

ME-L107-REPTD,SCA

**PROJETO OTIMIZADO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO
LOCALIZADA: NOVA CONCEPÇÃO**

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017980

JOÃO ABNER GUILMARÃES JÚNIOR

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. ARTHUR MATTOS



São Carlos

1998 < 325

Class.	TESE - EESC
Curr.	2706
Tombo	T0098/98

31100017980

CONTENÍDO RESUMEN (1/1)

Hidráulica y Sonarmento

A 22.6.2018

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC - USP

G963p Guimarães Júnior, João Abner
Projeto otimizado de sistemas de irrigação localizada:
nova concepção / João Abner Guimarães Júnior. -- São Carlos,
1998.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos -
Universidade de São Paulo, 1998.

Área: Engenharia Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Arthur Mattos.

1. Irrigação localizada. 2. Rede hidráulica. 3. Projeto.
4. Otimização. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **JOÃO ABNER GUIMARÃES JUNIOR**

Tese defendida e aprovada em 25-03-1998
pela Comissão Julgadora:

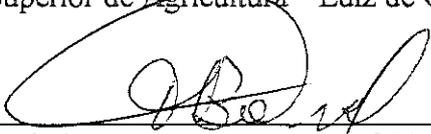


Prof. Associado **ARTHUR MATTOS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



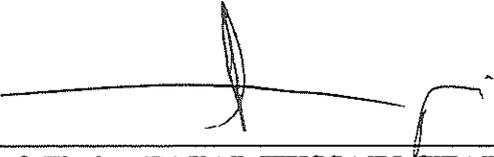
Prof. Associado **JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**
(Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo)



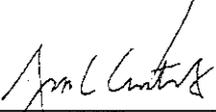
Prof. Associado **TARLEI ARIEL BOTREL**
(Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo)



Prof. Adjunto **MANOEL LUCAS FILHO**
(Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN)



Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICO:

A minha esposa Rita e aos
meus filhos: Luís, Clarice e Cecília.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Arthur Mattos pela amizade e a excelente orientação fornecida durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES que através do Programa Institucional de Capacitação Docente - PICD financiou o estudo.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da UFRN pela amizade e incentivos.

TRABALHOS DESENVOLVIDOS PELO AUTOR
NO CONTEXTO DO ESTUDO

GUIMARÃES Jr, J. A. SRINIVASAN V. S. *Dimensionamento Econômico de uma Parcela de Irrigação por Gotejamento.* - XVI Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Anais, V. 4 p. 334-345, Santiago, Chile 1994.

GUIMARÃES Jr, J. A. & MATTOS, A. *Programa DPG: Dimensionamento de uma parcela de gotejamento.* XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Anais, p 281, Viçosa, MG, Brasil, jul/1995.

GUIMARÃES Jr, J. A. & MATTOS, A. *Fórmulas práticas para o cálculo do comprimento ótimo de ramais de gotejamento.* XI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Campinas, SP. set/1996.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA SÍMBOLOS.....	iii
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Sistemas de irrigação localizada.....	4
2.2 Componentes do sistema dos sistema de irrigação localizada.....	5
2.3 Características dos emissores.....	7
2.4 Uniformidade da irrigação.....	10
2.4.1 Coeficiente de uniformidade do sistema.....	11
2.4.2 Coeficiente de variação de fabricação dos emissores.....	13
2.4.3 Limites de variação da pressão na parcela.....	13
2.4.4 Eficiência de irrigação.....	14
2.5 Manejo do sistema.....	15
2.5.1 Água solo.....	18
2.6 Hidráulica aplicada aos sistemas de irrigação localizada.....	21
2.6.1 Perda de carga uniforme.....	21
2.6.2 Fator de correção da perda de carga uniforme nas tubulações das parcelas com saídas múltiplas d'água.....	23
2.6.3 Perdas de carga localizadas nas linhas de irrigação.....	25
2.6.4 Dimensionamento das linha de irrigação de uma parcela.....	29
2.7 Etapas do projeto.....	30
2.8 Layout do sistema.....	32
2.8.1 Número de unidades operacionais.....	33
2.9 Dimensionamento otimizado das parcelas de irrigação localizada.....	34
2.9.1 Solução ótima sem restrições.....	39

2.9.2	Perdas de cargas ótimas associadas com um dado comprimento de ramal.....	40
2.9.3	Comprimento ótimo de um ramal associado com determinado diâmetro.....	40
2.9.4	Ponto de alimentação d'água das linhas inclinadas.....	42
2.10	Dimensionamento da rede de distribuição de sistemas de irrigação localizada...43	
2.10.1	Definições.....	44
2.10.2	Metodologias de dimensionamento de redes ramificadas.....	44
	I Programação Dinâmica.....	46
	II Programação Linear.....	49
	a) Função objetivo.....	50
	b) Classes das tubulações.....	52
	c) Limites de velocidade.....	53
	d) Restrições explícitas do modelo de programação linear.....	55
	e) Análise do modelo.....	56
	f) Método Simplex.....	57
	III Programação não-linear.....	57
2.11	Considerações finais.....	65
3	METODOLOGIA.....	68
3.1	Considerações iniciais.....	68
3.2	Programa manejo.....	68
3.3	Programa parcela.....	69
3.3.1	Modelo hidráulico.....	69
3.3.2	Limites para os comprimentos dos ramais.....	70
3.3.3	Varição de pressão mínima na parcela.....	72
3.3.4	Comprimento ótimo dos ramais.....	73
3.3.5	Otimização do ponto de alimentação das tubulações das parcelas.....	73
3.3.6	Otimização das perdas de cargas nas tubulações.....	74
3.3.7	Dimensionamento das tubulações das parcelas.....	74
3.4	Programa rede.....	79
3.4.1	Análise do problema.....	79
3.4.2	Função objetivo do problema geral de otimização da rede.....	83
4	RESULTADOS.....	90

4.1 Alternativa de projeto 1.....	93
4.2 Alternativa de projeto 2.....	94
5 DISCUSSÃO.....	99
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
ANEXO A: MÉTODO SIMPLEX.....	113
ANEXO B: PROGRAMA PROLOC.....	123
ANEXO C: CURVAS CARACTERÍSTICAS DA BOMBA.....	144
ANEXO D: RESULTADOS DETALHADOS.....	145
ENCARTE: DISK 3 ½ do Programa PROLOC	

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de funcionamento de um sistema de irrigação localizada.....	5
Figura 2 - Sistemas de irrigação por gotejamento com ramais duplos.....	19
Figura 3 - Tipo de conexões dos emissores nas linha de irrigação.....	27
Figura 4 - Tipos de conexão sobre linha de emissores.....	28
Figura 5 - Layouts de uma parcela de gotejamento.....	36
Figura 6 - Linha piezométrica da rede na etapa i.....	48
Figura 7 - Carga de pressão em uma linha de irrigação com distribuição em marcha.....	75
Figura 8 - Linha de irrigação em aclave.....	76
Figura 9 - Linha de irrigação em declive com combinação de diâmetros.....	78
Figura 10 - Esquema inverso de cálculo da rede principal de sistemas de irrigação localizada.....	82
Figura 11 - Esquema de projeto do sistema de irrigação.....	93
Figura 12 - Esquema de projeto da alternativa 2 do sistema de irrigação.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Expoentes x segundo a categoria do gotejador.....	9
Tabela 2 - Coeficientes de uniformidade (CU) dos sistemas de irrigação localizada.....	12
Tabela 3 - Coeficientes de Transmisividade (Tr).....	15
Tabela 4 - Percentagem de área molhada (P_m).....	20
Tabela 5 - Fórmulas práticas empregadas no cálculo das perdas de cargas nas linhas de irrigação localizada.....	22
Tabela 6 - Parâmetros da fórmula do comprimento equivalente.....	28
Quadro 1 - Etapas de projeto de um sistema de irrigação localizada.....	31
Tabela 7 - Acréscimos de pressão devido ao golpe de aríete nas redes de tubulações	53
Tabela 8 - Limites de velocidade nas tubulações das redes.....	54
Tabela 9 - Dados dos tubos disponíveis.....	92
Tabela 10 - Custos das parcelas da alternativa 1.....	94
Tabela 11 - Otimização conjunta rede-parcela da alternativa 1.....	95
Tabela 12 - Custos das parcelas da alternativa 2.....	97
Tabela 13 - Otimização conjunta rede-parcela da alternativa 2.....	98
Tabela 14 - Análise comparativa dos resultados.....	99
Tabela 15 - Tarifas mínimas associada com as alternativas de projeto.....	100
Tabela 16 - Custo marginal de mudança de diâmetro no trecho 1.....	104

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- área da parcela em m^2 ;
a	- relação entre o espaçamento inicial e os subseqüentes
a	- coeficiente de regressão da função água-produção
A'	- área do setor em aclive da parcela
A _c	- coeficiente de regressão da função água-produção
a _d	- coeficientes da função de regressão custo-diâmetro linha de derivação
a _r	- coeficientes da função de regressão custo-diâmetro dos ramais
A _u	- área da unidade operacional, m^2
b	- coeficiente de regressão da função água-produção
B _c	- coeficiente de regressão da função água-produção
b _d	- coeficientes da função de regressão custo-diâmetro linha de derivação
b _r	- coeficientes da função de regressão custo-diâmetro dos ramais
C	- gradiente de câmbio, US\$/m
CB	- custo anual de bombeamento, R\$/ano
CB _c	- custo anual de consumo de energia do sistema, R\$
CB _d	- custo anual de demanda, R\$
C _c	- capacidade de campo, %
CE	- custo anual de amortização dos equipamento, R\$/ano
ce	- tarifa de consumo de energia, R\$/Kwh;
CF	- custos fixos anuais de amortização dos equipamentos, R\$/ano
C _d	- custo da derivação, R\$/ano
cd	- Custo de demanda anual, R\$/Kw.
C _g	- coeficiente de rugosidade que incorpora os efeitos das perdas
C _h	- custo de bombeamento por unidade de altura manométrica

- $CMB_{b,r}$ - custos anuais de amortização do equipamento motor-bomba e do sistema elétrico, R\$/ano
 C_p - custo de instalação do conjunto das tubulações da parcela, R\$/ano
 $C_{p,j}$ - custo anual de amortização do conjunto das tubulações de uma parcela, R\$/ano
 C_r - custo do conjunto de ramais
 CRP - custo anual de amortização da rede primária, R\$/ano.
 CRS - Custo anual de amortização das redes secundárias, R\$/ano
 $CSIST$ - custos do sistema, US\$/ha
 C_T - custo total anual da rede, US\$/ha
 CT - custo total anual do sistema, R\$/ano
 $CT_{t,d}$ - custo unitário anual de amortização referente a tubulação de diâmetro
 CU - coeficiente de uniformidade do sistema, (adimensional)
 cu_i - custo anual de consumo de energia da unidade operacional i , R\$/mca.
 CV - coeficiente de variação de fabricação do emissor, (adimensional)
 D - diâmetro interno da tubulação, m ou mm
 d_a - densidade relativa aparente do solo
 D_d - diâmetro da linha de derivação, m
 D_p - número de dias de irrigação durante o período de irrigação
 D_r - diâmetro dos ramais, m
 $D(t,d)$ - diâmetro interno da tubulação de diâmetro d do trecho t , m
 D_1 - diâmetro menor da tubulação, m
 D_2 - diâmetro maior da tubulação, m
 e - número de emissores por cada planta
 E_g - espaçamentos entre emissores um grupo de emissores nos ramais, m
 E_f - espaçamentos entre fileiras de plantas, m
 E_r - espaçamento entre ramais ou entre fileiras de plantas, m
 ET_a - evapotranspiração real da cultura no período, mm ou m

- E_{tanque} - evaporação do tanque, mm
 ET_m - evapotranspiração máxima provável no período, m
 E_1 - espaçamento entre os ramais duplos, m
 E_2 - espaçamento entre os ramais internos às fileiras de plantas, m
 F - fator de correção da perda de carga de CHRISTIANSEN (1942);
 F' - fator de correção da perda de carga para um comprimento inicial diferente dos subseqüentes
 f_d - fatores de repartição da vazão na linha de derivação
 f_e - comprimento equivalente à perda localizada, m
 f_f - fatores de repartição da vazão nos ramais
 G_1 - constantes da função de custo da parcela
 G_2 - constantes da função de custo da parcela
 G_3 - constantes da função de custo da parcela
 G_4 - constantes da função de custo da parcela
 H - carga de pressão de serviço do emissor, mca
 $Ha_{b,r,i,j}$ - carga de pressão de alimentação da parcela j da unidade operacional i associada com o rotor r da bomba b , mca.
 Ha_p - cargas pressão de alimentação das parcelas, m
 H_b - carga de pressão que atua no emissor com vazão básica, mca
 h_c - perda de carga no cabeçal de controle em m
 $H_{c(\text{min})}$ - carga de pressão mínima no ponto crítico, mca
 h_d - perda de carga na linha de derivação, m
 h_e - perdas de cargas eventuais em m.
 h_f - perda de carga uniforme na tubulação, em m
 H_f - carga de pressão no final da linha, mca
 h_f' - perda de carga fictícia, m
 H_{f1} - carga de pressão efetiva no final da linha de diâmetro D_1 , mca

- H_2 - carga de pressão hipotética no final da linha de diâmetro D_2 , mca
 H_i - carga de pressão no início da linha, mca
 h_r - Perda de carga nos ramais, m
 H_{max} - cargas de pressão máxima na parcela, mca
 H_{min} - carga de pressão mínima na parcela, mca
 h_t - perda de carga total na tubulação, m
 H_m - altura manométrica do sistema, mca
 $H_{m_{b,r,i}}$ - altura manométrica requerida pela unidade operacional i e identificada na curva do rotor r , da bomba b , mca
 H_x - carga de pressão na seção distante x do final da linha em mca;
 h_x - perda de carga do final da linha até um ponto distante x do final, m
 i_r - declividade dos ramais, m/m
 i_d - declividade da linha de derivação, m/m
 J - perda de carga uniforme por unidade de comprimento da tubulação, m/m
 J' - perda de carga global por unidade de comprimento da tubulação, m/m
 $J[i,j(k,c)]$ - perda de carga unitária na tubulação de diâmetro i do trecho $j(k,c)$ do terminal crítico;
 $J[i,j(k,t)]$ - perda de carga unitária na tubulação de diâmetro i do trecho $j(k,t)$
 $j(k,c)$ - índice geral indicativo dos trechos do terminal crítico
 $j(k,t)$ - índice geral indicativo de um trecho k de um terminal t
 $J_{t,d}$ - perda de carga por unidade de comprimento da tubulação de diâmetro d , do trecho t , m/m;
 J_1 - perda de carga por unidade de comprimento da tubulação de diâmetro D_1
 J_2 - perda de carga por unidade de comprimento da tubulação de diâmetro D_2
 J_{100} - perda de carga para 100 m de tubulação, m/100m
 K - coeficiente de rugosidade da fórmula da perda de carga nas tubulações
 k_d - coeficiente característico de cada emissor
 k_d - coeficientes da fórmula da perda de carga na linha derivação

K_d'	- coeficientes da fórmula geral da perda de carga na linha de derivação
K_c	- coeficientes da cultura
K_L	- coeficiente que depende do layout das tubulações
K_p	- coeficiente do tanque classe "A"
k_r	- coeficientes da fórmula da perda de carga nos ramais
K_r'	- coeficientes da fórmula geral da perda de carga e dos ramais
k_1	- parâmetro da fórmula do comprimento equivalente
k_2	- parâmetro da fórmula do comprimento equivalente
L	- comprimento de uma tubulação, m
L_j	- comprimento de um trecho qualquer j da rede;
L_{lm}	- lâmina de irrigação líquida máxima, mm
L_n	- lâmina de irrigação necessária, mm
L_r	- comprimento dos ramais, m
L_t	- comprimento do trecho t da rede, m
M	- parâmetro que depende das características topográficas do terreno
m	- expoentes da vazão na fórmula geral da perda de carga
N	- número de saídas d'água na tubulação
n	- expoentes do diâmetro na fórmula geral da perda de carga
N_b	- número de bombas disponíveis
$N_d(j)$	- número de diâmetros selecionados para um trecho j
$N_d[j(k,c)]$	- número de diâmetros do trecho j(k,c) do terminal crítico
$N_d[j(k,t)]$	- número de diâmetros do trecho j(k)
$N_d(t)$	- número de diâmetros selecionados para o trecho t;
N_e	- número de emissores em cada unidade operacional
N_g	- número de emissores por grupo de emissores ou por árvore
N_{h_i}	- total anual de horas de funcionamento da unidade operacional
N_{p_i}	- número de parcelas da unidade operacional i

$N_p(i)$	- número de parcelas da unidade operacional i
N_r	- número de restrições
N_r	- número de ramais por fileiras de plantas
N_{r_b}	- número de rotores da bomba b
NT	- número de terminais da rede
$Nt(c)$	- número de trechos do terminal crítico
$Nt(p)$	- número de trechos da parcela p
Ntr	- número de trechos da rede
$Nt(t)$	- número de trechos de um terminal t
N_u	- número de unidades operacionais do sistema
N_{ud}	- número de unidades em funcionamento por dia
N_v	- número de variáveis de decisão:
P	- preços dos produtos, kg
P_{ef}	- precipitação efetiva no período em mm;
$P(i,j)$	- preço unitário da tubulação de diâmetro i do trecho j
P_m	- percentagem da área do terreno molhada pelo sistema de irrigação
P_{m_p}	- ponto de murcha permanente
P_1	- valor de P_m para um espaçamento entre ramais igual a S_1
P_2	- valor de P_m para um espaçamento entre ramais igual a S_2
P_1	- custo unitário da tubulação de diâmetro D_1
P_2	- custo unitário da tubulação de diâmetro D_2
q	- vazão do emissor, m^3/h ou l/h
Q	- vazão em uma tubulação, m^3/s
Q	- vazão inicial na linha de irrigação, m^3/s
q_b	- vazão média ou vazão básica de projeto dos emissores, l/h
q_d	- vazão distribuída na linha de irrigação, $(m^3/s)/m$;
Q_i	- vazão da unidade operacional i , m^3/h

- q_m - vazão mínima que corresponde ao emissor de pressão mínima, l/h
 $Q_t(p,t)$ - vazão no trecho t da parcela p, m^3/s ;
 Q_u - vazão de uma unidade operacional, m^3/h ou l/h
 r - relação entre as perdas de cargas das tubulações de uma parcela
RBRUT - receita bruta anual da produção, US\$/ha
RLIQ - receita líquida, US\$/ha
 s - declividades do terreno, m/m
 s - declividade da linha de irrigação, m/m
 T_a - tempo de aplicação, horas
 T_{apl} - tempo de aplicação, horas
 T_d - tempo disponível diário para a irrigação, horas
 T_R - turno de rega, dias
 T_r - coeficiente de transmisividade
 T_m - tempo de funcionamento médio das unidade operacionais, horas/dia.
 T_a - tempo de aplicação (tempo de funcionamento das unidade operacionais), horas
 T_R - turno de rega, dias.
 u - parâmetro representativo da declividade da tubulação
 V_{irr} - volume de irrigação, m^3
 V_T - volume de água por árvore, m^3
 x - expoente da fórmula do cálculo da vazão dos emissores
 x - distância do final da linha até um determinado ponto da tubulação, m
 $X(i,j)$ - comprimento da tubulação de diâmetro i do trecho j, m
 $X[i,j(k,c)]$ - comprimento da tubulação de diâmetro i do trecho j(k,c) do terminal crítico, m
 $X[i,j(k,t)]$ - comprimento da tubulação de diâmetro i do trecho j(k,t), m
 X_m - distância do ponto de pressão mínima até o final da linha, m

$X_{t,d}$	- comprimento da tubulação de diâmetro d do trecho t da rede primária, m
x_1	- distância do ponto de conexão até a extremidade final da tubulação, m
Y	- produção de frutos, kg/ha
y	- déficit hídrico, %
Y_c	- cota do terminal crítico, m
Y_0	- cota da tomada d'água, m
Y_m	- produção máxima da cultura, kg/ha
$Z_m(t)$	- cota piezométrica mínima de um terminal t da rede
Z_p	- cota do ponto de alimentação da parcela p , m
Z_r	- profundidade radicular das plantas, mm
Z_0	- cota piezométrica da tomada d'água;
$\alpha_{i,j}$	- coeficiente da função de custo da parcela i , da unidade operacional j
$\beta_{i,j}$	- coeficiente da função de custo da parcela i , da unidade operacional j
ΔH	- variação da pressão na parcela, mca
ΔH_{\max}	- variação máxima da carga de pressão na parcela, mca
ε_a	- eficiência de aplicação.
ε_r	- eficiência de irrigação ou de rega, %
$\phi_{b,r}$	- diâmetro do rotor r de uma bomba b , em mm;
$\eta_{b,r,i}$	- rendimento da bomba b identificado na curva do rotor r a partir da vazão da unidade operacional i
η_m	- rendimento do motor

RESUMO

GUIMARÃES JR., J. A. *Projeto otimizado de sistemas de irrigação localizada: nova concepção*. São Carlos, 1998. 190p Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os elevados custos de instalação e de energia dos sistemas de irrigação localizada são considerados os principais empecilhos da difusão desta técnica. Neste contexto, o presente estudo teve como propósito o desenvolvimento de um modelo computacional geral de otimização do projeto hidráulico dos sistemas de irrigação localizada. O modelo desenvolvido consiste de um método iterativo para a minimização do custo global do sistema, incluindo os custos de instalação e de energia. O modelo foi baseado num esquema inverso de cálculo da rede, em que as variáveis de decisão são: a seleção da bomba, o diâmetro do rotor e as cargas de pressão nos terminais da rede principal, nos pontos de alimentação das parcelas. Foi empregado um modelo de programação linear para o dimensionamento das tubulação da rede principal. O projeto das parcelas é baseado na metodologia proposta por Guimarães Jr (1993), incluindo os seguintes fatores de otimização: o comprimento e a perda de carga da linha lateral e o ponto de conexão das tubulações. Para facilitar o emprego da metodologia proposta foi desenvolvido o programa computacional ProLoc (Projeto Otimizado de Sistemas de Irrigação Localizada).

Palavras-chave: irrigação localizada - rede hidráulica; projeto - otimização

ABSTRACT

GUIMARÃES JR., J. *Optimized design of localized irrigation systems: new conception*. São Carlos, 1998. 190p Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The high costs of installation and energy of localized irrigation systems have been considered as a drawback for a wide spread use of this technique. In this context, the purpose of this study was to develop a general computational optimization model for the hydraulic design of localized irrigation systems. The model developed consists of the iterative method to minimize the global cost of the system, including the costs of the hydraulic network and energy. This is based in the inverse scheme of calculation of the network, whose decision variables are: the pump selection, the diameter impeller and the pressure heads in of terminals of the main network, in the points of connections with the subunits. A linear programming model is used to dimension the pipe sizes of the main network. The design of the subunits is based in the methodology proposed by Guimarães Jr (1995), including the optimization factors: the length and friction head loss of the lateral and the point of alimentation of the pipe-lines. A computer programme ProLoc (Projeto Otimizado de Sistemas de Irrigação Localizada) was developed to facilitate of employment of the model proposed.

Keywords: localized irrigation - hydraulic network; design - optimization

1 INTRODUÇÃO

A irrigação localizada é uma técnica muito eficiente de aplicação de água e fertilizantes solúveis, diretamente nas proximidades do sistema radicular das plantas, através de uma extensa rede de tubulações pressurizadas, que cobre toda a superfície do terreno. Por ser um sistema fixo, o seu manejo é bastante facilitado, permitindo uma frequência de irrigação elevada muito favorável para as plantas.

O custo inicial de um sistema de irrigação localizada, principalmente devido às tubulações, é a sua maior desvantagem. Originalmente esta técnica foi concebida para irrigar áreas com topografia acidentada, com solos pobres e com água e mão de obra escassa ou cara. Nestas condições, os sistemas de irrigação localizada apresentam muitas vantagens sobre a irrigação convencional.

Atualmente, no Brasil, os sistemas de irrigação localizada estão quase sempre sendo implantados, principalmente na Região Nordeste, em áreas com água abundante, culturas altamente produtivas e condições bastante favoráveis à produção e à comercialização da safra. Este fato deve-se, geralmente, aos elevados custos de instalação e manutenção, que tornam esta técnica acessível apenas aos projetos com baixo risco e alta capacidade de retorno, justificando o emprego de técnicas de otimização no projeto destes sistemas .

Diversos estudos foram realizados com este objetivo. Inicialmente as pesquisas restringiram-se à minimização do custo das tubulações. Em seguida, com a disponibilidade no mercado de pacotes de otimização cada vez mais potentes e versáteis, os estudos tornaram-se mais abrangentes, buscando inclusive a maximização dos lucros. Incorporando um grande número de variáveis de decisão, contínuas e inteiras, associadas com a configuração da rede, o manejo do sistema e a produção das culturas. Para estas condições, o processo de otimização apresenta-se bastante complexo, requerendo, portanto, o domínio de técnicas de otimização sofisticadas, combinadas com processos iterativos trabalhosos que dificultam o emprego no dia a dia dos projetistas.

Os programas computacionais, disponíveis no mercado, desenvolvidos com a finalidade de elaborar projetos de sistemas de irrigação localizada, praticamente reproduzem o cálculo manual. Não incorporando, diretamente, técnicas computacionais de otimização compatíveis com a capacidade de processamento cada vez maior dos microcomputadores atuais.

A presente pesquisa, por conseguinte, consiste do desenvolvimento de um modelo computacional para a elaboração de projetos otimizados da rede hidráulica de sistemas de irrigação localizada. Para isto, foram adotadas técnicas de otimização adequadas para a formulação de um programa genérico, que atenda as condições mais diversificadas possíveis de projetos dos sistemas de irrigação localizada.

O estudo restringiu-se à minimização dos custos anuais globais de energia e equipamentos, simplificando bastante o problema. Dado que, nos estudos de otimização com maximização dos lucros pesquisados as soluções ótimas geralmente corresponderam aos benefícios máximos. Nestas condições, a minimização do custo do sistema predomina no processo de otimização.

Para facilitar a aplicação da metodologia, foi desenvolvido o programa ProLoc (Projeto Otimizado de Sistemas de Irrigação Localizada), em anexo, que reproduz as etapas normais de um projeto. O programa auxilia no cálculo dos parâmetros do manejo do sistema; otimiza o projeto das subunidades envolvendo o layout, o formato, os pontos de alimentação e o dimensionamento das tubulações e promove o cálculo otimizado da rede principal, selecionando, inclusive, o ponto de funcionamento da bomba.

O capítulo 2, deste trabalho, apresenta as informações gerais para a elaboração do projeto dos sistemas de irrigação localizada, com respeito aos aspectos agronômicos e a funcionalidade do sistema e as técnicas de otimização recomendadas para o projeto das parcelas (subunidades de rega) e da rede principal.

A metodologia empregada no modelo de otimização é descrita no capítulo 3. Compreendendo um processo iterativo envolvendo a otimização conjunta da rede e das parcelas. As pressões de alimentação das parcelas são variáveis de decisão do problema.

O capítulo 4 apresenta, em detalhe, os resultados da aplicação do modelo computacional. Os quais são discutidos no capítulo 5.

E, por fim, o capítulo 6 expõe as conclusões e recomendações resultantes da análise da pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistemas de irrigação localizada

A irrigação localizada é uma moderna técnica agrícola de aplicação artificial de água, sob condições altamente controladas e favoráveis, diretamente na zona radicular das plantas, com pequenas vazões emitidas e com uma alta frequência de irrigação (SAN JUAN, 1988).

Os sistemas de irrigação localizada englobam um grande número de técnicas de irrigação, com entrega d'água pontual, que apresentam em comum uma extensa rede de tubulações pressurizadas, projetados para garantir uma distribuição relativamente uniforme da água em toda a superfície do terreno.

Assim, pode-se classificar os principais tipos de sistema de irrigação localizada, segundo TELLES (1986), como:

- a) Gotejamento;
- b) Tubos perfurados;
- c) Microaspersão;
- d) Irrigação por potes e cápsulas porosas;
- e) Jato pulsante;

2.2 Componentes dos sistemas de irrigação localizada

Em um sistema de irrigação localizada uma rede de tubulações, normalmente fixa, cobre toda a superfície do terreno e distribui a água diretamente para as plantas.

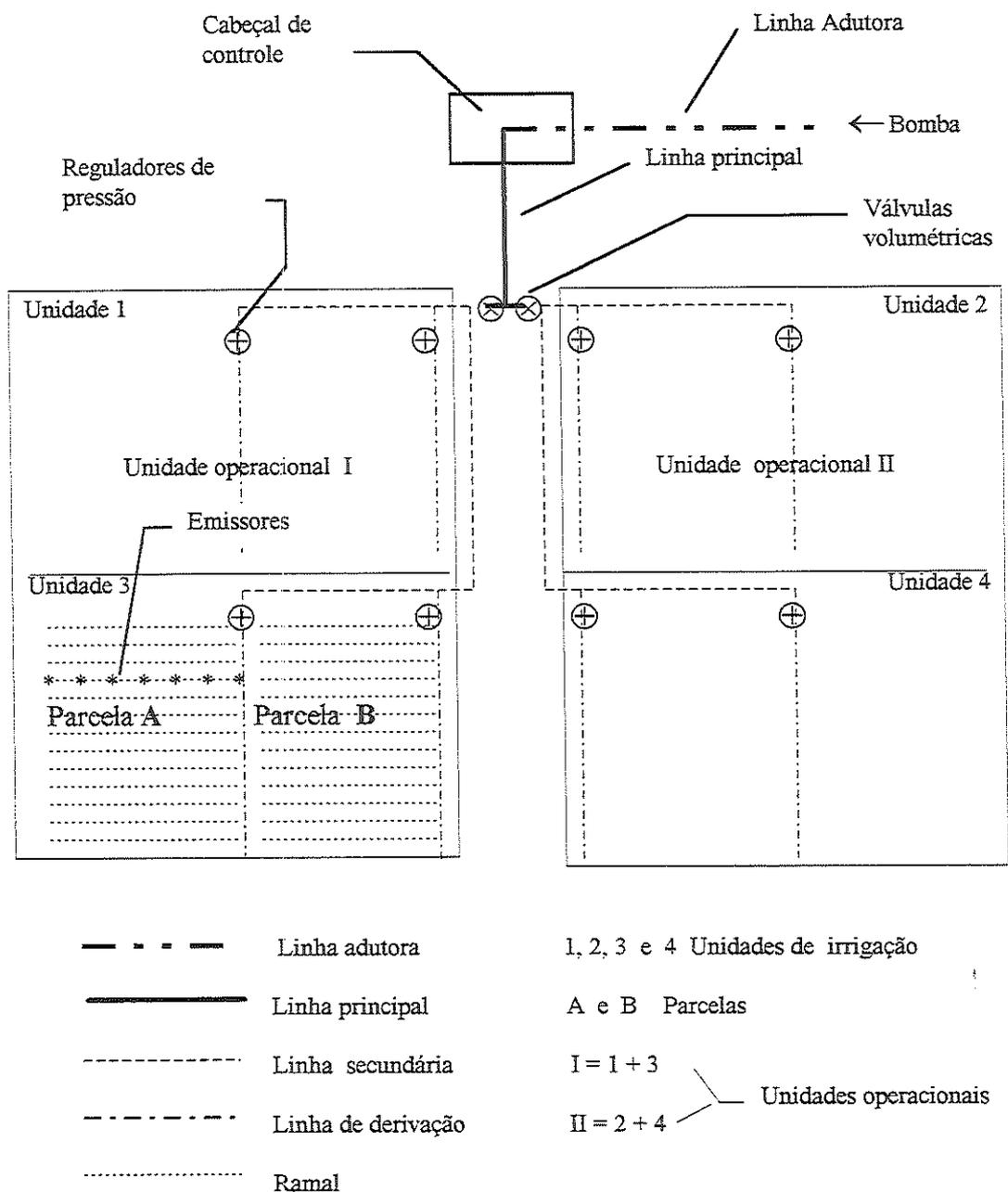


Figura 1 - Esquema de funcionamento de um sistema de irrigação localizada

Para facilitar o controle da uniformidade na distribuição da água e a adaptação às características dos emissores, o sistema é dividido em unidades operacionais compostas por uma ou mais parcelas de irrigação, .

Uma parcela, também denominada de subunidade de rega, corresponde a uma fração da superfície do terreno, com formato geralmente retangular, definida pelo conjunto de ramais que são alimentados por cada linha de derivação.

Geralmente, a alimentação dos sistemas de irrigação localizada é feita por bombeamento direto. Conduzindo a água para o cabeçal de controle que a distribui para as diversas parcelas de irrigação do sistema através de uma rede de tubulações ramificadas. Entretanto, em situações com topografia favorável, com a localização da fonte de suprimento em um ponto elevado do terreno, o sistema pode ser alimentado por gravidade diretamente de um reservatório elevado.

O cabeçal de controle é um conjunto de equipamentos próximos e interligados, composto de: sistema de filtros, sistema de injeção de fertilizantes, válvulas de controle volumétrico, etc.

Os ramais ou linhas laterais são as tubulações onde estão inseridos os emissores. As linhas principais ligam o cabeçal de controle às diversas unidades de irrigação. As tubulações que, dentro das unidades de irrigação, alimentam diretamente as parcelas são denominadas linhas secundárias (LOPEZ et al., 1992).

Os emissores são os dispositivos que controlam a liberação da água pela dissipação da pressão nas linhas laterais.

2.3 Características dos emissores

Os emissores são os equipamentos que controlam a uniformidade de distribuição da água. Segundo KELLER & KARMELI (1975), um emissor de irrigação localizada ideal deve apresentar as seguintes características:

- a) Vazão pequena, uniforme e constante;
- b) Orifício de saída da água relativamente grande, para reduzir a possibilidade de entupimentos;
- c) Compacto e de baixo custo.

Quanto ao funcionamento hidráulico, os emissores podem ser classificados, segundo TELLES (1986) e LOPEZ et al. (1992), como:

- a) Orifícios;
- b) Bocais difusores;
- c) De longo percurso;
- d) Com câmara de vórtice;
- e) Auto reguláveis;
- f) Microaspersores;
- g) Cápsulas porosas.

Orifícios: neste tipo de emissores o escoamento ocorre, com pequena vazão e baixa pressão, a partir de um ou mais orifícios de pequenas dimensões.

Bocais difusores: a água sai por um pequeno bocal cônico divergente, incidindo com grande velocidade em um deflector fixo, difundindo-se no ar e caindo no terreno formando um círculo molhado.

Emissores de longo percurso: a água percorre um longo caminho em micro tubos ou labirintos, dissipando a pressão residual, principalmente, pelo efeito do atrito viscoso.

Emissores com câmara de vórtice: o escoamento da água ocorre a partir de uma câmara circular, onde se produz um movimento rotacional forçado que resulta em uma perda de carga maior do que nos emissores convencionais, resultando em um orifícios de saída maior, com uma menor possibilidade de obstrução.

Emissores auto reguláveis: o escoamento é controlado por uma membrana flexível que estrangula o orifício de saída, compensando as variações da pressão do sistema, mantendo a vazão praticamente constante.

Microaspersores: um pequeno jato d'água é lançado ao ar a partir de um dispositivo móvel circular, caindo pulverizado no terreno na forma de um círculo molhado, como nos difusores.

Potes ou cápsulas porosas: a água percola através das paredes do emissor, umedecendo a massa de solo que envolve o mesmo.

