

TESE DE DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

**TÍTULO: MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O
DIMENSIONAMENTO E OPERAÇÃO DE
SISTEMAS DE MICROIRRIGAÇÃO**

AUTOR: KENNEDY FLÁVIO MEIRA DE LUCENA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE DOUTORADO
TEMÁTICO EM RECURSOS NATURAIS

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO E OPERAÇÃO DE
SISTEMAS DE MICROIRRIGAÇÃO

KENNEDY FLÁVIO MEIRA DE LUCENA

Tese submetida ao Programa Institucional de Doutorado Temático em Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutor em Recursos Naturais.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Sub-área: Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos

Orientadores:

Dr. Heber Pimentel Gomes

Dr. Carlos de Oliveira Galvão

Campina Grande – PB

Julho - 2003



L935m Lucena, Kennedy Flávio Meira de.
Modelo de otimização para dimensionamento e operação de sistemas de microirrigação / Kennedy Flávio Meira de Lucena. - Campina Grande, 2013.
187 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2003.
"Orientação: Heber Pimental Gomes, Carlos de Oliveira Galvão".
Referências.

1. Microirrigação - Método de Irrigação. 2. Modelo de Otimização. 3. Demandas Hídricas. 4. Energia. 5. Layout. 6. Recursos Naturais - Tese. I. Gomes, Heber Pimental. II. Galvão, Carlos de Oliveira. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 626.84(043)

KENNEDY FLÁVIO MEIRA DE LUCENA

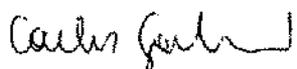
**MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO E
OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE MICROIRRIGAÇÃO**

APROVADA EM: 16/07/2003

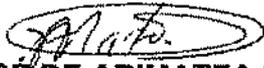
BANCA EXAMINADORA


Dr. HEBER PIMENTEL GOMES

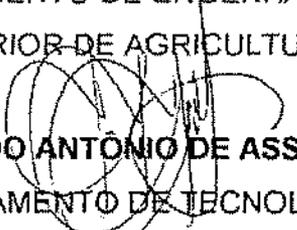
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - DEC
CENTRO DE TECNOLOGIA - CT
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB


Dr. CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO

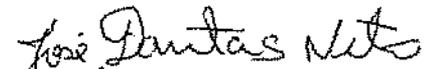
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - DEC
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG


Dr. JOSÉ DE ARIMATEA DE MATOS

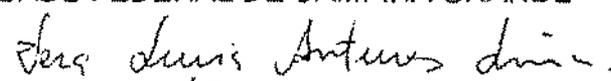
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - DEA
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA DE MOSSORÓ - ESAM


Dr. ABERLADO ANTONIO DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL - DTR
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE


Dr. JOSÉ DANTAS NETO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - DEAg
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG


Dra. VERA LÚCIA ANTUNES DE LIMA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - DEAg
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

Agradecimentos

A Deus que me deu saúde, sabedoria e perseverança para superar os obstáculos ao longo dessa jornada e pela existência das pessoas que comigo caminharam em busca dessa conquista.

À minha esposa Ana Cláudia e aos meus familiares dos quais sempre tive apoio irrestrito.

Aos professores Heber Pimentel Gomes e Carlos de Oliveira Galvão pela orientação, dedicação, apoio, ensinamentos e convivência harmônica.

Aos colegas de trabalho do CEFET-PB UNED Cajazeiras, em especial professores Chaquibe Costa, Nivaldo Ribeiro, Alberdan Santiago, João Rodrigues, Newmark Heiner e ao orientador educacional Gilvandro, que reconheceram meu sacrifício e me apoiaram nos momentos mais difíceis em conciliar trabalho e estudo.

Aos colegas do Mestrado em Engenharia Civil, em especial, Elton, Aldo, Osvalcélcio e Clécia pelo companheirismo e aprendizado mútuo.

Ao professor José de Arimatea de Matos por suas informações valiosas e seu incentivo.

A Cledson, estudante de Engenharia Civil, pelas importantes informações sobre modelagem computacional.

Aos servidores do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil – UFCG, pelo suporte em informática, material e bibliográfico essenciais para execução deste trabalho, em especial ao professor Carlos de Oliveira Galvão.

Aos colegas do Doutorado Cláudia Coutinho, Rosilene Lucena, Luíza Teixeira e Francisco Damasceno pelos incentivos, convivência e aprendizagem.

À Coordenação do Curso de Doutorado em Recursos Naturais.

Aos professores do Curso de Doutorado em Recursos Naturais pelos ensinamentos além do conhecimento científico.

À Universidade Federal de Campina Grande que proporcionou mais essa oportunidade para meu crescimento profissional com um ensino de qualidade e gratuito, anseio do povo brasileiro.

A Empresa de irrigação IRRICAMP pelas informações econômicas necessárias para a realização deste trabalho.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

A minha família, em especial
minha mãe, Carminha Meira,

Dedico.

A minha esposa Ana Cláudia,

Ofereço.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Características dos sistemas de microirrigação.....	5
2.2. Panorama da microirrigação no Brasil.....	7
2.3. Considerações gerais sobre o planejamento, dimensionamento e operação de sistemas de irrigação pressurizados.....	10
2.3.1. Aspectos do planejamento.....	10
2.3.2. Aspectos do dimensionamento e operação.....	14
2.4. Modelos e técnicas de otimização.....	23
2.5. Programação não linear.....	28
2.5.1. Introdução.....	28
2.5.2. Descrição do modelo de programação não linear.....	30
2.5.3. Condições de otimalidade.....	31
2.5.3.1. Vetor gradiente.....	31
2.5.3.2. Matriz Hessiana.....	32
2.5.4. Funções convexas e côncavas.....	33
2.5.5. Classificação da programação não linear.....	34
2.5.5.1. Técnicas analíticas.....	34
2.5.5.2. Técnicas de busca numérica.....	34
2.6. Modelos para análise hidráulica e econômica de sistemas de irrigação pressurizados.....	35
2.7. Hidráulica dos sistemas de microirrigação.....	46
2.7.1. Introdução.....	46
2.7.2. Hidráulica dos emissores.....	48
2.7.3. Dimensionamento das tubulações.....	49
2.7.3.1. Linhas laterais e linhas de derivação.....	49
2.7.3.2. Linhas principal e secundária.....	59

3 - METODOLOGIA	60
3.1. Descrição geral da metodologia.....	60
3.2. Demandas hídricas.....	64
3.2.1. Balanço hídrico anual simplificado.....	64
3.2.2. Balanço hídrico mensal no solo simplificado.....	65
3.3. Função objetivo.....	66
3.3.1. Custos fixos.....	66
3.3.2. Custos operacionais.....	70
3.4. Variáveis de decisão do modelo.....	72
3.4.1. Variáveis para o balanço hídrico anual simplificado.....	72
3.4.2. Variáveis para o balanço hídrico mensal no solo simplificado.....	74
3.5. Layout e a operação do sistema.....	74
3.6. Modelo hidráulico.....	76
3.6.1. Perdas de carga.....	76
3.6.2. Altura manométrica.....	80
3.6.3. Potência do conjunto eletrobomba.....	80
3.7. Restrições do modelo.....	81
3.8. Método de otimização.....	85
3.9. Casos para aplicação do modelo.....	86
3.9.1. Cultura selecionada.....	86
3.9.2. Emissor selecionado.....	87
3.9.3. Área de projeto e configurações de sistema.....	87
3.9.4. Dados para dimensionamento do sistema e definição das restrições.....	87
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
4.1 Configurações e operações possíveis do sistema.....	89
4.2. Análise do dimensionamento e operação do sistema considerando o balanço hídrico anual.....	90
4.2.1. Demandas hídricas.....	91
4.2.2. Análise dos custos fixos.....	91
4.2.3. Análise dos custos operacionais.....	100
4.2.4. Análise dos custos totais.....	103
4.2.5. Análise hidráulica.....	112
4.2.5.1. Sistema com $N_{SUT} = 4$	113
4.2.5.2. Sistema com $N_{SUT} = 8$	117
4.2.5.3. Sistema com $N_{SUT} = 12$	121

4.2.5.4. Sistema com $N_{SUT} = 16$	124
4.2.5.5. Sistema com $N_{SUT} = 20$	128
4.2.6. Análise de sensibilidade.....	132
4.2.6.1. Análise de sensibilidade ao aumento da tarifa de energia elétrica.....	132
4.2.6.1.a. Sistema com $N_{SUT} = 12$	133
4.2.6.1.b. Sistema com $N_{SUT} = 16$	134
4.2.6.2. Análise de sensibilidade ao tempo de amortização do capital.....	135
4.2.6.2.a. Sistema com $N_{SUT} = 12$	135
4.2.6.2.b. Sistema com $N_{SUT} = 16$	137
4.3. Análise do dimensionamento e operação do sistema considerando o balanço hídrico mensal.....	138
4.3.1. Demandas hídricas.....	138
4.3.2. Análise dos custos com duas tarifas diárias de energia.....	140
4.3.2.1. Análise hidráulica.....	151
4.3.3. Análise dos custos com uma tarifa diária de energia.....	152
4.4. Aplicação do modelo para áreas com desníveis.....	156
4.5. Dimensionamento do sistema de irrigação sem considerar o custo de energia.....	159
5 - CONCLUSÕES.....	161
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	164
ANEXOS.....	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Relação de diâmetros internos comerciais aplicáveis em cada uma das tubulações da rede e seus respectivos custos.	63
Tabela 3.2. Parâmetros das equações para composição de custos dos equipamentos.	71
Tabela 4.1. Configurações de áreas irrigadas aplicadas no modelo de otimização.	90
Tabela 4.2. Potenciais operações (N_{UD}) do sistema para cada configuração (N_{SUT}).	90
Tabela 4.3. Custos fixos médios (UM\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹) em função do número de sub-unidades (N_{SUT}), para duas unidades operacionais (N_{UD}).	94
Tabela 4.4. Custos relativos médios dos principais componentes dos custos fixos do sistema, em %.	97
Tabela 4.5. Custos médios das sub-unidades (UM\$.ha ⁻¹), em função de N_{SUT} .	98
Tabela 4.6. Custos ótimos médios, máximos e mínimos (UM\$.ha ⁻¹ .ano ⁻¹), em função de N_{SUT} e N_{UD} e das diferentes tarifas de energia.	107
Tabela 4.7. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade, para o sistema com $N_{SUT} = 4$ e duas tarifas de energia diárias.	114
Tabela 4.8. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 4$ e duas tarifas de energia diárias.	115
Tabela 4.9. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 4$ e $N_{UD} = 1$, com duas tarifas de energia diárias.	115
Tabela 4.10. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 4$ e $N_{UD} = 2$, com duas tarifas de energia diárias.	116
Tabela 4.11. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 4$ e $N_{UD} = 4$, com duas tarifas de energia diárias.	116
Tabela 4.12. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade para o sistema com $N_{SUT} = 4$ e uma tarifa de energia diária.	116
Tabela 4.13. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 4$ e uma tarifa de energia diária.	117
Tabela 4.14. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 8$ e duas tarifas de energia diárias.	118
Tabela 4.15. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade para o sistema com $N_{SUT} = 8$ e duas tarifas de energia diárias.	119
Tabela 4.16. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 8$ e $N_{UD} = 1$ e 2, com duas tarifas de energia diárias.	119
Tabela 4.17. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 8$ e $N_{UD} = 4$, com duas tarifas de energia diárias.	120
Tabela 4.18. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 8$ e $N_{UD} = 8$, com duas tarifas de energia diárias.	120
Tabela 4.19. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 8$ e uma tarifa de energia diária.	120
Tabela 4.20. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 12$ e duas tarifas de energia diárias.	121
Tabela 4.21. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade para o sistema com $N_{SUT} = 12$ e duas tarifas de energia diárias.	122

