96	0,00		33,80
4	100	1650,18	21,09		46,89
3	100	1650,18	18,74		44,84
2	100	4571,13	16,02		44,32
1	12	0,46	0,19		28,49
C rede =		10118,28			
Energia =		56282,02			
Total =		66400,29			

Iteração 2 Z2(m)= 61,55

Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(mca)	D J	Pd(mca)
12	150	10017,88	21,42		53,32
11	100	15482,08	20,85		53,05
10	100	38512,65	18,31		53,01
9	16 e 20	1,33	0,00		35,90
8	100	1008,19	18,69		49,59
7	50	63,53	9,78		40,98
6	50	167,63	6,35		39,75
5	16 e 20	3,96	0,00		33,80
4	100	1650,18	20,90		46,70
3	100	1650,18	18,55		44,65
2	100	4571,13	15,83		44,13
1	12	0,46	0,00		28,30
C rede =		10119,27			
Energia =		56110,91			
Total =		66230,18			

Quadro 6.12 - Continuação

Iteração 3 Z3(m)= 57,95

Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(mca)	D J	Pd(mca)
12	150	10017,88	17,82	0,17	49,72
11	100	15482,08	17,25	0,25	49,45
10	100	38512,65	14,71	0,04	49,41
9	16 e 20	1,33	0,00	6,50	35,90
8	100	1008,19	15,09	3,41	45,99
7	50	63,53	6,18	7,45	37,38
6	50	167,63	2,75	1,06	36,15
5	20	19,18	0,00	1,24	33,80
4	100	1650,18	17,31	2,64	43,11
3	100	1650,18	14,96	1,87	41,06
2	100	4571,13	12,24	0,48	40,54
1	12 e 16	0,46	0,00	9,33	28,30
C rede =		10139,99			
Energia =		52832,03			
Total =		62972,01			

Iteração 4 Z4(m)= 56,72

Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(mca)	D J	Pd(mca)
12	150	10017,88	16,58	0,17	48,48
11	100	15482,08	16,01	0,25	48,21
10	100	38512,65	13,47	0,04	48,17
9	16 e 20	1,33	0,00	5,27	35,90
8	100	1008,19	13,85	3,41	44,75
7	50	63,53	4,94	7,45	36,14
6	50	167,63	1,52	1,06	34,92
5	25	36615,15	0,00	0,01	33,80
4	100	1650,18	16,07	2,64	41,87
3	100	1650,18	13,72	1,87	39,82
2	100	4571,13	11,00	0,48	39,30
1	12 e 16	0,46	0,00	8,10	28,30
C rede =		10165,96			
Energia =		51703,41			
Total =		61869,37			

Quadro 6.12 - Continuação

Iteração 5 Z5(m)= 49,26

Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(mca)	D J	Pd(mca)
12	150	10017,88	9,13	0,17	41,03
11	100	15482,08	8,56	0,25	40,76
10	100	38512,65	6,02	0,04	40,72
9	16 e 20	1,33	0,00	5,25	35,90
8	100	1008,19	6,40	3,41	37,30
7	75	978,87	4,94	0,88	36,14
6	50	167,63	1,52	1,06	34,92
5	25	84,89	0,00	0,49	33,80
4	100	1650,18	8,62	2,64	34,42
3	100	1650,18	6,27	1,87	32,37
2	100	4571,13	3,55	0,48	31,85
1	12 e 16	0,46	0,00	8,08	28,30
C rede =		10652,82			
Energia =		44909,32			
Total =		55562,14			

Iteração 6 Z6(m)= 48,78

Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(mca)	D J	Pd(mca)
12	150	10017,88	8,64	0,17	40,54
11	100	15482,08	8,07	0,25	40,27
10	100	38512,65	5,53	0,04	40,23
9	16 e 20	1,33	0,00	4,77	35,90
8	100	1008,19	5,92	3,41	36,82
7	75	978,87	4,46	0,88	35,66
6	50	167,63	1,03	1,06	34,43
5	32	1745,01	0,00	0,19	33,80
4	100	1650,18	8,13	2,64	33,93
3	100	1650,18	5,78	1,87	31,88
2	100	4571,13	3,06	0,48	31,36
1	12 e 16	0,46	0,00	7,60	28,30
C rede =		10694,95			
Energia =		44466,32			
Total =		55161,27			