O escoamento em um emissor deve-se à carga de pressão efetiva na tubulação. As características físicas dos emissores definem o seu comportamento hidráulico. Segundo KELLER & KARMELI (1975), a vazão relaciona-se diretamente com a carga hidráulica na entrada do emissor, pela equação (2.1):

$$q = k_d.H^x \quad (2.1)$$

Sendo que:

q = Vazão do emissor em l/h;

k_d = Coeficiente característico de cada emissor;

H = Carga de pressão de serviço do emissor em mca;

x = Expoente, dependendo do regime de fluxo do emissor.

Os valores do expoente "x" variam de 0,5, para emissores com fluxo turbulento, a 1,0, para fluxo laminar. Sendo que, em tese, os emissores auto reguláveis deveriam apresentar um expoente "x" nulo. Para a maioria dos emissores, o valor do expoente "x" situa-se entre 0,5 e 1,0. (KELLER & KARMELI, 1975).

Tabela 1 - Expoentes x segundo a categoria do gotejador (Pizarro, 1990)

Categoria do gotejador	Expoente x
longo percurso tipo micro tubo	0,7 - 1,0
longo percurso tipo espiral ou labirinto	0,5 - 0,8
curto percurso, orifício	0,4 - 0,6
tipo vórtice	0,3 - 0,5
auto reguláveis	0,0 - 0,5

Os emissores tipo orifícios ou bocais oferecem pouca resistência ao escoamento, resultando em pequenas seções de escoamento e vazões relativamente grandes associadas com pressão de serviço baixa. O escoamento neste tipo de emissor é geralmente turbulento.

Os emissores de longo percurso caracterizam-se por regime laminar, seções de escoamento relativamente maiores e pressão de serviço também maior.

Os emissores auto reguláveis, com uma baixa sensibilidade às variações de pressão, são, em tese, os que apresentam um comportamento hidráulico ideal, aproximando-se das características citadas por KELLER & KARMELI (1975). Porém, aspectos relacionados principalmente com o processo de fabricação destes emissores podem alterar o seu funcionamento hidráulico. Este fato, segundo KELLER & KARMELI (1975), deve-se a distorções na flexibilidade da membrana, que podem ser ocasionadas por uma não uniformidade ou fadiga do material.

2.4 Uniformidade da irrigação.

Os sistemas de irrigação localizada são projetados visando-se uma razoável uniformidade na distribuição da água no terreno. As variações da vazão emitida são causadas por fatores construtivos expressados pelo coeficiente de variação de fabricação e hidráulicos ocasionados pelas diferenças de pressão devidas às perdas de cargas associadas com o escoamento nas tubulações, aos desníveis topográficos e às obstruções ocasionais na rede (KELLER & KARMELI, 1975).

Na prática usual de projeto, o controle da pressão do sistema é feito a partir das parcelas onde os emissores operam simultaneamente. OLITTA (1984) recomenda uma variação máxima da vazão emitida da ordem de 10% da vazão básica dos emissores, correspondendo a uma variação em torno de 20% da pressão de serviço, para os emissores com fluxo turbulento, e a 10% da pressão de serviço, para os emissores com fluxo laminar.

Porém, alguns autores baseados em critérios práticos e econômicos apresentam critérios menos rigorosos. BERNARDO (1987), para condições de irrigação suplementar no Brasil, recomenda uma variação máxima de 20% da vazão emitida para os ramais.

PEROLD (1977) recomenda que a uniformidade numa linha lateral de irrigação deve basear-se em um coeficiente de uniformidade como o de CHRISTIANSEN (1942), principalmente nas linhas em declive, onde a variação da pressão entre os emissores extremos não deve ser considerada.

De uma maneira geral, a uniformidade da aplicação da água num sistema de irrigação localizada é definida a partir do Coeficiente de Uniformidade do Sistema, CU (LOPEZ et al. 1992).

2.4.1 Coeficiente de uniformidade do sistema

Para uma parcela de irrigação localizada, desprezando-se os efeitos das obstruções que devem ser controlados, pode-se avaliar a uniformidade na distribuição da água de um sistema de irrigação localizada a partir do coeficiente de uniformidade (CU) proposto por KELLER & KARMELI (1975).

$$CU = 100 \left(1 - \frac{1,27CV}{\sqrt{e}} \right) \frac{q_m}{q_b} \quad (2.2)$$

Sendo que:

CU = Coeficiente de uniformidade do sistema;

CV = Coeficiente de variação de fabricação do emissor;

e = Número de emissores por cada planta;

q_m = Vazão mínima que corresponde ao emissor de pressão mínima;

q_b = Vazão média ou vazão básica de projeto dos emissores.

Na equação (2.2), de KELLER & KARMELI (1975), q_m pode ser estimado a partir de um valor de CU adotado. LOPEZ et al. (1992) apresentaram a Tabela 2 com os valores práticos para o Coeficiente de Uniformidade, CU, associados às diversas alternativas de projeto dos sistemas de irrigação localizada.

Tabela 2 - Coeficientes de uniformidade (CU) dos sistemas de irrigação localizada. (Lopez et al., 1992).

Tipo de emissor	Topografia do solo	CU para zonas áridas
Cultivo permanente $E_g > 4$ m	uniforme ($s < 2\%$)	90% a 95%
	inclinado ($s > 2\%$) ou ondulado	85% a 90%
Cultivos permanentes e semi permanentes. $E_g < 2,5$ m	uniforme ($s < 2\%$)	85% a 90%
	inclinado ($s > 2\%$) ou ondulado	80% a 90%
Mangueiras de gotejamento em cultivos anuais com o de hortaliças	uniforme ($s < 2\%$)	80% a 90%
	inclinado ($s > 2\%$) ou ondulado	70% a 85%

Para zonas úmidas, segundo LOPEZ et al. (1992), os valores tabelados de CU devem ser rebaixados em 10% .

Sendo que: E_g é o espaçamento entre os gotejadores no ramal e s é a declividade representativa da topografia do terreno.

2.4.2 Coeficiente de variação de fabricação dos emissores

Um outro aspecto, importante, que deve ser levado em consideração na seleção de um emissor de irrigação localizada é a identificação do Coeficiente de Variação de Fabricação do Emissor (CV). Definido por KELLER & KARMELI (1975) pela relação entre o desvio padrão e a média das vazões de uma amostra de emissores submetidos a uma mesma carga de pressão. Este parâmetro é determinado em laboratório, devendo ser fornecido pelos fabricantes.

TELLES (1986) apresenta a seguinte classificação para os gotejadores e microaspersores, em função do coeficiente de variação de fabricação:

$CV < 0,05$	Bom
$0,05 < CV < 0,10$	Médio
$0,10 < CV < 0,20$	Regular
$CV > 0,20$	Deficiente e inaceitável.

2.4.3 Limites de variação da pressão na parcela.

A variação máxima da carga de pressão da parcela relaciona-se diretamente com os limites adotados para a vazão emitida. Segundo LOPEZ et al. (1992), a diferença máxima da carga de pressão permitida em uma subunidade de rega deverá ser proporcional à diferença entre a carga de pressão (H_b), que produz a vazão básica de projeto, e a carga de pressão mínima (H_{min}), que corresponde à vazão mínima compatível com o CU adotado para o projeto, de modo que:

$$\Delta H = M.(H_b - H_{\min}) \quad (2.3)$$

Sendo que:

ΔH = Variação da pressão na parcela;

H_b = Carga de pressão que atua no emissor com vazão básica;

H_{\min} = Carga de pressão mínima;

M = Parâmetro que depende das características topográficas do terreno.

Segundo LOPEZ et al. (1992), $M \cong 2,5$ ($2,0 < M < 4,5$)

2.4.4 Eficiência de irrigação

Em um sistema de irrigação localizada as perdas d'água, excluindo-se a limpeza periódica dos filtros, são nulas na rede de distribuição e estão concentradas praticamente apenas nas parcelas (LOPEZ et al., 1992). Neste caso, a eficiência de irrigação pode ser expressada pela eficiência de aplicação que é definida pela percentagem da água aplicada, armazenada na zona radicular, que está a disposição das plantas ao nível das parcelas.

Segundo GOMES (1994), os principais fatores que interferem na eficiência dos sistemas de irrigação localizada são: a percolação profunda, definida pelo coeficiente de transmisividade (Tr), e as variações das vazões emitidas, avaliadas pelo coeficiente de uniformidade (CU). A eficiência de irrigação ou de rega (ϵ_r) é calculada a partir do produto destes coeficientes, como a seguir:

$$\epsilon_r = Tr \times CU \quad (2.4)$$

Tabela 3 - Coeficientes de Transmisividade (Tr) (Keller e Karmeli, 1974)

Clima	Profundidade das raízes em m	Textura do solo			
		Muito grossa	Grossa	Média	Fina
Árido	<0,75	0,85	0,90	0,95	1,00
	0,75 a 1,50	0,90	0,95	1,00	1,00
	>1,5	0,95	1,00	1,00	1,00
Úmido	<0,75	0,75	0,80	0,85	0,90
	0,75 a 1,50	0,80	0,85	0,90	0,95
	>1,50	0,85	0,90	0,95	1,00

2.5 Manejo do sistema

A irrigação localizada, por ser um sistema fixo, apresenta-se com um manejo bastante facilitado. O processo de irrigação é controlado a partir do tempo necessário para aplicar um determinado volume d'água em cada unidade operacional do sistema.

$$T_{apl} = \frac{V_{irr}}{Q_u} \quad (2.5)$$

T_{apl} = Tempo de aplicação em horas;

V_{irr} = Volume de irrigação em m³;

Q_u = Vazão de uma unidade operacional em m³/h.

O volume d'água de irrigação produz a lâmina de irrigação necessária.

$$V_{ir} = \frac{A_u}{\epsilon_r} \left(\frac{L_n}{1000} \right) \left(\frac{P_m}{100} \right) \quad (2.6)$$

Sendo que:

P_m = Percentagem da área do terreno molhada pelo sistema de irrigação

$(1/3 \leq f_c \leq 1)$ (KELLER & KARMELI, 1975);

L_n = Lâmina de irrigação necessária em mm;

A_u = Área da unidade operacional em m²;

ϵ_r = Eficiência de irrigação.

A lâmina de irrigação necessária (L_n) da unidade operacional é determinada a partir do balanço hídrico do terreno no período sem irrigação. Desta forma, desprezando-se as possíveis contribuições do lençol freático, a lâmina de irrigação necessária no período será:

$$L_n = Et_m - P_{ef} \quad (2.7)$$

Sendo que:

Et_m = Evapotranspiração máxima da cultura no período em mm;

P_{ef} = Precipitação efetiva no período em mm;

A evapotranspiração real pode ser obtida a partir da evaporação de um tanque evaporimétrico instalado na região:

$$Et_m = K_c \cdot K_p \cdot E_{tanque} \quad (2.8)$$

Sendo que:

K_c = coeficientes da cultura;

K_p = coeficiente do tanque;

E_{tanque} = evaporação do tanque em mm.

A vazão de uma unidade operacional é determinada a partir do número total dos emissores da unidade e da vazão nominal destes.

$$Q_u = N_e \cdot q \quad (2.9)$$

Sendo que:

N_e = número de emissores em cada unidade operacional;

q = vazão nominal dos emissores em l/h .

O número de emissores de uma unidade operacional pode ser estimado a partir da relação entre a área da unidade e a área de influência de cada emissor.

$$N_e = \frac{N_r \cdot A_u}{E_g \cdot E_f} \quad (2.10)$$

Sendo que:

N_r = Número de ramais por fileiras de plantas (Figura 2);

E_g = Espaçamentos entre emissores nos ramais;

E_f = Espaçamentos entre fileiras de plantas;

2.5.1 Água no solo

Os sistemas de irrigação localizada são projetados para umedecer apenas um volume restrito do solo, nas proximidades do sistema radicular das plantas. Sendo esta a sua característica marcante.

Nestes casos, a disponibilidade de água no solo, diretamente associada com a lâmina de irrigação líquida máxima, deve ser corrigida pelo percentual de área molhada, como a seguinte :

$$L_{lm} = \left(\frac{(C_c - Pm_p)}{100} \cdot d_a \cdot Z_r \cdot \left(\frac{y}{100} \right) \right) \cdot \frac{P_m}{100} \quad (2.11)$$

Sendo que:

L_{lm} = Lâmina de irrigação líquida máxima em mm;

C_c = Capacidade de campo em %;

Pm_p = Ponto de murcha permanente em %

d_a = Densidade relativa aparente do solo (adimensional);

Z_r = Profundidade radicular das plantas em mm;

y = fator de disponibilidade hídrica em %

P_m = Percentagem de área molhada em %

A percentagem de área molhada (P_m) depende de aspectos relacionados com: a cultura (densidade e estado de desenvolvimento das plantas) e os elementos formadores do bulbo molhado (vazão emitida e textura do solo). Segundo KELLER & KARMELI (1975), o limite inferior de P_m deve ser de 33%.

A Tabela 4, proposta por KELLER & KARMELI (1975), apresenta valores de P_m para diversas situações de projeto de sistemas de irrigação por gotejamento.

Nos casos de fileira de plantas com ramais duplos (conforme a Figura 2), o valor de P_m é estimado a partir da seguinte expressão proposta por KELLER & KARMELI (1975):

$$P_m = \frac{P_1 E_1 + P_2 E_2}{E_f} \quad (2.12)$$

Sendo que:

E_1 = Espaçamento entre os ramais duplos em m;

E_2 = Espaçamento entre os ramais internos às fileiras de plantas em m;

E_f = Espaçamento entre as fileiras de plantas em m;

P_1 = Valor de P_m para um espaçamento entre ramais igual a E_1 ;

P_2 = Valor de P_m para um espaçamento entre ramais igual a E_2 .

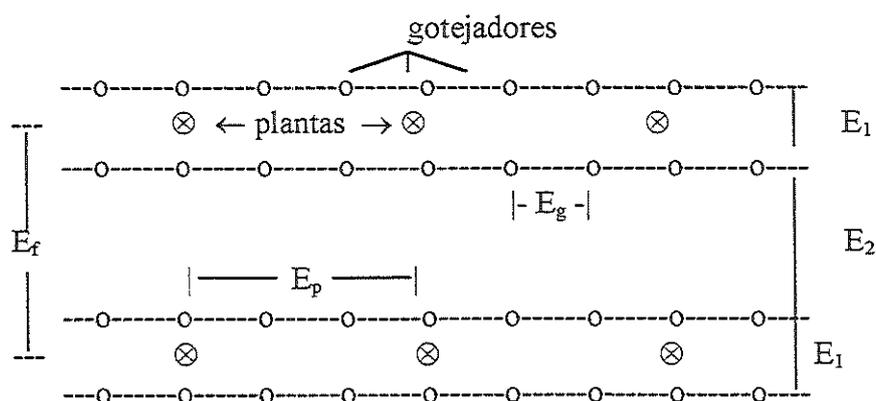


Figura 2 - Sistemas de irrigação por gotejamento com ramais duplos

Tabela 4 - Percentagem de área molhada (P_m) (Keller e Karmeli, 1974)

Espaçamento das linhas laterais (m) E_L	Vazão do gotejador (l/h)														
	<1,5			2,0			4,0			>12					
	Texturas do solo (Grossa, Média e Fina) e espaçamentos recomendados, E_B , entre gotejadores em m														
	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
0,8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,0	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	100
1,5	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	100
2,0	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	100
2,5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	100
3,0	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80
3,5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	68
4,0	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60
4,5	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	33	44	53
5,0	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48
6,0	5	12	18	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	40

2.6 Hidráulica aplicada aos sistemas de irrigação localizada

As tubulações de um sistemas de irrigação localizada formam uma rede ramificada, constituída de uma rede primária e de redes secundárias, que cobre todo o terreno. As redes secundárias estão localizadas nas parcelas e são alimentadas pela rede primária a partir da bomba. O dimensionamento das tubulações é distinto para estas redes.

Para as tubulações das parcelas, o cálculo é bem mais criterioso, estando condicionado por limites de variação de pressão nas tubulações relativamente estreitos, com base na pressão de serviço do emissor, garantindo a uniformidade de distribuição da água estabelecida para o sistema.

No dimensionamento da rede primária predomina o critério econômico, envolvendo os custos de energia e de instalação da rede, e é condicionado pelas pressões de alimentação das parcela e as pressões máximas toleradas.

2.6.1 Perda de carga uniforme

Diversas fórmulas empíricas são empregadas no dimensionamento das tubulações de irrigação localizada. Estas fórmulas podem ser representadas genericamente pela seguinte expressão:

$$h_f = K \frac{Q^m}{D^n} L \quad (2.13)$$

Sendo que:

h_f = Perda de carga uniforme na tubulação, em m;

Q = Vazão de montante da tubulação, em m^3/s ;

D = Diâmetro interno da tubulação, em m;

L = Comprimento da tubulação, em m;

K = Coeficiente que depende da rugosidade da tubulação;

m e n = Expoentes associados ao regime do escoamento.

Os valores do coeficiente K , m e n de diversas fórmulas práticas recomendadas para o cálculo hidráulico do sistemas de irrigação estão apresentados na Tabela 5, seguinte.

Tabela 5 - Fórmulas práticas empregadas no cálculo das perdas de cargas nas linhas de irrigação localizada (Guimarães Jr, 1993).

Fórmulas	Materiais	K	m	n
Hazen-Williams	tubos de PVC (C=150)	0,00093	1,852	4,87
Blasius	tubos lisos	0,00078	1,75	4,75
Cruciani-Magazitoria	polietileno	0,00099	1,75	4,75
Flamant	ferro fundido e aço, novos	0,00140	1,75	4,75
	cimento amianto	0,00095		
	PVC e polietileno	0,00082		
Fair-Whipple-Hsiao	Plástico	0,00086	1,75	4,75

2.6.2 Fator de correção da perda de carga uniforme nas tubulações das parcelas com múltiplas saídas d'água

As tubulações das parcelas, ramal ou derivação, funcionam com distribuição de vazão em marcha. O efeito das múltiplas saídas laterais de água reduz gradativamente a vazão inicial e conseqüentemente a declividade da linha de energia.

Para facilitar o cálculo, a perda de carga é determinada inicialmente sem considerar a variação da vazão (a vazão de cálculo é a inicial) e em seguida é corrigida por um coeficiente (F) que traduz o efeito da redução da vazão ao longo da tubulação. Nesses casos:

$$h_f = F \cdot h_f' \quad (2.14)$$

Sendo que:

h_f = Perda de carga real na tubulação;

h_f' = Perda de carga fictícia (a vazão de cálculo é a inicial);

F = Fator de correção da perda de carga.

CHRISTIANSEN (1942) apresentou a fórmula geral (2.15), bastante aproximada, para o cálculo do fator de correção F;

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \quad (2.15)$$

Sendo que:

m = Expoente da vazão na fórmula da perda de carga;

N = Número de saídas d'água na tubulação.

O estudo de CHRISTIANSEN (1942) baseou-se nas seguintes considerações práticas:

- a) tubulação com distribuição longitudinal de vazão discreta e constante;
- b) vazão longitudinal nula no final da tubulação;
- c) diâmetro da tubulação constante;
- d) regime de fluxo inalterado;
- e) espaçamentos entre as saídas constantes;
- f) espaçamento inicial igual aos subseqüentes.

A expressão (2.16), segundo SCALOPPI (1986) e PACO (1989), permite ajustar o valor do coeficiente F de CHRISTIANSEN (1942) quando o primeiro ponto de derivação d'água situar-se a uma distância do início da linha diferente dos espaçamentos subsequentes.

$$F' = \frac{F \cdot N + a - 1}{N + a - 1} \quad (2.16)$$

Sendo que:

F' = Fator de correção da perda de carga para um comprimento inicial diferente dos subseqüentes;

F = Fator de correção de CHRISTIANSEN (1942);

N = Número de saídas d'água na tubulação;

a = Relação entre o espaçamento inicial e os subseqüentes.

Quando o número de saídas é grande, como nas linhas de irrigação localizada, a distribuição de vazão aproxima-se de um modelo com distribuição de vazão contínua e uniforme em toda a tubulação. Nestes casos, o fator “F”, segundo WU & GITLIN (1975), pode ser determinado a partir da seguinte expressão:

$$F = \frac{1}{m + 1} \quad (2.17)$$

2.6.3 Perdas de carga localizadas nas linhas de irrigação

As perdas de cargas localizadas (singulares) nas tubulações dos sistemas de irrigação localizada ocorrem em maior escala nos ramais. Devendo-se, principalmente, aos efeitos da turbulência provocada pela conexão ou inserção dos gotejadores na tubulação. Podendo aumentar até em 30% ou mais as perdas normais nos ramais, segundo LOPEZ et al. (1992). As perdas ocasionadas pela derivação do fluxo são compensadas pelo ganho de pressão resultante da redução da carga de velocidade no escoamento, segundo AGUILERA (1972).

KELLER & KARMELI (1975) apresentaram um fator de correção para o coeficiente de rugosidade da fórmula de Hazen-Williams que incorpora os efeitos da perda de carga localizada.

$$h_t = \left(\frac{150}{C_g} \right) \cdot \frac{J_{100} \cdot L}{100} \quad (2.18)$$

Sendo que:

h_t = Perda de carga total na tubulação;

C_g = Coeficiente de rugosidade que incorpora os efeitos das perdas localizadas;

L = Comprimento da tubulação;

J_{100} = Perda de carga para 100 m de tubulação com $C = 150$.

Segundo os autores (KELLER & KARMELI, 1975), os valores de C_g para emissores com espaçamentos até 1,5 m devem variar de 80 a 140. Os menores valores correspondem aos emissores inseridos na linha.

Um outro método freqüentemente empregado é o dos comprimentos equivalentes. Neste método, as perdas localizadas são transformadas em comprimentos equivalentes que são somados ao comprimento real das tubulações. LOPEZ et al. (1992) apresenta a seguinte expressão (2.19) para a determinação da perda de carga global (soma das perdas uniformes e localizadas) nos ramais de irrigação:

$$J' = J \cdot \frac{E_g + f_e}{E_g} \quad (2.19)$$

Sendo que:

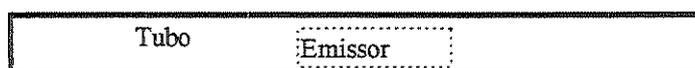
J' = Perda de carga global por unidade de comprimento da tubulação em m/m;

J = Perda de carga uniforme por unidade de comprimento da tubulação em m/m;

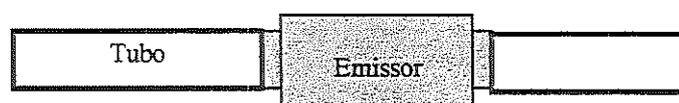
E_g = Espaçamentos entre os emissores em m;

f_e = Comprimento da tubulação do ramal cuja perda de carga equivale à perda localizada produzida nas imediações dos emissores em m.

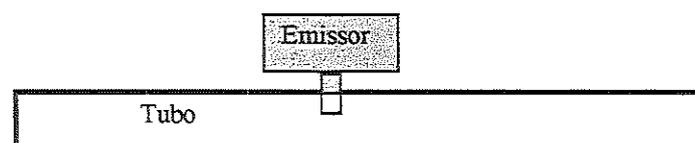
Segundo Lopez et al. (1992), os emissores podem estar integrados nas tubulações ou conectados: na linha; sobre a linha ou com prolongamento, conforme a Figura 3.



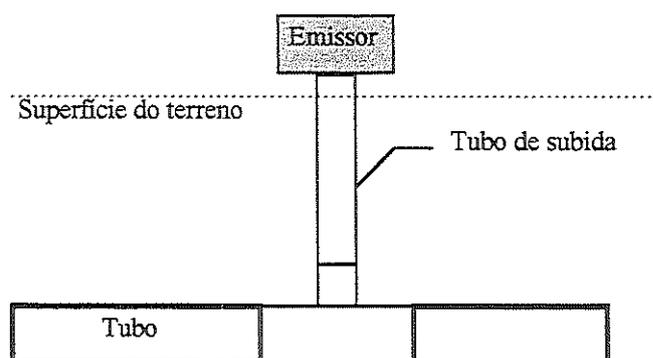
a) Emissor integrado à linha lateral



b) Emissor conectado na linha lateral



c) Emissor conectado sobre a linha lateral



d) Conexão com prolongamento

Figura 3 - Tipo de conexões dos emissores nas linha de irrigação

As maiores perdas de cargas localizadas ocorrem nas conexões sobre a linha, dependendo, principalmente, do tamanho da penetração do emissor na tubulação, critério normalmente empregado para a classificação deste tipo conexão.

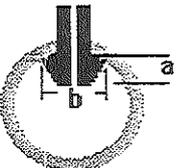
Tipo de conexão		Tamanho	
		mm	
		a	b
	Grande	5	7,5
	Médio	5	5
	Pequeno	5	3,5

Figura 4 - Tipos de conexão sobre linha de emissores (Lopez et al., 1992)

Segundo LOPEZ et al. (1992), os comprimentos equivalentes às perdas de carga localizadas nos pontos de conexão dos emissores das linhas laterais de irrigação localizada podem ser determinados pela fórmula geral, seguinte:

$$f_e = \frac{k_1}{D^{k_2}} \quad (2.20)$$

Onde: k_1 e k_2 são parâmetros (Tabela 6) da fórmula (2.20) e D é o diâmetro interno da tubulação em mm

Tabela 6 - Parâmetros da fórmula do comprimento equivalente

Tipo de conexão		k_1	k_2
Interlinha (na linha)		0,23	0
Com prolongamento ou integrado		0	0
Sobre Linha	Grande	23,04	1,84
	Média	18,91	1,87
	Pequena	14,38	1,89

Fonte: Lopez et al. (1995)

2.6.4 - Dimensionamento das linha de irrigação de uma parcela

O dimensionamento dos ramais e da linha de derivação é condicionado pelas pressões mínimas e máximas na parcela, associadas com o coeficiente de uniformidade adotado para o sistema.

Quando as linhas de irrigação estão em nível ou em aclive as pressões máxima e mínima ocorrem, respectivamente, nas extremidades inicial e final das tubulações.

Entretanto, nas linhas em declive, o cálculo é dificultado pelo fato de que a pressão geralmente ocorre em um ponto intermediário. Tendendo para o final da tubulação quando a declividade é fraca e para o início da tubulação quando a declividade é acentuada. Neste limite, a pressão mínima ocorre no início e a pressão máxima no final da tubulação.

GILLESPIE et. al. (1979), a partir da equação adimensional da perda de carga de WU & GITLIN (1975), identificou cinco tipo de perfis diferentes de distribuição de pressão nas linha de irrigação com vazão em marcha.

A metodologia de GILLESPIE et. al (1979) foi empregada por MATTOS & NUEVO (1994) e MAIA (1994), no cálculo das linhas laterais, no desenvolvimento de programas computacionais para o dimensionamento de sistemas de irrigação localizada.

LOPEZ et al. (1992) apresentaram um método gráfico, prático, a partir da equação adimensional (2.21) da perda de carga.

$$h_x/h_t = (x/L)^{1+m} \quad (2.21)$$

Sendo que:

x = Distância do final da linha até um determinado ponto da tubulação;

h_x = Perda de carga do final da linha até um ponto distante x do final;

h_t = Perda de carga total na linha;

L = Comprimento da tubulação;

m = Expoente da vazão na fórmula da perda de carga.

O método é bastante versátil, permitindo determinar graficamente as pressões, os pontos intermediários de alimentação e os pontos de conexões das tubulações inclinadas das parcelas.

2.7 - Etapas do projeto

O projeto de um sistema de irrigação localizada visa assegurar uma distribuição relativamente uniforme da água no terreno, um manejo racional e um custo razoável. O procedimento lógico de projeto envolve: os dados de manejo, a definição do layout do sistema, a seleção dos equipamento (emissores, cabeçal de controle, motor-bomba, etc) e o dimensionamento das tubulações. Estando sujeito a diversos condicionamentos associados com a funcionalidade do sistema, a disponibilidade de tempo e de equipamentos e principalmente aos aspectos físicos do terreno. As diversas etapas do projeto são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Etapas de projeto de um sistema de irrigação localizada

Etapas	Variáveis.....Características	Condicionamentos:
I - Projeto agrônômico	- volume irrigação.....contínua (m ³) - seleção de emissordiscreta (tipo) contínua (vazão em l/h) contínuas (espaçamentos em m) - tempo de irrigação.....contínua (h)	- área unidade operacional, consumo da planta e o turno de rega; - disponibilida,cultura e solo; - pressão de serviço, tempo de irrigação; - densidade da cultura e tipo de solo; - vazão e tempo disponíveis.
I - Layout do sistema:	- local da fonte de suprimento.....contínua (m) - número de unidades operacionais ..discreta - número de parcelasdiscreta - local do cabeçal de controle.....contínua (m)	- aspectos físicos do terreno; - tempos disponível e de irrigação; - dimensão e topografia do terreno; - configuração da área e topografia;
II - Projeto das parcelas:	- layout das tubulações.....discreta (T, H, C, L) - alimentação das tubulação..... contínua (m) - diâmetros das tubulações..... discretas (mm)	- área da parcela, topografia do terreno, etc; - topografia do terreno, layout, etc - disponibilidade, vazões requeridas, e limites de pressão.
III - Traçado da rede de distribuição:	- disposição das linhas principais e a adutora..... discreta (m) - pontos de conexão das linhas primárias e secundáriascontínuas (m)	- local da fonte de suprimento e do cabeçal de controle, aspectos físicos do terreno; - projeto das parcelas e aspectos físicos do terreno.
V - Dimensionamento das tubulações da rede de distribuição:	- diâmetros dos trechos:.....discreta - classes das tubulações.....discreta - altura do reservatório de alimentação ou manométrica:.....contínua (m ou mca) - motor-bomba:.....discreta (tipo, marca, modelo, rotação e rotor.)	- disponibilidade, vazões das parcelas, limites de velocidade, pressões nos terminais, topografia do terreno, etc; - carga de pressão na rede; - diâmetros dos trechos - disponibilidade de equipamentos e energia.

2.8 Layout do sistema

O layout do sistema influencia diretamente o dimensionamento das tubulações. Compreendendo a definição da fonte de suprimento; a localização do cabeçal de controle; o número de unidades operacionais; o número e o formato das parcelas e a disposição das tubulações no terreno.

Em um terreno horizontal o cabeçal de controle deve estar localizado no centro do mesmo, facilitando o controle da variação da pressão na rede. Enquanto que, nos terrenos inclinados o cabeçal de controle deve ser deslocado para cima compensando o efeito dos desníveis topográficos do terreno.

ORON (1982) sugere que as unidades operacionais de sistemas pressurizados permanentes devem ser divididas em subunidades.

O arranjo em subunidades permite irrigar, quando necessário, parte da área em um determinado tempo, aumentando a flexibilidade nas práticas de irrigação; o uso de um grande número de emissores por planta durante o estado de crescimento das plantas frutíferas e alcançar uma maior uniformidade na vazão emitida com diâmetros relativamente pequenos para as tubulações do sistema (BUSTOS, 1988).

As parcelas, subunidades do sistema, são geralmente retangulares, com dimensões definidas pelo comprimento dos ramais e da linha de derivação. Os ramais normalmente são dispostos no alinhamento das plantas.

Segundo GRANADOS (1986), o estudo do traçado da rede se constitui em uma das etapas com maior repercussão na economia do projeto. O problema, cujas variáveis básicas são os comprimentos dos trechos da rede e os preços dos condutos, apresenta-se, entretanto, com uma grande complexidade motivada pelo grande número de condicionamentos que intervém no problema, tais como:

- a) Geológico-geotécnico: zonas com rocha, instabilidade do terreno, níveis freáticos, solos pedregosos, etc.
- b) Orográficos: acidentes do terreno, declividades e classes das tubulações, ventosas, pontos de deságües, etc.
- c) Topológicos: distribuição dos lotes, vias de comunicação, edificação, etc

O método freqüentemente empregado na definição do layout consiste em situar a rede seguindo as estradas e as bordas das parcelas. Como norma geral evita-se atravessar as unidades de produção. O traçado segue as linhas gerais da configuração topológica da zona de irrigação (vias de comunicação e o loteamento), com uma distribuição funcional que facilita a conservação futura da rede. O avanço da água deve realizar-se preferencialmente das zonas topográficas mais altas para as mais baixas, de maneira que as perdas de cargas nas tubulações compensem os desníveis topográficos (GRANADOS, 1986).

Segundo GOMES (1992), as duas tendências de traçado das redes ramificadas são: traçado pelas fronteiras e traçado de custo mínimo. O traçado das redes desde o cabeçal até as unidades de irrigação, seguem, no máximo possível os contornos das parcelas e as bordas dos caminhos, por uma conveniência funcional de instalação e manutenção.

2.8.1 Número de unidades operacionais

Um sistema de irrigação é projetado para atender ao consumo da cultura nas condições mais desfavoráveis possíveis. Nestas condições a lâmina de irrigação é máxima com um tempo de aplicação em cada unidade operacional também máximo, limitando o número de unidades operacionais do sistema. Desta forma:

$$N_{ud} \leq \frac{T_d}{T_a} \quad (2.22)$$

com $N_u = N_{ud} T_R$ (2.23)

Sendo que:

N_u = Número de unidades operacionais do sistema;

N_{ud} = Número de unidades em funcionamento por dia;

T_d = Tempo disponível diário para a irrigação em horas;

T_a = Tempo de aplicação em horas;

T_R = Turno de rega em dias.

2.9 Dimensionamento otimizado das parcela de irrigação localizada

A metodologia usual de projeto dos sistemas de gotejamento parte do dimensionamento das parcelas, unidades básicas que, em conjunto, englobam a maior parte das tubulações do sistema, e onde o controle da vazão emitida está diretamente relacionado com a variação da pressão na rede.

O projeto de uma parcela depende:

- a) do formato da parcela;
- b) do layout das tubulações; e
- c) da distribuição das perdas de cargas nas tubulações.

Na maioria das situações aceita-se uma considerável flexibilidade nestes elementos de projeto, conduzindo a diferentes soluções, com custos diversos, justificando o desenvolvimento de métodos práticos de otimização do projeto das parcelas.

KELLER & KARMELI (1975) recomendam a seguinte expressão (2.24) para a determinação do comprimento ótimo dos ramais de sistemas de gotejamento:

$$L_r = K_L A^{0,45} \quad (2.24)$$

Sendo que:

L_r = Comprimento dos ramais em m;

A = Área da parcela em m^2 ;

K_L = Coeficiente que depende do layout das tubulações ($K=1$, quando as linhas laterais são estendidas em uma só direção e $K=0,685$, quando as linhas são divididas ao meio).

GOEHRING (1976) e ORON & WALKER (1981) encontraram que a forma mais econômica de uma subunidade é a quadrada. ORON (1982) comparou vários formatos de subunidade, encontrando grande variação no custo relativo de cada tipo de tubulações da rede.

Em relação as perdas de cargas nas tubulações da parcela, KELLER & KARMELI (1975) recomendam uma divisão de 55% e 45% da perda de carga global da parcela, respectivamente, entre os ramais e a linha de derivação e LOPEZ et al. recomendam uma divisão por igual.

As metodologias citadas anteriormente generalizam os parâmetros associados com os custos das tubulações, a densidade de ramal, as vazões emitidas, e a variação de pressão na parcela, simplificando bastante o problema.

Com o intuito de incorporar na análise de otimização os parâmetros citados, GUIMARÃES Jr. (1993) aplicou um modelo analítico na minimização dos custos das tubulações de uma parcela horizontal de gotejamento (SRINIVASAN & GUIMARÃES Jr., 1996).

Os elementos básicos de projeto identificados pela pesquisa, foram: a área da parcela (A_p); a perda de carga global da parcela (h_p); a vazão dos gotejadores ou de um grupo de emissores (q) e os espaçamentos entre gotejadores ou entre grupos de emissores (E_g) e entre ramais (E_r).