Tabela 4.22. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 12$ e $N_{UD} = 1, 2$ e 6 , com duas tarifas de energia diárias.	123
Tabela 4.23. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 12$ e $N_{UD} = 3$, com duas tarifas de energia diárias.	123
Tabela 4.24. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h) em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área para o sistema com $N_{SUT} = 12$ e uma tarifa de energia diária.	124
Tabela 4.25. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 16$ e duas tarifas de energia diárias.	124
Tabela 4.26. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade para o sistema com $N_{SUT} = 16$ e duas tarifas de energia diárias.	125
Tabela 4.27. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UD} = 1$, com duas tarifas de energia diárias.	126
Tabela 4.28. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UD} = 2$, com duas tarifas de energia diárias.	126
Tabela 4.29. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UD} = 4$, com duas tarifas de energia diárias.	127
Tabela 4.30. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UD} = 8$, com duas tarifas de energia diárias.	127
Tabela 4.31. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 16$ e uma tarifa de energia diária.	128
Tabela 4.32. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h) em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área para o sistema com $N_{SUT} = 20$ e duas tarifas de energia diárias.	128
Tabela 4.33. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade para o sistema com $N_{SUT} = 20$ e duas tarifas de energia diárias.	129
Tabela 4.34. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 20$ e $N_{UD} = 1, 2$ e 5 , com duas tarifas de energia diárias.	129
Tabela 4.35. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação diários (h) em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura da área na operação com uma tarifa de energia.	129
Tabela 4.36. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade em função do N_{UD} e de L_X/L_Y .	130
Tabela 4.37. Alturas manométricas médias (m) para todas as configurações e operações do sistema com duas tarifas diárias de energia.	130
Tabela 4.38. Pressões de serviço (m) ótimas, distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade e potência requerida (kW), em função do N_{UD} para a tarifa sem aumento e com 100% de aumento de custo.	134
Tabela 4.39. Variações nos custos do sistema com $N_{SUT} = 16$ em função do aumento da tarifa de energia.	135
Tabela 4.40. Pressões de serviço (m) ótimas, distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade e potência requerida (kW) para diferentes fatores de recuperação do capital FRC e FRCa.	136
Tabela 4.41. Variações nos custos do sistema com $N_{SUT} = 16$ em função do fator de recuperação do capital FRC e FRCa.	137
Tabela 4.42. Requerimentos hídricos diários médios e máximos nas localidades de Iguatu (CE) e de João Pessoa (PB) obtidos à partir do balanço hídrico mensal no solo.	138
Tabela 4.43. Combinações de número de sub-unidades, relação de forma da área e número de unidades operacionais avaliadas com o balanço hídrico mensal.	139
Tabela 4.44. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal e anual em Iguatu, com $N_{SUT} = 4$.	143

Tabela 4.45. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal em João Pessoa, com $N_{SUT} = 4$.	143
Tabela 4.46. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal e anual em Iguatu, com $N_{SUT} = 8$ e 16.	144
Tabela 4.47. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal em João Pessoa, com $N_{SUT} = 8$ e 16.	144
Tabela 4.48. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal e anual em Iguatu, com $N_{SUT} = 12$.	145
Tabela 4.49. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal em João Pessoa, com $N_{SUT} = 12$.	145
Tabela 4.50. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal e anual em Iguatu, com $N_{SUT} = 20$.	146
Tabela 4.51. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal em João Pessoa, com $N_{SUT} = 20$.	146
Tabela 4.52. Pressão de serviço (m), uniformidade de emissão (%), variação de pressão na sub-unidade (m) e potência requerida (kW), para os sistemas dimensionados com base nos balanços hídricos, mensal e anual, em função de N_{SUT} e N_{UD} com duas tarifas diárias.	151
Tabela 4.53. Diferenças de níveis nas sub-unidades em função da relação L_X/L_Y da área, com $N_{SUT} = 8$.	157
Tabela 4.54. Características hidráulicas do dimensionamento do sistema em desnível com $N_{SUT} = 8$.	158
Tabela 4.55. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para as sub-unidades ascendentes e descendentes.	159
Tabela 4.56. Comparação entre os dimensionamentos do sistema com e sem o custo operacional.	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Relação benefício/custo na análise econômica de projetos.	24
Figura 2.2. Representação de uma função multimodal com os máximos e mínimos.	31
Figura 2.3. Representação gráfica de funções côncavas e convexas.	33
Figura 2.4. Comportamento dos custos de sistemas adutores com relação ao diâmetro.	36
Figura 2.5. Comportamento dos custos de sistemas adutores com relação à altura manométrica.	36
Figura 3.1. Metodologia para otimização do dimensionamento e operação de sistemas de microirrigação.	61
Figura 3.2. Layout característico do sistema de microirrigação aplicado neste trabalho.	62
Figura 3.3. Configuração de um sistema de microirrigação com 12 sub-unidades (N_{SUT}).	64
Figura 3.4. Configuração de um sistema com oito sub-unidades ($N_{SUT} = 8$).	73
Figura 4.1. Custos fixos médios ótimos, considerando todas as configurações de sistema, operando com duas tarifas diárias, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	92
Figura 4.2. Custos fixos médios ótimos, considerando todas as operações (N_{UO}) do sistema, para duas tarifas diárias, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).	93
Figura 4.3. Custos fixos médios para as diferentes configurações de sistemas com uma e duas tarifas de energia diárias, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	95
Figura 4.4. Variação dos custos fixos médios para as diferentes relações L_X/L_Y , com duas tarifas de energia diárias, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	96
Figura 4.5. Custos relativos médios de alguns componentes do sistema para a configuração com $N_{SUT} = 8$, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	97
Figura 4.6 Custos médios das sub-unidades em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}), com duas tarifas diárias.	99
Figura 4.7. Custos operacionais médios em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	102
Figura 4.8. Custos totais médios do sistema em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	104
Figura 4.9. Variação dos custos totais médios em função do número de unidades operacionais (N_{UO}) e das tarifas de energia.	105
Figura 4.10. Custos totais médios do sistema em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).	106
Figura 4.11. Variação dos custos totais médios ótimos nas diferentes tarifas de energia, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).	108
Figura 4.12. Variação dos custos totais médios do sistema em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}) e do número de unidades operacionais (N_{UO}).	109
Figura 4.13. Custos médios dos sistemas para diferentes configurações, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), com duas tarifas diárias.	110
Figura 4.14. Custos médios dos sistemas para diferentes configurações, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), com uma tarifa diária.	111
Figura 4.15. Potências médias requeridas, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para todas as configurações (N_{SUT}) e duas tarifas diárias.	131
Figura 4.16. Sensibilidade dos custos totais do sistema com doze sub-unidades ao aumento das tarifas de energia, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	134
Figura 4.17. Sensibilidade dos custos totais do sistema com doze sub-unidades ao FRC (quinze anos) e ao FRCa (dez anos), em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	136
Figura 4.18. Efeito do número de unidades operacionais (N_{UO}) nos custos fixos, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}), para os três balanços hídricos.	141
Figura 4.19. Custos fixos médios para todas as operações (N_{UO}) do sistema, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).	141

Figura 4.20. Custos fixos médios para todas as configurações de sistemas (N_{SUT}), em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	142
Figura 4.21. Custos totais ótimos máximos e mínimos para os balanços hídricos anual e mensal em Iguatu, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).	148
Figura 4.22. Custos totais e operacionais do sistema com quatro sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.	149
Figura 4.23. Custos totais e operacionais do sistema com oito sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.	149
Figura 4.24. Custos totais e operacionais do sistema com doze sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.	150
Figura 4.25. Custos totais e operacionais do sistema com dezesseis sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.	150
Figura 4.26. Custos totais e operacionais do sistema com vinte sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.	150
Figura 4.27. Custos fixos para $N_{SUT} = 12$, considerando os balanços hídricos em Iguatu (IG) e João Pessoa (JP), em função do número de unidades operacionais (N_{UO}) com uma tarifa de energia.	153
Figura 4.28. Custos operacionais para $N_{SUT} = 12$, considerando os balanços hídricos em Iguatu (IG) e João Pessoa (JP), em função do número de unidades operacionais (N_{UO}) com uma tarifa de energia.	153
Figura 4.29. Custos totais para $N_{SUT} = 12$, considerando os balanços hídricos em Iguatu (IG) e João Pessoa (JP), em função do número de unidades operacionais (N_{UO}) com uma tarifa de energia.	154
Figura 4.30. Custos totais do sistema para $N_{SUT} = 12$, considerando o balanço hídrico mensal em Iguatu (IG) e João Pessoa (JP), com uma e duas tarifas diárias de energia, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).	155