Quadro 6.12 - Continuação

Iteração 7 Z(m)= 47,71

Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(mca)	D J	Pd(mca)
12	150	10017,88	7,58	0,17	39,48
11	100	15482,08	7,01	0,25	39,21
10	100	38512,65	4,47	0,04	39,17
9	16 e 20	1,33	0,00	3,71	35,90
8	100	1008,19	4,85	3,41	35,75
7	75	978,87	3,39	0,88	34,59
6	75	2582,77	1,03	0,13	34,43
5	32	1745,01	0,00	0,19	33,80
4	100	1650,18	7,07	2,64	32,87
3	100	1650,18	4,72	1,87	30,82
2	100	4571,13	2,00	0,48	30,30
1	12 e 16	0,46	0,00	6,54	28,30
C rede =		10874,85			
Energia =		43498,29			
Total =		54373,14			

Iteração 8 Z(m)= 46,84

Trecho	D(mm)	C(R\$/m)	EP(mca)	D J	Pd(mca)
12	150	10017,88	6,70	0,17	38,60
11	100	15482,08	6,13	0,25	38,33
10	100	38512,65	3,59	0,04	38,29
9	16 e 20	1,33	0,00	2,83	35,90
8	100	1008,19	3,97	3,41	34,87
7	100	14898,08	3,39	0,26	34,59
6	75	2582,77	1,03	0,13	34,43
5	32	1745,01	0,00	0,19	33,80
4	100	1650,18	6,19	2,64	31,99
3	100	1650,18	3,84	1,87	29,94
2	100	4571,13	1,12	0,48	29,42
1	12 e 16	0,46	0,00	5,66	28,30
C rede =		11736,94			
Energia =		42696,89			
Total =		54433,83			

Verifica-se que, para comprovação de que a cota de custo conjunto ótimo é a cota de 47,71m, foi apresentada a última iteração (46,84m), que possui custo conjunto ótimo maior que a cota anterior.

A cota de menor custo conjunto ótimo (47,71m) tem custo da rede de distribuição, custo da energia e custo conjunto respectivamente iguais a R\$ 10.874,85, R\$ 43.498,92, R\$ 54.373,14.

O gráfico seguinte (figura 6.4), apresenta os custos da rede, da energia, e conjunto em diferentes cotas. Para cada cota piezométrica, encontra-se um custo correspondente, o ponto mais baixo da linha vermelha representa o custo ótimo conjunto (rede x bombeamento).