A pesquisa identificou quatro tipos de layouts possíveis para as tubulações da parcela, conforme a Fig. 3.

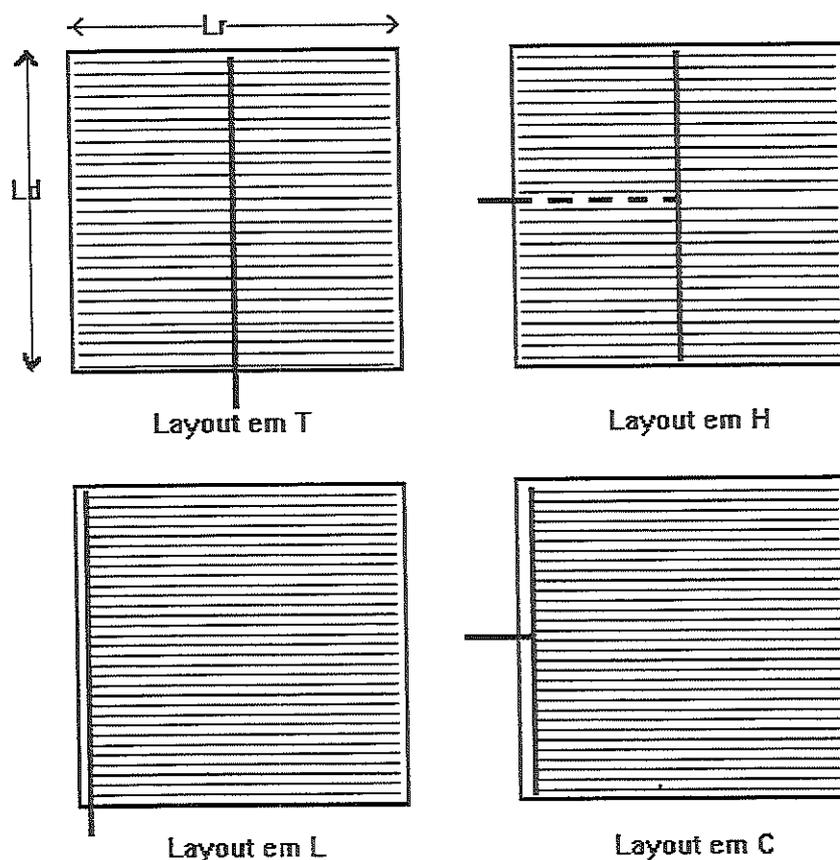


Figura 5 - Layouts de uma parcela de gotejamento (Guimarães Jr, 1993)

O layout em **H**, repartindo as tubulações ao meio, conduz a um menor custo para a parcela. O layout em **T** exigindo um menor número de linhas secundárias ou principais, pode resultar, em alguns casos, em uma solução com menor custo para o sistema. Os layouts em **C** e **L** são os recomendados para a irrigação de terrenos em encostas, com grandes declividades (GUIMARÃES JR, 1993).

A função-objetivo do problema de GUIMARÃES Jr. (1993) compreende a minimização do custo de instalação do conjunto das tubulações da parcela (C_p). Resultando da combinação do custo do conjunto de ramais (C_r) com o custo da derivação (C_d).

Foram empregadas no modelo de otimização funções lineares custo-diâmetro para as tubulações (o dimensionamento dos ramais e da linha de derivação envolve a seleção de diâmetros comerciais próximos e em um número limitado, geralmente 3 ou 4 opções disponíveis justificando tal procedimento).

Os espaçamentos entre os emissores externos e as bordas da parcela foram desprezados.

Os diâmetros teóricos das tubulações foram calculados a partir da fórmula genérica da perda de carga.

Desta forma, a função-objetivo foi expressa como a seguir:

$$\text{(minimizar)} \quad C_p = C_r + C_d \quad (2.25)$$

Sendo:

$$C_r = G_1 \frac{L_r^{(m+1)/n}}{h_r^{1/n}} + G_2 \quad (2.26)$$

e

$$C_d = \frac{G_3}{L_r^{(n+1)/n} (h_p - h_r)^{1/n}} + \frac{G_4}{L_r} \quad (2.27)$$

Onde: G_1 , G_2 , G_3 e G_4 são as constantes características do sistema, sendo dadas por:

$$G_1 = \frac{a_r \cdot A_p \cdot k_r^{1/n} \cdot q^{m/n}}{E_r \cdot E_g^{m/n} \cdot f_r^{(m+1)/n}} \quad (2.28)$$

$$G_2 = b_r \left(\frac{A_p}{E_r} \right) \quad (2.29)$$

$$G_3 = \frac{a_d \cdot k_d^{1/n} \cdot q^{m/n} \cdot A_p^{(m+n+1)/n}}{E_g^{m/n} \cdot E_r^{m/n} \cdot f_d^{(m+1)/n}} \quad (2.30)$$

$$G_4 = b_d \cdot A_p \quad (2.31)$$

Sendo que:

h_r = Perda de carga nos ramais em m

L_r = Comprimento dos ramais em m

a_r e b_r = Coeficientes da função de regressão custo-diâmetro dos ramais

a_d e b_d = Coeficientes da função de regressão custo-diâmetro linha de derivação;

k_r e k_d = Coeficientes da fórmula de perda de carga, eq. (2.13), que incorporam os efeitos da rugosidade, da distribuição em percurso e das perdas localizada nos ramais e na linha derivação, respectivamente;

m e n = Expoentes da fórmula de perda de carga;

f_r e f_d = Fatores de repartição da vazão nas tubulações nos ramais e na linha de derivação, respectivamente ($f_r = 2$ nos layout em **T** e **H** e $f_d = 2$ para os layout em **H** e **C**).

2.9.1 Solução ótima sem restrições

A função-objetivo apresenta-se com duas variáveis independentes, $C_p = f(h_r, L_r)$, a perda de carga e o comprimento dos ramais. Dentro do seu domínio ($0 < h_r < h_p \dots e \dots 0 < L_r < \infty$) a função é contínua e assume valores significativamente grandes próximos ao contorno. Garantindo a existência de um ponto estacionário mínimo absoluto no domínio, determinado a partir das seguintes condições: $\frac{\partial C_p}{\partial h_r} = 0$

e $\frac{\partial C_p}{\partial L_r} = 0$, que resultam no sistema de equações seguinte, respectivamente:

$$r = \frac{h_r}{h_d} = \left(\frac{G_1}{G_3} \right)^{n/(n+1)} \cdot L_r^{(m+n+2)/(n+1)} \quad (2.32)$$

$$\frac{G_1(m+1)L_r^{(m-n+1)/n}}{n h_r^{1/n}} - \frac{G_3(n+1)}{n(h_p - h_r)^{1/n} L_r^{(2n+1)/n}} - \frac{G_d}{L_r^2} = 0 \quad (2.33)$$

A combinação destas equações reduz o sistema a uma equação com apenas uma incógnita, com solução a partir de métodos numéricos iterativos.

2.9.2 Perdas de cargas ótimas associadas com um dado comprimento de ramal

Em algumas situações o formato ótimo da parcela não pode ser adotado. Por exemplo: quando as dimensões do terreno limitam os comprimentos das tubulações ou os diâmetros teóricos associados à solução ótima são impraticáveis. Nestes casos, a relação ótima (r) entre as perdas de cargas nos ramais (h_r) e na linha de derivação (h_d) pode ser determinada pela seguinte expressão deduzida da equação (2.32):

$$r = \frac{h_r}{h_d} = M_3 \left[\frac{(L_r / E_r)^{(n-m)}}{(L_d / L_r)^{(m+1)}} \right]^{1/(n+1)} \quad (2.34)$$

Onde:

$$M_3 = \left[(k_r / k_d)(a_r / a_d)^n (f_d / f_r)^{(m+1)} \right]^{1/(n+1)} \quad (2.35)$$

Sendo:

$$h_r = \left(\frac{r}{r+1} \right) h_p \quad \text{e} \quad h_d = \frac{h_p}{r+1} \quad (2.36) \quad \text{e} \quad (2.37)$$

2.9.3 Comprimento ótimo de um ramal associado com determinado diâmetro

GOERING (1976), ORON (1982), e BUSTOS (1988) mostraram que o diâmetro de um ramal por um modelo de otimização que minimize o custo é sempre o menor dentre os propostos, comercialmente disponíveis.

A adoção prévia de um determinado diâmetros (D_r) para os ramais é uma condição de projeto muito comum na irrigação por gotejamento, como nas situações de gotejadores conectados diretamente na linha e na irrigação com mangueiras flexíveis. Nestes casos, o custo dos ramais está definido e o problema restringe-se a minimização da função (2.27) de custo da linha de derivação.

A perda de carga nos ramais (h_r) é determinada a partir da fórmula geral (2.13), corrigida pelo fator F de WU & GITLIN (1975), expressão (2.17). Sendo, a vazão nos ramais avaliada pelo produto da vazão distribuída por unidade de comprimento (q/E_g) pelo comprimento de cálculo dos ramais (L_r/f_r).

$$h_r = G_5 \cdot L_r^{(m+1)} \quad (2.38)$$

Onde:

$$G_5 = \frac{k_r q^m}{D_r^n \cdot E_g^m \cdot f_r^{(m+1)}} \quad (2.39)$$

Substituindo-se a equações (2.37), (2.38) na equação (2.27), chega-se a uma função do custo da derivação com apenas uma variável, o comprimento dos ramais. Derivando-se essa expressão com respeito ao comprimento dos ramais (L_r) e igualando-se a zero, encontra-se a equação (2.40) que permite determinar, a partir de métodos numéricos iterativos, o comprimento ótimo dos ramais associados com um determinado diâmetro dos ramais.

$$G_5(m+n+2)L_r^{(m+1)} - \frac{nG_4(h_p - G_5 \cdot L_r^{m+1})^{\frac{n+1}{n}}}{G_3} - (n+1)h_p = 0 \quad (2.40)$$

O estudo refere-se a uma parcela horizontal e a uma função custo-diâmetro contínua. Entretanto, para generalizar o emprego da metodologia, GUIMARÃES JR (1993) sugere compensar os efeitos dos desníveis topográficos do terreno com um deslocamento conveniente do ponto de conexão das tubulações e promover-se um dimensionamento das tubulações combinando-se os diâmetros comerciais disponíveis.

2.9.4 Ponto de alimentação d'água das linhas inclinadas

O ponto de alimentação ótimo de uma linha horizontal de irrigação com distribuição de vazão em marcha, segundo GUIMARÃES JR. (1993), divide a tubulação ao meio. Em uma linha inclinada com entrega central o efeito do desnível topográfico resulta em um diâmetro para o trecho em aclive maior do que o do trecho em declive.

Um análise comparativa desenvolvida por GUIMARÃES JR. (1993) mostrou que: o custo de uma tubulação inclinada com entrega central supera o custo de uma tubulação horizontal semelhante, e que um deslocamento conveniente, para cima, do ponto de entrega da água reduz o diâmetro do trecho em aclive e aumenta o do trecho em declive, podendo resultar em um diâmetro único semelhante ao da condição horizontal, diminuindo significativamente o custo final da tubulação.

Tendo como base o parâmetro u representativo da declividade da tubulação, dado pela relação entre o desnível médio da tubulação e a variação de pressão adotada, GUIMARÃES JR. (1993) chegou às seguintes recomendações:

$u < 0,4$ - ponto de entrega central;

$0,4 \leq u < 2,5$ - otimizar o ponto de entrega; e

$u \geq 2,5$ - ponto de entrega na extremidade superior.

$$\text{Onde: } u = \frac{s \cdot L}{2\Delta p} \quad (2.41)$$

Sendo que: s é a declividade, L é o comprimento e Δp é a variação da carga de pressão na linha.

A identificação do ponto ótimo de alimentação de uma linha de irrigação inclinada requer uma solução iterativa e complexa. A expressão seguinte, deduzida por GUIMARÃES JR. (1993), permite a determinação do comprimento relativo do trecho em aclive (X_a/L) que resulta em um diâmetro semelhante ao determinado para uma tubulação horizontal com ponto de alimentação central, simplificando o problema de otimização da localização do ponto de alimentação.

$$2^{(m+1)}(X_a/L)^{(m+1)} + 2u(X_a/L) - 1 = 0 \quad (2.42)$$

2.10 Dimensionamento da rede de distribuição de sistemas de irrigação localizada

Para efeito de cálculo pode-se classificar as tubulações dos sistemas de irrigação pressurizados em redes de distribuição e de aplicação (GOMES, 1992). Nas redes de aplicação, que correspondem às parcelas na irrigação localizada, o dimensionamento é condicionado pela variação de pressão que está diretamente associada com a uniformidade do sistema. Enquanto que, na rede de distribuição formada pelas linhas adutora, principal e secundárias, os critérios econômicos predominam no cálculo.

O dimensionamento usual das tubulações dos sistemas de irrigação localizada parte das parcelas e em seguida prossegue com o cálculo da rede de distribuição (BERNARDO, 1987), (OLITTA, 1989) e (LOPEZ et al. 1992).

As redes de distribuição dos sistemas de gotejamento são redes fixas, enterradas e ramificadas. Segundo GRANADOS (1986), é muito pouco comum o emprego de rede fechadas, quase sempre mais caras do que as abertas (ramificadas), em sistemas de irrigação pressurizados.

2.10.1 Definições

GRANADOS (1986) e GOMES (1994) mostraram que as redes de distribuição ramificadas são constituídas de:

TUBO - peça com diâmetro e comprimento padronizado;

TUBULAÇÃO - conjunto de tubos conectados em série;

TRECHO - tubulações que liga dois nós;

NÓ - ponto de conexão entre dois trechos;

NÓ DE DERIVAÇÃO - ponto de conexão entre mais de dois trechos;

BIFURCAÇÃO - conexão simultânea de três trechos;

RAMAL - conjunto de trechos interligados sem nenhuma derivação;

ARTÉRIA - trajeto principal em um agrupamento de ramais;

TERMINAL - final do último trecho de um ramal ou de uma artéria.

2.10.2 - Metodologias de dimensionamento de redes ramificadas

Os condicionantes básicos de projeto de uma rede ramificada (a cota piezométrica disponível na cabeceira, as cotas piezométricas mínimas exigidas nos terminais e as vazões que devem circular nas tubulações) tornam o problema de

dimensionamento das tubulações indeterminado. Admitindo um grande número de soluções com grandes diferenças de custos, justificando a aplicação de métodos de otimização no projeto (GRANADOS, 1986).

Inicialmente foram empregados métodos aproximados, baseados em critérios prático, associados com um ordenamento lógico do cálculo, com padrões de velocidades ou com uma distribuição uniforme da perda de carga disponível nas tubulações. Recentemente, acompanhando o avanço das investigações dos especialistas em irrigação, surgiram os métodos associados com a pesquisa operacional.

O processo de otimização do projeto de uma rede de tubulações compreende a minimização do custo global do sistema hidráulico, definido pela composição dos custos anuais de operação (custo de energia) e de instalação (custo das tubulações e equipamentos). As variáveis de decisão do problema são os diâmetros adotados com suas respectivas classes (limites de pressão) nos diversos trechos da rede. Os diâmetros dos trechos definem explicitamente o custo da rede e implicitamente os custos de energia e do equipamento motor-bomba, dado que a altura manométrica do sistema varia com o dimensionamento das tubulações.

Os custos de energia e de instalação variam segundo leis opostas, isto é, uma redução de diâmetro num determinado trecho, diminui o custo da rede e eleva o custo de bombeamento pelo acréscimo da altura manométrica devido ao aumento da perda de carga no trecho. A otimização do projeto envolve a seleção do conjunto de diâmetro, dentre os disponíveis, para os trechos da rede que resultem em um menor custo global para o sistema e que atenda aos condicionamentos do problema (limites de velocidade e pressão e as cotas piezométricas de montante e jusante).

Para as redes com um número pequeno de trechos pode-se testar todas as possíveis combinações de diâmetros. BERNARDO (1987) cita dois procedimentos simples: o Método das Tentativas que se baseia na minimização da soma do custo

anual das tubulações com o custo anual relativo às perdas de cargas em todos os trechos e o Método das Tentativas Simplificado; onde a seleção baseia-se em um comprimento padrão de 100 m para as tubulações compostas por trechos de mesma vazão. Para facilitar a seleção dos diâmetros nos trechos foi desenvolvido por KELLER (1965) um método gráfico, direto, a partir de um nomograma que relaciona a vazão com a diferença da perda de carga, em m/100 m, entre tubulações com diâmetros adjacentes. Os procedimentos descritos são trabalhosos e dificultam a análise do problema, e portanto, segundo BERNARDO (1987) e SAAD(1993), não são recomendados para sistemas complexos, justificando o emprego de técnicas de otimização mais eficientes.

Atualmente, acompanhando o desenvolvimento da informática, destaca-se o emprego na otimização de redes ramificadas de modelos computacionais baseados, na programação dinâmica, na programação linear e em técnicas de programação não linear (programação geométrica, multiplicadores de Lagrange, etc) combinadas ou não com processos iterativos como os do método “Branch and Bound”.

I - Programação Dinâmica

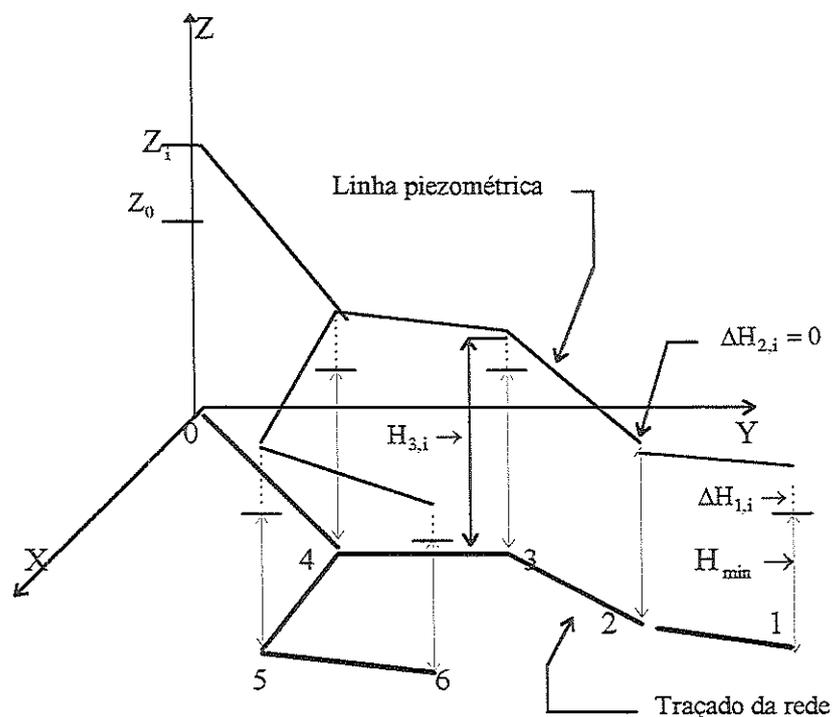
Os modelos de programação dinâmica empregados na otimização do cálculo de redes de tubulações, geralmente, partem de uma solução básica para o dimensionamento da rede e em seguida procede-se a modificação dos diâmetros originais, gradativamente até que sejam atendidos os condicionamentos do problema, em um processo de múltiplas etapas que conduz gradativamente a solução ótima do problema. Cada etapa corresponde a seleção de um trecho ótimo (T^*), onde a substituição do diâmetro, da etapa anterior, no trecho pelo consecutivo é mais vantajoso.

O critério de seleção do trecho ótimo em cada etapa do processo baseia-se no gradiente de câmbio (C) determinado pela relação entre as diferenças dos custos unitários (P_1 e P_2) e das perdas de cargas unitária (J_1 e J_2) das opções de diâmetros consecutivas de cada trecho da rede. Segundo GOMES (1994), o gradiente de câmbio representa o custo marginal da variação da perda de carga em um trecho a partir da substituição de um diâmetro por um outro consecutivo.

$$C = \frac{P_2 - P_1}{J_2 - J_1} \quad (2.43)$$

Dentre os modelos baseados no gradiente de câmbio destaca-se o algoritmo de GRANADOS (1986) que parte de uma solução prévia, solução de custo mínimo de contorno do problema, com os diâmetros mínimos nos trechos, resultando conseqüentemente em uma cota piezométrica de cabeceira (de montante) máxima necessária para assegurar as pressões mínimas nas extremidades da rede. Em seguida a cota piezométrica de cabeceira é reduzida gradativamente de um valor que corresponde a diminuição da perda de carga devido a substituição no trecho ótimo do diâmetro menor pelo diâmetro maior, elevando o mínimo possível o custo da rede. O trecho ótimo é aquele que apresenta o menor gradiente de câmbio dentre todos os trechos da rede em cada etapa. O processo de otimização prossegue até que seja alcançada a cota piezométrica de cabeceira desejada

A Figura 4 mostra a configuração da linha piezométrica de uma rede na etapa i de um processo de otimização com o algoritmo de GRANADOS (1986).



H = carga de pressão na rede

H_{min} = carga de pressão mínima

ΔH = excesso de pressão na rede

Z = cota piezométrica de cabeceira

Z_0 = cota piezométrica de cabeceira de projeto

Figura 6 - Linha piezométrica da rede na etapa i

LUCAS (1991) desenvolveu uma modelo computacional que incorpora o efeito da classe das tubulações no algoritmo de GRANADOS (1986). GOMES (1993) empregou o algoritmo de GRANADOS (1986) no cálculo conjunto das redes coletivas e privadas de sistemas de irrigação por aspersão.

II - Programação Linear

A Programação Linear é um modelo matemático empregado na otimização (maximização ou minimização) de problemas que apresentam a função objetivo e o conjunto de restrições expressados por funções matemáticas lineares.

Segundo SAAD (1993), a simplicidade de programação e a versatilidade da técnica tornou a programação linear o método mais utilizado nos problemas de otimização.

A aplicação da técnica no dimensionamento das redes ramificadas pressurizadas foi introduzida por KARMELI et al. (1968) no cálculo de sistemas com uma única fonte de abastecimento. O problema com várias fontes de suprimento foi estudado por GUPTA et al. (1972). CASE & WHITE (1972) aplicaram o método a um sistema com demanda variável com o tempo, considerando o custo da energia dissipada pelas perdas de cargas. ORON & KARMELI (1981) aplicaram a Programação Linear na minimização dos custos de instalação dos equipamentos (tubulações, emissores e acessórios) de sistemas de irrigação pressurizados (aspersão, microaspersão e gotejamento). BENAMI & OFEN (1984) recomendam a Programação Linear para a otimização do dimensionamento das linhas primárias e secundárias de sistemas de irrigação pressurizadas. Recentemente, SAAD et al. (1994) empregaram um modelo de Programação Linear para otimizar a rede hidráulica (linhas primárias, secundárias, terciárias e laterais) de um sistema de gotejamento em um pomar de citros de 11,5 ha.

Nos modelos de programação linear aplicados às redes de tubulações as variáveis de decisão explícitas do problema são os comprimentos de tubulações de diâmetros distintos pré selecionados conectadas em série, para todos os trechos das redes cujos comprimentos e vazões são conhecidos.

O conjunto de diâmetros de cada trecho pode ser selecionado, dentre os disponíveis, a partir de critérios práticos associados com os limites de velocidade (inferior e superior) ou com um enquadramento em uma solução prévia, diminuindo bastante o número de variáveis de decisão e, conseqüentemente, acelerando a solução do problema. BHAVE (1979) desenvolveu um método iterativo que seleciona o conjunto de diâmetros dos trechos centrado os diâmetros disponíveis consecutivos na solução da iteração anterior.

a) Função objetivo

A função objetivo da otimização conjunta (energia e tubulações) de uma rede com alimentação por bombeamento pode ser expressada da seguinte forma na programação linear, segundo GOMES (1994):

$$\text{(minimizar)} \quad C_T = C_h \cdot H_m + \sum_{j=1}^{Ntr} \sum_{i=1}^{Nd(j)} X(i,j) \cdot P(i,j) \quad (2.44)$$

Sendo que:

C_T = custo total anual da rede;

C_h = custo anual de bombeamento por unidade de altura manométrica;

i = índice que identifica o diâmetro da tubulação de um trecho;

j = índice geral que identifica o trecho da rede;

$Nd(j)$ = número de diâmetros selecionados para cada trecho;

Ntr = número de trechos da rede;

$X(i,j)$ = comprimento da tubulação de diâmetro i do trecho j .

$P(i,j)$ = preço unitário anual da tubulação de diâmetro i do trecho j

H_m = altura manométrica da bomba;

A altura manométrica (H_m) é determinada pela soma do desnível geométrico (diferença entre a cota do ponto crítico da rede e o nível da água na captação) com a carga de pressão mínima exigida no ponto crítico e com as perdas de cargas na rede, acumuladas da estação de bombeamento até o ponto crítico. O ponto crítico da rede pode corresponder ao terminal da rede (extremidade final de um ramal) em condições mais desfavoráveis, maior cota e/ou distância da fonte de suprimento d'água.

$$H_m = Z_0 - Z_c + H_{c(\min)} + \sum_{k=1}^{N_t(c)} \left\{ \sum_{i=1}^{N_d[j(k,c)]} J[i, j(k, c)] \cdot X[i, j(k, c)] \right\} \quad (2.45)$$

Sendo que:

i = índice indicativo dos diâmetro da tubulação de um trecho;

c = índice indicativo do terminal crítico;

k = índice particular indicativo dos trechos;

$j(k,c)$ = índice geral indicativo dos trechos do terminal crítico;

Z_0 = cota da tomada d'água;

Z_c = cota do terminal crítico;

$H_{c(\min)}$ = carga de pressão mínima no ponto crítico;

$N_t(c)$ = número de trechos do terminal crítico;

$N_d[j(k,c)]$ = número de diâmetros do trecho $j(k,c)$ do terminal crítico

$J[i,j(k,c)]$ = perda de carga unitária na tubulação de diâmetro i do trecho $j(k,c)$ do terminal crítico;

$X[i,j(k,c)]$ = comprimento da tubulação de diâmetro i do trecho $j(k,c)$ do terminal crítico.

Segundo LOPEZ et al. (1992), para se otimizar o custo da rede e sua exploração deve-se distinguir dois casos:

1º) cota piezométrica de entrada (de montante) conhecida, alimentação por gravidade a partir de um reservatório elevado, e

2º) cota piezométrica desconhecida, alimentação por bombeamento direto.

Para uma altura manométrica fixa ou uma alimentação por gravidade a partir de um reservatório o processo de otimização envolve apenas o dimensionamento das tubulação, simplificando o problema.

Nas instalações de bombeamento a altura manométrica apresenta-se como uma variável de decisão implícita que depende do dimensionamento das tubulações. Segundo GOMES (1994), os fatores econômicos de escala fazem com que o custo de bombeamento por unidade de altura manométrica (C_h) de um sistema de recalque não seja constante, decresce com a altura manométrica. Para superar esta não linearidade pode-se partir de um valor inicial para C_h e obter uma solução prévia para a altura manométrica que conduzirá a um novo C_h , valor adotado na solução seguinte, esse processo segue até que sejam mantidas aproximadamente inalterados as variáveis de decisão do problema. Segundo ALPEROVITS & SHAMIR (1977) este procedimento geralmente converge entre duas a cinco iterações.

b) Classes das tubulações

As variáveis de decisão do processo de otimização de uma rede são os diâmetros dos trechos com as suas respectivas classes, definidas pelas pressões máximas nos trechos decorrentes da combinação mais desfavorável das pressões dinâmicas ou estáticas com as sub pressões resultantes dos golpes de ariete. A Tabela 7 apresenta os acréscimos de pressão devido ao golpe de ariete nas tubulações.

Tabela 7 - Acréscimos de pressão devido ao golpe de aríete nas redes de tubulações

Diâmetro (mm)	Acréscimo sobre a pressão (atm)	
	estática	dinâmica
≤ 200	3,0	4,0
250	2,0	3,5
300	1,0	3,0
350	0,5	2,5
400	0,5	2,0
450	0,5	1,5
≥ 500	0,5	1,0

Fonte: GOMES (1994)

Segundo GOMES (1994), o modelo de programação linear não pode incorporar diretamente as classes como uma variável de decisão. Necessitando, portanto, de um método de busca, iterativo, para selecionar as classes nos trechos. ROBINSON & AUSTIN (1976) recomendam calcular a rede inicialmente com a classe de menor pressão, procedendo-se em seguida a verificação e a possível modificação das classes em todos os trechos da rede, repetindo-se o cálculo da rede até que não ocorram mais modificações.

c) Limites de velocidade

O cálculo de uma rede é condicionado por limites de velocidade nas tubulações (Tabela 8) adotados pelo projetista a partir de critérios práticos associados com a funcionalidade do sistema.

Tabela 8 - Limites de velocidade nas tubulações das redes

Diâmetro (mm)	V _{min.} (m/s)*	V _{máx.} (m/s)**
100	0,20	2,00
125	0,25	2,00
150	0,25	2,00
200	0,35	2,00
250	0,40	2,00
300	0,40	2,10
350	0,50	2,20
400	0,50	2,30
450	0,50	2,40
500	0,50	2,50
600	0,50	2,60
700	0,50	2,70
800	0,50	2,80
900	0,50	2,90
1000	0,50	3,00
>1000	-	2+D (m)

* Valores recomendados por Clement e Galant

** Valores recomendados por Granados

Fonte: GOMES (1992)

As velocidades máximas implicam em: menores diâmetros (menor custo da rede), maiores alturas manométricas e, principalmente, um maior risco de ocorrência de golpes de aríete (GOMES, 1992). As velocidades mínimas são estabelecidas para garantir a auto limpeza da rede, evitando as obstrução nas tubulações provocadas pela sedimentação de partículas sólidos transportadas pela água.

d) Restrições explícitas do modelo de programação linear

As restrições explicitadas no modelo de programação linear são de caráter físico e hidráulico. As restrições físicas estão associadas com os comprimentos das tubulações dos trechos da rede, como a seguir:

$$\sum_{i=1}^{Nd(j)} X(i, j) = L_j \dots\dots \text{para } j = 1..Ntr \quad (2.46)$$

$$e \quad X(i, j) \geq 0 \dots\dots\dots \text{para todo } i \text{ e } j \quad (2.47)$$

Sendo que:

i = índice indicativo do diâmetro da tubulação;

j = índice geral indicativo dos trechos da rede;

$X(i, j)$ = comprimento da tubulação de diâmetro i do trecho j ;

L_j = comprimento de um trecho qualquer j da rede;

Ntr = número de trechos da rede.

As restrições hidráulicas visam assegurar o atendimento das pressões mínimas nos terminais da rede. Nestes casos, a perda de carga acumulada da fonte de suprimento d'água (reservatório ou bomba) até os terminais da rede não deve exceder a diferença entre as cotas piezométricas definidas para estes pontos.

$$\sum_{k=1}^{Nt(t)} \left\{ \sum_{i=1}^{Nd[j(k,t)]} J[i, j(k, t)] \cdot X[i, j(k, t)] \right\} \leq Z_o - Z_m(t) \quad (2.48)$$

Para $t = 1..NT$

Sendo que:

t = índice indicativo de um terminal;

k = índice particular indicativo de um trecho de um terminal;

$j(k,t)$ = índice geral indicativo de um trecho k de um terminal t ;

i = índice indicativo dos diâmetro da tubulação de um trecho;

$N_t(t)$ = número de trechos de um terminal t ;

$N_d[j(k,t)]$ = número de diâmetros do trecho $j(k,t)$;

$J_{[i,j(k,t)]}$ = perda de carga unitária na tubulação de diâmetro i do trecho $j(k,t)$ do terminal t ;

$X_{[i,j(k,t)]}$ = comprimento da tubulação de diâmetro i do trecho $j(k,t)$.

Z_0 = cota piezométrica da tomada d'água;

$Z_m(t)$ = cota piezométrica mínima de um terminal t da rede;

NT = número de terminais.

A vazão em cada trecho define a sua perda de carga unitária (J). Em um sistema abastecido a partir de um reservatório, o nível d'água no reservatório representa a carga piezométrica de montante (Z_0). Em um sistema de recalque a carga piezométrica de montante (Z_0) é determinada diminuindo-se da altura manométrica da bomba o desnível topográfico e as perdas de cargas na sucção.

e) Análise do modelo

A formulação matemática do modelo de programação linear, aplicado ao cálculo das redes ramificadas, conduz ao seguinte número (N_v) de variáveis de decisão:

$$N_v = \sum_{j=1}^{N_t} N_d(j) \quad (2.49)$$

O número de restrições (N_r) resulta da soma do número de trechos com o número de terminais da rede, isto é:

$$N_r = N_{tr} + NT \quad (2.50)$$

O número de trecho da rede é maior do que o número de terminais, aproximadamente igual a uma vez e meia. Admitindo-se, para os trechos da rede, quatro diâmetros disponíveis consecutivos chega-se as seguintes relações: $N_v \cong 6NT$ e $N_r \cong 2,5.NT$.

f) Método Simplex

Um modelo de programação linear aplicado às redes ramificadas apresenta-se com um número de variáveis e restrições relativamente grande, tornando necessário o emprego de técnicas computacionais adequadas para resolução deste tipo de problema. O Método SIMPLEX (APÊNDICE A) desenvolvido por George B. Dantzig em 1947 é o método mais empregado nos modelos computacionais pela precisão e simplicidade de programação.

III - Programação não linear

A programação linear, exigindo uma definição prévia da configuração da rede, limita o processo de otimização do projeto ao dimensionamento das tubulação de um sistema de irrigação localizada.

O problema de otimização global de um sistema de gotejamento é bastante complexo. Envolve um grande número de variáveis de decisão, contínuas ou inteiras, associadas com a configuração da rede e a funcionalidade do sistema, definidas, geralmente, a partir de funções não lineares. Conduzindo a aplicação de métodos de programação não-linear associados com métodos iterativos de programação inteira.

O problema de otimização conjunta do dimensionamento das tubulações com a configuração da rede de um sistema de irrigação pressurizada foi resolvido com o auxílio da Programação Geométrica e da técnica de “Branch e Bound” por GEOHRING (1976), ORON & KARMELI (1979), KARMELI & ORON (1979), ORON & WALKER (1981). A Programação Geométrica resolve os problemas de otimização não linear pela conversão da função-objetivo e suas restrições em relações lineares.

O uso da programação não-linear na otimização de sistemas de irrigação localizada tem se intensificado nos últimos anos pela disponibilidade no mercado de modelos computacionais de programação não-linear, como o GAMS/MINOS (rotina de otimização do General Algebraic Modeling System), facilitando a formulação e a resolução de problemas de otimização mais abrangentes possíveis. O GAMS-MINOS usa os algoritmos básicos do método Simplex, o método Aparente de Newton, o método do Gradiente Reduzido, o método de Lagrange para resolver problemas de otimização linear, não-linear e mistos (HOLZAPFEL et al., 1990). O pacote GAMS/MINOS resolve problemas que apresentam equações não lineares na função-objetivo e nas restrições, porém não admite variáveis inteiras nas funções não lineares (SAAD, 1993).

ALLEN & BROCKWAY (1984) recomendam que a receita líquida deveria ser o principal critério a ser observado na otimização conjunta da configuração e do dimensionamento de um sistema de irrigação.