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIÇÕES

- A - parte da equação do fator G.
 A_I - área irrigada, ha.
 A_M - máxima área molhada pelo emissor, %.
 A_{SUB} - área da sub-unidade, ha.
 A_{UO} - área da unidade operacional, ha.
 B - parte da equação do fator G.
 C - coeficiente de rugosidade da equação de Hazen-Williams.
 C - parte da equação do fator G.
 C_{AD} - custo de adaptadores de linhas laterais, UM\$.
 C_{ad} - custo unitário dos adaptadores de diâmetros nas laterais, UM\$.
 C_{CC} - custo do centro de controle, UM\$.
 C_{CON} - custo de conectores, UM\$.
 C_{con} - custo unitário dos conectores de laterais nas linhas de derivação, UM\$.
 C_{Dai} - custo do PVC nas linhas de derivação ascendentes nos trechos com D_{Dai} e comprimento L_{Dai} , (UM\$.m⁻¹).
 C_{Ddi} - custo do PVC nas linhas de derivação descendentes nos trechos com D_{Ddi} e comprimento L_{Ddi} , (UM\$.m⁻¹).
 C_{ENr} - custo da energia elétrica para período de tarifa reduzida ou com desconto, UM\$.kWh⁻¹;
 C_{ENn} - custo da energia elétrica para período de tarifa normal ou sem desconto, UM\$.kWh⁻¹;
 C_{EM} - custo do emissor, UM\$.
 C_{em} - custo unitário do emissor, UM\$.
 C_F - custos fixos, UM\$.ano⁻¹.
 C_{Laai} - custo do polietileno no trecho de lateral ascendente da derivação ascendente com diâmetro D_{Laai} e comprimento L_{Laai} , (UM\$.m⁻¹).
 C_{Ladi} - custo do polietileno no trecho de lateral descendente da derivação ascendente com diâmetro D_{Ladi} e comprimento L_{Ladi} , (UM\$.m⁻¹).
 C_{Ldai} - custo do polietileno no trecho de lateral ascendente da derivação descendente com diâmetro D_{Ldai} e comprimento L_{Ldai} , (UM\$.m⁻¹).
 C_{Lddi} - custo do polietileno no trecho de lateral descendente da derivação descendente com diâmetro D_{Lddi} e comprimento L_{Lddi} , (UM\$.m⁻¹).
 C_{MEN} - custo do medidor de energia.
 C_{men} - custo unitário do medidor de energia, UM\$.
 C_{OPa} - custos operacionais considerando o balanço hídrico anual, UM\$.ano⁻¹.
 C_{OPm} - custos operacionais considerando o balanço hídrico mensal, UM\$.ano⁻¹.
 C_{PE} - custo das tubulações de polietileno, UM\$.
 C_{Pi} - custo do PVC na principal no trecho com D_{Pi} e comprimento L_{Pi} , (UM\$.m⁻¹).
 C_{PVC} - custo das tubulações de PVC, UM\$.
 C_{SUC} - custo do conjunto de sucção UM\$.
 C_{SB} - custo do sistema de bombeamento, UM\$.
 C_{ST} - custo do sistema de tratamento d'água, UM\$.
 C_{Saij} - custo do PVC na secundária ascendente na seção com D_{Saij} e comprimento L_{Saij} , (UM\$.m⁻¹).
 C_{Sdij} - custo do PVC na secundária descendente na seção com D_{Sdij} e comprimento L_{Sdij} , (UM\$.m⁻¹).
 C_T - custos totais, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.
 C_{VF} - coeficiente de variação de fabricação.
 C_{VR} - custo de válvulas, UM\$.
 C_w - custo unitário de válvulas, UM\$.
 C_{SUB} - custo da sub-unidade, UM\$.ha⁻¹.
 D_{D1} - diâmetro do primeiro trecho da derivação, m.
 D_{D2} - diâmetro do segundo trecho da derivação, m.
 $DEFa$ - deficiência hídrica anual, mm.
 $DEFm_j$ - deficiência hídrica mensal líquida, mm.mês⁻¹.
 D_{L1} - diâmetro do primeiro trecho da lateral, m.
 D_{L2} - diâmetro do segundo trecho da lateral, m.
 D_m - diâmetro molhado do emissor, m.
 D_{Sij} - diâmetro da seção i do trecho j da secundária, m.
 D_{Pi} - diâmetro da seção i da principal, m.
 D_{SUC} - diâmetro da sucção, m.
 Ea - eficiência de aplicação d'água.
 E_E - espaçamento entre plantas na fileira, m.

- E_L - espaçamento entre fileiras de plantas, m.
 ETC_{max} - evapotranspiração máxima diária da cultura, mm.dia⁻¹.
 ETC_{med} - evapotranspiração média diária da cultura, mm.dia⁻¹.
 ETO - evapotranspiração de referência anual, mm.
 ETO_{med} - evapotranspiração de referência média diária, mm.dia⁻¹.
 ETO_{max} - máxima evapotranspiração de referência diária, mm.dia⁻¹.
 F - fator de correção das perdas de carga no segundo trecho da lateral e da derivação (Christiansen, 1942).
 $f(X)$ - função objetivo.
 f - fator de atrito de Blasius.
 FRC - fator de recuperação do capital.
 G - fator de correção das perdas de carga no primeiro trecho da lateral e da derivação (Anwar, 1999).
 h - pressão de serviço do emissor, m.
 h_{aa} = variação de pressão na sub-unidade com linha de derivação e linhas laterais ascendentes, m.
 h_{ad} = variação de pressão na sub-unidade com linha de derivação ascendente e linhas laterais descendentes, m.
 h_{da} = variação de pressão na sub-unidade com linha de derivação descendente e linhas laterais ascendentes, m.
 h_{dd} = variação de pressão na sub-unidade com linha de derivação e linhas laterais descendentes, m.
 h_{adm} - perda de carga admissível na sub-unidade, m.
 h_{fl} - perda de carga nas linhas laterais, m.
 $h_{fl_{aa}}$ - perda de carga na linha lateral ascendente da derivação ascendente, m.
 $h_{fl_{ad}}$ - perda de carga na linha lateral descendente da derivação ascendente, m.
 $h_{fl_{da}}$ - perda de carga na linha lateral ascendente da derivação descendente, m.
 $h_{fl_{dd}}$ - perda de carga na linha lateral descendente da derivação descendente, m.
 h_{fD} - perda de carga na linha de derivação, m.
 h_{fDa} - perda de carga na derivação ascendente, m.
 h_{fDd} - perda de carga na derivação descendente, m.
 h_{fp} - perda de carga na principal, m.
 h_{fs} - perda de carga por trecho de secundária, m.
 h_{fsa} - perda de carga na secundária ascendente, m.
 h_{fssd} - perda de carga na secundária descendente, m.
 h_{fsuc} - perda de carga na sucção, m.
 h_{fST} - perda de carga no sistema de tratamento, m.
 H_{man} - altura manométrica, m.
 h_{min} - mínima pressão de operação do emissor, m.
 h_{max} - máxima pressão de operação do emissor, m.
 I_s - capacidade de infiltração máxima d'água no solo, mm.h⁻¹.
 I_F - frequência de irrigação, dia.
 k_d - coeficiente de descarga do emissor.
 k_s - seção em tubulações com múltiplas saídas ($1 \leq k_s \leq n_s$);
 K_S - coeficiente de sombreamento.
 Kc_{med} - coeficiente de cultivo médio.
 Kc_{max} - coeficiente de cultivo máximo.
 L_D - comprimento máximo das linhas de derivação, m.
 L_{Dmax} - comprimento máximo da linha de derivação, m.
 L_L - comprimento máximo das linhas laterais, m.
 L_{Lmin} - comprimento mínimo da linha lateral, m.
 L_{Lmax} - comprimento máximo da linha lateral, m.
 L_M - máxima lâmina armazenável no solo, mm.
 L_P - comprimento máximo da linha principal, m.
 L_{P1} - comprimento da seção i da principal, m.
 L_{P1} - comprimento da primeira seção da linha principal, m.
 L_{P2} - comprimento da segunda seção da linha principal, m.
 L_{P3} - comprimento da terceira seção da linha principal, m.
 L_{P4} - comprimento da quarta seção da linha principal, m.
 L_{P5} - comprimento da quinta seção da linha principal, m.
 L_X - dimensão da área no sentido das linhas laterais, m.
 L_Y - dimensão da área no sentido das linhas de derivação, m.
 L_S - comprimento máximo das linhas secundárias, m.
 L_{sj} - comprimento do trecho de secundária, m.
 L_{Sij} - comprimento da seção i do trecho j da secundária, m.
 L_{Saj} - comprimento da seção i do primeiro trecho j da secundária ascendente, m.

- L_{Sij} - comprimento da seção i do primeiro trecho j da secundária descendente, m.
 L_{SUC} - comprimento da sucção, m.
 L_x/L_y - relação comprimento/largura da área irrigada.
 m - expoente da velocidade na equação de perda de carga.
 m.c.a. - metro coluna de água, por convenção m.
 N - número de saídas de descarga na tubulação.
 N_{ei} - número de emissores no primeiro trecho da lateral (índices 1, 3, 5 e 7).
 N_{ej} - número de emissores no segundo trecho da lateral (índices 2, 4, 6 e 8).
 N_{e1} - número de emissores no primeiro trecho da lateral e derivação ascendentes.
 N_{e2} - número de emissores no segundo trecho da lateral e derivação ascendentes.
 N_{e3} - número de emissores no primeiro trecho da lateral descendente e derivação ascendente.
 N_{e4} - número de emissores no segundo trecho da lateral descendente e derivação ascendente.
 N_{e5} - número de emissores no primeiro trecho da lateral e derivação descendentes.
 N_{e6} - número de emissores no segundo trecho da lateral e derivação descendentes.
 N_{e7} - número de emissores no primeiro trecho da lateral ascendente e derivação descendente.
 N_{e8} - número de emissores no segundo trecho da lateral ascendente e derivação descendente.
 N_{EP} - número de emissores por planta.
 $NDIa$ - número de dias irrigados por ano, dia.
 $NDIm_j$ - número de dias do mês j .
 n_s - número de seções em tubulações com múltiplas saídas.
 N_S - número de saídas de linhas laterais na derivação, computando apenas um lado da derivação.
 N_{S1} - número de saídas de laterais no primeiro trecho da derivação (índices 1 e 3).
 N_{S2} - número de saídas de laterais no segundo trecho da derivação (índices 2 e 4).
 N_{S1} - número de saídas de laterais no primeiro trecho da derivação ascendente.
 N_{S2} - número de saídas de laterais no segundo trecho da derivação ascendente.
 N_{S3} - número de saídas de laterais no primeiro trecho da derivação descendente.
 N_{S4} - número de saídas de laterais no segundo trecho da derivação descendente.
 N_{SUT} - número de sub-unidades total do sistema.
 N_{SUS} - número de sub-unidades funcionando simultaneamente.
 N_{TE} - número total de emissores no sistema.
 N_{TL} - número total de linhas laterais no sistema.
 N_{UCmax} - número máximo de unidades operacionais.
 N_{UO} - número de unidades operacionais.
 P - precipitação anual média, com 75% de probabilidade de ocorrência, mm.
 P_{IND} - pressão no início da linha de derivação ou da sub-unidade, m.
 P_m - máxima precipitação do emissor, mm.h⁻¹.
 P_{DT} - potência do conjunto eletrobomba, kW.
 Q_{Di} - vazão no primeiro trecho da linha de derivação, m³.s⁻¹.
 Q_{Li} - vazão no primeiro trecho da lateral, m³.s⁻¹.
 Q_{Sj} - vazão no trecho j da secundária, m³.s⁻¹.
 q_e - vazão do emissor em L.h⁻¹.
 r - razão entre a vazão total do trecho posterior (Q_p) e o trecho anterior (Q_a) da tubulação.
 R\$ - unidade monetária Real.
 Re - número de Reynolds.
 R_{HCmed} - requerimento hídrico médio diário da cultura, mm.dia⁻¹.
 R_{HCmax} - requerimento hídrico máximo diário, mm.dia⁻¹.
 R_{HCmedj} - requerimento hídrico diário médio da cultura no mês j , mm.dia⁻¹.
 S_e - espaçamento entre emissores na lateral, m.
 S_L - espaçamento entre linhas laterais, m.
 T_{ID} - tempo de irrigação disponível diário, h.
 T_{ij} - tempo de irrigação diário no horário com tarifa i (T_r ou T_n) no ano (balanço hídrico anual) ou mês j (balanço hídrico mensal), h.
 T_n - o tempo de operação na tarifa normal sem desconto, h.
 T_{nj} - tempo de operação no período de tarifa normal n no ano ou mês j , h.
 T_r - tempo de operação na tarifa com desconto ou reduzida, h.
 T_{rj} - tempo de operação no período de tarifa reduzida r no ano ou mês j , h.
 T_T - Tempo total de irrigação anual, h.
 T_{TD} - tempo total de irrigação diário, h.
 T_1 - operação com uma tarifa diária.
 T_2 - operação com duas tarifas diárias.