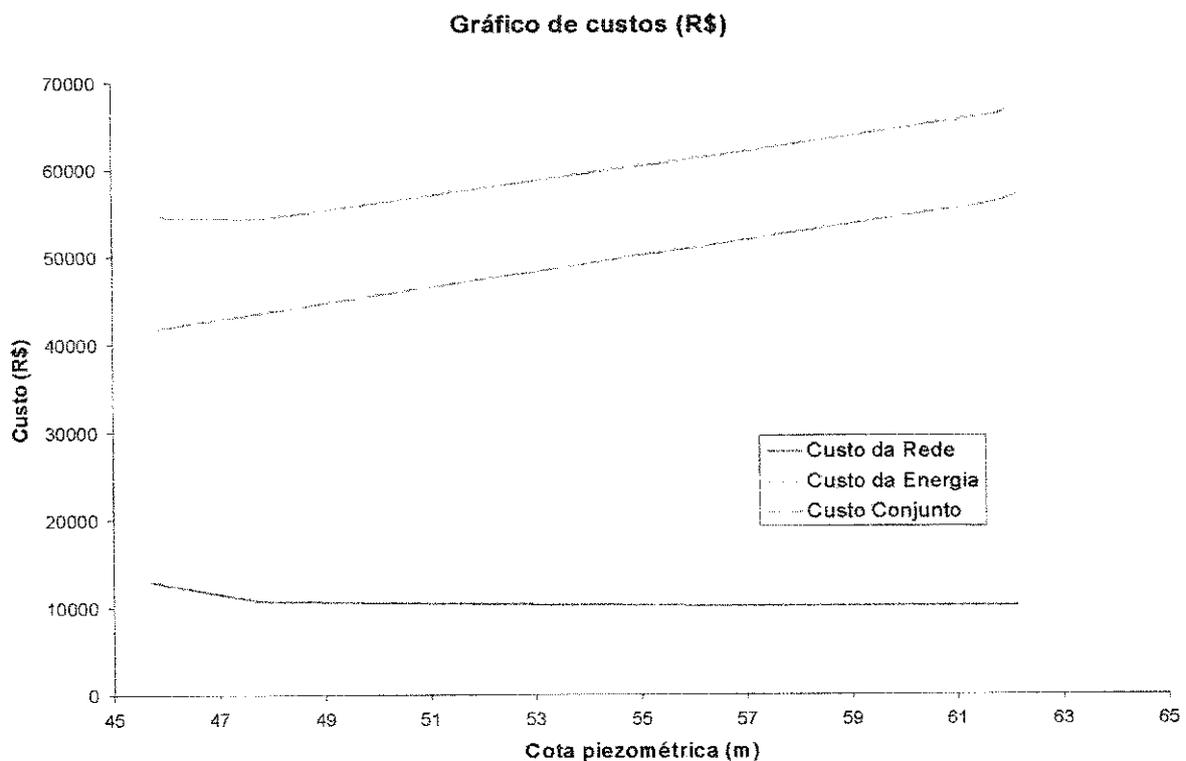


Figura 6.4 - Gráfico de custos do caso 2

Assim como no caso 1, os trechos que são compostos por dois diâmetros devem ter seu comprimento calculado através das fórmulas 6.1 e 6.2.

Os comprimentos referentes à cada diâmetro da rede de distribuição são mostrados no quadro 6.13.

Quadro 6.13 - Comprimentos de cada trecho (CASO 2)

Trecho	Diâmetro(mm)	Comprimento(m)
1	12	50,6
	16	49,4
2	100	76
3	100	108
4	100	152
5	32	125
6	75	50
7	75	133
8	100	120
9	16	41,2
	20	83,8
10	100	50
11	100	133
12	150	60

Fica, então, comprovada a aplicação do método para terrenos com topografia de relevo irregular, atendendo a todos os critérios de dimensionamento e garantindo pressão e vazão suficientes para abastecer toda a rede.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O dimensionamento ótimo através do método GRANADOS busca conseguir o custo total conjunto, onde são levados em conta os custos relativos à rede de distribuição e à energia utilizada para o bombeamento. No entanto, a metodologia desenvolvida por Alfredo Granados não considera as perdas de carga localizadas no cabeçal de controle e nem faz o dimensionamento da rede parcelar (tubulações onde a vazão é variável).

O novo método de cálculo para redes de distribuição não faz distinção entre as redes coletivas e parcelares, considerando todas as tubulações (linhas laterais e de derivação) como tubulações sem nenhuma derivação (através da correção feita pelo coeficiente de Christiansen) e posteriormente as tornando outra vez, tubulações com vazão variável ao longo de seu comprimento, considerando ainda, no dimensionamento a parcela de perda de carga corresponde aos cabeçais de controle.

Os resultados obtidos através da metodologia utilizada neste trabalho tem como vantagens não somente a obtenção de um custo ótimo de menor valor em relação às metodologias que não levam em conta os avanços alcançados nesta pesquisa, mas também a conversão das redes parcelar e conjunta em uma só rede de distribuição, fazendo com que não haja variações de pressão entre um ponto e outro imediatamente posterior da

tubulação devido ao cálculo ser feito considerando toda a rede como uma só.

Como já era esperado, o método Granados, acrescido do cálculo das perdas de carga localizadas nos cabeçais de controle, pode ser aplicado sem nenhum problema para redes parcelares onde a vazão é variável, através de uma correção feita pelo coeficiente de Christiansen.

Fica então comprovado que não há necessidade de desmembramento da rede de distribuição em rede parcelar e rede coletiva, podendo toda a rede ser calculada através do mesmo método, mesmo que a topografia do terreno a ser irrigado seja irregular.

Uma recomendação para trabalhos posteriores é o dimensionamento considerando as perdas de carga localizadas em todas as tubulações, conexões, curvas, cones de redução, tê, ou qualquer outra peça da rede que possa alterar a pressão disponível no interior das tubulações. Outra recomendação é a comprovação deste método para outros métodos de irrigação como aspersão convencional, onde a vazão e pressão nominal dos emissores tem valor bem mais elevado e a regra dos 20% deve ser sempre obedecida.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO NETO, J. M.; ALVAREZ G.. *Manual de hidráulica*. Ed. São Paulo, 1997.

BALOGH, J. ; GERGELY, I.. *Basic Aspects of Trickling Irrigation*, Budapest, 1985.

BASTOS, Edna. *Manual de Irrigação*. 3 ed. São Paulo. Ed. Ícone, 1991.

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

BERNARDO, Salassier. *Manual de Irrigação*. 4^o Edição, Viçosa: Ed. Universitária / UFV, 1986.

CABRERA, E y otros. *Sistemas Hidráulicos a Presión – Aspectos de su Diseño e Explotacion*. Universidad Politécnica de Valência, 1990.

CHRISTIANSEN, J. E.. *Irrigation by Sprinkling*. California, EUA, 1942.