HOLZAPFEL et al. (1990), SAAD (1993) e SAAD & FRIZZONE (1996) aplicaram o pacote GAMS/MINOS de programação matemática na otimização da configuração e operação de um sistema de irrigação localizada, a partir da maximização da receita líquida. O estudo foi desenvolvido para uma área plana retangular, horizontal ou não. Os dados de entrada do modelo foram: a função de água-produção da cultura, a função de custo dos componentes do sistema de irrigação, o custo de energia elétrica, custo da produção agrícola e as variáveis do dimensionamento (área, extensão e declividade do terreno). Os dados de saída mais importantes foram: a receita líquida anual, o número total de unidades operacionais, o número de subunidades operando simultaneamente, a uniformidade de emissão, e os comprimento e os diâmetros das tubulações, em cada linha, do sistema.

CARVALHO et al. (1995) estudaram a otimização da distribuição de áreas e culturas irrigadas no Chile a partir de um modelo de programação não-linear resolvido com o auxílio do programa GAMS/MINOS.

As principais variáveis de decisão do problema de otimização global de um sistema de gotejamento, segundo HOLZAPFEL et al. (1990) e SAAD (1993) são: os diâmetros e os comprimentos das tubulações, o número de emissores ou de grupos de emissores em cada linha lateral, o número de linhas laterais ligadas em cada linha de derivação, o número de unidades operacionais, o número de subunidades operando simultaneamente, o turno de irrigação e o tempo de aplicação. Sendo afetadas pelos parâmetros de projeto associados com as dimensões e declividades da área, a vazão do emissores e os custos das tubulações, da energia e da produção agrícola.

A função-objetivo dos modelos estudados por HOLZAPFEL et al. (1990) e SAAD (1993) consiste na maximização da receita líquida (RLIQ) determinada pela diferença entre a receita bruta anual da produção (RBRUT) e os custos do sistema (CSIST) (custos anuais da rede, dos equipamentos, da estação de controle e da energia acrescidos dos custos de produção)

$$RLIQ = RBRUT - CSIST \quad (2.51)$$

A receita bruta (benefícios da cultura) é diretamente associada com a produção relativa da cultura (relação entre as produções real e a máxima possível que diminui com o déficit de água que a cultura está submetida) determinada a partir do volume de água fornecido para as plantas durante um ciclo.

A receita bruta (benefícios da cultura) depende da produção, que é uma função da água aplicada quando todos os outros recursos requeridos estão em nível ótimo (HOLZAPFEL et al.,1990), sendo dada por:

$$RBRUT = P.Y \quad (2.52)$$

Em que: RBRUT = benefícios em US\$/ha; P = preços dos produtos em kg e Y = produção de frutos em kg/ha, sendo determinada, segundo HOLZAPFEL et al.(1990) por:

$$Y = \left[A_c \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^a + B_c \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^b + C_c \right] Y_m \quad (2.53)$$

Em que: ET_a é a evapotranspiração real no período em m; ET_m é a evapotranspiração máxima provável no período em m; Y_m é a produção máxima da cultura em kg/ha; e a, b, A_c , B_c e C_c são os coeficientes de regressão da função água-produção. A evapotranspiração real pode ser obtida da evaporação do tanque da estação conhecendo-se os coeficientes da cultura (K_c) e do tanque classe "A" (K_p).

SAAD (1993) empregou a seguinte relação para o cálculo da produção de uma cultura de laranja no Estado de São Paulo.

$$Y = Y_m \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right) \quad (2.54)$$

O volume de água a ser abastecido para as plantas, função da evapotranspiração real da cultura, é:

$$V_T = \frac{ET_a E_g E_r}{\epsilon_a} \quad (2.55)$$

Em que: V_T é o volume de água por árvore em m^3 ; E_g é o espaçamento entre um grupo de emissores na lateral ou entre árvores em uma fileira em m; E_r é o espaçamento entre ramais ou entre fileiras de plantas em m; ϵ_a é a eficiência de aplicação ($0 \leq E_r \leq 1$).

O volume de água aplicado durante o período é:

$$V_T = N_g \cdot q \cdot T_m D_p \quad (2.56)$$

Em que: q é a vazão emitida em m^3/h ; N_g é o número de emissores por grupo de emissores ou por árvore; D_p é o número de dias de irrigação durante o período de irrigação; T_m é o tempo de funcionamento médio das unidade operacionais durante o período de irrigação em horas/dia. Das equações (2.54) e (2.55) obtém-se:

$$ET_a = \frac{q \cdot N_g \cdot T_m \cdot D_p \cdot \epsilon_a}{E_g E_r} \quad (2.57)$$

Para SAAD (1993);

$$T_m = T_a / T_R \quad (2.58)$$

Em que: T_a é o tempo de aplicação (tempo de funcionamento das unidades operacionais) em horas e T_R é o turno de rega em dias.

As variáveis de projeto dos modelos estudados por HOLZAPFEL et al. (1990) e SAAD (1993) são: O comprimento da lateral; o comprimento da linha de derivação; os diâmetros das tubulações da rede; a descarga e a pressão dos emissores; o número de parcelas e o número de parcelas trabalhando simultaneamente; e o número de horas de irrigação por período. O número de emissores por árvore, que depende do tipo de árvore, é considerada como sendo uma informação conhecida, valor avaliado como uma condição básica da característica do solo.

O formato e o número de parcelas define a configuração geral da rede assim como o número total de válvulas, conexões e acessórios das tubulações do sistema. O comprimento da linha lateral depende do número de emissores ou grupos de emissores na linha lateral e o comprimento da linha de derivação depende do número de linhas laterais conectadas na linha de derivação.

Segundo HOLZAPFEL et al. (1990) e SAAD (1993) o custo dos sistemas de gotejamento é principalmente devido aos emissores, tubulações, válvulas, filtros, bomba, acessórios, e energia. O custo de mão de obra e da água não foi considerado na análise, assumindo-se para eles um menor efeito no projeto do sistema. Os custos dos emissores e da produção são fixos para uma determinada área do sistema. Os custos unitários das tubulações variam exponencialmente com os diâmetros. O número de parcelas e de unidades operacionais definem os custos das válvulas, painel de controle e acessórios, a vazão do sistema determina o custo da estação de

controle, a potência consumida pelo sistema determina os custos da estação de bombeamento e associada com número de horas de irrigação o custo de energia.

As relações funcionais do modelo matemático reproduzem os cálculos dos números de unidades operacionais, de parcelas do sistema, de parcelas operando simultaneamente, de emissores e de equipamentos do sistema, a determinação dos comprimentos, das perdas de cargas, da vazões e dos diâmetros das tubulações e o cálculo do consumo de energia do sistema.

As principais restrições do modelo se referem aos aspectos ligados ao dimensionamento hidráulico, a disponibilidade de tempo para a irrigação e a produção da cultura.

As perdas de cargas máximas nas tubulações das parcelas estão associadas com o coeficiente de uniformidade do sistema, as velocidades nas tubulações são limitadas e a vazão do sistema não deve ultrapassar a vazão disponível.

O turno de irrigação (T_R) não deve ultrapassar um valor máximo ($T_{R(max)}$), isto é:

$$T_R \leq T_{R(max)} \quad (2.59)$$

e o tempo efetivo de irrigação diário não deve ultrapassar o tempo disponível (T_d), portanto:

$$\frac{N_u}{T_R} T_a \leq T_d \quad (2.60)$$

Em que: N_u é o número de unidades operacionais do sistema.

A produção da cultura que depende do consumo d'água da cultura não pode ultrapassar a produção máxima, desta forma:

$$ET_a = \frac{q \cdot N_g \cdot T_m \cdot D_p \cdot \varepsilon_a}{E_g \cdot E_r} \leq ET_m \quad (2.61)$$

Os estudos GEOHRING (1976), ORON & KARMELI (1979), KARMELI & ORON (1979) e ORON & WALKER (1981) referem-se a minimização do custo do sistema para um período de pico da demanda de água. Enquanto que nos estudos de HOLZAPFEL et al. (1990) e SAAD (1993) de maximização da receita líquida o consumo de água da cultura é uma variável de decisão do problema de otimização.

Os modelos de otimização empregados por HOLZAPFEL et al. (1990) e SAAD (1993) requerem entradas como o fator de tempo de irrigação, a evapotranspiração máxima provável da estação, o rendimento máximo de produção que é esperado para a área a ser irrigada pelo sistema, a função água-produção, a função de custo e o custo dos componentes do sistema, o custo de energia, o rendimento da produção, e as variáveis de projeto. O fator do tempo de irrigação é obtido da evapotranspiração máxima histórica para o período de irrigação.

Os resultados dos modelos de HOLZAPFEL et al. (1990) e SAAD (1993) mostraram que o custo do sistema e de operação são relativamente pequenos comparados com os benefícios obtidos (a solução mais rentável encontrada por SAAD (1993) apresentou um custo da ordem de 7,12 % dos benefícios e a menos rentável um custo da ordem de 11,39%). Isto, segundo HOLZAPFEL et al. (1990), é principalmente devido ao benefício marginal da água ser maior que o custo marginal das tubulações e operação.

A análise de sensibilidade do modelo mostrou que o preço dos produtos é o parâmetro de entrada mais importante, com um grande impacto na função-objetivo (maximização dos lucros). O preço de energia, apesar de importante por apresentar um elevado risco de aumento, tem um pequeno efeito na função objetivo.

As soluções ótimas dos estudos de HOLZAPFEL et al. (1990) e SAAD (1993) resultaram em um diâmetro para as linhas laterais maior do que o menor diâmetro comercial disponível.

SAAD (1993) aplicou o modelo de otimização em 120 combinações de projeto para uma cultura de laranja irrigada por microaspersão, envolvendo diferentes opções de área, formato, declividade e vazão emitida. A otimização resultou na produção máxima possível da cultura, com um déficit d'água nulo, em 114 opções. Uma análise das opções restantes mostrou que a restrição do tempo disponível de irrigação prevaleceu no cálculo, evitando que o consumo de água da planta alcançasse o valor máximo. Nestes casos, uma modificação adequada da vazão emitida poderia conduzir a uma solução otimizada com produção máxima.

2.11 Considerações finais

A otimização do projeto de sistemas de irrigação localizada é um importante fator de difusão desta moderna prática agrícola, principalmente, para as condições que originalmente motivaram a criação desta técnica: áreas com topografia acidentada, solos pobres e escassez de água. Nestas situações, a irrigação localizada apresenta muitas vantagens sobre a irrigação convencionais.

Os processos de otimização estudados, com base na maximização da receita líquida (produção menos os custos), resultaram, geralmente, numa produção máxima possível para as culturas. Nestes casos, a solução ótima corresponde ao custo mínimo do sistema e a minimização dos custos do sistema define o processo de otimização

A configuração é um importante fator de otimização de sistemas de irrigação localizada. Os estudos conhecidos empregaram modelos de programação não-linear na otimização conjunta da configuração e do dimensionamento de sistemas de gotejamento. Apresentando várias dificuldades, principalmente, devidas ao fato de que tais modelos não admitem funções não lineares associadas com variáveis inteiras, como é o caso das funções dos diâmetros das tubulação e outras variáveis de decisão do problema.

Um sistema de irrigação por gotejamento é constituído de diversas unidades operacionais que nem sempre são idênticas. As unidades operacionais podem funcionar com vazões diferente devido ao atendimento de áreas e/ou culturas diferentes. Nestes casos, as vazões nos trecho da rede não são permanentes dificultando o emprego de modelos de programação não-linear e dinâmica.

O fato de que a pressão mínima geralmente não ocorre na extremidade das linhas inclinadas das parcelas é um fator complicador no estabelecimento das restrições das pressões nas tubulações.

Um modelo de programação linear aplicado no dimensionamento (minimização dos custos) de um sistema, envolvendo as parcelas, requer um número muito grande de restrições de pressão (no mínimo duas restrições de pressão para cada linha lateral quando as linhas laterais estão em nível e nos casos de linhas laterais em declive duas restrições de pressão para cada ponto de emissão d'água) que dificultam a aplicação da metodologia nas situações de áreas grandes e/ou culturas densas.

A minimização do custo das tubulações de uma parcela depende da pressão no terminal da rede principal que interfere diretamente no procedimento de otimização da rede. Uma redução da pressão no ponto de conexão aumenta o custo da parcela e diminui o custo da rede principal. Desta forma, as cargas de pressão nos pontos de alimentação das parcelas tornam-se as variáveis de decisão de um processo de otimização conjunto rede-parcela. Um procedimento iterativo para a otimização do dimensionamento conjunto das parcela e da rede principal pode partir das pressões máximas nos terminais e em seguida proceder a redução gradativa destas pressões até que o custo global seja mínimo. Neste caso, pode-se empregar métodos mais apropriados para cada procedimento de otimização, tais como: a programação linear para a otimização da rede principal e a metodologia de GUIMARÃES JR (1993) para a otimização do dimensionamento da parcela.

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações iniciais

A presente pesquisa consiste no desenvolvimento de uma metodologia geral de otimização do projeto hidráulico de sistemas de irrigação localizada, visando a formulação de um programa genérico que atenda as condições de projeto mais diversificadas possíveis.

Para facilitar a aplicação do estudo foi desenvolvido o programa computacional **ProLoc** (Projeto Otimizado de Sistemas de Irrigação Localizada), com o auxílio do programa Microsoft Visual Basic, versão 3.0, adquirido pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP, cujo número do produto é de 203-851AV300, conforme o ANEXO B.

ProLoc reproduz o andamento normal de projeto de um sistema de irrigação localizada, sendo constituído de três programas básicos: **Agro**, **Parcela** e **Rede**.

3.2 Programa Manejo

O Programa **Agro** é um gerenciador dos dados de controle do processo de irrigação nas unidades operacionais. Envolvendo aspectos relacionados com: as características da cultura associadas com o balanço hídrico, a água no solo, a seleção do emissor e a funcionalidade do sistema. Auxiliando na entrada de dados do

programa **Parcela**. Os dados do Programa podem ser digitados diretamente ou determinados a partir de rotinas de cálculo específicas, envolvendo praticamente todas as variáveis do Programa.

3.3 Programa Parcela

O projeto das subunidades de rega é elaborado com o auxílio do Programa **Parcela**. Compreendendo a definição da configuração da rede e o dimensionamento das tubulações, ramais e linha de derivação. Os resultados do programa **Parcela**, o custo das tubulações e a pressão de alimentação, são dados de entrada do programa **Rede**.

3.3.1 Modelo hidráulico

No cálculos hidráulico das tubulação das parcelas foi empregada a fórmula geral da perda de carga (2.13), corrigida pelos fatores de distribuição em marcha de vazão e de perda de carga localizada, conforme a expressão (3.1).

$$h_t = F.K' \frac{Q^m}{D^n} L \quad (3.1)$$

Sendo que:

h_t = Perda de carga total na linha em m;

Q = Vazão inicial na linha de irrigação em m^3/s ;

D = Diâmetro da linha em m;

L = Comprimento da tubulação em m;

m e n = Expoentes da fórmula prática adotada.

Onde:

$$K' = K \cdot \left(\frac{E_g + f_e}{E_g} \right) \quad (3.2)$$

Sendo que:

K = Fator de rugosidade da tubulação da fórmula prática adotada;

E_g = Espaçamento entre os emissores d'água nas linhas laterais;

f_e = Comprimento equivalente associado com a perdas de carga localizada no ponto de conexão dos emissores.

Na expressão (3.1), F é o fator de correção da perda de carga de WU & GITLIN (1975) para um número de saídas grande, determinado a partir da expressão (2.17).

3.3.2 Limites para os comprimentos dos ramais

O dimensionamento das tubulações requer a definição prévia dos comprimentos das tubulação. O comprimento dos ramais determina o formato da parcela, influenciando, portanto, diretamente na configuração da rede de tubulações.

Neste contexto, como um valor de referência, o programa apresenta os comprimentos, máximo e mínimo, permitidos para os ramais, associados com os maiores diâmetros disponíveis para as tubulação e a variação de pressão estabelecida para a parcela. O cálculo baseia-se nas condições mais desfavorável com respeito ao dimensionamento das tubulações. Nas parcelas inclinadas corresponde ao setor em aclave.

A variação da pressão na parcela (ΔH) é decorrente da combinação dos efeitos das perdas de cargas acumuladas nas tubulação com o desnível topográfico. Podendo ser determinada pela expressão (3.3) seguinte, que se apresenta como uma função do comprimento dos ramais (L_r).

$$\Delta H = k_1 L_r^{m+1} + k_2 L_r + \frac{k_3}{L_r} \quad (3.3)$$

Onde:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{K'_r}{(m+1)D_r^n} \cdot \frac{(q/E_g)^m}{f_r^{m+1}} \\ k_2 &= \frac{i_r}{f_r} \\ k_3 &= i_d \cdot A' + \frac{K'_d \cdot A'^{m+1}}{(m+1)D_d^n} \cdot \left(\frac{N_r \cdot q}{E_g \cdot E_f} \right)^m \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Nas expressões anteriores (3.4): q é vazão básica dos emissores; E_g é o espaçamento entre os emissores; E_f é o espaçamento entre as fileiras de planta; n_r é o número de ramais por fileiras de plantas ($n_r = 1$ ou 2); A' é área do setor em aclave da parcela; i_r e i_d , D_r e D_d , K'_r e K'_d e f_r e f_d são, respectivamente, as declividades, os diâmetros, os coeficientes das fórmulas da perda de carga e os fatores de layout dos ramais e da derivação.

A variação máxima da pressão na parcela (ΔH_{\max}) é definida a partir das cargas de pressão máxima (H_{\max}) e mínima (H_{\min}), estabelecidas, para a parcela, com base nos critérios de uniformidade da distribuição d'água no terreno.

$$\Delta H_{\max} = H_{\max} - H_{\min} \quad (3.5)$$

Os comprimentos máximos e mínimos dos ramais correspondem as raízes da equação (3.3) para as seguintes condições: variação de pressão na parcela máxima e tubulações (ramais e linha de derivação) com os maiores diâmetros disponíveis. Sendo determinados, no programa, com o auxílio do método computacional iterativo da bisseção sucessiva .

3.3.3 Variação de pressão mínima na parcela

Para evitar as indeterminações no cálculo o Programa **Parcela** verifica antecipadamente a variação de pressão mínima permitida na parcela, associada com os maiores diâmetros disponíveis. Devendo ser inferior a variação máxima de pressão de projeto.

A partir da minimização da função (3.3) chega-se a equação (3.6) que permite, com o auxílio de método numérico iterativo da bisseção sucessiva, determinar o comprimento L_r que está associado com a variação mínima de pressão na parcela.

$$\frac{\partial \Delta H}{\partial L_r} = (m +)k_1 L_r^m + k_2 - \frac{k_3}{L_r^2} = 0 \quad (3.6)$$

Substituindo-se o valor de L_r , encontrado a partir da expressão (3.6), na equação (3.3) encontra-se a variação de pressão mínima na parcela. Caso a variação de pressão encontrada seja superior a de projeto deve-se selecionar diâmetros maiores para as tubulações

3.3.4 Comprimento ótimo dos ramais

O comprimento ótimo dos ramais, da solução geral é determinado a partir da resolução do sistema de equações (2.32), (2.33), (2.34) e (2.36). A combinação destas equações reduz o problema à determinação numérica das raízes de uma equação com apenas uma incógnita.

O comprimento ótimo associado com um dado diâmetro dos ramais foi determinado a partir da solução numérica da equação (2.40).

Para as duas situações, o comprimento ótimo corresponde ao mínimo absoluto do conjunto de soluções encontradas. Foi empregado, na pesquisa, o método da bisseção sucessiva, com um passo (faixa de variação de comprimento de ramal) preestabelecido de 0,1m.

3.3.5 Otimização do ponto de alimentação das tubulações das parcelas

A otimização do ponto de alimentação das linhas inclinadas das parcelas seguiu as recomendações de GUIMARÃES JR (1993), item 2.9.4, com base no parâmetro u representativo da declividade da tubulação, dado pela relação (2.41). O ponto ótimo de alimentação da linha foi determinado, a partir da equação (2.42), também com o auxílio do método numérico da bisseção sucessiva.

3.3.6 Otimização das perdas de carga nas tubulações

Na otimização das perdas de cargas nas tubulações foi empregada a metodologia de GUIMARÃES JR. (1993), a partir das equações (2.36) e (2.37), combinadas com as fórmulas (2.34) e (2.35).

3.3.7 Dimensionamento das tubulações das parcelas

No dimensionamento das tubulações, ramais e linha de derivação, foi empregada a metodologia apresentada por GUIMARÃES JR. & MATTOS (1995), que reproduz analiticamente o método gráfico da curva da perda de carga adimensional, descrito por LOPEZ et al. (1992) e DENÍCULE et al. (1993).

A metodologia empregada na pesquisa baseia-se na equação (3.7) que expressa a carga de pressão ao longo de um linha de irrigação com distribuição de vazão em marcha constante, a partir da extremidade final. O início da linha corresponde ao ponto de alimentação d'água, conforme a Figura 7.

$$H_x = H_f + \frac{K \cdot q_d^m \cdot x^{m+1}}{(m+1)D^n} - s \cdot x \quad (3.7)$$

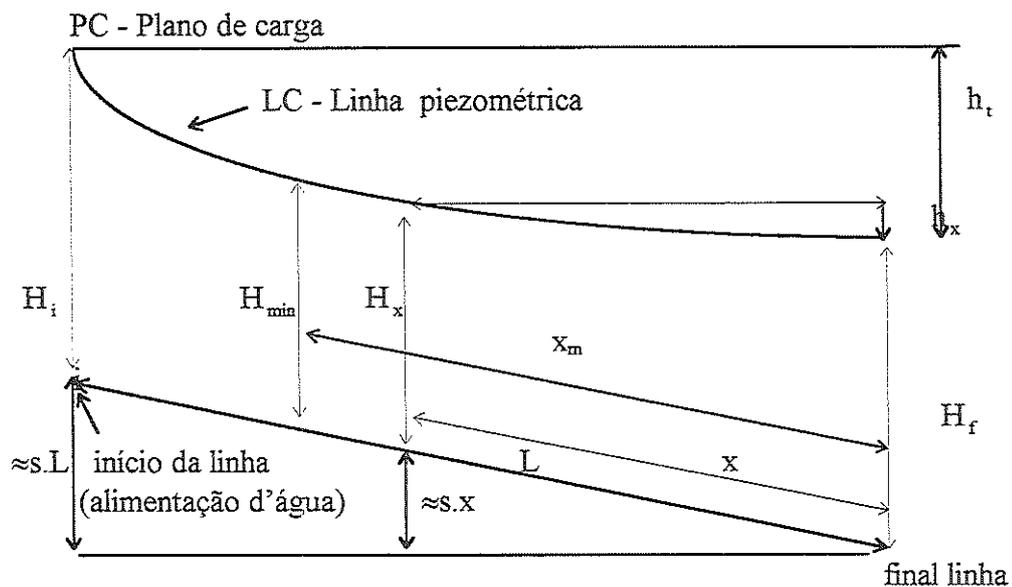


Figura 7 - Carga de pressão em uma linha de irrigação com distribuição em marcha

Sendo que:

q_d = Vazão distribuída na linha de irrigação em $(m^3/s)/m$;

s = Declividade da linha em m/m ;

K, m, n = Parâmetros da fórmula da perda de carga ;

D = Diâmetro da tubulação em m .

L = Comprimento da linha de irrigação em m ;

x = Distância do final da linha até uma determinada seção em m ;

H_i = Carga de pressão no início da linha em mca ;

H_f = Carga de pressão no final da linha em mca

H_x = Carga de pressão na seção distante x do final da linha em mca ;

x_m = Distância do final da linha até o ponto de pressão mínima em m

H_{min} = Carga de pressão mínima em mca ;

h_t = Perda de carga total na linha em m ;

h_x = Perda de carga do trecho de comprimento x da linha em m ;

s = Declividade da linha em m/m ;

O dimensionamento das tubulações é feito com combinação de diâmetros. O cálculo compreende a seleção do par de menores diâmetros, dentre os disponíveis, que assegure uma distribuição de pressão na linha de irrigação compatível com os limites preestabelecidos, as cargas de pressão no início da linha e a mínima.

Inicialmente são selecionados os diâmetros comerciais imediatamente inferior e superior a um diâmetro de referência, determinado a partir da equação geral (3.7), fazendo-se: $x = L$, $H_x = H_{\max}$ e $H_f = H_{\min}$.

O cálculo é condicionado essencialmente pela pressão mínima.

Nas linha em aclive (Figura 8) ou em nível a pressão mínima ocorre na extremidade final (DENÍCULE, RAMOS e MARTINEZ, 1993).

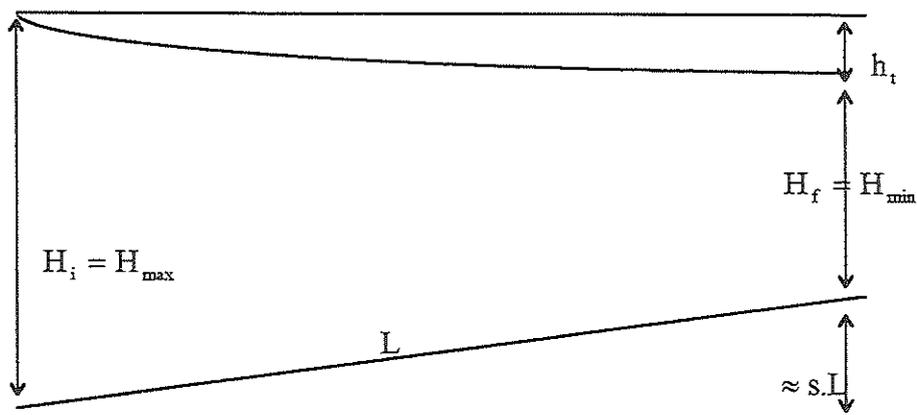


Figura 8 - Linha de irrigação em aclive

Nas linha de irrigação em declive a pressão mínima raramente ocorre no final da linha, como nas linhas horizontais ou em aclives (DENÍCULE et al. 1993). Nestes casos, o ponto de pressão mínima é identificado pela distância (X_m) até o final da

linha, determinada pela expressão (3.8) seguinte, resultante da minimização da função da carga de pressão na linha (3.7).

$$X_m = \left(\frac{s.D^n}{K.q_d} \right)^{1/m} \quad (3.8)$$

O problema consiste na identificação do ponto de conexão das tubulações de diâmetros distintos, definido pela distância (x_1) do ponto de conexão até a extremidade final da tubulação. Sendo determinada pela expressão (3.9) seguinte, deduzida por GUIMARÃES Jr. & MATTOS (1995).

$$x_1 = \left[\frac{(m+1)(H_{f2} - H_{f1})}{\beta.K.q_d^m} \right]^{1/(m+1)} \quad (3.9)$$

Onde:

$$\beta = \frac{1}{D_1^m} - \frac{1}{D_2^m} \quad (3.10)$$

Sendo que:

D_1 = Diâmetro menor da tubulação em m;

D_2 = Diâmetro maior da tubulação em m;

H_{f1} = Carga de pressão efetiva no final da linha de diâmetro D_1 ;

H_{f2} = Carga de pressão hipotética no final da linha de diâmetro D_2 ;

A carga de pressão hipotética no final da linha (H_{f2}) da tubulação de maior diâmetro (D_2) é determinada com o auxílio da fórmula geral (3.7), assumindo-se a pressão máxima no início da linha.

Nas tubulações em nível ou em aclave, $H_{f1} = H_{min}$

Nas tubulações em declive (Figura 9), a carga de pressão (H_{f1}) no final da tubulação de menor diâmetro (D_1) é calculada, com o auxílio da fórmula geral (3.7), a partir do ponto de pressão mínima da tubulação, determinado pela equação (3.8).

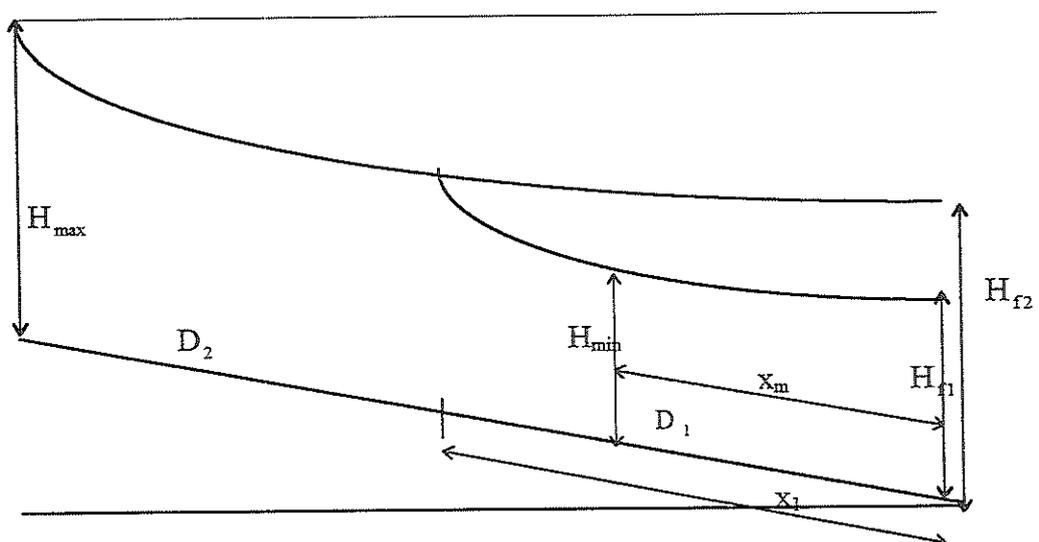


Figura 9 - Linha de irrigação em declive com combinação de diâmetros

Quando a distância até o final da linha dos pontos de pressão mínima (x_m) ou de conexão é maior do que o comprimento da tubulação deve ser testada uma nova combinação de diâmetros (imediatamente inferiores). Nestes casos, quando o menor diâmetro selecionado corresponde ao menor diâmetro disponível, este diâmetro é adotado em toda a tubulação. A pressão mínima é assumida no início da linha e a pressão no final da linha é determinada a partir da equação geral (3.7).

Os diâmetros devem ser aumentados quando o ponto de pressão mínima ocorrer antes do ponto de conexão. Quando não é possível aumentar o diâmetro, deve-se adotar o maior diâmetro disponível em toda a tubulação. Neste casos, as pressões nos pontos extremos da linha devem ser calculadas, a partir do ponto de pressão mínima.

3.4 Programa Rede

O Programa **Rede** dimensiona as tubulações da rede principal, minimizando o custo global (custo de energia e das tubulações) a partir de um modelo iterativo que apresenta as pressões de alimentação das parcelas como variáveis de decisão, conectando os dimensionamento das redes primárias e secundárias.

3.4.1 - Análise do problema

O dimensionamento usual da rede hidráulica de um sistema de irrigação localizada consiste de um cálculo seqüencial com as seguintes etapas: dimensionamento das tubulações das parcelas, dimensionamento da rede principal e seleção do equipamento motor-bomba.

O dimensionamento das tubulações da parcela depende da pressão de alimentação e é condicionado pela pressão mínima estabelecida a partir do coeficiente de uniformidade do sistema. O custo das parcelas cresce com a redução da pressão de alimentação.

O dimensionamento da rede principal é condicionado pelas pressões de alimentação das parcelas e varia com a altura manométrica do sistema que,

juntamente com a vazão do sistema, define o rotor da bomba. Uma elevação da altura manométrica aumenta o custo de bombeamento e reduz o custo da rede.

A seleção da bomba envolve a definição da marca, do modelo e do regime de rotação da bomba.

Portanto, as variáveis de decisão intrínsecas do processo de minimização do custo global, energia e tubulações, da rede hidráulica de um sistema de irrigação localizada são: a bomba, a altura manométrica e as cargas de pressão nos pontos de alimentação das parcelas.

Em um sistema de irrigação localizada, as unidades operacionais podem funcionar com vazões distintas, decorrentes do atendimento de diferentes culturas ou áreas do terreno. Nestes casos, a altura manométrica e o rendimento da bomba variam com a vazão do sistema, acompanhando o ponto de funcionamento do sistema na curva do rotor da bomba, tornando o problema de otimização bem mais complexo. No modelo estudado, o rotor foi adotado como uma das variáveis de decisão, substituindo a altura manométrica do sistema, simplificando bastante o problema.

Os modelos disponíveis de bombas que atendem a uma determinada vazão e a uma faixa de variação de altura manométrica são relativamente limitados, nestas condições, o problema de otimização conjunta do projeto de um sistema de irrigação localizada pode ser abordado de maneira inversa, em um processo de busca com três etapas, conforme o esquema de cálculo da Figura 10.

A bomba é selecionada na etapa 1, a etapa 2 compreende a escolha do rotor da bomba, definindo as alturas manométricas empregadas no cálculo da rede na etapa 3.

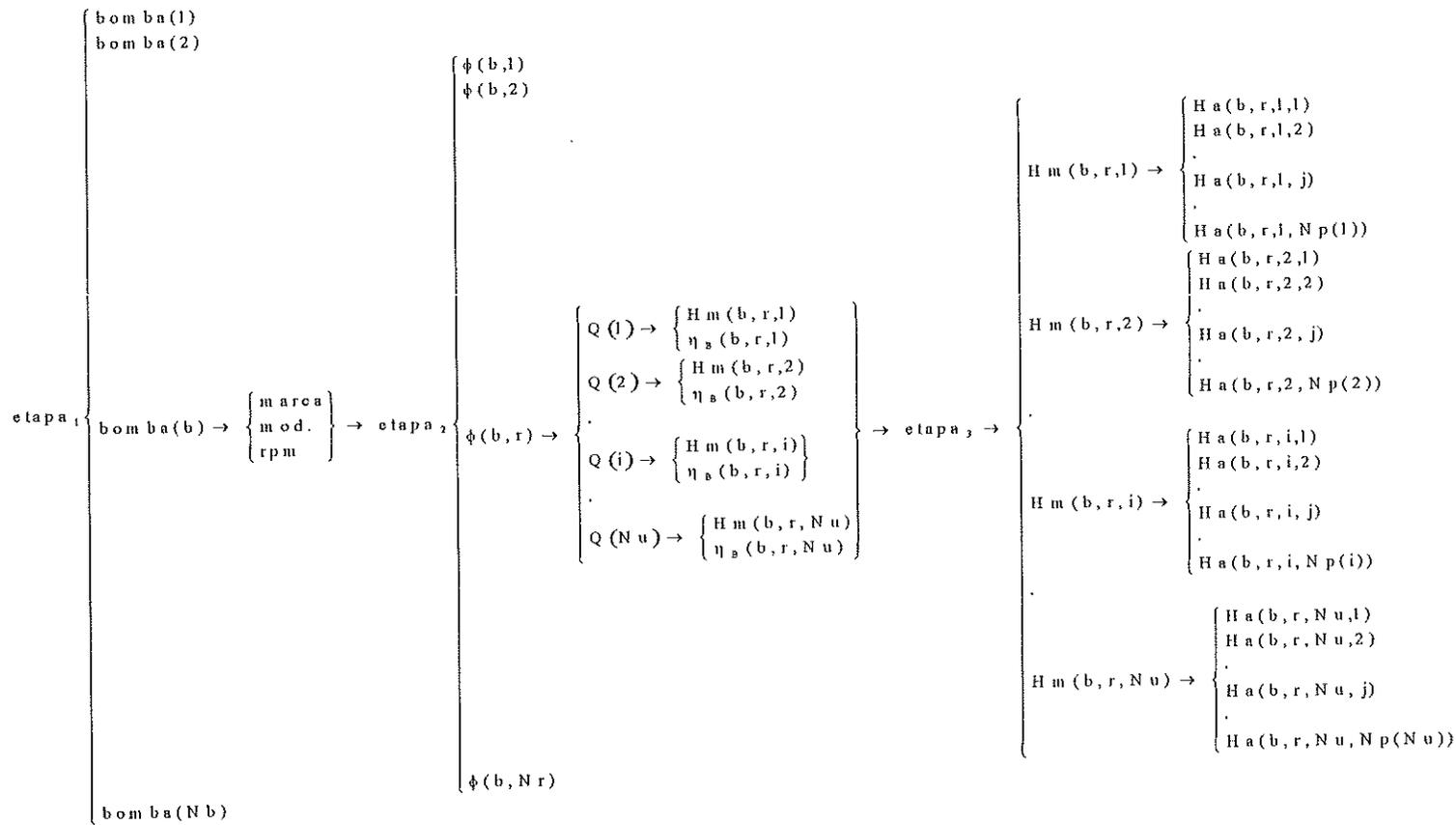
O dimensionamento da rede, na etapa 3, consiste de um método iterativo de busca, envolvendo a otimização conjunta rede-parcela. As variáveis de decisão são as

pressões de alimentação das parcelas. Sendo expressadas por funções que relacionam os custos das parcelas com as pressões de alimentação.