- U_E - uniformidade de emissão, %.
 U_{Ec} - uniformidade de emissão corrigida, %.
 UMS - unidade monetária.
 V_D - velocidade na linha de derivação, $m.s^{-1}$.
 V_{Dmin} - velocidade mínima na derivação.
 V_{Dmax} - velocidade máxima na derivação.
 V_L - velocidade na linha lateral, $m.s^{-1}$.
 V_{Lmin} - velocidade mínima na linha lateral.
 V_{Lmax} - velocidade máxima na linha lateral.
 V_P - velocidade na linha principal, $m.s^{-1}$.
 V_{Pmin} - velocidade mínima na principal.
 V_{Pmax} - velocidade máxima na principal.
 V_S - velocidade na secundária, $m.s^{-1}$.
 V_{Smin} - velocidade mínima na secundária.
 V_{Smax} - velocidade máxima na secundária.
 Vol_{max} - máxima demanda bruta diária d'água da cultura, $L.dia^{-1}$.
 Vol_{med} - é demanda média bruta diária d'água da cultura, $L.dia^{-1}$.
 x - expoente que caracteriza o regime de fluxo do emissor.
 Z_{SUC} - desnível geométrico da sucção, m.
 η - rendimento da eletrobomba.
 Δ_D - desnível na derivação ascendente, m.
 Δ_L - desnível na lateral ascendente, m.
 Δh_S - variação de pressão na sub-unidade, m.
 Δh_{Sc} - variação de pressão ou perda de carga na sub-unidade corrida, m.
 Δ_P - desnível na linha principal, m.
 Δ_S - desnível na linha secundária ascendente, m.
 $\hat{\sigma}$ e ξ - parâmetros de regressão, Eq. 3.14.
 ω e β - parâmetros de regressão, Eq. 3.15.
 σ e φ - parâmetros de regressão, Eq. 3.16.
 ψ e τ - parâmetros de regressão Eq. 3.17.

RESUMO

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE MICROIRRIGAÇÃO

Desenvolveu-se um modelo de otimização para minimização dos custos totais (investimento e operacional) de sistemas de microirrigação para áreas em nível ou não niveladas, considerando a influência das demandas hídricas, da divisão do sistema em sub-unidades, do número de unidades operacionais, da relação comprimento/largura da área irrigada e da operação com diferentes tarifas de energia variáveis com o horário de irrigação. O modelo foi aplicado a um sistema de microaspersão, para uma área hipotética referencial de 34 ha (340000 m²) com a cultura da manga (*Mangifera indica* L.). Foram obtidas as demandas hídricas através do balanço hídrico climático anual e mensal no solo, considerando-se a precipitação pluviométrica média anual e mensal com 75% de probabilidade de ocorrência e a evapotranspiração de referência, em duas localidades da região Nordeste do Brasil com diversidades climáticas, Iguatu no Estado do Ceará e João Pessoa no Estado da Paraíba. A técnica de otimização empregada foi a programação não linear através do software Matlab. A demanda hídrica de projeto, obtida pelo balanço anual, subestimou consideravelmente as necessidades de irrigação com relação ao balanço mensal, levando a um menor tempo de funcionamento do sistema e, conseqüentemente, menor custo operacional com energia. No entanto, os custos de investimento não sofreram alterações consideráveis com os dois balanços para um mesmo número de unidades operacionais, evidenciando que não houve modificação no dimensionamento nas duas situações. Em João Pessoa foi possível elevar o número de unidades operacionais devido ao menor requerimento hídrico, o que proporcionou uma maior redução dos custos de investimento e dos custos totais. Com relação à aplicação das tarifas de energia, o modelo alocou completamente o horário com descontos nas tarifas, promovendo uma economia representativa nos custos operacionais. Não houve efeito das tarifas no dimensionamento do sistema, o que pode permitir a adoção de medidas de racionamento no consumo de energia, nos sistemas em operação, através da mudança dos períodos de operações diários. Os custos de investimento representaram a quase totalidade dos custos totais, cujos principais responsáveis foram as linhas laterais de polietileno, os emissores, a tubulação em PVC e o sistema de tratamento d'água. Os fatores que mais afetaram os custos totais do sistema foram o número de sub-unidades e de unidades operacionais, tendo menor efeito o formato da área. O aumento do número de sub-unidades e de unidades operacionais do sistema reduziu consideravelmente os custos de investimento. Entretanto, a sub-unidade de custo mínimo e o maior número de unidades operacionais não garantiram a obtenção do sistema de custo mínimo. A sub-unidade de custo mínimo para uma determinada pressão de serviço foi aquela que utilizou toda a perda de carga disponível. O preestabelecimento de percentuais de perda de carga nas linhas laterais e linhas de derivação não garantiu a obtenção da sub-unidade de custo mínimo. O sistema de menor custo foi obtido com a menor pressão de serviço do emissor, menor uniformidade de emissão e menor frequência de irrigação. O dimensionamento do sistema sem considerar o custo de energia foi ineficiente sob os aspectos energético e econômico.

Palavras-chave: microirrigação, modelo de otimização, demandas hídricas, energia, layout.

ABSTRACT

OPTIMIZATION MODEL FOR DESIGN AND OPERATION OF
MICROIRRIGATION SYSTEMS

An optimization model has been developed for minimizing the total costs (investment and operational) of microirrigation systems for leveled and unleveled areas, considering the influence of the water demands, the division of the system in subunits, the number of operational units, the shape of the irrigated area and the operation with changeable tariffs of energy with the irrigation schedule effects. The model was applied in microsprinkler system, for a referencial hypothetical area of 34 ha (340000 m²) with the culture of the mango (*Mangifera indica* L.). The water demands were computed by the annual climatic water balance and monthly soil water balance, considering the annual and monthly average precipitation with 75% of occurrence probability and the reference evapotranspiration for two localities in the Northeastern region of Brazil with climatic diversities, Iguatu (Ceará State) and João Pessoa (Paraíba State). The optimization technique was based on nonlinear programming through the Matlab software. The water demand computed by the annual water balance underestimated the necessities of irrigation in relation to the monthly water balance, leading to a shorter time of functioning of the system and, consequently, smaller operational energy cost. However, the investment costs did not suffer important alterations with the two water balances for the same number of operational units, thus evidencing that there was no modification in the design for the two situations. In João Pessoa it was possible to increase the number of operational units, leading to a higher reduction of the investment costs and the total costs. As for the application of the energy tariffs, the model allocated the functioning period to the lower tariffs time, promoting significant saving in the operational costs. The changeable tariffs did not affect the sizing of the system. Thus, for the currently operation systems measures of energy saving can be adopted, through modifications in the daily periods of operations. The investment costs represented almost the total amount of the costs. The main costs was those of the lateral polyethylene lines, the emitters, the PVC tubing and the water treatment system. The factors that most affected the total costs of the system was the number of subunits and operational units, having lesser effect the shape of the area. The increase in the number of subunits and operational units of the system reduced the investment costs significantly. However, the subunit of minimum cost and bigger number of operational units did not guarantee the attainment of the minimum cost system. The subunit of minimum cost for one determined service pressure was that one that uses all the head loss available. The preestablishment of percentages of head loss in the lateral lines and manifold lines did not guarantee the attainment of the subunit of minimum cost. The system of minimum cost was achieved with the minimum service pressure of the emitter, lower emission uniformity and lower irrigation frequency. The system design without considering the energy cost was inefficient under the energetic and economic aspects.

Keywords: microirrigation, optimization model, water demands, energy, layout.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação é o maior consumidor de água bruta no planeta e a crescente competição pela água tem promovido a busca de formas de otimização desse recurso limitado. O que tem sido direcionado na utilização de fontes alternativas d'água, no aperfeiçoamento das técnicas de engenharia de irrigação, tanto na aplicação como no manejo da água e, na melhoria do gerenciamento dos recursos hídricos em todas as suas aplicações. Uma constatação dessa realidade é o uso indiscriminado de água com qualidade inferior aos padrões recomendados de saúde e de irrigação, tornando-se um grande problema de saúde pública e ambiental em muitos países.

No campo da engenharia de irrigação pode-se citar como uma importante evolução tecnológica os sistemas de irrigação localizados ou de microirrigação. Esses sistemas caracterizam-se principalmente pela aplicação d'água freqüente sob baixas taxas, mantendo o solo em condições de elevada disponibilidade de umidade às plantas para satisfazer a evapotranspiração da cultura, fazendo com que o sistema seja operado diariamente, até várias vezes por dia, ou várias vezes por semana.

Uma das principais vantagens dos sistemas de microirrigação, que é a economia d'água com relação a outros sistemas de irrigação, deve-se à aplicação da água próximo ao sistema radicular da planta, reduzindo significativamente as perdas por evaporação. Outro aspecto importante desses sistemas é que permitem um maior controle na distribuição d'água. Elevadas uniformidades de aplicação d'água, superiores a 90%, são mais facilmente atingidas que em outros sistemas. E são dois os fatores que potencializam um alto controle d'água: a) os sistemas cobrem toda a área irrigada com uma extensa rede de tubulações, emissores e acessórios, favorecendo a menor interferência do operador; b) podem ser mais facilmente

automatizados que outros sistemas. Além da economia d'água, uma outra vantagem da microirrigação é o baixo requerimento de pressão, o que implica em menores custos com energia. Porém, a principal desvantagem dos sistemas de microirrigação é o elevado custo inicial devido à rede de tubulações, emissores, acessórios, aberturas de valas, entre outros.

Dentre os componentes dos sistemas de microirrigação os emissores, responsáveis pela aplicação d'água, são as peças mais importantes. Atualmente, encontram-se no mercado emissores com alto nível tecnológico que lhes confere características desejáveis, tais como: autocompensação da vazão, autolimpeza, robustez, elevada uniformidade de fabricação, baixa sensibilidade às obstruções e à temperatura, entre outras. Essas características são fundamentais para o dimensionamento e o manejo do sistema e podem garantir maior confiabilidade no projeto de irrigação.

A difusão da microirrigação tem apresentado considerável impulso em regiões com limitações hídricas como o Nordeste do Brasil, onde é empregada principalmente na fruticultura. No entanto, verifica-se a adesão aos sistemas de microirrigação mesmo em regiões de altas precipitações. Isso é justificado pelo fato que, embora o balanço hídrico anual seja positivo, ou seja, a precipitação supere a evapotranspiração, a má distribuição das chuvas causa freqüentes períodos de deficiência hídrica que, dependendo da intensidade e do período, podem causar prejuízos à produção agrícola.

O principal objetivo dos projetos de irrigação é o fornecimento d'água às culturas prevenindo a ocorrência de estresse hídrico, não programado, que reduziria a produção a níveis antieconômicos. A demanda evapotranspirométrica é, portanto, o parâmetro de maior importância para o planejamento e elaboração de um projeto de irrigação. Diferentes métodos são utilizados para sua estimativa não havendo, porém, um consenso qual a melhor metodologia a ser utilizada genericamente. Na Região Nordeste do Brasil os projetos são normalmente dimensionados em termos de irrigação total, haja visto que os períodos de estiagem e de chuva são bem determinados. A maioria dos dimensionamentos não considera a água das precipitações, elevando os custos totais dos sistemas. Não é comum também no dimensionamento o uso de estratégias de déficits de irrigação, como forma de redução de custos e de economia d'água. Dessa forma, para os projetistas a grande questão vem a ser a taxa de distribuição e aplicação d'água para atender a máxima demanda de evapotranspiração.