DAKER, Alberto. *A Água na Agricultura*. Ed. Freitas Bastos, 1984.

FERNANDEZ, J. B.. *Diseño Hidraulico en Instalaciones de riego a Presión (Aspersión y Goteo)*. XI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Campinas, 1996.

- GHEYI, H. R.; DAMASCENO, F. A. V.; SILVA Jr., L. G. A.; MEDEIROS, J. F.. *Irrigação Localizada*. Campina Grande, UFPB, 1997.
- GOMES, Heber Pimentel. *Dimensionamiento Optimo del Conjunto Red Coletiva y Privadas Del Riego por Aspersión*. 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, 1^o edição-1994 e 2^o edição-1997.
- GONÇALVES, A. C. A., et all. *Análise da Perda de Carga em Tubos Perfurados para Irrigação, pela comparação entre o Conceito de Vazão Fictícia e a Metodologia Proposta por Christiansen*. Anais VII CONIRD, Florianópolis, SC, 1988.
- GRANADOS, A. *Infraestructura de Regadíos, Redes Colectivas de riego a Presión*. Servicio de Publicación de la E. T. S. I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, 1986.
- GUIMARÃES jr., João Abmer. *Dimensionamento Econômico de uma Parcela de Irrigação por Gotejamento*. Tese de Mestrado, Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, , 1993.
- HOWARD, P. W.. *Trickle Irrigation*. National Engineering Handbook, Water Resources Publications, Highlands Raches Colorado, USA. 1984.
- KARMELI, D.; PERI, G.; TODES, M.. *Irrigation Systems: Design and Operation*. Oxford University, 1985.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. *Sprinkle and Trickle Irrigation*. Van Nostrand Reinhold. 1990.

- KELLER, J.; KARMELI, D. *Trickle Irrigation Design*. Rain Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975.
- LAPAZARAN, J. C. P.; ABELAIRAS, J. L. P.. *Projeto de Irrigação por Microaspersão – II Curso Intensivo de Irrigação por Microaspersão*. Ceará, 1983
- 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.
- LUCAS FILHO, M.. *Metodologías de optimización de redes ramificadas de riego a presión que consideran el timbraje como variable intrínseca del proceso*. Tesis Doctoral E. T.S.I. de caminos de la Univesidad Politécnica de Madrid, 1991.
- 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.
- MEDEIROS, Paulo da Costa. *Otimização integrada em sistemas de irrigação por gotejamento*. Tese de Mestrado, Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997.
- NEVES, E. T.. *Curso de Hidráulica*. Ed. Globo, Porto Alegre, 1979.
- OLLITA, A. F. L.. *Os Métodos de Irrigação*. Ed. Nobel, São Paulo, 1987.
- OLIVEIRA, C. A. S.; BERNARDO, S.; VIEIRA M. e FERREIRA, P. A.. *Dimensionamento de linhas laterais para irrigação por gotejamento*, 1979.

- OLIVEIRA, C. A. S.; BERNARDO, S.; VIEIRA M. e FERREIRA, P. A.. *Características Hidráulicas de Gotejadores*, 1979.
- PIZZARO, F.. *Riegos localizados de alta frecuencia*. 2^o Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 1990.
- SAAD, João Carlos Cury. *Otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação por microaspersão utilizando programação não-linear*. Tese de Doutorado, Piracicaba, USP, 1993.
- SERRANO, José García. *Sistemas Hidraulicos a Presion, Aspectos Práticos de su Diseño y Explotación*. Universidade Politecnica de Valencia, 1990.
- SILVA, Rossana Cavalcanti Araújo. *Otimização de Redes Ramificadas através do método da Programação Não-Linear*. Tese de Mestrado, Campina Grande. Universidade Federal da Paraíba, 1997.
- TIBAU, Artur Oberlaender. *Técnicas Modernas de Irrigação*. 5a edição, Ed. Nobel, 1984, São Paulo. Tese de Mestrado, Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997.
- VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A.. *Irrigação Localizada*. Estudos FAO irrigação e drenagem, 1980.
- VIEIRA, Dirceu Brasil. *As Técnicas de Irrigação*. 2 ed. São Paulo. Ed. Globo, 1995.
- WITHERES, Bruce; VIPOND, Stanlay. *Irrigação Projeto e Prática*. 2 ed. São Paulo. Ed. Nobel, 1984.
- YAGÜE, J. L. F.; ROCHE, J. C.. *Curso Elemental de Riego*. Ed. Ministerio da Agricultura, Pesca y Alimentacion. Madrid, 1990.