A escolha do rotor, na etapa 2, define as alturas manométricas e os rendimentos das diversas unidades operacionais e, em consequência, o custo de bombeamento do sistema. Restringindo, portanto, o processo de otimização da etapa 3 apenas a minimização do custo da rede. Na pesquisa foi empregado um modelo computacional de programação linear para o cálculo da rede, para cada conjunto de pressões de alimentação das parcela.

O processo de otimização da etapa 3 inicia-se com as pressões máximas de alimentação das parcelas, procedendo, em seguida, a redução gradativa das pressões até que o custo da rede seja mínimo. O modelo baseia-se num método de busca de múltiplos estágios. Cada estágio compreende um número de cálculo da rede igual ao de parcela. Em cada cálculo a pressão de uma das parcelas é reduzida de um passo constante, definido para cada parcela, sendo restauradas as pressões das outras parcelas do estágio anterior. Cada estágio corresponde a seleção da parcela onde a redução da pressão de alimentação implica na maior redução do custo da rede.

O modelo de otimização geral parte do menor rotor da primeira bomba selecionada que atende a uma altura manométrica mínima possível na rede, associada com os maiores diâmetro nas tubulações. Neste caso, o custo da rede é máximo e o custo de bombeamento é mínimo. O processo de otimização prossegue testando cada um dos rotores da bomba, do menor para o maior, até que custo global (custo de energia e das tubulações) seja mínimo. Para cada rotor selecionado promove-se o cálculo otimizado das tubulações, conforme a etapa 3. Quando o maior rotor da bomba é o rotor ótimo deve-se testar uma nova bomba que atenda uma faixa altura manométrica maior do que primeira.



Etapa 1 = Seleção da bomba

Etapa 2 = Seleção do rotor da bomba

Etapa 3 = Dimensionamento da rede com o ajuste das pressões de alimentação das parcelas

Figura 10 - Esquema inverso de cálculo da rede principal de sistemas de irrigação localizada

Sendo que:

b = índice representativo da bomba;

r = índice representativo do rotor;

i = índice representativo da unidade operacional;

j = índice representativo da parcela da unidade;

N_b = número de bombas disponíveis ;

N_{r_b} = número de rotores da bomba b ;

N_u = número de unidades operacionais do sistema;

N_{p_i} = número de parcelas da unidade operacional i ;

$\phi_{b,r}$ = diâmetro do rotor r de uma bomba b , em mm;

Q_i = vazão da unidade operacional i , em m^3/h ;

$H_{m_{b,r,i}}$ = altura manométrica requerida pela unidade operacional i e identificada na curva do rotor r , da bomba b , em mca;

$\eta_{b,r,i}$ = rendimento da bomba b identificado na curva do rotor r a partir da vazão da unidade operacional i ;

$H_{a_{b,r,i,j}}$ = carga de pressão de alimentação da parcela j da unidade operacional i , associada com o rotor r da bomba b , em mca.

3.4.2 Função objetivo do problema geral de otimização da rede

A função objetivo do problema consiste da minimização do custo anual do sistema resultante da composição dos custos anuais de bombeamento e de amortização das tubulações e equipamentos (os custos de instalação do sistema são incorporados nos custos unitários dos equipamentos e das tubulações). Desta forma, a função objetivo é expressada por:

$$\text{(minimizar)} \quad CT = CE + CB + CRS + CRP \quad (3.11)$$

Sendo que:

CT = Custo total anual do sistema em R\$/ano;

CE = Custo anual de amortização dos equipamento em R\$/ano;

CB = Custo anual de bombeamento em R\$/ano;

CRS = Custo anual de amortização das redes secundárias R\$/ano;

CRP = Custo anual de amortização da rede primária em R\$/ano.

a) Custo dos equipamentos

O custo dos equipamentos compreende o custo do conjunto motor-bomba e do sistema elétrico que depende da seleção da bomba e do rotor e uma parte relativamente fixa associada com o projeto agrônômico, o layout e a vazão do sistema, englobando os custos de emissores, conexões, acessórios, equipamentos do cabeçal de controle (filtros, injetor de fertilizante, válvulas reguladoras de vazão, etc) e da estação elevatória (casa de bombas, base metálica, tubulação de sucção, ligação de pressão, etc).

$$CE = CF + CMB_{b,r} \quad (3.12)$$

Sendo que

CF = Custos fixos anuais de amortização dos equipamentos em R\$/ano;

$CMB_{b,r}$ = Custos anuais de amortização do equipamento motor-bomba e do sistema elétrico em R\$/ano.

b) Custo de bombeamento

O custo de bombeamento corresponde ao custo anual de consumo de energia do sistema acrescido do custo anual de demanda, isto é:

$$CB = CB_c + CB_d \quad (3.13)$$

Sendo que:

CB_c = Custo anual de consumo de energia do sistema em R\$;

CB_d = Custo anual de demanda em R\$.

O custo anual de consumo de energia é avaliado, para um rotor r de uma determinada bomba b , a partir da seguinte expressão (3.14), de

$$CB_c = \sum_{i=1}^{Nu} cu_i \cdot \frac{Hm_{b,r,i}}{\eta b_{b,r,i}} \quad (3.14)$$

Onde: cu_i é custo anual de consumo de energia da unidade operacional i , em R\$/mca.

Sendo dado por:

$$cu_i = ce \cdot Nh_i \cdot \frac{9,806 \cdot Q_i}{\eta m} \quad (3.15)$$

Sendo que:

ce = tarifa de consumo de energia em R\$/Kwh;

Nh_i = total anual de horas de funcionamento da unidade operacional;

Q_i = vazão da unidade operacional em m^3/s ;

η_m = rendimento do motor.

O custo anual de demanda baseia-se na potência máxima absorvida pelo sistema. Sendo determinado por:

$$CB_d = cd \cdot \left(\max_{i=1, Nu} \left\{ \frac{9,806 Q_i \cdot Hm_{b,r,i}}{\eta b_{b,r,i} \cdot \eta_m} \right\} \right) \quad (3.16)$$

Sendo que:

cd = Custo de demanda anual em R\$/Kw.

c) Custo das redes secundárias

As redes secundárias correspondem ao conjunto das tubulações, ramais e linha de derivação, das parcelas.

$$CRS = \sum_i^{Nu} \sum_j^{Np(i)} CP_{i,j} \quad (3.17)$$

Sendo que:

$Np(i)$ = número de parcelas da unidade operacional i ;

$Cp_{i,j}$ = custo anual de amortização do conjunto das tubulações em uma parcela, em R\$/ano.

O custo das parcelas foi expressado como uma função potencial da carga de pressão de alimentação da parcela.

$$Cp_{i,j} = \alpha_{i,j} \cdot Ha_{i,j}^{\beta(i,j)} \quad (3.18)$$

Onde: $\alpha_{i,j}$ e $\beta_{i,j}$ são os coeficientes da função de custo da parcela i , da unidade operacional j .

d) Custo da rede primária

O custo da rede primária define a função objetivo do modelo de programação linear aplicado na etapa 3 que foi expressada da seguinte forma:

$$(\text{minimizar}) \text{ CRP} = \sum_{t=1}^{Nr} \sum_{d=1}^{Nd(t)} CT_{t,d} X_{t,d} \quad (3.19)$$

Sendo que:

t = índice geral que designa cada um dos trechos da rede principal;

d = índice para o diâmetro nominal do tubo;

N_{tr} = número de trechos da rede principal;

$N_d(t)$ = número de diâmetros selecionados para o trecho t ;

$CT_{t,d}$ = custo unitário anual de amortização referente a tubulação de diâmetro d do trecho t da rede primária em R\$/ano;

$X_{t,d}$ = comprimento da tubulação de diâmetro d do trecho t da rede primária em m (variáveis de decisão do problema).

As restrições geométrica associadas com os comprimentos dos trechos da rede, são definidas da seguinte forma:

$$L_t = \sum_{d=1}^{N_d(t)} X_{t,d} \quad (3.20)$$

Para: $t = 1 \dots N_{tr}$

Sendo que: L_t é o comprimento do trecho t da rede

As restrições hidráulicas que garantem o atendimento das cargas de pressão de alimentação das parcelas (Ha_p) nos terminais da rede primária, são definidas, por:

$$\sum_{k=1}^{N_p(p)} \sum_{d=1}^{N_d[t]} J_{t,d} \cdot X_{t,d} \leq Hm_{b,r,j} + Z_0 - Z_{i,j} - Ha_{b,r,i,j} - h_c - h_e \quad (3.21)$$

Onde: $p = p(i,j)$ e $t = t(p,k)$

Para: $i=1 \dots N_u$ e $j=1 \dots N_{p_i}$

Sendo que:

b = índice das bombas selecionadas;

r = índice dos rotores selecionados

i = índice das unidades operacionais do sistema;

j = índice das parcela de uma unidade;

k = índice dos trechos que alimentam uma parcela;

d = índice dos diâmetros selecionados para um trecho;

p = índice geral das parcelas do sistema;

t = índice geral dos trechos da rede principal;

$Nt(p)$ = número de trechos da parcela p ;

$J_{t,d}$ = perda de carga por unidade de comprimento da tubulação de diâmetro

d do trecho t em m/m;

Z_0 = cota do nível d'água na captação em m;

Z_p = cota do ponto de alimentação da parcela p em m;

h_c = perda de carga no cabeçal de controle em m;

h_e = perdas de cargas eventuais em m.

As Perdas de cargas unitárias das tubulações dos trechos são determinadas a partir da expressão (3.22), seguinte:

$$J(t,d) = K \frac{[Qt(p,t)]^m}{[D(t,d)]^n} \quad (3.22)$$

Sendo que:

$Qt(p,t)$ = vazão no trecho t da parcela p em m^3/s ;

$D(t,d)$ = diâmetro interno da tubulação de diâmetro d do trecho t em m;

K , m e n = coeficientes da fórmula da perda de carga.

4 RESULTADOS

Para a aplicação da metodologia foi selecionado um projeto de um sistema de irrigação localizada desenvolvido, por SAAD et al (1994), com o auxílio de um modelo computacional de programação linear. Apresentando-se com as seguintes características (Figura 11):

- a) O sistema de irrigação atende a uma área retangular com 11,60 ha (460 m x 252 m), cultivada com citros, dividida em quatro parcelas de irrigação, constituindo, cada uma, uma unidade operacional.
- b) As parcelas 1 e 3 atendem individualmente a uma área de 3,28 ha (260 m x 126 m), enquanto que as parcelas 2 e 4 cobrem uma área de 2,52 ha (200 m x 126 m), cada.
- c) O terreno é plano e apresenta-se com uma declividade de 1% na direção da menor dimensão da área, perpendicular ao alinhamento das fileiras das plantas.
- d) O espaçamento entre as fileiras de plantas é de 7 m. e o espaçamento entre as plantas nas fileiras é de 5 m.
- e) A irrigação é por gotejamento, tendo um ramal em cada fileira de planta, com vazão emitida por planta de 20 l/h, correspondendo a 5 gotejadores de 4 l/h com pressão de serviço de 10 mca.

f) Tempos de irrigação de cada unidades

- período de irrigação diário = 20 h/dia;
- período de irrigação anual = 45 dias/ano.

g) Equação vazão-carga hidráulica do emissor

$$q = 1,3542 \cdot H^{0,4704}$$

h) Parâmetros de uniformidade do sistema

Coefficiente de uniformidade CU = 90%,

Coefficiente de variação de fabricação do emissor CV = 6,7%

i) Limites de pressão na parcela

- a vazão mínima da parcela;

$$q_{\min} = \frac{CU \cdot q_b}{100 \left(1 - \frac{1,27 \cdot CV}{\sqrt{e}} \right)} = \frac{90 \times 4}{100 \left(1 - \frac{1,27 \times 0,067}{\sqrt{5}} \right)} = 3,7424 \text{ l/h}$$

- a carga de pressão mínima;

$$H_{\min} = \left(\frac{q_{\min}}{1,3542} \right)^{\frac{1}{0,4704}} = \left(\frac{3,7424}{1,3542} \right)^{\frac{1}{0,4704}} = 8,68 \text{ mca}$$

- a variação máxima de pressão na parcela;

$$\Delta H = M(H_b - H_{\min}) = 2,5 \times (10 - 8,68) = 3,30 \text{ mca}$$

- a carga de pressão máxima

$$H_{\max} = H_{\min} + \Delta H = 8,68 + 3,30 = 11,98\text{mca}$$

j) Dados gerais dos sistema:

- cota do nível d'água na captação = 0 m;
- altura de sucção = 3 m;
- perda de carga no cabeçal de controle = 11 m;
- perdas de cargas eventuais = 1 m;
- rendimento do motor = 96%
- tarifa global média de energia elétrica = 0,04517 R\$/Kwh.
(consumo + demanda)

l) Tubos disponíveis

Tabela 9 - Dados dos tubos disponíveis (SAAD et al., 1994)

Tubulações Tipo	Diâmetro nominal (DN) (mm)	Diâmetro interno (DI) (mm)	Custo anual R\$/m
Ramais	12	9,4	0,0646
	15	17,0	0,1253
	20	21,8	0,1867
Linha de derivação e Rede principal	50	48,1	0,2295
	75	72,5	0,4238
	100	97,6	0,6235

m) No cálculo de perda de carga uniforme nas tubulações foi empregada a fórmula de Blasius ($K = 0,0078$, $m = 1,75$ e $n = 4,75$)

n) O fator multiplicativo das perdas de carga localizada nos ramais é 1,03.

Para facilitar a análise da metodologia proposta foram desenvolvidas, com o auxílio do Programa ProLoc, duas alternativas de projeto otimizado para o sistema. A primeira alternativa manteve a configuração do projeto original de SAAD et al. (1994). O projeto da segunda alternativa teve como base a otimização da configuração e do ponto de alimentação das tubulações das parcelas.

4.1 Alternativa de projeto 1

Na alternativa 1, de acordo com a Figura 11, as parcelas são compostas de 18 ramais conectados em T com uma linha de derivação de 122,5 m. Os ramais das parcelas 1 e 3 medem 255 m, enquanto que os ramais das parcelas 2 e 4 medem 195 m. Os pontos de alimentação d'água das parcelas estão na cota 4,5 m ($3,0 + 0,01 \times 150$).

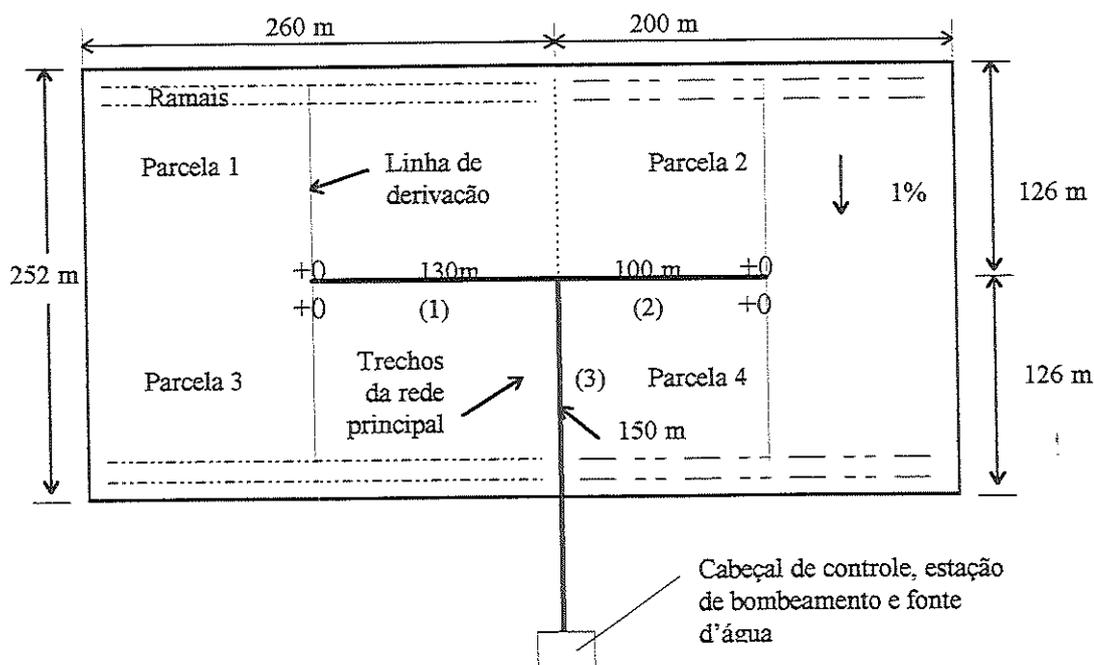


Figura 11 - Esquema de projeto do sistema de irrigação (Saad et al, 1994)

A Tabela 10 apresenta os custos das parcelas da alternativa 1, calculados pelo Programa Parcela, associados com a carga máxima de alimentação das parcelas, de 11,98 mca, e com uma carga 0,1 mca inferior a máxima, de 11,88 mca

Tabela 10 - Custos das parcelas da alternativa 1

Parcelas	Vazão m ³ /h	Custo da parcela em R\$/ano	
		Pressão de alimentação em mca	
		11.98	11.88
P ₁	18,72	609,15	632,40
P ₂	14,40	417,76	420,54
P ₃	18,72	529,14	531,33
P ₄	14,40	369,68	372,06

A Tabela 11 mostra os resultados do processo iterativo de otimização da rede principal do Programa Rede, tendo como variáveis de decisão o diâmetro do rotor da bomba e as cargas de pressão de alimentação das parcelas.

Para facilitar a seleção da bomba e dos rotores, o Programa Rede calcula a altura manométrica mínima do sistema, assumindo em todos os trechos da rede principal os maiores diâmetros selecionados e nos terminais da rede as pressões máximas de alimentação das parcelas. A altura manométrica mínima encontrada na alternativa 1 foi de 29,86 mca.

A bomba selecionada apresenta as seguintes características: Tipo centrífuga, Marca KSB MEGANORM, Modelo 32-160.1 e Rotação 3.500 rpm.

A partir da série de curvas características da bomba (ANEXO C) foram escolhidos os primeiros rotores que atendem a altura manométrica mínima: ϕ 138, ϕ 145 e ϕ 150,

As vazões das unidades operacionais definem nas curvas características de cada rotor o ponto de funcionamento do sistema de cada unidade operacional, determinando a altura manométrica e o rendimento da bomba.

O Programa Rede é um método de busca, de múltiplos estágios, sendo as cargas de pressão de alimentação das parcelas reduzidas, uma a uma, de um passo padrão até que seja encontrado o custo mínimo do sistema. O Programa Rede assume um passo padrão, para cada parcela, igual a um décimo da diferença entre as cargas de pressão de alimentação máxima e mínima estabelecidas para as parcela. Neste estudo foi simulada uma situação de cálculo com passo padrão de 0,1 mca para todas as parcelas.

As parcelas 1 e 3 apresentam um ponto de alimentação comum, nestes casos a redução da carga de pressão de alimentação destas parcelas deve ocorrer simultaneamente, o mesmo acontece com as parcelas 2 e 4.

Tabela 11 - Otimização conjunta rede-parcela da alternativa 1

Rotor \varnothing (mm)	$\frac{H_m \text{ (mca)}}{\eta_b \text{ (\%)}}$		Carga de pressão de alimentação das parcelas em mca				Custos do sistema em R\$/ano		
	Unidades operacionais		Parcela				Rede	Energia	Total
	1 e 3	2 e 4	1	2	3	4	CR = CRP+CRS	CB = CB _c +CB _d	CT
138	30 mca 52 %	33 mca 48 %	11,98	11,98	11,98	11,98	2.134,04	477,54	2.611,58
			11,88	11,98	11,88	11,98	2.157,78	477,54	2.635,32
			11,98	11,88	11,98	11,88	2.138,94	477,54	2.616,48
145	34 mca 52,5 %	36 mca 49 %	11,98	11,98	11,98	11,98	2.077,98	523,75	2.601,73*
			11,88	11,98	11,88	11,98	2.102,27	523,75	2.626,02
			11,98	11,88	11,98	11,88	2.082,88	523,75	2.606,63
150	37,5 mca 53 %	40 mca 50 %	11,98	11,98	11,98	11,98	2.077,98	571,33	2.633,41
			11,88	11,98	11,88	11,98	2.102,27	571,33	2.658,69
			11,98	11,88	11,98	11,88	2.082,88	571,33	2.638,57

* Solução ótima global da alternativa 1

Onde: ϕ é diâmetro de rotor da bomba em mm; H_m e η_b são a altura manométrica e o rendimento da bomba determinados na curva do rotor da bomba, no ponto de funcionamento do sistema, em mca e %; CR é o custo total da rede de tubulações do sistema em R\$/ano, CRP é o custo da rede primária em R\$/ano, CRS é o custo total da redes secundárias (tubulações da parcela) em R\$/ano, CB é custo global da energia de bombeamento em R\$/ano, C_{b_e} é custo do consumo de energia em R\$/ano; C_{B_d} é custo de demanda em R\$/ano e CT é o custo total do sistema em R\$/ano.

4.2 Alternativa de projeto 2

Na alternativa de projeto 2, a configuração geral da rede de tubulações do sistema foi definida a partir do comprimento ótimo dos ramais das parcelas 1 e 3, associado com o menor diâmetro disponível para os ramais, cujo diâmetro interno é de 9,4 mm. Resultando em 46 ramais de 95 m e dimensões de 100 m x 322 m para as parcelas 1 e 3 e, conseqüentemente, 46 ramais de 75 m e dimensões de 80 m x 322 m para as parcelas 2 e 4. As linhas de derivação de todas as parcelas apresentaram um comprimento de 315 m. Foi adotado um layout em H para todas as parcelas, com a otimização do ponto de alimentação das linhas de derivação. A Figura 12 mostra a configuração do sistema da alternativa 2.

A Tabela 12 apresenta os custos das parcelas da alternativa 2 de projeto, calculados pelo Programa Parcela. Para as parcelas 1 e 2 foram analisadas duas situações de carga de pressão de alimentação, 11,98 mca e 11,88 mca. O dimensionamento das parcelas 2 e 4 resultou nos menores diâmetros disponíveis, alcançando portanto a menor carga de pressão de alimentação possível, de 11,65 mca.

Tabela 12 - Custos das parcelas da alternativa 2

Parcela	Vazão m ³ /h	Altura manométrica mca	Custo R\$/ano
P ₁ e P ₃	18,40	11,98	368,58
		11,88	369,75
P ₂ e P ₄	14,72	11,65	295,16

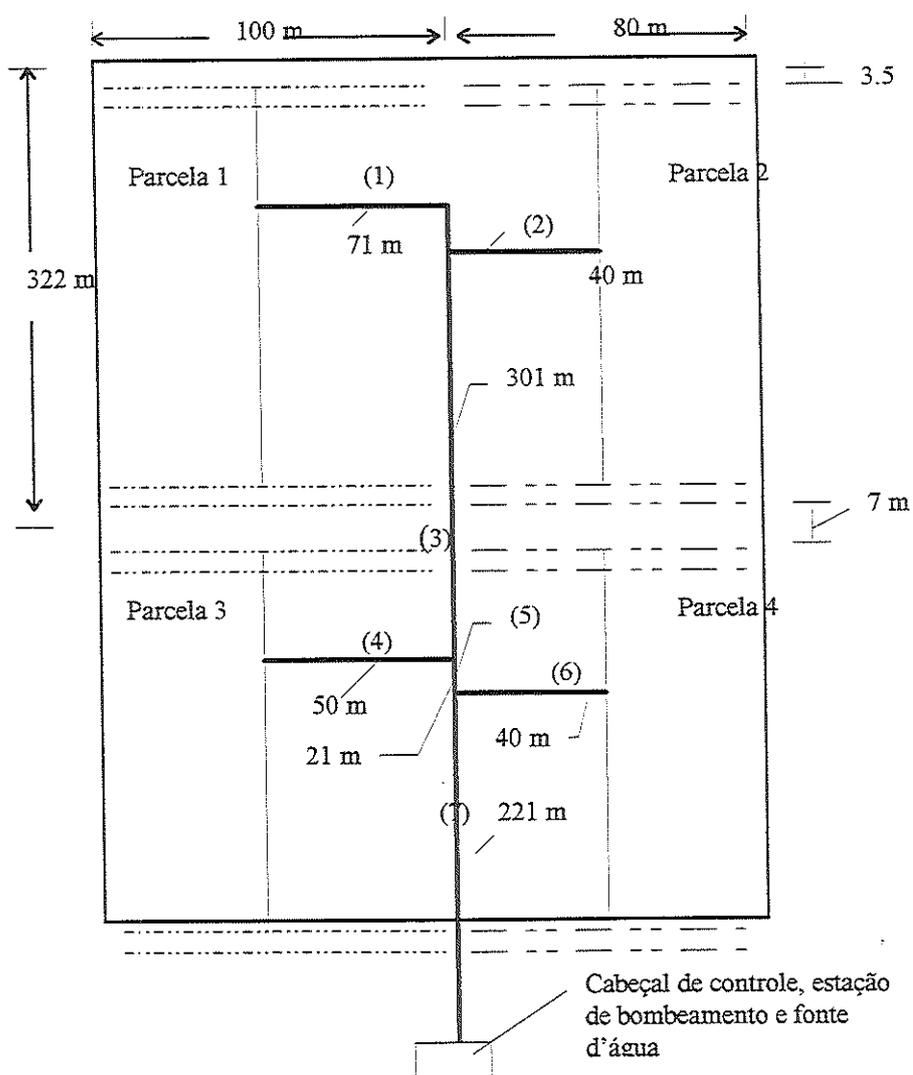


Figura 12 - Esquema de projeto da alternativa 2 do sistema de irrigação

Na alternativa 2 a altura manométrica mínima encontrada foi de 35,57 mca. Foi adotada a mesma bomba da alternativa 1, modelo 32.160.1. Os primeiros rotores da bomba que atendem o limite de altura manométrica são: $\phi 150$, $\phi 157$ e $\phi 162$.

Tabela 13 mostra os resultados do cálculo da rede principal da alternativa 2, com a simulação do processo de otimização do Programa Rede. O dimensionamento da rede primária da alternativa 2 foi condicionado apenas pela pressão de alimentação da parcela 1, dado que, nas parcelas 2, 3 e 4 as pressões de alimentação disponíveis nos terminais da rede superaram as pressões de alimentação das parcelas previamente estabelecidas. Nestes casos, o diâmetro dos ramais da rede que alimentam diretamente estas parcelas é o menor dentre os disponíveis.

Tabela 13 - Otimização conjunta rede-parcela da alternativa 2

Rotor ϕ (mm)	Hm (mca) η_b (%)		Carga de pressão de alimentação das parcelas em mca				Custos do sistema em R\$/ano		
	Unidades operacionais		Parcela				Rede	Energia	Total
	1 e 3	2 e 4	1	2	3	4	CR = CRP+CRS	CB = CB _e +CB _d	CT
150	37,5 mca 53%	40 mca 50%	11,98	11,65	11,98	11,65	1.714,38	572,01	2.286,39
			11,88	11,65	11,98	11,65	1715,96	572,01	2.287,97
157	42 mca 53%	43 mca 50%	11,98	11,65	11,98	11,65	1.654,19	628,42	2.282,61*
			11,88	11,98	11,88	11,98	1.655,78	628,42	2.284,20
162	46 mca	47,5 mca	11,98	11,65	11,98	11,65	1.615,47	681,25	2.296,72
	53,5%	51%	11,88	11,65	11,98	11,65	1.618,23	681,25	2.299,48

* Solução ótima global da alternativa 2

Os resultados detalhados das duas alternativas de projeto estudadas e da solução encontrada por SAAD et al. (1994) são apresentados no Anexo D. Na alternativa de projeto de SAAD et al. (1994) foram mantidos o dimensionamento e as alturas manométricas originalmente estabelecidos. Porém, para possibilitar a análise comparativa, foram adotados rendimentos compatíveis com a bomba selecionada nas alternativas 1 e 2.

5 DISCUSSÃO

O modelo de otimização proposto foi testado em duas situações de projeto de um sistema de irrigação localizada desenvolvido por SAAD et al. (1994) com o auxílio de um modelo de programação linear. A Tabela 14 apresenta uma análise comparativa dos resultados

Tabela 14 - Análise comparativa dos resultados

Alternativas de projeto (i)	Custo da rede R\$/ano			Custo de energia R\$/ano	Custo total R\$/ano	Custo relativo i/3
	Principal	Parcelas	Total			
1	152,25	1.925,73	2.077,98	523,75	2.601,73	1,0058
2	326,71	1.327,48	1.654,19	628,42	2.282,61	0,8825
3*	193,47	1.892,79	2.086,26	500,38	2.586,64	1
2/1	2,1459	0,6893	0,7961	1,1998	0,8773	

* Solução de SAAD et al. (1994)

SAAD et al. (1994) comparou a solução otimizada com um projeto convencional que apresentou um custo, aproximadamente, 38% maior.

A primeira alternativa de projeto estudada manteve a mesma configuração da rede adotada por SAAD et al. (1994) e apresentou-se com um custo total praticamente o mesmo do modelo aplicado por SAAD et al. (1994).

O projeto da segunda alternativa, que teve como base a otimização da configuração e do ponto de alimentação das tubulações das parcelas, apresentou um resultado com redução de 31,07% no custo do conjunto das parcelas do sistema, em relação a primeira alternativa, compensando a elevação dos custos da rede primária (114,59%) e de energia (119,98%), com um custo global de 20,39 % menor, ressaltando a importância da otimização do projeto da parcela na otimização do projeto do sistema.

A análise comparativa dos resultados anteriores refere-se a tarifa de energia global (consumo + demanda) média estabelecida por SAAD et al (1994) de 0,04517 US\$/ano. A análise de sensibilidade do modelo mostrou que o valor da tarifa de energia interfere diretamente no processo de otimização. A Tabela 15 apresenta os valores das tarifas mínimas que tornam mais atrativas as opções de rotores das duas alternativas de projeto estudadas.

Tabela 15 - Tarifas mínimas associadas com as alternativas de projeto

Alternativa		Custo rede		Consumo		Tarifa
i	Rotor	R\$/ano	Diferença	kWh/ano	Diferença	R\$/kWh
1	138	2.134,04	56,06	10.572,06	-1023,03	≥ 0,0548
	145	2.077,98	15,90	11.595,09	-1.053,34	≥ 0,0184
	150	2.062,08		12.648,43		< 0,0184
2	150	1.712,06	57,91	12.663,49	-1.248,84	≥0,0464
	157	1.654,15	38,68	13.912,33	-1.169,58	≥0,0331
	162	1.615,47		15.081,91		<0,0331

Tarifa mínima que torna a alternativa 1 mais atrativa do que a alternativa 2:

$$\text{tarifa} \geq \frac{2.134,04 - 1.712,06}{-(10.572,06 - 12.663,49)} = 0,2018$$

No dimensionamento otimizado das parcelas foi empregado o Programa Parcela do Programa ProLoc.

SAAD et al. (1994) empregaram o software Linear Programming (LP-88) da Eastern Software Product para a otimização do sistema a partir de uma matriz de 418 variáveis e 188 restrições geométricas e de pressão estabelecidas para o problema.

O Programa Rede do Programa ProLoc foi desenvolvido incorporando uma rotina do Método Simplex na otimização da rede principal do sistema. A primeira alternativa de projeto, que corresponde ao estudo de SAAD et al. (1994), envolveu uma matriz com 9 variáveis (3 trechos com 3 opções de diâmetros) e 11 restrições (3 restrições geométricas de comprimentos dos trechos e 8 restrições de pressões nos terminais da rede principal) comprovando a aplicabilidade da metodologia estudada, principalmente para sistemas de grande porte e/ou com uma grande densidade de pontos de emissão.

O algoritmo desenvolvido no Programa Rede compreende um processo iterativo onde as pressões de alimentação das parcelas são as variáveis de decisão da otimização da rede principal. Os resultados da aplicação do modelo para as duas alternativas estudadas mostraram que as pressões de alimentação ótimas são as máximas, dado que o custo marginal das parcelas superou o custo marginal das tubulações dos ramais de alimentação das parcelas.

A partir da análise dos resultados da alternativa 2, detalhados no Anexo D, pode-se concluir, sem a necessidade do processo iterativo, que as pressões máximas

de alimentação das parcelas estão associadas com o custo mínimo, como se verá a seguir, a partir das seguintes considerações:

a) Uma redução de pressão num terminal da rede, que corresponde ao ponto de alimentação das parcelas, implica numa elevação do custo da parcela e uma redução do custo da rede principal. A experiência mostra que uma pequena variação de pressão em um terminal de um rede ramificada modifica preferencialmente o dimensionamento do ramal, último trecho da rede que alimenta os terminais, mantendo constante a pressão no ponto de montante do ramal, dado que uma redução na pressão neste ponto aumentaria o custo dos trechos a jusante deste ponto. Nestes casos uma redução de pressão no terminal só seria vantajosa se e somente se a elevação do custo da parcela fosse compensado pela redução do custo da tubulação do terminal, ou que, o módulo da taxa de variação do custo da parcela (custo marginal) $(\Delta C_p/\Delta H_a)$ com respeito a carga de pressão de alimentação fosse inferior ao módulo do custo marginal da tubulação do terminal $(\Delta C_t/\Delta H_a)$.

Nestes casos:

$$\frac{\Delta C_s}{\Delta H_a} = \frac{\Delta C_p}{\Delta H_a} + \frac{\Delta C_t}{\Delta H_a} > 0 \quad (5.1)$$

Onde: C_s é o custo do sistema, C_p é custo da parcela, C_t é custo das tubulações do trecho e H_a é a carga de pressão de alimentação da parcela.