O dimensionamento ótimo dos sistemas é um importante meio de aumentar os benefícios e tornar o investimento mais eficiente na irrigação. As principais variáveis que devem ser consideradas no dimensionamento de sistemas de microirrigação são: diâmetros dos tubos, comprimentos das tubulações, número de emissores ou grupo de emissores na linha

lateral, número de laterais na linha de derivação, número de sub-unidades, número de sub-unidades que operam simultaneamente, tempo de irrigação por unidade operacional, vazão do emissor e pressão de operação dos emissores. No dimensionamento hidráulico a meta principal é a redução das variações de pressão e assim das variações de vazão para uma uniformidade de aplicação desejada.

Os sistemas de microirrigação, além de serem economicamente viáveis, devem garantir qualidade e confiabilidade. Os fatores que afetam diretamente esses objetivos são: adequada seleção do emissor e sua qualidade; porcentagem de área molhada; variações permissíveis de pressão; filtragem adequada; grau de automação; confiabilidade do manejo; mão-de-obra; energia; e suprimento d'água. Dois itens fundamentais são a porcentagem de área molhada e a garantia do emissor contra entupimento e mau funcionamento.

O dimensionamento dos sistemas é complexo e permite inúmeras soluções. No entanto, os modelos computacionais podem ajudar na obtenção de alternativas econômicas de dimensionamento e operação dos mesmos. A competitividade atual entre os setores da economia, principalmente no setor agrícola, exige que os projetos sejam elaborados com uma análise criteriosa dos fatores envolvidos, tais como: água, cultura, energia, mão-de-obra, equipamentos, ecologia, entre outros.

Os custos das redes hidráulicas pressurizadas para condução d'água, a exemplo das redes de irrigação, são compostos basicamente pelos seus equipamentos, compreendendo os custos fixos, e, pelos custos operacionais, representados principalmente pelo consumo de energia. Os sistemas de irrigação têm uma vida útil de muitos anos e não se pode deixar de considerar a importância dos custos operacionais. Mas, para que o dimensionamento e a operação do sistema de microirrigação sejam otimizados necessita-se de boas informações com relação às necessidades hídricas ao longo da vida útil do projeto. Isso, porém, nem sempre é considerado e o sistema é dimensionado rotineiramente para que seu custo inicial, que é elevado, seja reduzido, o que se consegue com a redução dos diâmetros da rede. Essa estratégia pode, no entanto, tornar o sistema antieconômico porque os custos operacionais aumentam com a redução dos diâmetros da rede. Esses dois aspectos opostos são, portanto, a base para um eficiente projeto.

A análise de projetos de microirrigação exige, muitas vezes, um esforço de cálculo que é impraticável sem o auxílio de modelos computacionais. Vários modelos foram desenvolvidos para o dimensionamento e operação de sistemas de irrigação nos últimos anos. Alguns com ênfase maior para análise hidráulica, outros à análise econômica, onde os principais objetivos são a minimização dos custos ou a maximização dos benefícios. Esses

modelos têm suas particularidades e, normalmente, não podem ser aplicados a situações genéricas. Dentre as técnicas numéricas mais empregadas nesses modelos tem-se como exemplos a enumeração exaustiva, programação linear e não linear, a programação dinâmica, os elementos finitos e os algoritmos genéticos. Dentre essas técnicas, a programação não linear é uma das que tem apresentado excelentes resultados.

Dois insumos fundamentais para os projetos de irrigação são a água e a energia. Tem-se encontrado constantemente conflitos pelo uso da água, mas o fornecimento de energia elétrica também tem afetado o setor agrícola, forçando os gestores em irrigação a medidas emergenciais para reduzir prejuízos advindos da escassez de energia. Desse modo, o dimensionamento de sistemas de irrigação deverá considerar as reais potencialidades hídricas da região, procurando estratégias que otimizem o uso da água, que terá influência direta no consumo energético. Além do mais, a eficiência hidráulica dos sistemas de irrigação pressurizados, que implica em análises de layout e de operação, deve ser continuamente melhorada.

A busca por técnicas e/ou procedimentos para a melhoria do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação, sob a ótica hidráulico-econômica, é um desafio aos que atuam nessa área do conhecimento científico. A análise de fatores que afetam o dimensionamento e a operação de sistemas de microirrigação visa encontrar estratégias que possam torná-los mais eficazes e, portanto, mais competitivos.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal obter o dimensionamento e operação ótimos de sistemas de microirrigação, minimizando os custos totais, compreendidos pelos custos de investimento e operacional, através da elaboração de um modelo computacional, considerando o efeito de:

- Balanço hídrico anual e o balanço hídrico mensal no solo simplificados;
- Demandas hídricas de localidades com climas distintos;
- Diferentes tarifas de energia variáveis com o horário de irrigação;
- Divisão do sistema em sub-unidades;
- Número de unidades operacionais;
- Relação comprimento/largura da área irrigada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Características dos sistemas de microirrigação

A denominação microirrigação vem sendo empregada nos últimos anos como alternativa à irrigação localizada. Consiste, portanto, dos vários sistemas que trabalham sob baixa pressão, com alta frequência de aplicação d'água e a baixas taxas, sobre ou sob a superfície do solo, compreendendo a irrigação por gotejamento, exsudação, xique-xique, tripa, microaspersão, entre outros, cada um com um tipo de emissor d'água que caracteriza o sistema. Esses emissores são inseridos nos condutos ou são integrados nos mesmos a pequenas distâncias entre si.

Dentre as vantagens potenciais relativas dos sistemas de microirrigação podem-se apresentar: a água é aplicada a baixas taxas, otimizando o tempo de penetração da água em solos problemáticos; pequenas áreas são molhadas, reduzindo a evaporação da água do solo; menos água é necessária ao sistema de microaspersão quando as árvores ou outras plantas de grande espaçamento são jovens; reduz o crescimento de ervas daninhas nas partes do solo que não são molhadas; aplicações de água pouco intensas e frequentes permitem manter a variação de umidade no solo dentro de uma pequena amplitude, que pode acentuar o crescimento e o rendimento de algumas culturas e aplicação diária ou frequente de água mantém uma reduzida concentração de sal na água do solo, uma vez que os sais movimentam-se para as bordas exteriores da área molhada, possibilitando o uso de água salina em escala maior do que é possível com outros métodos. Porém, a principal preocupação no uso da microirrigação é o entupimento do emissor que pode afetar a descarga e a uniformidade da

aplicação da água, aumentar os custos de manutenção e resultar em redução do rendimento da colheita se não for detectado e corrigido. Em grandes sistemas, com milhares de emissores instalados, a detecção de entupimentos é tarefa difícil e quando esse é percebido o desenvolvimento da cultura pode ter sido afetado. Em virtude disso é imprescindível, na maioria das situações, medidas preventivas que incluem a filtragem da água e seu tratamento químico, limpeza periódica das canalizações e inspeção de campo.

Particularmente, com relação ao gotejamento, a microaspersão tem a vantagem de aplicar água sobre uma superfície maior, conseqüentemente, o sistema radicular é distribuído dentro de um maior volume de solo úmido, disponibilizando também um maior reservatório de nutrientes de água. É mais adequada para solos com alta permeabilidade e pequeno armazenamento d'água. São menos susceptíveis ao entupimento, uma vez os orifícios de descarga são maiores. No entanto, apresentam maiores perdas d'água por efeito do vento e da evaporação.

Segundo Smajstrla et al. (1995) a utilização dos sistemas de microirrigação está crescendo rapidamente, em virtude da necessidade da melhoria tecnológica na engenharia de irrigação. São muitos os exemplos da aplicação da microirrigação. No Estado da Flórida (EUA) estimam-se que de 850.000 ha irrigados, 55% estão adaptados à microirrigação. A taxa de conversão de outros sistemas para microirrigação está em torno de 12.500 ha.ano⁻¹, principalmente para fruteiras e hortaliças. A microirrigação permite um maior grau de proteção contra o frio e crescimento mais rápido de plantas jovens de citros quando comparada com os métodos convencionais de irrigação. Além de ser um meio mais econômico de aplicar fertilizantes e outros produtos químicos através da irrigação. Com relação aos custos, a microirrigação apresentam menor custo inicial que sistemas de aspersão permanentes em culturas de grande espaçamento. Porém, os sistemas de microirrigação requerem maiores custos de manutenção. Como a maioria dos componentes é de plástico os danos físicos esperados são maiores que em elementos metálicos. Vale salientar ainda que, em função de se molhar apenas parte da área, as aplicações d'água são mais freqüentes, requerendo mais trabalho e melhor qualidade da mão-de-obra que sistemas convencionais.

Os sistemas do tipo microaspersão são usados principalmente para pomares e plantações de citros e aplicam água promovendo precipitações de muito baixas intensidades, como se fossem um pequeno borrifo ou névoa. O sistema de liberação de água é semelhante àqueles usados nos sistemas de gotejamento, ou seja, não se molha toda a superfície do solo. Os sistemas de microaspersão são adaptáveis para a maioria das culturas. Mas, devido ao seu custo inicial relativamente alto, eles são usados principalmente onde: a água é escassa ou cara;

os solos são de textura média a arenosa, rochosos ou difíceis de serem nivelados; culturas de alto custo e de grande retorno econômico que necessitem de maior nível de controle da água do solo.

Na Índia os sistemas por microaspersão estão tornando-se gradualmente populares para culturas arbóreas, estufas (viveiros) e até em plantas com denso desenvolvimento. Estes sistemas permitem maior cobertura que o gotejamento com praticamente a mesma pressão de operação e nos solos de textura grossa se torna mais econômico, enfatiza Pandey et al. (1995).

Os sistemas de microaspersão por trabalharem com baixas pressões favorecem o uso mais racional não apenas da água, mas também da energia. São mais flexíveis nas medidas operacionais, pois oferecem uma ampla faixa de descarga dos emissores.

2.2. Panorama da microirrigação no Brasil

A irrigação tornou-se fator determinante para o suprimento mundial de alimentos e não apenas mais uma técnica que visa garantir as colheitas. Segundo dados da FAO (1998) a agricultura irrigada é responsável por 40% das colheitas. A superfície irrigada no mundo é estimada em 267,7 milhões de ha (1997), representando 17,75% da área mundial total cultivada (em torno de 1,51 bilhão de ha). Com a expansão da agricultura irrigada, aponta-se, nos dias de hoje, que 70% da água utilizada no planeta é para esse fim, sendo porém, esse percentual bastante variável de país para país. No Brasil, estima-se que quase 55% da água consumida é destinada à agricultura irrigada. Em relação aos países com mais de um milhão de ha irrigados, o Brasil ainda apresenta uma das mais baixas relações área irrigada/cultivada com 5,8%, para uma área irrigada de 2.765.000 ha (Christofidis, 2001). Isso demonstra claramente que o Brasil não utiliza todo o seu potencial para irrigação, e que poderá no futuro atingir índices muito superiores.

O Nordeste brasileiro apresenta um grande potencial para agricultura irrigada e tem reconhecidamente condições muito favoráveis para produção de frutas e hortaliças. A exploração de mais de 25 culturas durante todo o ano com bons níveis de produtividade é potencialmente viável. O setor primário nessa região representa hoje 10% do produto interno bruto (PIB) e ocupa 77% da população economicamente ativa. A expectativa de sucesso da fruticultura irrigada é muito boa levando-se em conta que o mercado mundial de frutas tropicais chega a US\$ 2 bilhões.ano⁻¹. Em 1994 o agronegócio brasileiro representou 40% do PIB, sendo a produção agrícola responsável por 33%. Um fator de extrema importância

social é que para cada hectare (ha) irrigado é estimada a geração de 2,4 empregos diretos e indiretos e que para cada emprego gerado na produção agrícola outro seria gerado no agronegócio (BNB, 2002).