A taxa de elevação do custo da parcela é igual a relação entre a variação do custo da parcela e a variação de pressão no terminal, como a seguir:

$$\frac{\Delta C_p}{\Delta H_a} = - \left(\frac{C_{p_2} - C_{p_1}}{H_{a_2} - H_{a_1}} \right) \quad (5.2)$$

Uma redução na pressão no terminal está associada com a substituição de um trecho do terminal de comprimento Δx do diâmetro original pelo imediatamente inferior, desta forma a taxa de redução do custo pode ser determinada a partir da seguinte expressão.

$$\frac{\Delta Ct}{\Delta Ha} = \frac{(c_2 - c_1)\Delta x}{(J_2 - J_1)\Delta x} = \frac{c_2 - c_1}{J_2 - J_1} \quad (5.3)$$

b) As parcelas 2, 3 e 4 apresentaram diâmetros nos ramais da rede principal mínimos, conforme resultados detalhados nos anexos D, portanto, as pressões máximas adotadas originalmente para estas parcelas são as ótimas, dado que uma redução na pressão de alimentação apenas poderá elevar o custo das parcelas. Neste caso, o dimensionamento da rede primária da alternativa 2 foi condicionado apenas pela pressão de alimentação da parcela 1, dado que, nas parcelas 2, 3 e 4 as pressões de alimentação disponíveis nos terminais da rede superaram as pressões de alimentação das parcelas, previamente estabelecidas.

c) Com os dados dos custos das parcelas da Tabela 12 pode-se determinar o custo marginal da parcela 1:

$$\frac{\Delta Cp}{\Delta Ha} = -\left(\frac{Cp_2 - Cp_1}{Ha_2 - Ha_1}\right) = -\left(\frac{369,75 - 368,58}{11,88 - 11,98}\right) = 11,70 \quad (5.4)$$

d) O ramal da rede principal que alimenta a parcela 1 corresponde ao trecho 1 e apresentou-se com um diâmetro de 72,5 mm. Neste caso, de acordo com o Quadro 8, o custo marginal de redução de diâmetro de 72,5 mm para 48,1 mm para o trecho 1 é de:

$$\frac{\Delta Ct}{\Delta Ha} = -1,58 \quad (5.5)$$

Como o custo marginal da parcela 1 superou, em módulo, o custo marginal da tubulação do ramal 1, pode-se concluir que a pressão máxima de alimentação da parcela 1 corresponde a pressão ótima.

Tabela 16 - Custo marginal de mudança de diâmetro no trecho 1

Diâmetro i	mm	Custo (R\$/ano)/m	$(C_i - C_{i+1})$ (R\$/ano)/m	J* m/m	$J_i - J_{i+1}$	$\frac{\Delta C_t}{\Delta H_a} = -\left(\frac{C_i - C_{i+1}}{J_i - J_{i+1}}\right)$
1	48,1	0,2295	-0,1943	0,1429	0,1226	-1,58
2	72,5	0,4238	-0,1997	0,0203	0,0153	-13,05
3	97,6	0,6235	-	0,0050	-	

* Fórmula de Blasius ($K=0,00078$, $m=1,75$ e $n=4,75$) e $Q = 0,0052 \text{ m}^3/\text{s}$

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo da pesquisa consistiu na formulação de uma metodologia geral de otimização do projeto de sistemas de irrigação localizada, adequada ao desenvolvimento de um modelo computacional próprio para ser aplicado as situações mais freqüentes de projeto de sistemas de irrigação localizada. Neste contexto, o Programa ProLoc atendeu bem a este propósito, constituindo-se dos programas Agro, Parcela e Rede que, a partir de um processo interativo, reproduziram bem o andamento normal de projeto.

O Programa Parcela facilitou bastante a otimização do projeto das parcelas, determinando o comprimento ótimo dos ramais e os pontos de conexão das tubulações.

O Programa Rede, emprega uma rotina do Método Simplex no dimensionamento da rede principal do sistema, constituindo-se de um processo iterativo que envolve a otimização conjunta da rede principal e das parcelas. As pressões de alimentação das parcelas são as variáveis de decisão do processo de otimização, reduzindo bastante o problema do cálculo da rede principal, facilitando a aplicação da metodologia estudada, principalmente para sistemas de grande porte ou com uma grande densidade de pontos de emissão.

Os resultados da aplicação do modelo, para as duas alternativas estudadas, mostraram que as pressões máximas de alimentação das parcelas são as ótimas, dado

que o custo marginal das parcelas superou amplamente o custo marginal das tubulações dos ramais de alimentação das parcelas.

O modelo computacional do estudo reproduziu um projeto desenvolvido totalmente com o auxílio de um pacote de programação linear, encontrando praticamente os mesmos resultados.

O projeto da segunda alternativa, que teve como base a otimização da configuração e do ponto de alimentação das tubulações das parcelas, apresentou um resultado significativamente menor do que o resultado da primeira alternativa, ressaltando a importância da otimização do projeto da parcela na otimização do projeto do sistema.

A análise de sensibilidade do modelo mostrou que o valor da tarifa de energia interferiu diretamente no processo de otimização, principalmente ao nível da seleção do rotor ótimo.

A aplicação do modelo estudado restringiu-se ao projeto da rede hidráulica do sistema. Para a otimização global do sistema deve-se incorporar na análise os outros fatores que interferem diretamente no custo global (instalação e manutenção) dos sistemas de gotejamento, tais como: o tipo de emissor, a vazão do emissor e o número de emissores por planta que interferem diretamente no tempo de aplicação e no número de unidades operacionais, o tempo disponível para a irrigação e o coeficiente de uniformidade do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILERA, L. T. *Análisis hidráulico en una tubería con salidas múltiples y su aplicación a un sistema de riego por goteo*. Secretaria de Recursos Hidráulicos, Mexico, 1972.
- ALLEN, R. G. & BROCKWAY, E. *Concept for energy-efficient irrigation system design*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, 110(2),99-106, 1984.
- ALPEROVITS, E. & SHAMIR, U. *Design of optimal water distribution system*. Water Resources, Vol. 13, n. 6, 1977.
- BENAMI, A. & OFEN, A. *Irrigation engineering*. Faculty of Agricultural Engineering Technion - Israel Institute of Technology. Haifa, 1984.
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 4. ed. Viçosa. UFV. Impr. Univ., 1987.
- BHAVE, R. *Selecting pipe sizes in network optimization by LP*. Journal of Hydraulics Division, ASCE. August, 1979.
- BUSTOS, D. *Modelo de optimización para riego por goteo*. Chillán, 63p. (Graduación-Universidad de Concepción), 1988.

- CARVALHO et al. *Optimizacion del manejo del riego a nivel predial - uso de funciones de produccion y programacion linear*. Artigo apresentado no XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 1995.
- CASE, K. E. & WHITE, J. A. *A linear programming formulation of a water supply problem*. Transactions of the American Institute of Industrial Engineers, 4(2):85-91, 1972.
- CHRISTIANSEN, J. E. *Irrigation by Sprinkling*. Berkeley, California, EUA, 1942.
- DENÍCULE W., RAMOS, M. M. e MARTINEZ, M. A. *Máximo Comprimento das Linhas Laterais de Irrigação, Usando o conceito de vazão fictícia II: Linhas em Desnível*. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Anais. Ilhéus - Ba. Brasil. v. 19 p 2803-2821, 1993.
- GILLESPIE, Y. A., PHILLIPS, A. L. e WU, I-Pai. *Drip irrigation design equations*. JIDD, ASCE, IR3, 1979.
- GOERING, L. D. *Optimization of trickle irrigation system design*. Fort Collins, 90p (M.S - Colorado Sate University), 1976.
- GOMES, H. P. *Dimensionamento Optimo del Conjunto Red Coletiva y Privadas del Riego por Aspersión*. Tese de Doutorado. Universidade Politécnica de Madri. Madri, Espanha, 213 p., 1992.
- Idem. *Engenharia de Irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento*. Editora Universitária/UFPB, João Pessoa, 1994.
- GRANADOS, A. *Infraestructura de Regadios - redes coletivas de riego a presion. Servicio*. I.S.B.N - Universiade Politécnica de Madrid. Madrid, 1986.

- GUIMARÃES Jr, J. *Dimensionamento Econômico de uma Parcela de Irrigação por Gotejamento*. - Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil. 158 p., 1993.
- GUIMARÃES Jr, J. A. SRINIVASAN V. S. *Dimensionamento Econômico de uma Parcela de Irrigação por Gotejamento*. - XVI Congresso Latinoamericano de Hidraulica. Anais, V. 4. Santiago, Chile. p. 334-345, 1994.
- GUIMARÃES Jr, J. A. & MATTOS, A. *Programa DPG: Dimensionamento de uma parcela de gotejamento*. XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Anais. Viçosa, MG, Brasil. p 281, 1995.
- GUPTA, I.; HASSAN, M. Z. e COOK, J. *Linear programming analysis of a water supply points*. Transactions of the American Institute of Industrial Engineers, 4(3);200-4, 1972.
- HOLZAPFEL, E. A.; MARINÑO, M. A. e VALENZUELA, A. *Drip Irrigation Nonlinear Optimization Model*. JIDD, ASCE, vol. 116, no 4 p. 479-495, 1990.
- KARMELI, D. et al. *Design of optimal water distribution network*. Journal of the Pipeline Div. ASCE, vol 94, No PLI, Proc. Paper 6130, 1968.
- KARMELI, D. & ORON, G. *Analysis of closed conduit irrigation system and its subdivision*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, 105(2): p 187-196, 1979.
- KELLER, J. *Selection of economical pipe sizes for sprinkler irrigation systems*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 8(2). p 186-193, 1965.

- KELLER, J. & KARMELI, D. *Trickler Irrigation Design*. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 133 p., 1975.
- LOPEZ, J. R. et al. *Riego Localizada*. IRYDA. Madri. Espanha. p. 217-328, 1992.
- LUCAS FILHO, M. *Metodologia de Optimizacion de Rede Coletivas Ramificadas de Riego a Pression que Consideren el Timbraje como Variable Intrinseca de proceso*. Tese de Doutorado. Universidade Politécnica de Madri. Madri, Espanha, 1991.
- MAIA, L. A. F. *Desenvolvimento de um Software para Auxiliar no Dimensionamento e Manejo da Irrigação Localizada*. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP, São Paulo. 157 p., 1994.
- MATTOS, A. NUEVO, F. A. S. *Software "DIMLOC-EXE" para dimensionamento hidráulico em sistemas de irrigação localizada*. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Campinas - SP, Brasil., 1994.
- OLITTA, A. F. *Os Métodos de Irrigação*. São Paulo. Nobel, 1984.
- ORON, G. *Technical and economic considerations in the design of closed conduit irrigation system: a case study*. Agricultural Water Management, Amsterdam, 5(1):15-27, 1982.
- ORON, G. & KARMELI, D. *Procedure for the economical evaluation of water network parameters*. Water Resources Bulletin, Urbana, 15(4): p 1050-60, 1979.
- ORON, G. & KARMELI, D. *Solid set irrigation system design using linear programming*. Water Resources Bulletin, Urbana, 17(4). p 565-70, 1981.

- ORON, G. & WALKER, W. R. *Optimal design and operation of permanent irrigation systems*. Water Resources Bulletin, Washington, 17(1): 11-7, 1981.
- PACO, J. L. *Fundamentos del Calculo Hidraulico en los Sistemas de Riego y Drenaje*. Ministério da Agricultura, Pesca e Alimentos, Castellón, Espanha, 1989.
- PEROLD, R. *Design of Irrigation Pipe Laterals with Multiple Outlets*. JIDD, ASCE, IR2, jul-1977. p.179-193, 1977.
- PIZARRO, F. *Riegos Localizados de Alta Frecuencia*. 2ª Edição. Ediciones Mundi-Prensa. Madri, Espanha, 1990.
- PUCCINI, A. L. & PIZZOLATO, N. D. *Programação Linear*. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora SA. Rio de Janeiro, 1987.
- ROBINSON, B. & AUSTIN, A. *Cost optimization of rural water systems*. Journal of Hydraulics Division, ASCE. Proc. Paper 12301, 1976.
- SAAD, J. C. *Otimização de Sistemas de Irrigação Localizada Utilizando Programação Não-Linear*. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP, São Paulo, 114 p., 1993.
- SAAD, J. C. C. et al. *Otimização da Rede Hidráulica de um Sistema de Irrigação por Gotejamento*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.29, n.5 p. 797-805, 1994.
- SAAD, J. C. C. & FRIZZONE J. A. *Design and Management Optimization of Trickle Irrigation Systems using Non-linear Programming*. J. agric. Engng Res. 64, p 109-118, 1996

- SAN JUAN, J. A. M. *Riego por Goteo - Teoria y Prática*. Ediciones Mundi-Prensa, Madri, Espanha, 1988.
- SANTANA, G. C. *Dimensionamento de sistemas de irrigação pressurizados por custo mínimo*. Artigo apresentado no XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 1995.
- SCALOPPI, E. J. *Coefficientes para o cálculo da perda de carga de pressão em tubulações com múltiplas derivações*. VII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Anais, Brasília, v.3, p. 1037-48, 1986.
- SRINIVASAN, V. S. & GUILMARÃES Jr. J. A. *Criteria for the economic design of a sub-unit of a trickle irrigation system*. Hydraulic Engineering Software VI. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, p. 173-182, 1996.
- TELLES, D. D. *Irrigação por gotejamento: subsídios para sua utilização*. Boletim Técnico DAEE, São Paulo, Brasil, v.5, n.1, p. 1-127, 1982.
- Idem. *Métodos de irrigação - elaboração de projetos de irrigação*. Programa Nacional de Irrigação, Brasília, 1986.
- Idem. *Equipamentos: Características, Operação e Manutenção. Elaboração de Projetos de Irrigação*. Programa Nacional de Irrigação, Brasília, 1986.
- WU, I-Pai & GITLIN, H. M. *Hdraulics and Uniformity for Drip Irrigation*. JIDD, ASCE, v. 101, 1975.

ANEXO A: MÉTODO SIMPLEX

O Método SIMPLEX é um algoritmo de busca que se move ao longo dos vértices da região factível, definida pelo conjunto de soluções viáveis do problema, até encontrar a solução ótima.

Quando o conjunto de restrições formam uma região poliedral convexa limitada, o problema de programação linear apresenta-se com solução factível, com a função-objetivo assumindo um valor máximo e/ou mínimo nos vértices desta.

O método Simplex é um procedimento matricial que resolve o modelo de programação linear na forma padrão.

a) Forma padrão da programação linear

A forma padrão de um problema de programação linear apresenta o conjunto de restrições definidas por igualdades.

$$\text{maximizar } f = c \cdot x$$

$$\text{sujeito a } A \cdot x = b$$

$$x \geq 0$$

Sendo que:

f = valor da função-objetivo,

m = número de restrições,

n = número de variáveis de decisão,

$c = c^{1 \times n}$ = vetor linha dos custos (lucros),

$x = x^{n \times 1}$ = vetor coluna das variáveis de decisão,

$A = A^{m \times n}$ = matriz dos coeficientes das equações de restrições,

$b = b^{m \times 1}$ = vetor coluna dos termos independentes das restrições.

b) Transformações de um problema geral para a forma padrão

I - Problema de minimização

$$\min f = \max (-f)$$

II - Termo independente negativo, $b_i < 0$

$$-(a^i \cdot x) = b_i$$

Sendo que:

i = índice de uma linha da matriz dos coeficientes das restrições,

a^i = vetor linha i da matriz dos coeficientes das restrições,

b_i = termo independente da restrição i .

III - Variáveis de folga nas equações de restrições

A passagem para a forma padrão se faz com a introdução de variáveis de folgas nas restrições.

$$a^i \cdot x + t \cdot x_{n+i} = b_i$$

Sendo que:

- : $t = 1$ para as desigualdade do tipo \leq ,
 $t = -1$ para as desigualdades do tipo \geq ,
 $n =$ número de variáveis

IV - Variáveis livres

As variáveis livres podem assumir valores positivos, negativos ou nulos. Nestes caso a variável, x_k , é substituída por duas variáveis auxiliares:

$$x_k = x_k' - x_k''$$

c) Forma canônica

O algoritmo do método simplex requer, sempre, a apresentação do problema, em qualquer estágio, na forma canônica, que corresponde a uma solução básica factível, onde: os coeficientes de custos das variáveis básicas na função-objetivo são nulos e cada equação de restrição deve apresentar um variável básica com coeficiente 1 e coeficientes 0 para as variáveis básicas restantes.

$$f = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n + 0 \cdot x_{n+1} + 0 \cdot x_{n+2} + \dots + 0 \cdot x_{n+m}$$

$$a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + \dots + a_{1,n}x_n + 1 \cdot x_{n+1} + 0 \cdot x_{n+2} + \dots + 0 \cdot x_{n+m} = b_1$$

$$a_{2,1}x_1 + a_{2,2}x_2 + \dots + a_{2,n}x_n + 0 \cdot x_{n+1} + 1 \cdot x_{n+2} + \dots + 0 \cdot x_{n+m} = b_2$$

.

.

$$a_{m,1}x_1 + a_{m,2}x_2 + \dots + a_{m,n}x_n + 0 \cdot x_{n+1} + 0 \cdot x_{n+2} + \dots + 1 \cdot x_{n+m} = b_m$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

Nestes casos, a solução básica factível em qualquer estágio é sempre óbvia, dado que as variáveis não básicas assumem valores nulos, isto é:

$$x_{n+1} = b_1$$

$$x_{n+2} = b_2$$

.

.

$$x_{n+m} = b_m$$

d) Solução básica factível inicial

Quando o conjunto de restrições é formado apenas por inequações do tipo \leq as variáveis de folga representam uma base factível inicial. Quando isto não ocorre, pode-se recorrer ao auxílio de variáveis artificiais para as restrições do tipo \geq e $=$, com coeficientes de custos apropriados (nos casos de maximização empregam-se coeficientes negativos com um módulo significativamente grande em relação aos

restantes das variáveis não artificiais) para garantir a exclusão destas variáveis da solução ótima do modelo.

e) Tipos de problemas

Os problemas de PL podem ser factíveis (admitindo soluções) ou infactíveis, no caso de sistemas de restrições incompatíveis. As soluções factíveis podem se apresentar como: única ou múltiplas (soluções ideais) ou ilimitadas.

f) Dual

A cada modelo de PL original, denominado primal, corresponde um outro modelo, denominado dual, onde: o vetor b do primal representa o vetor custo do dual, o vetor de custo do primal passa a ser o vetor dos termos independentes do sistema de restrições e a matriz de coeficientes do dual é determinada pela transposta da matriz de restrições do primal.

O modelo Primal:

$$\begin{aligned} \max(\min) \quad & f = c \cdot x \\ \text{sujeito a} \quad & A \cdot x = b \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

O modelo Dual:

$$\begin{aligned} \min(\max) \quad & g = b \cdot x \\ \text{sujeito a} \quad & A^T \cdot x = c \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

Propriedades básicas da dualidade:

I - A maximização do primal corresponde a minimização do dual, ou o inverso.

II - O dual e o primal apresentam a mesma solução ótima quando admitem soluções factíveis.

III - Se um dos problemas tem solução ilimitada, o outro será infactível.

IV - As restrições \leq no primal são convertida em \geq no dual ou o inverso.

V - As restrições de igualdade no primal são transformadas em restrições com variáveis livres no dual.

g) Algoritmo do Simplex para um problema de maximização

Supondo Consistência, não redundância e conhecida uma base inicial factível:

1 - Transformar o problema para a forma canônica, eliminando os coeficientes de custos das variáveis básicas:

$$P/j=1 \dots n$$

$$C(j) = c(j) - z(j) = c(j) - \sum_{i=1}^m a(i, j) \times c[s(i)]$$

$C(j)$ = coeficientes de custos da função-objetivo transformada para a forma canônica;

$s(i)$ = índice da variável básica da restrição i ;

2 - Verificar se a base factível atual é ótima.

Enquanto existir um índice j tal que $C(j) > 0$ ir para 3 se não a solução é ótima:

2.1 - Encontrar os valores das variáveis básicas ótimas;

$$p/i=1\dots m$$

$$X[s(i)] = b(i)$$

2.2 - Calcular o valor da função-objetivo e fim

$$f = \sum_{i=1}^m b(i) \times c[s(i)]$$

3 - Determinar a variável não básica que deve entrar na base.

$$p/j = 1\dots n$$

$$s = j \text{ tal que } C(s) = \text{máximo } \{C(j)\}$$

$$s = \text{índice da variável básica a entrar na base}$$

4 - Determinar a variável básica a sair da base.

$$p/i = 1\dots m$$

$$r = i \text{ tal que } \Theta = b(r)/a(r,s) = \text{mínimo } \{b(i)/a(i,s)\} \text{ e } a(i,s) > 0$$

$$r = \text{índice da variável básica a sair da base}$$

5 - Encontrar a nova solução básica factível (por pivotamento) e voltar a 1.

$$\text{pivô} = a(r,s)$$

6 - Dividir os elementos da linha r e do vetor b por $a(r,s)$;

$$p/j = 1 \dots n$$

$$a(r,j) = a(r,j) / a(r,s)$$

$$b(r) = b(r) / a(r,s)$$

$p/i = 1 \dots m$, com $i \neq r$ e $p/j = 1 \dots n$, fazer:

$$b(i) = b(i) - b(r) \times a(i,s)$$

$$a(i,j) = a(i,j) - a(r,j) \times a(i,s)$$

Casos especiais:

- Empate na entrada: toma-se a decisão arbitrariamente.
- Empate na saída: variável na base com valor zero, degeneração (soluções múltiplas), toma-se a decisão arbitrariamente.

Tableau do Simplex

$i \setminus j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	c_i	$c(1)$	$c(2)$	$c(s)$	$c(n)$	0	0	0	f	
2	Variáv. Básicas	P1	P2	Ps.	Pn.	$P(n+1)$.	$P(n+m)$	b	\ominus
3	$X(n+1)$	$a(1,1)$		$a(1,s)$		1			$b(1)$	$b(1)/a(1,s)$
4	.									
5	$X(r)$	$a(r,1)$		$a(r,s)^*$					$b(r)$	$b(r)/a(r,s)$
6	.									
7	$X(n+m)$			$a(m,s)$				1	$b(m)$	$b(m)/a(m,s)$
8	z_j									
9	$c_j - z_j$	$C(1)$		$C(s)$		$C(n+1)$		$C(n+m)$		

* Pivô

Linhas: 1 - Coeficientes de custos;
3 a 7 - Restrições;
9 - Coeficientes de custos da solução canônica;

Colunas: 1 - Variáveis básicas;
2 a 8 - Matriz dos coeficientes das restrições;
9 - Termos independentes
10 - Variável de teste

h) Sub-rotina de programação linear

A sub-rotina de programação linear do Programa Rede baseou-se no programa apresentado por PUCCINI & PIZZOLATO (1987) desenvolvido para a solução de problemas de programação linear de pequeno porte.

O porte máximo do problema aceito pelo programa é estimado em um sistema com cerca de trinta trechos, o que corresponde a uma matriz A dos coeficientes de entrada da sub-rotina de programação linear com dimensões (100x150), atendendo a uma grande faixa de problemas. A matriz A tem um número de linhas igual a C+2 e o número de colunas igual a C+V+1, onde C corresponde ao número de restrições e V ao número de variáveis.

O programa resolve diretamente problemas de minimização, aceitando restrições de desigualdade, com a relação \leq (menor ou igual) representada pelo coeficiente 1, e a relação \geq (maior ou igual) representada pelo coeficiente -1.

O problema apresenta restrições hidráulicas, tipo \leq , associadas com as perdas de cargas nas tubulações e restrições geométricas de igualdade, associadas com os comprimentos das tubulações. As restrições de igualdade são transformadas em duas restrições de desigualdade, uma de \leq e a outra de \geq .

Para evitar problemas infactíveis, os dados de entrada das alturas manométricas são comparados com os valores mínimos possíveis associados com os maiores diâmetros selecionados em cada trecho.

Elementos da matriz do simplex da solução ótima da alternativa 1

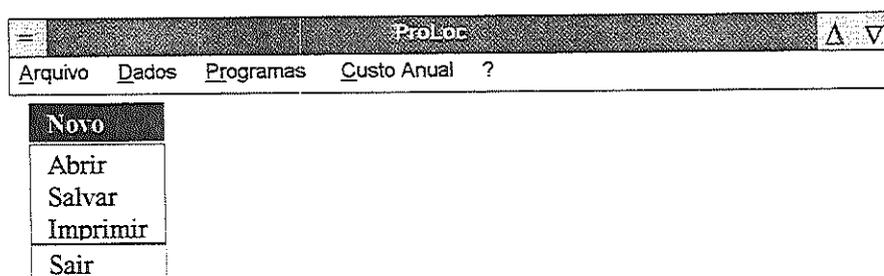
Variáveis	Coeficientes									Tipo de restrição	Termo independente
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉		
Cof. Custos	0,2295	0,4238	0,6235	0,2295	0,4238	0,6235	0,2295	0,4238	0,6235		
Restrições geométricas	1	1	1							1	130
	1	1	1							-1	130
				1	1	1				1	100
				1	1	1				-1	100
							1	1	1	1	150
							1	1	1	-1	150
Restrições hidráulicas	0,142	0,020	0,004				0,142	0,020	0,004	1	5,20
				0,090	0,012	0,003	0,090	0,012	0,003	1	7,20
	0,142	0,020	0,004				0,142	0,020	0,004	1	5,20
				0,090	0,012	0,003	0,090	0,012	0,003	1	7,20

ANEXO B: PROGRAMA PROLOC

1.0 - Programa ProLoc

O Programa **ProLoc**, desenvolvido com o auxílio do Programa Visual Basic da Microsoft, foi idealizado para, no ambiente Windows, elaborar projetos otimizados de sistemas de irrigação localizada.

O menu **Arquivo** da barra de menu permite abrir (**A**brir) e salvar (**S**alvar) os arquivos dos dados gerais e imprimir (**I**mprimir) os dados do Programa **ProLoc**.



A entrada dos dados de identificação e das características gerais do projeto é via menu **Dados** da barra de menu.

A opção **Tubos** do menu **Dados** acessa o banco de dados de tubos do Programa **ProLoc**.

=		ProLoc		△	▽
Arquivo	Dados	Programas	Custo Anual	?	

IdentificaçãoCaracterísticasTubosSair

IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO			
Projeto	Alternativa 1		
Proprietário	Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento da EESC-USP		
Localização	São Carlos, SP (Projeto hipotético)		
Descrição	Sistema de irrigação por gotejamento para uma área de 11,5 ha cultivada com citrus.		
Elaboração do Projeto			
Empresa	EESC - USP		
Responsável Técnico	João Abner Guimarães Jr.	CREA	
Local	São Carlos, SP	Data	02/01/98

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

Tipo de Irrigação

Tipo de Emissor

Área do Terreno

Cultura

Manejo da Irrigação

Período Anual

horas/dia

Total de Unidades Operacionais

Tipo de Controle

Água de Suprimento

Fonte

Qualidade

Disponibilidade

Energia Disponível

Tipo

Disponibilidade

Tipo: Marca: Classe:

Tabela 1: Linha de Tubos

	Diâm. Nom. mm	Diâm. Int. mm	Custo \$/m
1	35	35.7	.1501
2	50	48.1	.2295
3	75	72.5	.4238
4	100	97.6	.6235
5	125	120	.85
6	150	144	1.1032
Novo			

Tabela 2: Tubos selecionados

	Diâm. Nom. mm	Diâm. Int. mm	Custo \$/m

Regressão Linear: custo x diâmetro

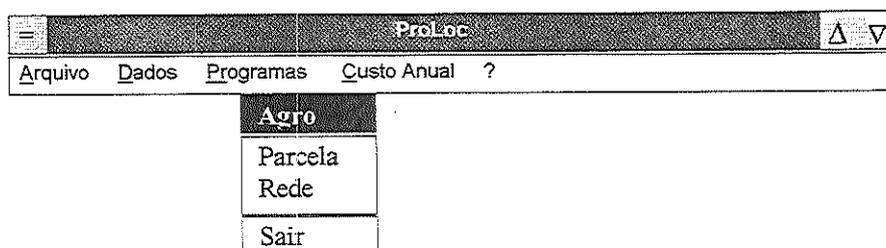
Coefficiente angular

Coefficiente linear

Coefficiente de correlação

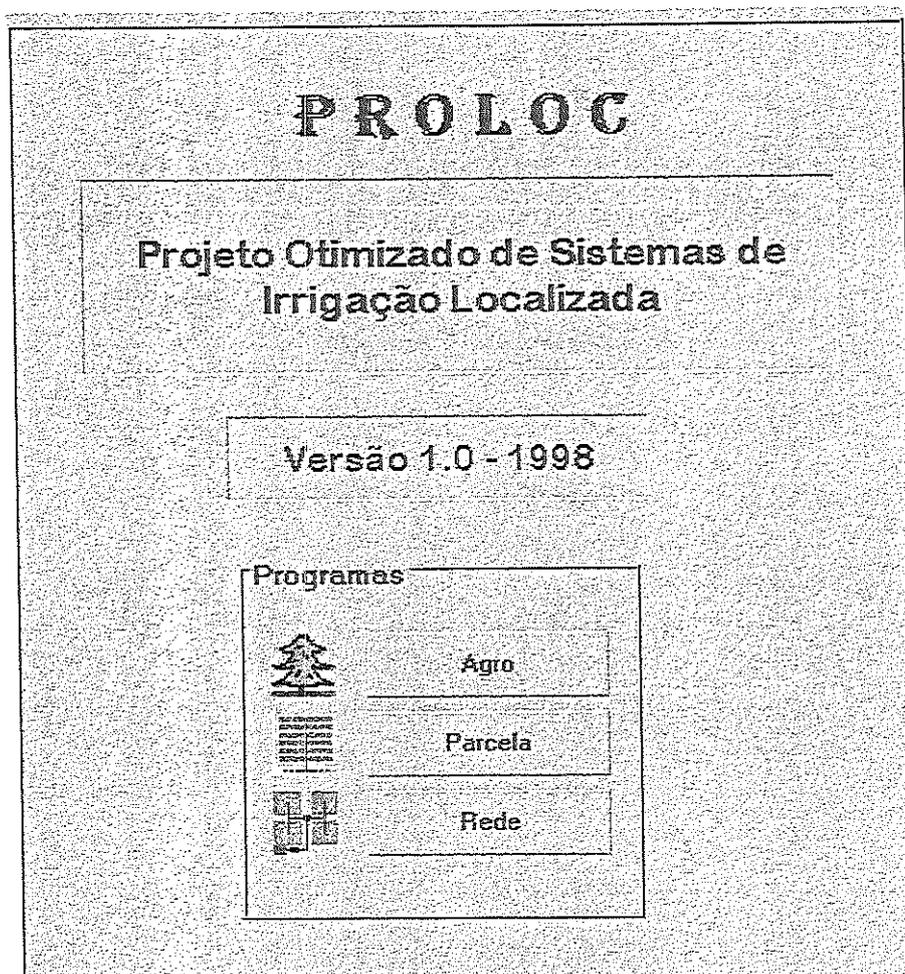
O **Programa ProLoc** constitui-se de um gerenciador de três programas básicos: os programas **Agro**, **Parcela** e **Rêde**, que, de uma maneira interativa, cobrem todas as etapas de cálculo de projeto.

Os programas podem ser executados a partir do menu **Programas** da barra de menu do **ProLoc**.



A opção **Custo Anual** é uma ferramenta que calcula o custo anual dos equipamentos auxiliando na entrada dos programas **Parcela** e **Rede**.

Os programas são acessados diretamente a partir da tela inicial do **ProLoc**, apertando-se o botão do mouse com o cursor na caixa correspondente



2.0 - Programa Agro

O projeto agrônômico do sistema é elaborado com o auxílio do **Programa Agro** a partir de um cálculo interativo envolvendo as variáveis de projeto, reunidas em 4 grupos de variáveis diretamente inter-relacionadas: **Água** (dados do consumo da cultura), **Emissor** (características hidráulicas dos emissores), **Parcela** (limites de pressão da sub-unidade de irrigação) e **Manejo** (elementos do controle do processo de irrigação).

O acesso aos grupos de variáveis é via menu **Dados** na barra de menu do **Programa Agro** ou diretamente apertando-se o botão do mouse com o cursor no botão correspondente da caixa **Dados**.

Unidade		Dados			
Parcelas 1 e 2		Água	Emissor	Parcela	Manejo
Dados Relação Água-Solo-Planta					
Seleção	Variáveis	Cálculo	Dados		
<input type="radio"/>	Tipo de Cultura	<input type="checkbox"/>	Citrus		
<input type="radio"/>	Consumo em mm/dia	<input type="checkbox"/>	1.846		
<input type="radio"/>	Água no Solo em mm	<input type="checkbox"/>	97.2		
<input type="radio"/>	Déficit Hídrico em %	<input type="checkbox"/>	9.496		
<input type="radio"/>	Lâmina Líquida em mm	<input type="checkbox"/>	9.23		
<input type="radio"/>	Turno de Rega em dias	<input type="checkbox"/>	5		
<input type="radio"/>	Espaç. entre Plantas em m	<input type="checkbox"/>	5		
<input type="radio"/>	Espaç. entre Fileiras em m	<input type="checkbox"/>	7		
Parâmetros			Dados		
 Agro					

Os dados podem ser diretamente digitados na caixa de dados correspondente.

As variáveis são determinadas apertando-se o botão do mouse com o cursor no botão **Cálculo** correspondente. O botão **Seleção** desabilita as variáveis que não estão diretamente relacionadas com a variável a ser calculada.

O **Programa Agro** também apresenta cálculos auxiliares envolvendo parâmetros relacionados com o armazenamento de água no solo, o consumo da cultura e a eficiência de irrigação.

O coeficiente de uniformidade pode ser determinado a partir das características do sistema, do terreno e do clima.

Unidade Parcelas 1 e 2		Dados <input type="button" value="Água"/> <input type="button" value="Emissor"/> <input type="button" value="Parcela"/> <input type="button" value="Manejo"/>	
Dados Relação Água-Solo-Planta			
Seleção	Variáveis	Cálculo	Dados
<input checked="" type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Água no Solo em mm Déficit Hídrico em % Lâmina Líquida em mm	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="text" value="57.0"/> <input type="text" value="7.84"/> <input type="text" value="97.2"/> <input type="text" value="9.496"/> <input type="text" value="9.23"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
 Agro	Cálculo auxiliar		Dados
	Capacidade de campo em % Ponto murcha perman. em % Densid. aparente em g/cm ³ Profund. radicular em mm	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="21"/> <input type="text" value="12"/> <input type="text" value="1.2"/> <input type="text" value="900"/>

O menu Arquivo da barra de menu do Programa Agro permite abrir (Abrir) e salvar (Salvar) os arquivos de dados e imprimir (Imprimir) os dados do Programa Agro.

3.0 - Programa Parcela

O Programa Parcela dimensiona as tubulações de uma parcela (sub-unidade de rega), minimizando os custos de instalação com base nos seguintes fatores de

otimização: o comprimento dos ramais, a identificação dos pontos de conexão e a distribuição da perda de carga nas tubulações (ramais e a linha de derivação).

O cálculo deve ser iniciado com a entrada dos dados da parcela, a partir do botão **Dados** da janela **Opções** ou via opção **Abrir** do menu **Arquivo** da barra de menu do **Programa Agro**.

Os dados foram agrupados em 4 blocos (Modelo, Sistema, Terreno e Tubulações), com acesso a partir da caixa **Dados**. O botão **Modelo** conduz à entrada dos parâmetros das fórmulas das perdas de cargas, uniforme e localizada. O botão **Sistema** acessa os dados associados com a funcionalidade do sistema. As informações do terreno entram via botão **Terreno** e os dados das tubulações selecionadas via botão **Tubulação**.

The screenshot displays the software's data entry interface. At the top, the 'Unidade' field is set to 'Parcela 1'. The 'Opções' panel includes buttons for 'Dados', 'Formatar', and 'Dimensionar'. The 'Dados' panel features buttons for 'Modelo', 'Sistema', 'Terreno', and 'Tubulação'. The detailed 'Dados' window shows the 'Modelo Hidráulico' section with 'Perda de Carga Uniforme' selected. The 'Blasius' dropdown is set to 'Blasius'. The 'Fórmula da Perda de Carga Uniforme' section lists 'Fórmula de Blasius' and 'Tubos lisos', with input fields for 'K (Coeficiente)', 'm (expoente da vazão)', and 'n (expoente do diâmetro)'. The 'Dados' section on the right contains three input fields with values: '.00078', '1.75', and '4.75'.

Unidade
Parcela 1

Opções

Dados

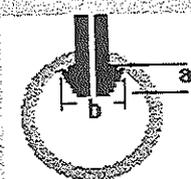
Dados

Modelo Hidráulico
 Perda de Carga Uniforme
 Perda de Carga Localizada

Fator perda localizada

Fator de perda localizada

Tipo de conexão
 Interlinha
 Sobre linha
 Integrado
 Com prolongamento



	Tamanho mm	
	a	b
<input checked="" type="radio"/> Pequeno	5	3,5
<input type="radio"/> Médio	5	5
<input type="radio"/> Grande	5	7,5

Unidade
Parcela 1

Opções

Dados

Dados

Dados Gerais do Sistema	Dados
Layout da tubulações	<input type="text" value="1"/>
Vazão do emissor em l/h	<input type="text" value="20"/>
Pressão mínima em mca	<input type="text" value="8.68"/>
Pressão máxima em mca	<input type="text" value="11.98"/>
Espaç. emissores ramais em m	<input type="text" value="5"/>
Espaç. fileiras de plantas em m	<input type="text" value="7"/>
Número de ramais por fileira	<input type="text" value="1"/>

Unidade Opções

Dados

Ramais

Opção
 Atualizar
 Mostrar

Seleção
 Ramais
 Derivação

Polietileno		Padrão		PN40
Tipo:		Marca:		Classe:
	D. Nom. mm	D. Int. mm	Custo \$/m	
1	12	9.4	.0646	
2	19	17	.1253	
3	24.5	21.4	.1867	
Custo de montagem				<input type="text"/>
Regressão Linear: custo x diâmetro				
Coef. angular			<input type="text" value=".0099"/>	
Coef. inear			<input type="text" value="-.0322"/>	
Coef. de correlação			<input type="text" value=".9878"/>	

Concluída a entrada dos dados, procede-se a formatação da parcela, via botão **Formatar** da caixa **Opção**, definindo-se o comprimento dos ramais que deve ser digitado na caixa correspondente. O comprimento adotado deve estar compreendido entre os comprimentos limites (mínimo e máximo) apresentados pelo programa. Como uma referência, o Programa também mostra o comprimento ótimo dos ramais para as condições de layout em H em terrenos horizontais ou quando se escolhe a opção otimizar os pontos de conexão das tubulações.

O Programa permite adotar o diâmetro dos ramais dentre os anteriormente selecionados.

Unidade		Opções																	
Parcela 1		Dados	Formatar	Dimensionar															
Configuração da Rede																			
Referências: Comprim. mínimo dos ramais = 2 m Comprim. máximo dos ramais = 114 m Comprim. ótimo dos ramais = 95 m		Tubulações dos ramais <input checked="" type="checkbox"/> Seleccionar diâmetro																	
Comprim. dos ramais <input type="text" value="95"/> m		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>D. Nom.</th> <th>D. Int.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>12</td> <td>9.4</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>19</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>24.5</td> <td>21.4</td> </tr> <tr> <td>Diâm.</td> <td>12</td> <td>9.4</td> </tr> </tbody> </table>				D. Nom.	D. Int.	1	12	9.4	2	19	17	3	24.5	21.4	Diâm.	12	9.4
	D. Nom.	D. Int.																	
1	12	9.4																	
2	19	17																	
3	24.5	21.4																	
Diâm.	12	9.4																	
Dados complementares da parcela Dimen. na direção dos ramais = 100 m Dimen. na direção da deriva. = 322 m Número de ramais = 46 Número de emissores = 920 Vazão da parcela = 18400 l/h		Tubulações <input checked="" type="checkbox"/> Optimizar ponto de conexão																	
		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="2">Comprimento (m)</th> </tr> <tr> <th>Setor Aclive</th> <th>Setor Declive</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ramal</td> <td>47.5</td> <td>47.5</td> </tr> <tr> <td>Deriv.</td> <td>101.5</td> <td>213.5</td> </tr> </tbody> </table>				Comprimento (m)		Setor Aclive	Setor Declive	Ramal	47.5	47.5	Deriv.	101.5	213.5				
	Comprimento (m)																		
	Setor Aclive	Setor Declive																	
Ramal	47.5	47.5																	
Deriv.	101.5	213.5																	

O dimensionamento do sistema é via botão **Dimensionar** da caixa de opção, apresentando os resultados imediatamente.

O botão **Tubos** apresenta o dimensionamento das tubulações juntamente com o custo da parcela e o botão **Pressão** mostra a distribuição da pressão nas tubulações.

Unidade		Opções			
Parcela 1		Dados		Formatar	Dimensionar

Resultados						
Tubulações da Parcela						
Tubos	Diâm mm	Comprimento (m)			Custo (\$)	
		Setor Active	Setor Declive	Total	Unitar.	Total
Pressão	Ramais					
	9,4	47,5	47,5	95,0	0,065	6,14
	17,0					
	21,4					
	Total	47,5	47,5	95,0		6,14
Custo do Conjunto de Ramais da Parcela = \$282,30						
Derivação						
48,1	81,0	168,0	249,0	0,230	57,15	
72,5	20,5	45,5	66,0	0,424	27,97	
97,6						
Total	101,5	213,5	315,0		85,12	
Custo Total da Parcela = \$367,42						

Unidade		Opções			
Parcela 1		Dados		Formatar	Dimensionar

Resultados					
Distribuição da Pressão nas Tubulações da Parcela					
Tubos	Tubulação	Setor	Distância	Pressão	Comentários
Pressão	Ramal	Active	0,0	10,548	Início
			47,5	8,680	Final
			47,5	8,680	Pressão mínima
	Declive	Declive	0,0	10,548	Início
			47,5	8,680	Final
			47,5	8,680	Pressão mínima
Derivação	Active	Active	0,0	11,980	Início
			101,5	10,548	Final
			101,5	10,548	Pressão mínima
	Declive	Declive	0,0	11,980	Início
			213,5	11,004	Final
			141,8	10,548	Pressão mínima

4. Programa Rede

O **Programa Rede** dimensiona as tubulações da rede principal do sistema minimizando o custo anual global que envolve o custo de energia e o custo total dos equipamentos do sistema.

A entrada dos dados do sistema é via opção **Abrir** do menu **Arquivo** da barra de menu do **Programa Rede** ou a partir do botão **Dados** da janela **Opções**.

Os dados foram agrupados em 5 blocos (Modelo, Sistema, Parcela, Tubulação e Bomba), com acesso a partir da caixa **Dados**.

O botão **Modelo** seleciona a fórmula da perda de carga uniforme que será empregada no cálculo.

The screenshot displays the 'Programa Rede' software interface. At the top, there is a 'Projeto' field containing 'alternativa 1' and an 'Opções' section with 'Resultados' and 'Cálculo' buttons. Below this is a 'Dados' section with buttons for 'Modelo', 'Sistema', 'Parcela', 'Tubulação', and 'Bomba'. The main area is titled 'Fórmula da Perda de Carga Uniforme' and features a dropdown menu set to 'Blasius'. Underneath, there are two panels: 'Fórmula de Blasius' and 'Coeficientes'. The 'Fórmula de Blasius' panel is titled 'Tubos lisos' and lists parameters: 'K (coeficiente)', 'm [expoente da velocidade]', and 'n [expoente do diâmetro]'. The 'Coeficientes' panel contains three input fields with values: '.00078', '1.75', and '4.75'.

O botão **Sistema** conduz via caixa **Dados Sistema** aos dados gerais do sistema (botão **Dados Gerais**), as informações sobre o funcionamento das unidades operacionais (botão **Unidades Operacionais**) e aos elementos geométricos da rede principal (botão **Rede**).

Projeto alternativa 1		Opções	
		Resultados	Cálculo
Dados			
Modelo	Sistema	Parcela	Tubulação
Dados do Sistema			
Dados Gerais		Unidades Operacionais	
Dados Gerais		Rede	
Nível d'água na captação em m		0	
Perdas de cargas no cabeçal de controle em m		11	
Perdas de cargas eventuais em m		1	
Rendimento do motor em %		96	
Custos dos Equipamentos em R\$			
Cabeçal de controle		0	
Peças, conexões e acessórios		0	
Motor-bomba		0	
Custos de Energia			
Consumo em R\$/Kwh		.04517	
Demanda em R\$/Kw		4.85	

Projeto alternativa 1	Opções Resultados Cálculo	
Dados Modelo Sistema Parcela Tubulação Bomba		
Dados do Sistema Dados Gerais Unidades Operacionais Rede		
Dados das Unidades Operacionais		
Número total de unidades operacionais do sistema		4
Unidade 4	Vazão da unidade em m ³ /h	13.8
Número de Parcelas 4	1	Tempo de Irrigação 45 40
Sistema	Unidade	dias/ano horas/dia
Parcelas da Unidade Operacional		
1	Número de ordem geral	4

Projeto Alternativa 1	Opções Resultados Cálculo	
Dados Modelo Sistema Parcela Tubulação Bomba		
Dados do Sistema Dados Gerais Unidades Operacionais Rede		
Rede		
Número total de trechos do sistema		7
Trecho 7	Comprimento do trecho em m	229.5
Cota na entrada do trecho em m		0
Cota na saída do trecho em m		5.3
Cabeçal de Controle		
<input type="checkbox"/> Localização no trecho	Local <input checked="" type="radio"/> Entrada do trecho <input type="radio"/> Saída de Trecho	

O acesso aos dados individuais das parcelas diretamente relacionados com o cálculo da rede é via botão **Parcela**.

Projeto Alternativa 1		Opções <input type="button" value="Resultados"/> <input type="button" value="Cálculo"/>	
Dados <input type="button" value="Modelo"/> <input type="button" value="Sistema"/> <input type="button" value="Parcela"/> <input type="button" value="Tubulação"/> <input type="button" value="Bomba"/>			
Dados das Parcelas Total de parcelas do sistema: <input type="text" value="4"/>			
Parcela <input type="text" value="1"/> Cota do ponto de alimentação em m: <input type="text" value="8.83"/> Vazão de alimentação em m ³ /h: <input type="text" value="18.72"/>			
Trechos da Parcela Número de Trechos: <input type="text" value="7"/> Sistema: <input type="text" value="7"/> Parcela: <input type="text" value="4"/>			
Número de Ordem do Trecho: <input type="text" value="4"/> <input type="text" value="4"/> Ordem geral: <input type="text" value="7"/>			
Pressão de Alimentação x Custo Parcela <input type="text" value="2"/> <input type="text" value="11.98"/> <input type="text" value="366.35"/> <input type="button" value="Incluir"/> Pressão em mca Custo em R\$ <input type="button" value="Excluir"/>			

O botão **Tubulação** conduz à seleção dos diâmetros disponíveis para todos os trechos da rede.

Projeto		Opções	
Alternativa 1		Resultados	Cálculo

Dados				
Modelo	Sistema	Parcela	Tubulação	Bomba

Dados das Tubulações		Limites de velocidades em m/s	
7	Mínima	.4	Máxima
Total de Trechos		2.5	
Trechos	Vazão da Unidade em m ³ /h	Diâmetros internos mm	
7	4	Mínimo	51
	13.8	Máximo	108
<input type="radio"/> Selecionar tubos		Total de tubos selecionados	
		3	
Tubos Selecionados		Diâmetros em mm	
1	Interno	48.1	Nominal
			50
Tipo	PVC	Classe	40
Marca	PADRÃO	Custo em R\$/m	.2295

Projeto		Opções	
Alternativa 1		Resultados	Cálculo
Dados			
Modelo	Sistema	Parcela	Tubulação
Bomba			
Centrífuga	KSB	32-160.1	3500
Tipo	marca	Modelo	rpm
Altura manom. mínima em mca	35.95	Número de rotores	4
Rotor		Unidade Operacional	
1	1	Vazão em m ³ /h	18.72
150		Altura manométrica em mca	37.5
Diâmetro em mm		Rendimento em %	53
Motor		Potência em CV	
Rendimento %	96	Efetiva	5.11
Custo motor-bomba	150	Instalada	7.5

Projeto Alternativa 1		Opções <input type="button" value="Dados"/> <input type="button" value="Cálculo"/>	
Resultados <input type="button" value="Custos"/> <input type="button" value="Rede"/> <input type="button" value="Pressão"/>		Rotor 150	
Cálculo			
11 Número de Iterações		3020.71 Custo Sistema	
<input type="button" value="Fechar"/>			

Projeto
Alternativa 1

Opções
Dados Cálculo

Resultados
Custos Rede Pressão Rotor 150

Custos do Sistema

	Custos (\$/ano)	%
Rede principal	404.1	13.4
Conjunto de parcelas	1293.3	42.8
Equipamentos	532	17.6
Energia	791.31	26.2
Custo total do sistema	3020.71	100

Projeto
Alternativa 1

Opções
Dados Cálculo

Resultados
Custos Rede Pressão Rotor 150

Rede

Trechos
3

Tipo da tubulação: PVC
 Marca do tubo: PADRÃO
 Classe do tubo: 40

Comprimento (m)	Diametros (mm)			Total
	50	75	100	
	0	23	274	297

Projeto Alternativa 1		Opções	
		Dados	Cálculo
Resultados			
Custos		Rede	Pressão
			Rotor 138
Pressão na Rede			
Unidade Operacional			
1			
Parcela			
1		Pressão de alimentação em mca	11.98
Trecho			
1			
Carga de pressão na entrada do trecho em mca			12.76
Carga de pressão na saída do trecho em mca			11.98

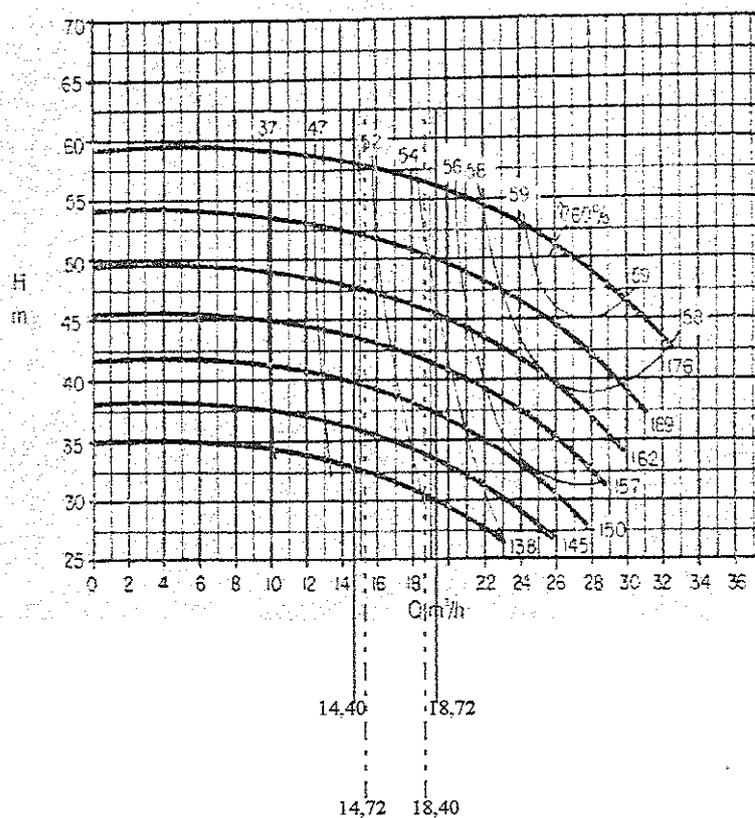
ANEXO C: CURVAS CARCTERÍSTICAS DA BOMBA

Tipo: KSB MEGANORM

Modelo: 32-160.1

Rotação: 3.500 rpm

Altura Manométrica
Head
Altura Manométrica



Alternativa 1 _____

Alternativa 2 - - - - -

ANEXO D: RESULTADOS DETALHADOS

Ítem	PROGRAMA PARCELA: DADOS						
1	PROJETO	Saad et al (1994)		PARCELA	Parcela 1		
2	DADOS DO TERRENO						
2.1	Área					32.760	m ²
2.2	Declividades						
2.2.1	Ramais	Active		Declive		0	%
2.2.2	Derivação	Active	X	Declive		1	%
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA						
3.1	Layout das tubulações				T		
3.2	Carga de pressão mínima				8.68	mca	
3.3	Carga de pressão máxima				11.98	mca	
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais				5	m	
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas				7	m	
3.6	Número de ramais por fileira de planta				1	m	
3.7	Espaçamento entre ramais duplos					m	
4	PERDA DE CARGA UNIFORME						
4.1	Fórmula				Blasius		
4.1.1	Coeficiente de rugosidade				0.00078		
4.1.2	Expoente da vazão				1.75		
4.1.3	Expoente do diâmetro				4.75		
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA						
5.1	Fator de perda localizada nos ramais				1.03		
6	TUBULAÇÃO RAMAIS						
6.1	Tipo	Polietileno	Marca	Padrão	Classe	40	
6.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)			
		Nominal	Interno				
	1	12.0	9.4	0.0646			
	2	19.0	17.0	0.1253			
	3	24.5	21.4	0.1867			
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
6.3.1	Coeficiente angular				0.0099		
6.3.2	Coeficiente linear				-0.0322		
6.3.3	Coeficiente de regressão				0.9878		
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO						
7.1	Tipo	PVC	Marca	Padrão	Classe	40	
7.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)			
		Nominal	Interno				
	1	50	48.1	0.2295			
	2	75	72.5	0.4238			
	3	100	97.6	0.6235			
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
7.3.1	Coeficiente angular				0.0099		
7.3.2	Coeficiente linear				-0.0322		
7.3.3	Coeficiente de regressão				0.9878		

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS						
1	PROJETO	Saad et al (1993)	PARCELA	Parcela 1		
2	DIMENSÕES DA PARCELA:					
2.1	na direção dos ramais			260,0		m
2.2	na direção da linha derivação			126,0		m
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:					
3.1	ramais			255,0		m
3.2	linha de derivação			122,5		m
4	NÚMERO DE RAMAIS					
5	NÚMERO DE EMISSORES					
6	VAZÃO DA PARCELA					
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO					
8	TUBULAÇÕES PARCELA					
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)	
		Aclive	Declive	Total	Unitár.	Total
8.1	Ramais					
	9,4				0,0646	
	17,0	127,3	127,3	254,6	0,1253	31,90
	21,4	0,2	0,2	0,4	0,1867	0,07
	Total	127,5	127,5	255,0		31,97
8.2	Custo do conjunto de ramais					
					575,57	R\$/ano
8.3	Linha de derivação					
	48,1	7,0		7,0	0,2295	1,61
	72,5	34,8		34,8	0,4238	14,75
	97,6	80,7		80,7	0,6235	50,32
	Total	122,5		122,5		66,68
8.4	Custo total da parcela					
					642,24	R\$/ano

Item	PROGRAMA PARCELA: DADOS					
1	PROJETO	Saad et al (1994)	PARCELA	Parcela 2		
2	DADOS DO TERRENO					
2.1	Área			25.200	m ²	
2.2	Declividades					
2.2.1	Ramais	Aclive		Declive	0	%
2.2.2	Derivação	Aclive	X	Declive	1	%
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA					
3.1	Layout das tubulações				T	
3.2	Carga de pressão mínima				8.68	mca
3.3	Carga de pressão máxima				11.98	mca
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais				5	m
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas				7	m
3.6	Número de ramais por fileira de planta				1	m
3.7	Espacamento entre ramais duplos					m
4	PERDA DE CARGA UNIFORME					
4.1	Fórmula				Blasius	
4.1.1	Coefficiente de rugosidade				0.00078	
4.1.2	Expoente da vazão				1.75	
4.1.3	Expoente do diâmetro				4.75	
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA					
5.1	Fator de perda localizada nos ramais				1.03	
6	TUBULAÇÃO RAMAIS					
6.1	Tipo	Polietileno	Marca	Padrão	Classe	40
6.2	Custos					
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno			
	1	12.0	9.4	0.0646		
	2	19.0	17.0	0.1253		
	3	24.5	21.4	0.1867		
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro					
6.3.1	Coefficiente angular				0.0099	
6.3.2	Coefficiente linear				-0.0322	
6.3.3	Coefficiente de regressão				0.9878	
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO					
7.1	Tipo	PVC	Marca	Padrão	Classe	40
7.2	Custos					
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno			
	1	50	48.1	0.2295		
	2	75	72.5	0.4238		
	3	100	97.6	0.6235		
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro					
7.3.1	Coefficiente angular				0.0099	
7.3.2	Coefficiente linear				-0.0322	
7.3.3	Coefficiente de regressão				0.9878	

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS							
1	PROJETO	Saad et al (1993)			PARCELA	Parcela 2	
2	DIMENSÕES DA PARCELA:						
2.1	na direção dos ramais				200,0	m	
2.2	na direção da linha derivação				126,0	m	
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:						
3.1	ramais				195,0	m	
3.2	linha de derivação				122,5	m	
4	NÚMERO DE RAMAIS						18
5	NÚMERO DE EMISSORES						720
6	VAZÃO DA PARCELA						14,4 m ³ /h
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO						11,98 mca
8	TUBULAÇÕES PARCELA						
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)		
		Active	Declive	Total	Unitár.	Total	
8.1	Ramais						
	9,4	76,0	76,0	152,0	0,0646	9,82	
	17,0	21,5	21,5	43,0	0,1253	5,39	
	21,4				0,1867		
	Total	97,5	97,5	195,0		15,21	
8.2	Custo do conjunto de ramais				273,73	R\$/ano	
8.3	Linha de derivação						
	48,1	18,5		18,5	0,2295	4,25	
	72,5	51,5		51,5	0,4238	21,83	
	97,6	52,5		52,5	0,6235	32,73	
	Total	122,5		122,5		58,81	
8.4	Custo total da parcela				332,54	R\$/ano	

Ítem	PROGRAMA PARCELA: DADOS						
1	PROJETO	Saad et al (1994)		PARCELA	Parcela 3		
2	DADOS DO TERRENO						
2.1	Área					32.760	m ²
2.2	Declividades						
2.2.1	Ramais	Active		Declive		0	%
2.2.2	Derivação	Active		Declive	X	1	%
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA						
3.1	Layout das tubulações				T		
3.2	Carga de pressão mínima				8,68	mca	
3.3	Carga de pressão máxima				11,98	mca	
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais				5	m	
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas				7	m	
3.6	Número de ramais por fileira de planta				1	m	
3.7	Espaçamento entre ramais duplos					m	
4	PERDA DE CARGA UNIFORME						
4.1	Fórmula				Blasius		
4.1.1	Coeficiente de rugosidade				0,00078		
4.1.2	Expoente da vazão				1,75		
4.1.3	Expoente do diâmetro				4,75		
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA						
5.1	Fator de perda localizada nos ramais				1,03		
6	TUBULAÇÃO RAMAIS						
6.1	Tipo	Polietileno	Marca	Padrão	Classe	40	
6.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)			
		Nominal	Interno				
	1	12,0	9,4	0,0646			
	2	19,0	17,0	0,1253			
	3	24,5	21,4	0,1867			
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
6.3.1	Coeficiente angular				0,0099		
6.3.2	Coeficiente linear				-0,0322		
6.3.3	Coeficiente de regressão				0,9878		
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO						
7.1	Tipo	PVC	Marca	Padrão	Classe	40	
7.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)			
		Nominal	Interno				
	1	50	48,1	0,2295			
	2	75	72,5	0,4238			
	3	100	97,6	0,6235			
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
7.3.1	Coeficiente angular				0,0099		
7.3.2	Coeficiente linear				-0,0322		
7.3.3	Coeficiente de regressão				0,9878		

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS							
1	PROJETO	Saad et al (1993) PARCELA			Parcela 3		
2	DIMENSÕES DA PARCELA:						
2.1	na direção dos ramais				260.0	m	
2.2	na direção da linha derivação				126.0	m	
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:						
3.1	ramais				255.0	m	
3.2	linha de derivação				122.5	m	
4	NÚMERO DE RAMAIS						
5	NÚMERO DE EMISSORES						
6	VAZÃO DA PARCELA						
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO						
8	TUBULAÇÕES PARCELA						
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)		
		Aclive	Declive	Total	Unitár.	Total	
8.1	Ramais						
	9.4				0.0646		
	17.0	127.3	127.3	254.6	0.1253	31.90	
	21.4	0.2	0.2	0.4	0.1867	0.07	
	Total	127.5	127.5	255.0		31.97	
8.2	Custo do conjunto de ramais					575.57	R\$/ano
8.3	Linha de derivação						
	48.1		79.6	79.6	0.2295	18.27	
	72.5		42.9	42.9	0.4238	18.18	
	97.6				0.6235		
	Total		122.5	122.5		36.45	
8.4	Custo total da parcela					612.02	R\$/ano

Ítem	PROGRAMA PARCELA: DADOS					
1	PROJETO	Saad et al (1994)	PARCELA	Parcela 4		
2	DADOS DO TERRENO					
2.1	Área			25.200	m ²	
2.2	Declividades					
2.2.1	Ramais	Aclive		Declive		0 %
2.2.2	Derivação	Aclive		Declive	X	1 %
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA					
3.1	Layout das tubulações					
3.2	Carga de pressão mínima			8.68	mca	
3.3	Carga de pressão máxima			11.98	mca	
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais			5	m	
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas			7	m	
3.6	Número de ramais por fileira de planta			1	m	
3.7	Espaçamento entre ramais duplos				m	
4	PERDA DE CARGA UNIFORME					
4.1	Fórmula			Blasius		
4.1.1	Coefficiente de rugosidade			0,00078		
4.1.2	Expoente da vazão			1.75		
4.1.3	Expoente do diâmetro			4.75		
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA					
5.1	Fator de perda localizada nos ramais			1.03		
6	TUBULAÇÃO RAMAIS					
6.1	Tipo	Polietileno	Marca	Padrão	Classe	40
6.2	Custos					
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno			
	1	12,0	9,4	0,0646		
	2	19,0	17,0	0,1253		
	3	24,5	21,4	0,1867		
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro					
6.3.1	Coefficiente angular			0,0099		
6.3.2	Coefficiente linear			-0,0322		
6.3.3	Coefficiente de regressão			0,9878		
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO					
7.1	Tipo	PVC	Marca	Padrão	Classe	40
7.2	Custos					
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno			
	1	50	48,1	0,2295		
	2	75	72,5	0,4238		
	3	100	97,6	0,6235		
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro					
7.3.1	Coefficiente angular			0,0099		
7.3.2	Coefficiente linear			-0,0322		
7.3.3	Coefficiente de regressão			0,9878		

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS							
1	PROJETO	Saad et al (1993)	PARCELA	Parcela 4			
2	DIMENSÕES DA PARCELA:						
2.1	na direção dos ramais			200.0		m	
2.2	na direção da linha derivação			126.0		m	
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:						
3.1	ramais			195.0		m	
3.2	linha de derivação			122.5		m	
4	NÚMERO DE RAMAIS						
5	NÚMERO DE EMISSORES						
6	VAZÃO DA PARCELA						
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO						
8	TUBULAÇÕES PARCELA						
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)		
		Aclive	Declive	Total	Unitár.	Total	
8.1	Ramais						
	9,4	76.0	76.0	152.0	0.0646	9.82	
	17,0	21.5	21.5	43.0	0.1253	5.39	
	21,4				0.1867		
	Total	97.5	97.5	195.0		15.21	
8.2	Custo do conjunto de ramais					273.73	R\$/ano
8.3	Linha de derivação						
	48,1		101.2	101.2	0.2295	23.23	
	72,5		21.3	21.3	0.4238	9.03	
	97,6				0.6235		
	Total		122,5	122,5		32,26	
8.4	Custo total da parcela					305,99	R\$/ano

Ítem	PROGRAMA REDE: DADOS						
1	PROJETO		Saad et al (1994)				
2	NÍVEL D'ÁGUA CAPTAÇÃO		0 m				
3	PERDAS DE CARGA						
3.1	cabeçal de controle		11 m				
3.2	eventuais		1 m				
4	CUSTOS EQUIPAMENTOS:						
4.1	cabeçal de controle		0 R\$/ano				
4.2	peças, conexões e acessórios		0 R\$/ano				
4.3	motor-bomba		0 R\$/ano				
5	TARIFAS DE ENERGIA						
5.1	consumo de energia		0,0457 R\$/Kwh				
5.2	demanda mensal		4.85 R\$/Kw				
6	PERDA DE CARGA						
6.1	Fórmula		Blasius				
6.2	Coeficiente de rugosidade		0.00078				
6.3	Expoente da vazão		1,75				
6.4	Expoente do diâmetro		4,75				
6	TUBULAÇÕES DISPONÍVEIS						
	Tubo	Tipo	Marca	Classe			
	1	PVC	Padrão	40			
7	REDE PRIMÁRIA DE TUBULAÇÕES						
7.1	Trechos						
	(t)	Comprim. (m)	Cota (m)		Tubulação selecionada		
			Entrada	Saída	Tubo	Diâmetro (mm)	
						Nom.	Int.
						Custo R\$/ano	
	1	130,0	4,50	4,50	1	50	48,1
						75	72,5
						100	97,5
						0,2295	
	2	100,0	4,50	4,50	1	50	48,1
						75	72,5
						100	97,5
						0,2295	
	3	150,0	0,00	4,50	1	50	48,1
						75	72,5
						100	97,5
						0,2295	
7.2	Local do cabeçal controle						
				Local			
	Trecho		3	Entrada	X	Saída	

Item	PROGRAMA REDE: DADOS					
	PROJETO				Saad et al (1994)	
8	PARCELAS					
	Parcela	Vazão	Trechos	Ponto de alimentação		
	(p)	m ³ /h	(t = 1-2...)	Cota (m)	Pressão (mca)	Custo (R\$/ano)
	1	18,72	1-3	4,50	11,98	642,24
	2	14,40	1-2	4,50	11,98	332,54
	3	18,72	1-3	4,50	11,98	612,02
	4	14,40	1-2	4,50	11,98	305,99
					Total	1.892,79
9	UNIDADE OPERACIONAL					
	(u)	Parcelas p(1-2...)	Vazão m ³ /h	Período de irrigação		
				dias/ano	h/dia	h/ano
	1	1	18,72	45	20	900
	2	2	14,40	45	20	900
	3	3	18,72	45	20	900
	4	4	14,40	45	20	900
10	MOTOR-BOMBA					
10.1	RENDIMENTO MOTOR					96 %
10.2	BOMBA	Marca	KSB MEGANORMA	Modelo	32-160.1	
	Rotor	Unidade		Altura manom.	Rend.	Potência absorvida
	φ (u)	Vazão (m ³ /h)		(mca)	%	(Kw)
	145	1	18,72	34,000	52,5	3,4399
		2	14,40	32,555	49,0	2,7145
		3	18,72	34,000	52,5	3,4399
		4	14,40	32,555	49,0	2,7145

Ítem	PROGRAMA REDE: RESULTADOS							
1	PROJETO						Saad et al (1994)	
2	TUBULAÇÕES							
	Trecho		Comprimento (m)			Total		
	(t)		Diâmetro nominal em mm					
			50	75	100			
	1			117,6	12,4			130,0
	2			100,0				100,0
	3							150,0
	Comprimento (m)			217,6	162,4			380,0
	Custo	(R\$/ano)/m	0,2295	0,4238	0,6235			
		R\$/ano		92,21	101,26			193,47
3	ENERGIA							
	Rotor	Unid.	Potên.	Consumo			Demanda	
	φ	(u)	Kw	Tempo h/ano	Tarifa R\$/Kwh	Custo R\$/ano	Tarifa (R\$/Kw) ano	Custo R\$/ano
	145	1	3,4399	900	0,04517	139,84		
		2	2,7145	900	0,04517	110,35		
		3	3,4399	900	0,04517	139,84		
		4	2,7145	900	0,04517	110,35		
	Total					500,38		
	Custo total de energia do sistema em R\$/ano						500,38	
4	CUSTOS DO SISTEMA							
						R\$/ano	%	
4.1	Rede principais					193,47	7,5	
4.2	Conjunto de parcelas					1.892,79	73,2	
4.3	Equipamentos					0,00	0,0	
4.4	Energia					500,38	19,3	
4.5	Total					2.585,64	100,0	

Item	PROGRAMA PARCELA: DADOS						
1	PROJETO	Alternativa 1			PARCELA	Parcela 1	
2	DADOS DO TERRENO						
2.1	Área					32.760	m ²
2.2	Declividades						
2.2.1	Ramais	Active		Declive		0	%
2.2.2	Derivação	Active	X	Declive		1	%
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA						
3.1	Layout das tubulações						T
3.2	Carga de pressão mínima					8,68	mca
3.3	Carga de pressão máxima					11,98	mca
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais					5	m
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas					7	m
3.6	Número de ramais por fileira de planta					1	m
3.7	Espaçamento entre ramais duplos						m
4	PERDA DE CARGA UNIFORME						
4.1	Fórmula						Blasius
4.1.1	Coeficiente de rugosidade					0,00078	
4.1.2	Expoente da vazão					1,75	
4.1.3	Expoente do diâmetro					4,75	
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA						
5.1	Fator de perda localizada nos ramais					1,03	
6	TUBULAÇÃO RAMAIS						
6.1	Tipo	Polietileno	Marca		Padrão	Classe	40
6.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)			Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno				
	1	12,0	9,4		0,0646		
	2	19,0	17,0		0,1253		
	3	24,5	21,4		0,1867		
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
6.3.1	Coeficiente angular					0,0099	
6.3.2	Coeficiente linear					-0,0322	
6.3.3	Coeficiente de regressão					0,9878	
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO						
7.1	Tipo	PVC	Marca		Padrão	Classe	40
7.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)			Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno				
	1	50	48,1		0,2295		
	2	75	72,5		0,4238		
	3	100	97,6		0,6235		
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
7.3.1	Coeficiente angular					0,0099	
7.3.2	Coeficiente linear					-0,0322	
7.3.3	Coeficiente de regressão					0,9878	

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS						
1	PROJETO	Alternativa 1	PARCELA	Parcela 1		
2	DIMENSÕES DA PARCELA:					
2.1	na direção dos ramais			260,0		m
2.2	na direção da linha derivação			126,0		m
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:					
3.1	ramais			255,0		m
3.2	linha de derivação			122,5		m
4	NÚMERO DE RAMAIS					
5	NÚMERO DE EMISSORES					
6	VAZÃO DA PARCELA			18,72		m ³ /h
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO			11,98		mca
8	TUBULAÇÕES PARCELA					
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)	
		Active	Declive	Total	Unitár.	Total
8.1	Ramais					
	9,4	16,0	16,0	32,0	0,0646	2,07
	17,0	111,5	111,5	223,0	0,1253	27,94
	21,4				0,1867	
	Total	127,5	127,5	255,0		30,01
8.2	Custo do conjunto de ramais				540,16	R\$/ano
8.3	Linha de derivação					
	48,1				0,2295	
	72,5	37,0		37,0	0,4238	15,68
	97,6	85,5		85,5	0,6235	53,31
	Total	122,5		122,5		68,99
8.4	Custo total da parcela				609,15	R\$/ano
9	CARGA DE PRESSÃO NAS TUBULAÇÕES					
	Tubulação	Setor	Distância do início (m)	Carga de pressão (mca)	Local	
	Ramal	Active	0,0	10,519	Início	
			127,5	8,680	Final	
			127,5	8,680	Pressão mínima	
		Declive	0,0	10,519	Início	
			127,5	8,680	Final	
			127,5	8,680	Pressão mínima	
	Linha de derivação	Active	0	11,980	Início	
			122,5	10,519	Final	
			122,5	10,519	Pressão mínima	
		Declive			Início	
					Final	
					Pressão mínima	