Comparativamente com outros países, a técnica de irrigação no Brasil ainda ocorre em pequenas proporções. Desse modo, considerando-se os benefícios potenciais da irrigação, como os de elevação da produtividade agrícola e melhoria da respectiva qualidade, da ampliação de níveis de emprego e de renda no campo, justificam-se plenamente as políticas agrícolas com a finalidade de fomentar o uso da irrigação no país.

O aumento da produção agrícola para atender à demanda mundial por alimentos, requererá o aumento das áreas irrigadas e do consumo de energia. As fontes de energia são limitadas e uma agricultura sustentável exigirá maior consumo das fontes energéticas. Para se obter uma agricultura sustentável a irrigação deve ser planejada e gerida de modo que conserve água e energia. Nos países em desenvolvimento a modernização dos sistemas de irrigação freqüentemente implica na substituição de sistemas com baixo consumo energético e maior mão-de-obra (superfície) por sistemas mais eficientes que têm maior requerimento energético e maiores custos operacionais. No entanto, em alguns países como Chile e Equador que modernizaram seus sistemas de irrigação a performance em termos de conservação de água e energia deixou a desejar (Alfaro & Marin, 2002). Também está havendo nos países em desenvolvimento a substituição de sistemas que têm maior requerimento de água e energia (aspersão) por aqueles que permitem usar mais racionalmente esses recursos.

Um dos maiores problemas da irrigação é a sua prática de forma não racional, o que tem reflexos negativos na economia e, principalmente, no meio ambiente. Embora se tenha atingido níveis tecnológicos excelentes na irrigação, atualmente, a mesma ainda não é utilizada de forma tecnológica e com adequada eficiência em muitas regiões. Segundo Christofidís (2001) nos países em desenvolvimento a média observada de uso da água para irrigação encontra-se acima de $13.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Enquanto, através de manejo adequado em regiões similares, pode-se obter valores da ordem de $7.500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$.

Estudo realizado por Silva (1999) para avaliar a eficiência da irrigação no Vale do São Francisco (Nordeste do Brasil) evidenciou que embora os agricultores venham obtendo bons resultados na produção irrigada, cerca de 70 a 88% dos produtores poderiam aumentar sua produtividade. O desperdício no custo com água varia de 16 a 20% do valor total. Sendo que, de 40 a 80% dos produtores têm dispêndio excessivo com a água e cerca de 40 a 65% não utilizaram eficientemente a mão-de-obra.

A melhoria dos índices de eficiência da irrigação está diretamente relacionada à aplicação de técnicas modernas, desde o dimensionamento à operação dos sistemas de irrigação. Um dos aspectos que tem tido grande relevância nos últimos anos é a qualidade dos equipamentos desenvolvidos para os sistemas, com ênfase para os emissores de microirrigação. Mantovani (2000) ressalta que o sucesso da irrigação depende de quatro etapas fundamentais: qualidade do projeto; qualidade do equipamento; qualidade da implantação e qualidade do manejo do sistema.

Houve uma clara evolução no período de 1996 a 1999 das áreas irrigadas pelos diferentes métodos de irrigação no Brasil, por Regiões e Estados, principalmente, nas áreas com irrigação por aspersão e microirrigação. Estima-se que nos próximos 10 anos não só as novas áreas irrigadas utilizarão predominantemente os métodos de microirrigação, como também haverá uma conversão de 40% das áreas sob irrigação por superfície e 30% das áreas sob aspersão, para microirrigação, principalmente, gotejamento e microaspersão. As áreas irrigadas com sistemas de microirrigação evoluíram no Nordeste entre 1996 e 1999 de 55.220 para 84.457 ha. Enquanto no Sudeste passou de 44.960 para 80.278 ha, na Região Sul de 11.200 para 33.052 ha e Região Centro-Oeste de 1.350 para 12.271 ha. É interessante observar que há uma maior evolução relativa da microirrigação em regiões onde se apresentam menos problemas hídricos que o Nordeste. A estimativa do crescimento total da microirrigação está baseada nos seguintes dados: 1996 (117.730 ha), 1998 (182.307 ha), 1999 (212.168 ha), (Christofidis, 2001).

O Brasil, como um dos principais países agrícolas do planeta, apresenta excelentes condições de explorar, dentre outras, a potencialidade da fruticultura irrigada. Pode-se verificar segundo Vilas (2001), que o setor está em plena expansão. Entre 1994 a 1999 as exportações de frutas aumentaram de US\$ 128.074.055 para US\$ 175.396.513. Tendo-se como as culturas de destaque para exportação a maçã, o melão, a banana e a uva. A participação do Brasil no mercado mundial de frutas, no entanto, é relativamente pequena, ocupando a 13ª posição entre os seus concorrentes. De acordo com Vilas (2001), dados da FAO indicam que o comércio internacional de frutas tem crescido aproximadamente um bilhão de dólares ao ano.

De maneira estratégica o Brasil foi dividido em 30 pólos de desenvolvimento da fruticultura. Um desses pólos localiza-se no Vale do São Francisco, que apresenta como principal cultura a banana, onde 51% das áreas são irrigadas com sistemas de microaspersão (11.717,8 ha) e 8% de gotejamento (169,9 ha). A ampla aplicação desses sistemas de

microirrigação reflete a preocupação com o uso racional do recurso água que já se encontra limitado em várias áreas produtivas (Santos et al., 2001).

A aplicação de técnicas de irrigação modernas e eficientes no uso da água é a principal medida de curto prazo para otimizar o recurso água. Além do mais, existe uma tendência de pensamento que um meio de se atingir maior racionalização desse recurso é através da cobrança pelo seu uso. Segundo Alves (2000) não se pode fazer uma gestão de água sem ter em mente que ela é um recurso limitado, portanto, dotado de valor econômico. Ressaltando que, em alguns países como os EUA, Chile, México e França, já se cobra pelo uso da água na irrigação. E cita que no Estado do Ceará – Brasil cobra-se R\$.m⁻³ 0,040 d'água para irrigação.

2.3. Considerações gerais sobre o planejamento, dimensionamento e operação de sistemas de irrigação pressurizados

2.3.1. Aspectos do planejamento

O planejamento da irrigação é importante em qualquer programa de gerenciamento d'água. Um programa de planejamento de irrigação pode ter como objetivo: (1) a maximização da produção; ou (2) a maximização do benefício com a possibilidade de redução controlada da evapotranspiração. Em ambos os objetivos, deve-se incluir a minimização do uso da energia. Um programa de gestão da irrigação para ter sucesso requer métodos precisos de medição de umidade, volumes e taxas de aplicação d'água, requerimento de evapotranspiração e probabilidade de precipitação (English et al., 1980).

Uma das formas de buscar o uso mais racional d'água seria a implantação estratégica da redução do uso consuntivo pela implementação de estresse hídrico ou pela rotação de culturas, porém esse tipo de procedimento exige um maior aperfeiçoamento do manejo d'água, e, portanto, melhor planejamento.

Segundo English & Nuss (1982) teoricamente uma irrigação ótima implica em praticar algum nível de déficit. Isso porque a renda marginal do último incremento atingido pela produção com irrigação integral não será tão elevado quando comparado ao último incremento dos custos de produção. Porém, normalmente, o máximo requerimento da cultura é atendido, com o objetivo de se obter a máxima produção. Está implícito, nessa estratégia de manejo, que o rendimento obtido com o déficit de irrigação não justifica o risco envolvido. Com a irrigação deficitária se reduz o consumo d'água e seu custo, assim como diminui o

consumo de energia. É também possível reduzir-se o custo de investimento e o custo de produção. Ressaltam, ainda, que a economia no dimensionamento pode chegar a ser maior que a economia d'água e de energia.

As culturas têm diferentes tolerâncias ao estresse hídrico, e, portanto, diferentes tolerâncias à depleção de umidade no solo. Embora os efeitos dos déficits hídricos sejam conhecidos para várias culturas, essa informação não tem sido levada em consideração na elaboração e no gerenciamento de projetos de irrigação (Hagan & Stewart, 1972).

A irrigação com déficit poderia ser praticada de duas formas: a) com alta frequência, onde a planta sofreria um estresse moderado continuamente, prevenindo grandes declínios de umidade no solo e b) com baixa frequência, onde se observariam amplas variações de umidade no solo. O grande diferencial entre essas duas estratégias de irrigação seria as diferenças nas produções obtidas (Rawlins & Raats, 1975).

Rawlins & Raats (1975) relataram alguns benefícios da irrigação com alta frequência em sistemas pressurizados. O custo de investimento de tais sistemas depende significativamente do diâmetro dos tubos, que depende da taxa de distribuição d'água. Assim, a taxa de distribuição, e, portanto, o custo capital, pode ser minimizado com o dimensionamento do sistema para uma operação contínua. Outra vantagem apontada pelos autores é que a irrigação freqüente e uniforme pode otimizar o ambiente radicular, enquanto se reduz o consumo d'água. O intervalo de irrigação pode ser relacionado diretamente ao custo de irrigação.

Usualmente, há uma tendência dos operadores utilizarem a capacidade máxima do sistema seja essa requerida ou não. Portanto, a redução de capacidade no dimensionamento pode resultar em economia de energia e redução do pique de demanda.

Allen & Brockway (1984) apresentam procedimentos para avaliação econômica do manejo da irrigação com déficit juntamente com o dimensionamento de novos sistemas, onde modelos computacionais incorporam funções de produção água-planta, vida útil do projeto, preços antecipados de produção e custos de investimento, energia, trabalho e água. Segundo os resultados desses modelos, os agricultores necessitam de uma previsão econômica e financeira dos custos operacionais e dos rendimentos dos projetos de irrigação para tomar decisões efetivas e vantajosas no dimensionamento e gerenciamento dos sistemas. Reiteram também, que o principal critério a ser considerado no dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação é o benefício líquido.

Oron & Karmeli (1979) e Oron (1982) desenvolveram modelos para o dimensionamento de sistemas pressurizados fixos em que o custo é minimizado para o atendimento das demandas máximas d'água e, em alguns casos, a demanda máxima diária.

Marouelli (1983) afirma que o dimensionamento da maioria dos sistemas de irrigação no Brasil é baseado em termos de irrigação total, onde as necessidades hídricas da planta são atendidas completamente, desprezando, portanto, a contribuição da precipitação. Ramos (1986) cita que nos projetos de irrigação, utiliza-se, para fins de dimensionamento dos mesmos, a necessidade máxima de água da cultura. A fim de reduzir os custos com operação e manutenção do sistema, o manejo atual da irrigação tende a viabilizar o aproveitamento das águas de chuva efetiva como água disponível às plantas. Para Saad (1990), o dimensionamento de projeto para irrigação total, que atende a todas as necessidades hídricas da cultura, é válido quando se trata de regiões áridas e semi-áridas, como é o caso de determinadas regiões do Nordeste brasileiro. Em se tratando de regiões úmidas e semi-úmidas, tal prática resulta num superdimensionamento de sistemas de irrigação.

Segundo Back (1997) a maioria dos trabalhos relacionados com irrigação é desenvolvida para atender as regiões que possuem períodos bem definidos com pouca ou quase nenhuma precipitação. Nessas regiões, o projeto de irrigação é dimensionado para a irrigação total e o efeito da irrigação na produção é mais previsível, facilitando a análise econômica dos investimentos.