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS						
1	PROJETO	Alternativa I		PARCELA	Parcela 1	
2	DIMENSÕES DA PARCELA:					
2.1	na direção dos ramais				260,0	m
2.2	na direção da linha derivação				126,0	m
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:					
3.1	ramais				255,0	m
3.2	linha de derivação				122,5	m
4	NÚMERO DE RAMAIS					
5	NÚMERO DE EMISSORES					
6	VAZÃO DA PARCELA					
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO				11,88	mca
8	TUBULAÇÕES PARCELA					
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)	
		Aclive	Declive	Total	Unitar.	Total
8.1	Ramais					
	9,4	6,0	6,0	12,0	0,0646	0,78
	17,0	121,5	121,5	243,0	0,1253	30,45
	21,4				0,1867	
	Total	127,5	127,5	255,0		31,22
8.2	Custo do conjunto de ramais				562,40	R\$/ano
8.3	Linha de derivação					
	48,1				0,2295	
	72,5	30,0		30,0	0,4238	12,71
	97,6	92,5		92,5	0,6235	57,67
	Total	122,5		122,5		70,38
8.4	Custo total da parcela				632,40	R\$/ano
9	CARGA DE PRESSÃO NAS TUBULAÇÕES					
	Tubulação	Setor	Distância do início (m)	Carga de pressão (mca)	Local	
	Ramal	Aclive	0,0	10,430	Início	
			127,5	8,680	Final	
			127,5	8,680	Pressão mínima	
		Declive	0,0	10,430	Início	
			127,5	8,680	Final	
			127,5	8,680	Pressão mínima	
	Linha de derivação	Aclive	0	11,880	Início	
			122,5	10,430	Final	
			122,5	10,430	Pressão mínima	
		Declive			Início	
					Final	
					Pressão mínima	

Item	PROGRAMA PARCELA: DADOS					
1	PROJETO	Alternativa 1	PARCELA	Parcela 2		
2	DADOS DO TERRENO					
2.1	Área			25.200	m ²	
2.2	Declividades					
2.2.1	Ramais	Acrive		Declive		0 %
2.2.2	Derivação	Acrive	X	Declive		1 %
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA					
3.1	Layout das tubulações				T	
3.2	Carga de pressão mínima			8,68	mca	
3.3	Carga de pressão máxima			11,98	mca	
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais			5	m	
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas			7	m	
3.6	Número de ramais por fileira de planta			1	m	
3.7	Espaçamento entre ramais duplos				m	
4	PERDA DE CARGA UNIFORME					
4.1	Fórmula			Blasius		
4.1.1	Coefficiente de rugosidade			0,00078		
4.1.2	Expoente da vazão			1,75		
4.1.3	Expoente do diâmetro			4,75		
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA					
5.1	Fator de perda localizada nos ramais			1,03		
6	TUBULAÇÃO RAMAIS					
6.1	Tipo	Polietileno	Marca	Padrão	Classe	40
6.2	Custos					
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno			
	1	12,0	9,4	0,0646		
	2	19,0	17,0	0,1253		
	3	24,5	21,4	0,1867		
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro					
6.3.1	Coeficiente angular				0,0099	
6.3.2	Coeficiente linear				-0,0322	
6.3.3	Coeficiente de regressão				0,9878	
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO					
7.1	Tipo	PVC	Marca	Padrão	Classe	40
7.2	Custos					
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno			
	1	50	48,1	0,2295		
	2	75	72,5	0,4238		
	3	100	97,6	0,6235		
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro					
7.3.1	Coeficiente angular				0,0099	
7.3.2	Coeficiente linear				-0,0322	
7.3.3	Coeficiente de regressão				0,9878	

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS							
1	PROJETO	Alternativa 1	PARCELA	Parcela 2			
2	DIMENSÕES DA PARCELA:						
2.1	na direção dos ramais			200,0	m		
2.2	na direção da linha derivação			126,0	m		
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:						
3.1	ramais			195,0	m		
3.2	linha de derivação			122,5	m		
4	NÚMERO DE RAMAIS						
5	NÚMERO DE EMISSORES						
6	VAZÃO DA PARCELA				14,4	m ³ /h	
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO				11,98	mca	
8	TUBULAÇÕES PARCELA						
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)		
		Aclive	Declive	Total	Unitár.	Total	
8.1	Ramais						
	9,4	37,0	37,0	74,0	0,0646	4,58	
	17,0	60,5	60,5	121,0	0,1253	15,16	
	21,4				0,1867		
	Total	97,5	97,5	195,0		19,94	
8.2	Custo do conjunto de ramais				358,95	R\$/ano	
8.3	Linha de derivação						
	48,1				0,2295		
	72,5	88,0		88,0	0,4238	37,29	
	97,6	34,5		34,5	0,6235	21,51	
	Total	122,5		122,5		58,81	
8.4	Custo total da parcela				417,76	R\$/ano	
9	CARGA DE PRESSÃO NAS TUBULAÇÕES						
	Tubulação	Setor	Distância do início (m)	Carga de pressão (mca)	Local		
	Ramal	Aclive	0,0	10,456	Início		
			97,5	8,680	Final		
			97,5	8,680	Pressão mínima		
		Declive	0,0	10,456	Início		
			97,5	8,680	Final		
			97,5	8,680	Pressão mínima		
	Linha de derivação	Aclive	0,0	11,980	Início		
			122,5	10,456	Final		
			122,5	10,456	Pressão mínima		
		Declive			Início		
					Final		
					Pressão mínima		

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS						
1	PROJETO	Alternativa 1		PARCELA	Parcela 2	
2	DIMENSÕES DA PARCELA:					
2.1	na direção dos ramais			200,0	m	
2.2	na direção da linha derivação			126,0	m	
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:					
3.1	ramais			195,0	m	
3.2	linha de derivação			122,5	m	
4	NÚMERO DE RAMAIS					
5	NÚMERO DE EMISSORES					
6	VAZÃO DA PARCELA					
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO					
8	TUBULAÇÕES PARCELA					
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)	
		Aclive	Declive	Total	Unitár.	Total
8.1	Ramais					
	9,4	36,0	36,0	72,0	0,0646	4,65
	17,0	61,5	61,5	123,0	0,1253	15,41
	21,4				0,1867	
	Total	97,5	97,5	195,0		20,06
8.2	Custo do conjunto de ramais				361,14	R\$/ano
8.3	Linha de derivação					
	48,1				0,2295	
	72,5	85,0		85,0	0,4238	36,02
	97,6	37,5		37,5	0,6235	23,38
	Total	122,5		122,5		59,40
8.4	Custo total da parcela				420,54	R\$/ano
9	CARGA DE PRESSÃO NAS TUBULAÇÕES					
	Tubulação	Setor	Distância do início (m)	Carga de pressão (mca)	Local	
	Ramal	Aclive	0,0	10,371	Início	
			97,5	8,680	Final	
			97,5	8,680	Pressão mínima	
		Declive	0,0	10,371	Início	
			97,5	8,680	Final	
			97,5	8,680	Pressão mínima	
	Linha de derivação	Aclive	0,0	11,880	Início	
			122,5	10,371	Final	
			122,5	10,371	Pressão mínima	
		Declive			Início	
					Final	
					Pressão mínima	

Item	PROGRAMA PARCELA: DADOS					
1	PROJETO	Alternativa 1	PARCELA	Parcela 3		
2	DADOS DO TERRENO					
2.1	Área			32.760	m ²	
2.2	Declividades					
2.2.1	Ramais	Aclive	Declive		0	%
2.2.2	Derivação	Aclive	Declive	X	1	%
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA					
3.1	Layout das tubulações			T		
3.2	Carga de pressão mínima			8,68	mca	
3.3	Carga de pressão máxima			11,98	mca	
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais			5	m	
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas			7	m	
3.6	Número de ramais por fileira de planta			1	m	
3.7	Espaçamento entre ramais duplos				m	
4	PERDA DE CARGA UNIFORME					
4.1	Fórmula			Blasius		
4.1.1	Coefficiente de rugosidade			0,00078		
4.1.2	Expoente da vazão			1,75		
4.1.3	Expoente do diâmetro			4,75		
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA					
5.1	Fator de perda localizada nos ramais			1,03		
6	TUBULAÇÃO RAMAIS					
6.1	Tipo	Polietileno	Marca	Padrão	Classe	40
6.2	Custos					
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno			
	1	12,0	9,4	0,0646		
	2	19,0	17,0	0,1253		
	3	24,5	21,4	0,1867		
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro					
6.3.1	Coefficiente angular			0,0099		
6.3.2	Coefficiente linear			-0,0322		
6.3.3	Coefficiente de regressão			0,9878		
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO					
7.1	Tipo	PVC	Marca	Padrão	Classe	40
7.2	Custos					
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)		
		Nominal	Interno			
	1	50	48,1	0,2295		
	2	75	72,5	0,4238		
	3	100	97,6	0,6235		
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro					
7.3.1	Coefficiente angular			0,0099		
7.3.2	Coefficiente linear			-0,0322		
7.3.3	Coefficiente de regressão			0,9878		

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS						
1	PROJETO	Alternativa 1 PARCELA			Parcela 3	
2	DIMENSÕES DA PARCELA:					
2.1	na direção dos ramais				260.0	m
2.2	na direção da linha derivação				126.0	m
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:					
3.1	ramais				255.0	m
3.2	linha de derivação				122.5	m
4	NÚMERO DE RAMAIS					
5	NÚMERO DE EMISSORES					
6	VAZÃO DA PARCELA					
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO					
8	TUBULAÇÕES PARCELA					
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)	
		Active	Declive	Total	Unitár.	Total
8.1	Ramais					
	9.4	40.0	40.0	80	0.0646	5.17
	17.0	87.5	87.5	175	0.1253	21.93
	21.4				0.1867	
	Total	127.5	127.5	255.0		27.10
8.2	Custo do conjunto de ramais				487.80	R\$/ano
8.3	Linha de derivação					
	48.1		54.0	54.0	0.2295	12.39
	72.5		68.5	68.5	0.4238	29.03
	97.6				0.6235	
	Total		122.5	122.5		41.42
8.4	Custo total da parcela				529.14	R\$/ano
9	CARGA DE PRESSÃO NAS TUBULAÇÕES					
	Tubulação	Setor	Distância do início (m)	Carga de pressão (mca)	Local	
	Ramal	Active	0.0	11.605	Início	
			127.5	8.680	Final	
			127.5	8.680	Pressão mínima	
		Declive	0.0	11.605	Início	
			127.5	8.680	Final	
			127.5	8.680	Pressão mínima	
	Linha de derivação	Active			Início	
					Final	
					Pressão mínima	
		Declive	0.0	11.980	Início	
			122.5	12.342	Final	
			94.9	11.605	Pressão mínima	

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS						
1	PROJETO	Alternativa 1	PARCELA	Parcela 3		
2	DIMENSÕES DA PARCELA:					
2.1	na direção dos ramais			260,0	m	
2.2	na direção da linha derivação			126,0	m	
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:					
3.1	ramais			255,0	m	
3.2	linha de derivação			122,5	m	
4	NÚMERO DE RAMAIS					
5	NÚMERO DE EMISSORES					
6	VAZÃO DA PARCELA					
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO					
8	TUBULAÇÕES PARCELA					
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)	
		Active	Declive	Total	Unitár.	Total
8.1	Ramais					
	9,4	39,0	39,0	78	0,0646	5,04
	17,0	88,5	88,5	177	0,1253	22,18
	21,4				0,1867	
	Total	127,5	127,5	255,0		27,22
8.2	Custo do conjunto de ramais					
					489,90	R\$/ano
8.3	Linha de derivação					
	48,1		54,0	54,0	0,2295	12,39
	72,5		68,5	68,5	0,4238	29,03
	97,6				0,6235	
	Total		122,5	122,5		41,42
8.4	Custo total da parcela					
					531,33	R\$/ano
9	CARGA DE PRESSÃO NAS TUBULAÇÕES					
	Tubulação	Setor	Distância do início (m)	Carga de pressão (mca)	Local	
	Ramal	Active	0,0	11,516	Início	
			127,5	8,680	Final	
			127,5	8,680	Pressão mínima	
		Declive	0,0	11,516	Início	
			127,5	8,680	Final	
			127,5	8,680	Pressão mínima	
	Linha de derivação	Active			Início	
					Final	
					Pressão mínima	
		Declive	0,0	11,880	Início	
			122,5	12,242	Final	
			94,9	11,516	Pressão mínima	

Item	PROGRAMA PARCELA: DADOS							
1	PROJETO	Alternativa I			PARCELA	Parcela 4		
2	DADOS DO TERRENO							
2.1	Área						25.200	m ²
2.2	Declividades							
2.2.1	Ramais	Aclive		Declive		0	%	
2.2.2	Derivação	Aclive		Declive	X	1	%	
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA							
3.1	Layout das tubulações					T		
3.2	Carga de pressão mínima					8,68	mca	
3.3	Carga de pressão máxima					11,98	mca	
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais					5	m	
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas					7	m	
3.6	Número de ramais por fileira de planta					1	m	
3.7	Espaçamento entre ramais duplos						m	
4	PERDA DE CARGA UNIFORME							
4.1	Fórmula					Blasius		
4.1.1	Coeficiente de rugosidade					0,00078		
4.1.2	Expoente da vazão					1,75		
4.1.3	Expoente do diâmetro					4,75		
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA							
5.1	Fator de perda localizada nos ramais					1,03		
6	TUBULAÇÃO RAMAIS							
6.1	Tipo	Poliétileno	Marca		Padrão	Classe	40	
6.2	Custos							
	Tubo	Diâmetro (mm)			Custos (R\$/ano)			
		Nominal		Interno				
	1	12,0		9,4	0,0646			
	2	19,0		17,0	0,1253			
	3	24,5		21,4	0,1867			
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro							
6.3.1	Coeficiente angular					0,0099		
6.3.2	Coeficiente linear					-0,0322		
6.3.3	Coeficiente de regressão					0,9878		
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO							
7.1	Tipo	PVC	Marca		Padrão	Classe	40	
7.2	Custos							
	Tubo	Diâmetro (mm)			Custos (R\$/ano)			
		Nominal		Interno				
	1	50		48,1	0,2295			
	2	75		72,5	0,4238			
	3	100		97,6	0,6235			
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro							
7.3.1	Coeficiente angular					0,0099		
7.3.2	Coeficiente linear					-0,0322		
7.3.3	Coeficiente de regressão					0,9878		

Item	PROGRAMA REDE: DADOS						
1	PROJETO		Alternativa I				
2	NÍVEL D'ÁGUA CAPTAÇÃO		0 m				
3	PERDAS DE CARGA						
3.1	cabeçal de controle		11 m				
3.2	eventuais		1 m				
4	CUSTOS EQUIPAMENTOS:						
4.1	cabeçal de controle		0 RS/ano				
4.2	peças, conexões e acessórios		0 RS/ano				
4.3	motor-bomba		0 RS/ano				
5	TARIFAS DE ENERGIA						
5.1	consumo de energia		0,04517 RS/Kwh				
5.2	demanda mensal		RS/Kw				
6	PERDA DE CARGA						
6.1	Fórmula		Blasius				
6.2	Coeficiente de rugosidade		0,00078				
6.3	Expoente da vazão		1,75				
6.4	Expoente do diâmetro		4,75				
6	TUBULAÇÕES DISPONÍVEIS						
	Tubo	Tipo	Marca	Classe			
1		PVC	Padrão	40			
7	REDE PRIMÁRIA DE TUBULAÇÕES						
7.1	Trechos						
	(t)	Comprim. (m)	Cota (m)		Tubulação selecionada		
			Entrada	Saída	Tubo	Diâmetro (mm)	
						Nom.	Int.
						Custo RS/ano	
	1	130,0	4,50	4,50	1	50	48,1
						75	72,5
						100	97,5
	2	100,0	4,50	4,50	1	50	48,1
						75	72,5
						100	97,5
	3	150,0	0,00	4,50	1	50	48,1
						75	72,5
						100	97,5
7.2	Local do cabeçal controle						
	Trecho		Local				
			3	Entrada	X	Saída	

Ítem	PROGRAMA REDE: DADOS					
	PROJETO			Alternativa 1		
8	PARCELAS					
	Parcela	Vazão	Trechos	Ponto de alimentação		
	(p)	m ³ /h	(t = 1-2...)	Cota (m)	Pressão (mca)	Custo (R\$/ano)
	1	18,72	1-3	4,50	11,98	609,15
					11,88	632,40
	2	14,40	1-2	4,50	11,98	417,76
					11,88	420,54
	3	18,72	1-3	4,50	11,98	529,14
					11,88	531,33
	4	14,40	1-2	4,50	11,98	369,68
					11,88	372,06
9	UNIDADE OPERACIONAL					
	(u)	Parcelas p(1-2...)	Vazão m ³ /h	Período de irrigação		
				dias/ano	h/dia	h/ano
	1	1	18,72	45	20	900
	2	2	14,40	45	20	900
	3	3	18,72	45	20	900
	4	4	14,40	45	20	900
10	MOTOR-BOMBA					
10.1	RENDIMENTO MOTOR				96	%
10.2	BOMBA	Marca	KSB MEGANORMA	Modelo	32-160.1	
	Rotor	Unidade		Altura manom. (mca)	Rend. %	Potência absorvida (Kw)
	φ (u)		Vazão (m ³ /h)			
	138	1	18,72	30,0	52,0	3,0644
		2	14,40	33,0	48,0	2,8090
		3	18,72	30,0	52,0	3,0644
		4	14,40	33,0	48,0	2,8090
	145	1	18,72	34,0	52,5	3,4399
		2	14,40	36,0	49,0	3,0018
		3	18,72	34,0	52,5	3,4399
		4	14,40	36,0	49,0	3,0018
	150	1	18,72	37,5	53,0	3,7582
		2	14,40	40,0	50,0	3,2687
		3	18,72	37,5	53,0	3,7582
		4	14,40	40,0	50,0	3,2687

Ítem	PROGRAMA REDE: RESULTADOS							
1	PROJETO						Alternativa 1	
2	TUBULAÇÕES							
	Trecho (t)	Comprimento (m)			Total			
		Diâmetro nominal em mm						
		50	75	100				
	1		130,0		130,0			
	2	57,1	42,9		100,0			
	3		138,5	11,5	150,0			
	Comprimento (m)	57,1	311,4	11,5	380,0			
	Custo (R\$/ano)/m	0,2295	0,4238	0,6235				
		R\$/ano	13,10	131,97	7,17	152,25		
3	ENERGIA							
	Rotor	Unid.	Potên.	Consumo			Demanda	
	φ	(u)	Kw	Tempo h/ano	Tarifa R\$/Kwh	Custo R\$/ano	Tarifa (R\$/Kw) ano	Custo R\$/ano
	145	1	3,4399	900	0,04517	139,84		
		2	3,0018	900	0,04517	122,03		
		3	3,4399	900	0,04517	139,84		
		4	3,0018	900	0,04517	122,03		
				Total		523,75		
				Custo total de energia do sistema em R\$/ano			523,75	
4	CUSTOS DO SISTEMA							
						R\$/ano	%	
4.1	Rede principais					152,25	5,9	
4.2	Conjunto de parcelas					1925,73	74,0	
4.3	Equipamentos					0,00	0,0	
4.4	Energia					523,75	20,1	
4.5	Total					2601,73	100	
5	CARGA DE PRESSÃO NA REDE							
	Parcela (p)	Carga de pressão de alimentação em mca	Carga de pressão no trecho em mca					
			Trecho	Entrada	Saída			
	1	11,98	1	14,62	11,98			
			3	34,10	14,62			
	2	11,98	2	17,68	11,98			
			3	36,00	17,68			
	3	11,98	1	14,62	11,98			
			3	34,10	14,62			
	4	11,98	2	17,68	11,98			
			3	36,00	17,68			

Item	PROGRAMA PARCELA: DADOS						
1	PROJETO	Alternativa 2		PARCELA	Parcelas 1 e 3		
2	DADOS DO TERRENO						
2.1	Área					32.200	m ²
2.2	Declividades						
2.2.1	Ramais	Aclive		Declive		0	%
2.2.2	Derivação	Aclive		Declive		1	%
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA						
3.1	Layout das tubulações					H	
3.2	Carga de pressão mínima					8,68	mca
3.3	Carga de pressão máxima					11,98	mca
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais					5	m
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas					7	m
3.6	Número de ramais por fileira de planta					1	m
3.7	Espaçamento entre ramais duplos						m
4	PERDA DE CARGA UNIFORME						
4.1	Fórmula					Blasius	
4.1.1	Coeficiente de rugosidade					0,00078	
4.1.2	Expoente da vazão					1,75	
4.1.3	Expoente do diâmetro					4,75	
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA						
5.1	Fator de perda localizada nos ramais					1,03	
6	TUBULAÇÃO RAMAIS						
6.1	Tipo	Polietileno	Marca	Padrão	Classe	40	
6.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)			
		Nominal	Interno				
	1	12,0	9,4	0,0646			
	2	19,0	17,0	0,1253			
	3	24,5	21,4	0,1867			
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
6.3.1	Coeficiente angular					0,0099	
6.3.2	Coeficiente linear					-0,0322	
6.3.3	Coeficiente de regressão					0,9878	
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO						
7.1	Tipo	PVC	Marca	Padrão	Classe	40	
7.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)		Custos (R\$/ano)			
		Nominal	Interno				
	1	50	48,1	0,2295			
	2	75	72,5	0,4238			
	3	100	97,6	0,6235			
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
7.3.1	Coeficiente angular					0,0099	
7.3.2	Coeficiente linear					-0,0322	
7.3.3	Coeficiente de regressão					0,9878	

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS						
1	PROJETO	Alternativa 2	PARCELA	Parcelas 1 e 3		
2	DIMENSÕES DA PARCELA:					
2.1	na direção dos ramais			100,0	m	
2.2	na direção da linha derivação			322,0	m	
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:					
3.1	ramais			95,0	m	
3.2	linha de derivação			315,0	m	
4	NÚMERO DE RAMAIS			46		
5	NÚMERO DE EMISSORES			920		
6	VAZÃO DA PARCELA			18,40	m ³ /h	
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO			11,98	mca	
8	TUBULAÇÕES PARCELA					
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)	
		Aclive	Declive	Total	Unitár.	Total
8.1	Ramais					
	9,4	47,5	47,5	95,0	0,0646	6,14
	17,0				0,1253	
	21,4				0,1867	
	Total	47,5	47,5	95		6,14
8.2	Custo do conjunto de ramais				282,30	R\$/ano
8.3	Linha de derivação					
	48,1	76,0	167,0	243,0	0,2295	55,77
	72,5	25,5	46,5	72	0,4238	30,51
	97,6				0,6235	
	Total	101,5	213,5	315		86,28
8.4	Custo total da parcela				368,58	R\$/ano
9	CARGA DE PRESSÃO NAS TUBULAÇÕES					
	Tubulação	Setor	Distância do início (m)	Carga de pressão (mca)	Local	
	Ramal	Aclive	0,0	10,604	Início	
			47,5	8,680	Final	
			47,5	8,680	Pressão mínima	
		Declive	0,0	10,604	Início	
			47,5	8,680	Final	
			47,5	8,680	Pressão mínima	
	Linha de derivação	Aclive	0,0	11,980	Início	
			101,5	10,604	Final	
			101,5	10,604	Pressão mínima	
		Declive	0,0	11,980	Início	
			213,5	13,368	Final	
			141,8	10,604	Pressão mínima	

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS						
1	PROJETO	Alternativa 2		PARCELA	Parcelas 1 e 3	
2	DIMENSÕES DA PARCELA:					
2.1	na direção dos ramais			100,0	m	
2.2	na direção da linha derivação			322,0	m	
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:					
3.1	ramais			95,0	m	
3.2	linha de derivação			315,0	m	
4	NÚMERO DE RAMAIS					
5	NÚMERO DE EMISSORES					
6	VAZÃO DA PARCELA					
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO					
8	TUBULAÇÕES PARCELA					
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)	
		Aclive	Declive	Total	Unitár.	Total
8.1	Ramais					
	9,4	47,5	47,5	95,0	0,0646	6,14
	17,0				0,1253	
	21,4				0,1867	
	Total	47,5	47,5	95		6,14
8.2	Custo do conjunto de ramais				282,30	R\$/ano
8.3	Linha de derivação					
	48,1	71,0	166,0	237,0	0,2295	54,39
	72,5	30,5	47,5	78,0	0,4238	33,06
	97,6				0,6235	
	Total	101,5	213,5	315,0		87,45
8.4	Custo total da parcela				369,75	R\$/ano
9	CARGA DE PRESSÃO NAS TUBULAÇÕES					
	Tubulação	Setor	Distância do início (m)	Carga de pressão (mca)	Local	
	Ramal	Aclive	0,0	10,548	Início	
			47,5	8,680	Final	
			47,5	8,680	Pressão mínima	
		Declive	0,0	10,548	Início	
			47,5	8,680	Final	
			47,5	8,680	Pressão mínima	
	Linha de derivação	Aclive	0,0	11,880	Início	
			101,5	10,548	Final	
			101,5	10,548	Pressão mínima	
		Declive	0,0	11,880	Início	
			213,5	13,268	Final	
			141,8	10,548	Pressão mínima	

Ítem	PROGRAMA PARCELA: DADOS						
1	PROJETO	Alternativa 2		PARCELA	Parcela 2 e 4		
2	DADOS DO TERRENO						
2.1	Área					25.760	m ²
2.2	Declividades						
2.2.1	Ramais	Aclive		Declive		0	%
2.2.2	Derivação	Aclive	X	Declive		1	%
3	DADOS GERAIS DO SISTEMA						
3.1	Layout das tubulações					H	
3.2	Carga de pressão mínima					8.68	mca
3.3	Carga de pressão máxima					11.98	mca
3.4	Espaçamento entre emissores nos ramais					5	m
3.5	Espaçamento entre fileiras de plantas					7	m
3.6	Número de ramais por fileira de planta					1	m
3.7	Espaçamento entre ramais duplos						m
4	PERDA DE CARGA UNIFORME						
4.1	Fórmula					Blasius	
4.1.1	Coefficiente de rugosidade					0.00078	
4.1.2	Expoente da vazão					1.75	
4.1.3	Expoente do diâmetro					4.75	
5	PERDA DE CARGA LOCALIZADA						
5.1	Fator de perda localizada nos ramais					1.03	
6	TUBULAÇÃO RAMAIS						
6.1	Tipo	Polietileno	Marca	Padrão	Classe	40	
6.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)				Custos (R\$/ano)	
		Nominal	Interno				
	1	12.0	9.4			0.0646	
	2	19.0	17.0			0.1253	
	3	24.5	21.4			0.1867	
6.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
6.3.1	Coefficiente angular					0.0099	
6.3.2	Coefficiente linear					-0.0322	
6.3.3	Coefficiente de regressão					0.9878	
7	TUBULAÇÃO LINHA DE DERIVAÇÃO						
7.1	Tipo	PVC	Marca	Padrão	Classe	40	
7.2	Custos						
	Tubo	Diâmetro (mm)				Custos (R\$/ano)	
		Nominal	Interno				
	1	50	48.1			0.2295	
	2	75	72.5			0.4238	
	3	100	97.6			0.6235	
7.3	Função de regressão linear custo-diâmetro						
7.3.1	Coefficiente angular					0.0099	
7.3.2	Coefficiente linear					-0.0322	
7.3.3	Coefficiente de regressão					0.9878	

PROGRAMA PARCELA: RESULTADOS						
1	PROJETO	Alternativa 2	PARCELA	Parcela 2 e 4		
2	DIMENSÕES DA PARCELA:					
2.1	na direção dos ramais			80,0	m	
2.2	na direção da linha derivação			322,0	m	
3	COMPRIMENTO DAS TUBULAÇÕES:					
3.1	ramais			75,0	m	
3.2	linha de derivação			315,0	m	
4	NÚMERO DE RAMAIS					
5	NÚMERO DE EMISSORES					
6	VAZÃO DA PARCELA					
7	CARGA DE PRESSÃO DE ALIMENTAÇÃO					
8	TUBULAÇÕES PARCELA					
	Diâmetro interno (mm)	Comprimento setor (m)			Custos (R\$/ano)	
		Aclive	Declive	Total	Unitár.	Total
8.1	Ramais					
	9,4	37,5	37,5	75,0	0,0646	4,85
	17,0				0,1253	
	21,4				0,1867	
	Total	37,5	37,5	75,0		4,85
8.2	Custo do conjunto de ramais				222,87	RS/ano
8.3	Linha de derivação					
	48,1	122,5	192,5	315,0	0,2295	72,29
	72,5				0,4238	
	97,6				0,6235	
	Total	122,5	192,5	315,0		72,29
8.4	Custo total da parcela				295,16	RS/ano
9	CARGA DE PRESSÃO NAS TUBULAÇÕES					
	Tubulação	Setor	Distância do início (m)	Carga de pressão (mca)	Local	
	Ramal	Aclive	0,0	9,684	Início	
			97,5	8,680	Final	
			97,5	8,680	Pressão mínima	
		Declive	0,0	9,684	Início	
			97,5	8,680	Final	
			97,5	8,680	Pressão mínima	
	Linha de derivação	Aclive	0,0	11,679	Início	
			122,5	9,684	Final	
			122,5	9,684	Pressão mínima	
		Declive	0,0	11,679	Início	
			192,5	10,936	Final	
			102,9	10,365	Pressão mínima	

Ítem	PROGRAMA REDE: DADOS						
1	PROJETO			Alternativa 2			
2	NÍVEL D'ÁGUA CAPTAÇÃO			0		m	
3	PERDAS DE CARGA						
3.1	cabecal de controle			11		m	
3.2	eventuais			1		m	
4	CUSTOS EQUIPAMENTOS:						
4.1	cabecal de controle			0		R\$/ano	
4.2	peças, conexões e acessórios			0		R\$/ano	
4.3	motor-bomba			0		R\$/ano	
5	TARIFAS DE ENERGIA						
5.1	consumo de energia			0.0457		R\$/Kwh	
5.2	demanda mensal					R\$/Kw	
6	PERDA DE CARGA						
6.1	Fórmula			Blasius			
6.2	Coeficiente de rugosidade			0.00078			
6.3	Expoente da vazão			1.75			
6.4	Expoente do diâmetro			4.75			
6	TUBULAÇÕES DISPONÍVEIS						
	Tubo	Tipo	Marca	Classe			
	1	PVC	Padrão			40	
7	REDE PRIMÁRIA DE TUBULAÇÕES						
7.1	Trechos						
	(t)	Comprim. (m)	Cota (m) Entrada Saída		Tubulação selecionada Tubo Diâmetro (mm) Custo Nom. Int. R\$/ano		
	1	71,0	8,43	8,64	1	50 48,1	0,2295
						75 72,5	0,4238
						100 97,5	0,6235
	2	40,0	8,43	8,43	1	50 48,1	0,2295
						75 72,5	0,4238
						100 97,5	0,6235
	3	301,0	5,42	8,43	1	50 48,1	0,2295
						75 72,5	0,4238
						100 97,5	0,6235
	4	50,0	5,42	5,42	1	50 48,1	0,2295
						75 72,5	0,4238
						100 97,5	0,6235
	5	21,0	5,21	5,42	1	50 48,1	0,2295
						75 72,5	0,4238
						100 97,5	0,6235
	6	40,0	5,21	5,42	1	50 48,1	0,2295
						75 72,5	0,4238
						100 97,5	0,6235
	7	221,0	0,0	5,21	1	50 48,1	0,2295
						75 72,5	0,4238
						100 97,5	0,6235
7.2	Local do cabeçal controle						
				Local			
	Trecho	7		Entrada	X	Saída	

Item	PROGRAMA REDE: DADOS					
	PROJETO			Alternativa 2		
8	PARCELAS					
	Parcela	Vazão	Trechos	Ponto de alimentação		
	(p)	m ³ /h	(t = 1-2...)	Cota (m)	Pressão (mca)	Custo (R\$/ano)
	1	18,72	1-3-5-7	8,64	11,980	368,58
					11,880	369,75
	2	14,40	1-2	8,43	11,672	295,16
	3	18,72	1-3	5,42	11,980	368,58
					11,880	369,75
	4	14,40	1-2	5,21	11,672	295,16
9	UNIDADE OPERACIONAL					
	(u)	Parcelas p(1-2...)	Vazão m ³ /h	Período de irrigação		
				dias/ano	h/dia	h/ano
	1	1	18,72	45	20	900
	2	2	14,40	45	20	900
	3	3	18,72	45	20	900
	4	4	14,40	45	20	900
10	MOTOR-BOMBA					
10.1	RENDIMENTO MOTOR					96 %
10.2	BOMBA	Marca	KSB MEGANORMA	Modelo	32-160.1	
	Rotor	Unidade		Altura manom.	Rend.	Potência absorvida pelo sistema (Kw)
	φ	(u)	Vazão (m ³ /h)	(mca)	%	
	150	1	18,40	37,5	53,0	3,6940
		2	14,72	40,0	50,0	3,3413
		3	18,40	37,5	53,0	3,6940
		4	14,72	40,0	50,0	3,3413
	157	1	18,40	42,0	53,0	4,1372
		2	14,72	43,0	50,0	3,5919
		3	18,40	42,0	53,0	4,1372
		4	14,72	43,0	50,0	3,5919
	162	1	18,40	46,0	53,5	4,9889
		2	14,72	47,5	51,0	3,8900
		3	18,40	46,0	53,5	4,9889
		4	14,72	47,5	51,0	3,8900

Item	PROGRAMA REDE: RESULTADOS							
1	PROJETO						Alternativa 2	
2	TUBULAÇÕES							
	Trecho	Comprimento (m)			Total			
	(t)	Diâmetro nominal em mm						
		50	75	100				
	1		71.0		71.0			
	2	40.0			40.0			
	3		301.0		301.0			
	4	50.0			50.0			
	5		21.0		21.0			
	6	40.0			40.0			
	7		37.4	183.6	221.0			
	Comprimento (m)	130.0	430.4	183.6	744.0			
	Custo	(R\$/ano)/m	0.2295	0.4238	0.6235			
		R\$/ano	29.84	182.40	114.47	326.71		
3	ENERGIA							
	Rotor	Unid.	Potên.	Consumo			Demanda	
	φ	(u)	Kw	Tempo h/ano	Tarifa R\$/Kwh	Custo R\$/ano	Tarifa (R\$/Kw) ano	Custo R\$/ano
	157	1	4.1372	900	0.04517	168.19		
		2	3.5919	900	0.04517	146.02		
		3	4.1372	900	0.04517	168.19		
		4	3.5919	900	0.04517	146.02		
				Total		628.42		
				Custo total de energia do sistema em R\$/ano			628.42	
4	CUSTOS DO SISTEMA							
						R\$/ano	%	
4.1	Rede principais					326.71	14.3	
4.2	Conjunto de parcelas					1.327.48	58.2	
4.3	Equipamentos					0.00	0.0	
4.4	Energia					628.42	27.5	
4.5	Total					2.282.61	100	
5	CARGA DE PRESSÃO NA REDE							
	Parcela (p)	Carga de pressão de alimentação em mca	Carga de pressão no trecho em mca					
			Trecho	Entrada	Saída			
	1	11,980	1	13.59	11.98			
			3	22.54	13.59			
			5	23.17	22.54			
			7	42.00	23.17			
	2	11,679	2	17.17	13.42			
			3	24.20	17.17			
			5	24.69	21.20			
			7	43.00	24.69			
	3	11,980	4	22.54	15.61			
			5	23.17	22.54			
			7	42.00	23.17			
	4	11,679	6	24.69	20.94			
			7	43.00	24.69			