Bernardo (1989) afirma que quando a quantidade de irrigação necessária for superestimada os sistemas de irrigação serão superdimensionados, o que encarece o custo total de irrigação por unidade de área, bem como leva à aplicação excessiva de água. O mesmo recomenda, para fins agrícolas, o nível de probabilidade para precipitação provável de 75%, isto é, uma lâmina mínima de chuva com possibilidade de ocorrência em três a cada quatro anos.

Segundo Castro (1994) apud Longo & Sampaio (2002) no Brasil é adotado, geralmente, o valor médio de precipitação pluviométrica como parâmetro de dimensionamento de projetos agrícolas. No entanto, para o valor médio de precipitação a probabilidade de ocorrência se dá entre 40 e 50%. Estudos realizados por Viana et al. (2002) no município de Russas – CE relataram que a precipitação média superestimou em 142% a precipitação com 75% de probabilidade, em toda a estação chuvosa, e atingiu valores de até 408,3%, no mês de maio.

A falta de informações climáticas e o fato de que as técnicas baseadas em critérios probabilísticos envolvem riscos são, segundo Marouelli (1983), fatores que levam à

elaboração de projetos de irrigação em termos de irrigação total. Dorfman (1985) mostrou que é economicamente viável a redução da dotação de irrigação, utilizando-se informações obtidas de balanços hídricos estocásticos.

O dimensionamento do projeto de irrigação baseado no balanço entre a evapotranspiração e a precipitação com certo nível de probabilidade é recomendável. Geralmente, indicando-se o valor médio da precipitação que é igualada ou superada com certa probabilidade, chamada de precipitação pendente ou precipitação provável (Doorembos & Pruitt, 1977; Silva et al., 1988). Nesse sentido foram realizados vários trabalhos determinando a precipitação provável em períodos semanais, decendiais ou mensais. Como a quantidade de água necessária para suplementar à chuva efetiva é específica para cada projeto, dependendo das condições de clima, do solo e da planta, uma simples distribuição probabilística dos totais precipitados parece não ser adequado para o dimensionamento dos projetos de irrigação, podendo subdimensionar a necessidade de irrigação (Bernardo & Hill, 1978).

Back (1997) concluiu que, em regiões úmidas, a precipitação efetiva média mensal obtida pelo método do Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (SCS, 1967) é superior à precipitação efetiva determinada através do balanço hídrico horário, principalmente em solos que podem gerar mais escoamento superficial. Além do mais, a utilização da precipitação provável no dimensionamento dos projetos de irrigação pode promover uma importante subestimativa da necessidade de irrigação.

Nos sistemas de microirrigação a água é usualmente aplicada diariamente a uma taxa suficiente para satisfazer o requerimento de evapotranspiração e, quando necessário, para lixiviação de sais no solo. Para esses sistemas o ideal seria um controle do programa de irrigação em tempo real o que pode ser possibilitado com o monitoramento do solo e/ou da planta e a automação do sistema.

Sardo & Germanà (1995) avaliando o efeito da irrigação noturna com sistemas localizados, verificaram que há um efetivo controle do déficit de pressão de vapor e que as perdas por evaporação são significativamente menores quando comparadas com as oriundas da irrigação diurna.

Segundo Keller & Bliesner (1990) para culturas de grandes espaçamentos, como algumas fruteiras, recomenda-se que a área molhada nos sistemas de microirrigação seja de pelo menos 1/3 a 2/3 da área da seção transversal do sistema radicular, isto é, entre 33 e 67%. Em regiões onde as chuvas são significativas, valores menores que 33% são aceitáveis em solos de textura de média a fina. Em culturas amplamente espaçadas a porcentagem de área molhada deve ser inferior a 67%.

Quando se comparam sistemas de irrigação, tanto os impactos benéficos e adversos sobre a sociedade e meio ambiente devem ser identificados e apropriadamente considerados na análise. A eficiência econômica pode ser restringida pelos impactos sociais e ambientais que superam o objetivo econômico da produção. Isso deve levar à seleção de um sistema com menor eficiência econômica. Restrições econômicas podem gerar impactos na eficiência econômica e dar lugar a uma importante regra na seleção do tipo de sistema e sua configuração. Por exemplo, quando o capital é limitado, minimizar o custo inicial é necessário (Keller & Bliesner, 1990).

2.3.2. Aspectos do dimensionamento e operação

Um sistema de irrigação pressurizado consiste em um conjunto de equipamentos compreendido por: sistema elevatório, tubulações, conexões, acessórios e emissores, que trabalham com pressões superiores à atmosférica e têm como função conduzir a água desde sua fonte até o ponto de aplicação à planta, fornecendo a mesma de forma adequada, na quantidade e tempo desejados. Esse conjunto é, portanto, uma rede de distribuição d'água com fins agrícolas. Uma característica principal das redes hidráulicas de irrigação é, comumente, ser uma rede ramificada, ao contrário das redes de distribuição d'água urbanas que, normalmente, são redes malhadas e mistas.

O dimensionamento e operação de sistemas de irrigação pressurizados envolvem uma série de fatores que devem ser analisados conjuntamente para que se obtenha a combinação mais favorável de aspectos como: técnico, sócio-econômicos e ambientais. O dimensionamento hidráulico do sistema deve levar em consideração os custos de implantação e seu efeito nos custos operacionais e de manutenção ao longo da vida útil do projeto. Além de considerar exigências agrônômicas, de suprimento d'água e de energia. Quanto maior o grau de automação do sistema menor o custo com mão-de-obra, porém maior custo inicial.

O percentual do custo total de produção, referente aos custos de aplicação da irrigação, varia em função das condições locais, clima, cultura, métodos utilizados, entre outros. Tal custo, na produção agrícola, representa, de maneira geral, a soma das despesas com energia para bombeamento, com mão-de-obra utilizada na irrigação e com serviços de manutenção. Isso representa o custo variável da irrigação que incidirá diretamente sobre o valor de custeio.

Segundo Melo (1993) o custo com energia representa a maior parcela do custo variável da irrigação e, dependendo do método de irrigação empregado, pode chegar a 70%. O custo da energia depende do tipo de combustível, velocidade do motor, da potência instalada e

da eficiência do conjunto motobomba. Considerando que os custos de investimento e operação são altos, é importante que o dimensionamento do sistema seja feito levando-se em conta critérios econômicos e não meramente hidráulicos.

O dimensionamento de uma rede hidráulica pressurizada não possui uma solução única e definida. Permitindo, assim, que sejam concebidas múltiplas redes possíveis com custos diferentes, para uma determinada situação, Karmeli & Oron (1979). Gomes (1999) afirma que o dimensionamento de redes hidráulicas consiste na determinação do diâmetro ou dos diâmetros de cada trecho da mesma, objetivando a adequação das pressões e vazões em todas as tomadas de irrigação, e que o custo da instalação seja o mínimo possível. Alguns dos métodos aplicados ao dimensionamento de redes hidráulicas como o da velocidade máxima admissível e da perda de carga unitária não conseguem atender às restrições do problema e encontrar a solução de menor custo, sendo necessário se recorrer a modelos de otimização econômica.

Várias metodologias têm sido desenvolvidas para o dimensionamento de redes hidráulicas pressurizadas, sendo que cada uma apresenta particularidades em complexidade e precisão. Três métodos baseados em critérios econômicos são apresentados por Bernardo (1986): o método das tentativas, o método das tentativas simplificado e o método de Keller. Esses, porém, apresentam as desvantagens de serem muito trabalhosos e de não permitirem uma análise detalhada das soluções, uma vez não há subsídios para uma análise de sensibilidade dos recursos envolvidos, Saad (1993).

Para Alzamorra & Tárrega (1987) nos sistemas de irrigação fixos como os de microirrigação em que a rede de tubulações e emissores é distribuída por toda a área, o dimensionamento é hidráulicamente indeterminado. Para uma determinada vazão, pode-se obter inúmeras soluções que atendam aos requerimentos de pressão e vazão desejados, ou seja, vários diâmetros de tubos podem ser selecionados, implicando para cada combinação de diâmetros diferentes velocidades de fluxo e diferentes perdas de carga. É fundamental, portanto, a busca da combinação de diâmetros mais viável.

A configuração de um sistema de microirrigação pode ser bastante variável, e depende do projetista, mas é usual encontrarem-se sistemas com as formas geométricas quadradas e principalmente retangulares. Assim, serão as dimensões de comprimento e largura das unidades operacionais que direcionarão o dimensionamento hidráulico e a operação do sistema.

Oron (1982) sugeriu que a área a ser irrigada com sistemas pressurizados fixos deve ser dividida em sub-unidades. A formação de sub-unidades permite irrigar parte da área em

determinado período de tempo, obter uma maior uniformidade de distribuição d'água, aumentar a flexibilidade nas práticas de irrigação, selecionar menores diâmetros de tubos e usar um crescente número de emissores por planta durante o desenvolvimento da cultura. Para Keller & Bliesner (1990) uma sub-unidade de irrigação pode ser a linha de derivação e laterais ligadas, um grupo de laterais, ou uma simples lateral, dependendo onde está o regulador de pressão.

Segundo Keller & Bliesner (1990), a largura de uma unidade operacional é função do espaçamento e vazão dos emissores, da economia devido ao uso de linhas laterais de menor diâmetro, das variações de pressão permissíveis, da expansão das linhas e número de unidades operacionais em funcionamento simultâneo, além da topografia. Enquanto que o comprimento de uma unidade operacional depende do espaçamento e vazão das linhas laterais, economia devida o uso de tubos de menor diâmetro, variações de pressão permissíveis, número de linhas laterais e número de unidades operacionais em funcionamento, bem como da topografia da área. A configuração ideal de um sistema deve ter: um número ótimo de unidades operacionais e de pontos de controle de vazão e/ou pressão; uma configuração conveniente e econômica da linha principal, para atender unidades operacionais que atuem simultaneamente; configurações da unidade operacional uniforme na forma e no tamanho; linhas laterais de diâmetro único variando de 12 mm a 20 mm; linhas de derivação com vários diâmetros, sendo 100 mm o valor máximo; variações de pressão que não excedam o valor permissível estabelecido, a fim de que se tenha a uniformidade de emissão desejada.

Keller & Karmeli (1975) afirmaram que a maior dificuldade associada à formação da sub-unidade é selecionar o tamanho e o número ótimo de sub-unidades. Oron & Walker (1981) encontraram que o formato mais econômico de sub-unidade é do tipo quadrado. Oron (1982) comparou vários tamanhos de sub-unidades e encontrou uma grande variação na quantidade relativa de cada tipo de tubo na rede que afeta o custo do sistema. Segundo Holzapfel et al. (1990) vários pesquisadores encontraram pequenas diferenças de custo entre tamanhos de sub-unidades para um específico tamanho de área.

Os sistemas devem ser subdivididos em estações de operação ou certo número de unidades operacionais (N_{uo}). Desse modo, o volume bruto diário requerido por planta, deve ser fornecido em no máximo 21,6 h ou menos. Então, seleciona-se um valor razoável de tempo de aplicação (T_a), tal que $12 < T_a < 21,6 \text{ h.dia}^{-1}$ e calcula-se uma vazão média do emissor. Quando o aumento de pressão excede a pressão recomendada para o emissor, emissores maiores ou mais emissores por planta são necessários. Keller & Bliesner (1990) sugerem preliminarmente para o tempo de aplicação:

- Se o T_a está próximo de $21,6 \text{ h.dia}^{-1}$ deve-se usar uma estação ou $N_{VO} = 1$. Seleciona-se $T_a \leq 21,6$ e ajusta-se a vazão do emissor;
- Se T_a está próximo de $10,8 \text{ h.dia}^{-1}$ usam-se duas estações, $N_{VO} = 2$. Seleciona-se $T_a \leq 10,8$ e ajusta-se a vazão do emissor;
- Se $12 < T_a < 18 \text{ h.dia}^{-1}$ deve ser desejável usar diferentes emissores ou diferentes número de emissores por planta para operar próximo de 90% do tempo disponível, promovendo a redução dos custos de investimento.

A capacidade do sistema está baseada, usualmente, na máxima evapotranspiração ou uso consuntivo da cultura. Antes de calcular a capacidade do sistema, porém, determina-se o número de unidades operacionais em que a área será dividida. Por razões econômicas é normal operar o sistema próximo ao tempo total de irrigação disponível, desse modo usando o maior número de unidades operacionais possível.

O número mínimo e máximo de sub-unidades depende dos seguintes fatores: geometria da área, taxa de aplicação, lâmina desejada, intervalo de irrigação, máxima capacidade do sistema disponível e do programa de operação desejado.

O desenvolvimento de modelos hidráulicos para os sistemas de microirrigação e o elevado nível tecnológico dos processos de fabricação dos equipamentos permite os projetistas conseguirem uniformidades de distribuição superiores a 90%, seguindo as recomendações da maioria dos pesquisadores. Isso, porém, não é garantia de eficiência de irrigação adequada, uma vez que essa eficiência está também na dependência de um manejo ótimo do sistema como um todo. A eficiência de irrigação é afetada principalmente pela uniformidade de emissão e pelas diversas perdas que ocorrem durante a operação do sistema. Logo, é fundamental que a seleção da uniformidade de emissão para o projeto seja adequada, o que requer uma análise econômica dos seguintes fatores: custos dos sistemas tendo vários valores de uniformidade de emissão; a relação água-custo; sensibilidade da produção e qualidade com irrigação não uniforme; e valor comercial do produto. Uma completa análise econômica desses fatores é necessária para se determinar o valor ótimo de uma situação específica. Mas, raramente existem dados suficientes para tais análises econômicas.

Os sistemas de microirrigação aplicam água geralmente com alta frequência e a baixas taxas. Variações na descarga dos emissores, mesmo pequena em termos absolutos, podem representar variações percentuais relativamente altas. São vários os fatores que afetam a uniformidade de aplicação dos emissores, porém, as características de performance dos emissores são freqüentemente desprezadas no dimensionamento e operação dos sistemas de microirrigação, segundo Boman & Parsons (1995). É importante considerar no

dimensionamento os efeitos do conjunto microtubo/suporte na microaspersão e o desgaste dos emissores. O dimensionamento deve ser baseado nas descargas reais dos emissores e não necessariamente nas especificações técnicas do fabricante. Sistemas que têm operação contínua visando atender à máxima demanda d'água, podem resultar em estresse hídrico não desejado na cultura, caso a vazão de projeto não possa ser distribuída em toda a área. Emissores com descarga inferior à do dimensionamento deve ter os tempos de aplicação aumentados e, conseqüentemente, acréscimo nos custos operacionais e de manutenção. Um outro aspecto é que em alguns grandes sistemas o tempo gasto para que todos os emissores estejam em seu funcionamento normal, ou seja, totalmente pressurizados pode levar de 20 a 30 minutos, o que pode resultar em problemas operacionais. Na seleção do emissor ideal para uma dada situação, devem-se considerar, além da uniformidade, fatores como: custo, efeitos do vento, restrições do sistema, manutenção e propriedades físicas do solo.

A uniformidade de aplicação depende da uniformidade de descarga do emissor, que é função do dimensionamento hidráulico do sistema e das características funcionais do emissor, que envolvem as variações de fabricação, efeitos da temperatura e entupimento. Dentre os fatores que afetam a uniformidade da microirrigação o entupimento é o que mais significativo deles, em seguida o número de emissores por planta e o espaçamento entre emissores (Wu, 1995). No entanto, em condições adequadas de tratamento da água de irrigação, um dos fatores principais para se garantir a elevada uniformidade de emissão é o baixo coeficiente de variação de fabricação dos emissores.

Para uma dada pressão de operação a variação de vazão pode ser mantida dentro de limites aceitáveis nas laterais ou terciárias para determinado diâmetro e comprimento de tubulação, permitindo assim, uniformidades de aplicação desejáveis (Gillespie et al., 1979).

Na fase de dimensionamento, não é possível medir as taxas de emissão do emissor do sistema planejado. A variação a ser esperada nas taxas de emissão pode ser estimada por alguns procedimentos analíticos. Infelizmente, não é prático considerar todos os fatores que influenciam, tais como o entupimento parcial ou total, mudanças na temperatura da água e idade dos emissores na fórmula da uniformidade de emissão. Não é possível verificar no dimensionamento e computar ou mesmo estimar satisfatoriamente as imprevistas variações que esses fatores podem causar nas taxas de emissão.

Koumanov et al. (1997), avaliando a eficiência de aplicação de microaspersores, relataram que embora os microaspersores possam apresentar alta variabilidade na aplicação d'água na superfície, a uniformidade na área molhada é, em geral, alta. Isso ocorre devido à rápida redistribuição d'água em função dos gradientes de potenciais d'água no solo e a um

eficiente mecanismo do sistema radicular para reduzir a variabilidade de umidade. Verificaram também que a irrigação por microaspersão ao anoitecer e à noite, períodos onde a temperatura do ar é baixa e a umidade relativa do ar é relativamente alta, pode promover uma significativa economia d'água, comparada com outros períodos do dia.

Lí (1998) avaliou o efeito da uniformidade de aplicação d'água na produção em sistemas irrigação por aspersão. Os resultados evidenciaram que a água é mais uniformemente distribuída dentro da zona radicular que na superfície. A produção aumenta com a uniformidade. A quantidade ótima de água depende da uniformidade e de fatores econômicos, diminuindo com a uniformidade, mas crescendo com a taxa preço do produto custo da água. O valor ótimo do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) aumenta com a taxa entre a lâmina bruta e a requerida, mas aproximou-se de 90% quando a taxa excedeu 0,85. Isso é justificado pelo fato que um aumento de CUD requereria um grande aumento no custo do equipamento quando CUD está acima de 90%. O CUD no solo excedeu 90% mesmo quando na superfície foi menor que 70%.

Uma das principais desvantagens dos sistemas de microirrigação é seu alto custo inicial, tendo em vista que é necessário uma grande quantidade de equipamentos para o sua instalação e operação. Segundo Mantovani (2000) o custo médio estimado para os sistemas de irrigação têm a seguinte variação: para aspersão convencional de R\$.ha⁻¹1.200 a 1.800; auto-propelido de R\$.ha⁻¹1.500 a 2.000; pivô-central de R\$.ha⁻¹1.500 a 2.500; gotejamento de R\$.ha⁻¹2.000 a 4.000 e um localizado alternativo de R\$.ha⁻¹1.500 a 2.500. Portanto, a escolha do tipo de sistema e o seu adequado dimensionamento são etapas fundamentais do planejamento do projeto de irrigação.

A crise do setor energético traz para discussão a necessidade de que se dê maior atenção à parcela dos custos que a energia representa na operação dos sistemas de irrigação. No Brasil as autoridades do setor elétrico impuseram em 2001 a redução de 10% no consumo de energia, como meta de racionamento, o que viria a provocar uma perda estimada de 80% da produção no Vale do São Francisco. Isso levaria a um grave problema econômico para a região e provocaria milhares de desempregos. Outro aspecto é o nível de endividamento dos produtores que contam com suas produções para cumprir um cronograma financeiro. Além do mais, isso implica em uma retração no investimento de irrigação em novas áreas (Freire & Pontes, 2001).

Segundo Lima (2001), em virtude da crise energética no país, o setor agrícola teve que tomar medidas como a redução do tempo de bombeamento dos sistemas de irrigação, visando minimizar os efeitos da crise, atendendo à meta de racionamento de 10%. Isso teve como

implicação direta à redução da lâmina de irrigação em 10%. Além disso, evidenciou-se a necessidade da utilização de sistemas mais eficientes e que demandam menor potência, em substituição àqueles que molham 100% da área. Portanto, o dimensionamento do sistema deve considerar como diretriz o consumo ótimo de energia. Para sistemas de gotejamento, por exemplo, um bom projeto requer aproximadamente $1 \text{ CV} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Lima & Silva, 2000).

A preocupação com a racionalização do consumo de energia não é, no entanto, uma questão apenas do momento. Além dos aspectos ambientais e de escassez de recursos os custos com energia são representativos e podem afetar a sustentabilidade de um projeto. A otimização dos recursos energéticos deve ser contínua e a competitividade do setor agrícola exige a realização de estudos de racionalização não apenas da água, mas também da energia. Nesse sentido, podemos citar a realidade observada por Souza (1999) do Distrito de Irrigação Senador Nilo Coelho (DISNC) que vem apresentando uma redução no consumo de energia entre os anos de 1989 a 1998 de 0,50 para 0,33 $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ e de 689,26 para 378,33 $\text{kWh} \cdot \text{ha}^{-1}$. A demanda de energia por volume fornecido e por área irrigada, que representa a potência requerida, também apresentou o mesmo comportamento variando de 0,00257 para 0,00117 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$ e de 3,54 para 1,32 $\text{kW} \cdot \text{ha}^{-1}$. Essa significativa economia de energia tem sido obtida, dentre outros fatores, por: instalação gradual de bombas automáticas, que favorece uma operação contínua e o custo mais baixo de energia entre 21:00 h e 05:00 h; melhoria do manejo da irrigação; mudança no tipo de sistema de irrigação por aspersão para microirrigação e melhor operacionalização do perímetro irrigado. Como a água é o principal insumo para irrigação recomenda-se trabalhar com os indicadores de consumo e de demanda de energia em função do volume de água fornecido.

A redução no consumo de energia na operação dos sistemas de irrigação depende diretamente do tempo de operação ou de bombeamento do mesmo. O tempo de operação de um sistema dependerá de muitos fatores, sendo os principais: (1) o volume d'água requerido pela cultura em todo o seu ciclo; (2) da descarga do emissor e (3) do número de unidades operacionais que compõem o sistema. Como forma de reduzir os custos com energia é essencial, portanto, que a demanda d'água da cultura seja bem determinada. Nesse sentido faz-se necessário que os fatores relacionados ao balanço hídrico no solo sejam bem conhecidos, tendo-se como principais a evapotranspiração real da cultura e a precipitação efetiva. Brito (1986) ressalta que para se reduzir o consumo de energia é fundamental um manejo racional da irrigação. E enfatiza a necessidade do uso de coeficientes de cultivo adequados para estimativa do uso consuntivo. Esses coeficientes são de determinação

complexa e específicos para cada situação, os valores existentes são escassos e muitas vezes de precisão questionável, exigindo esforço de pesquisa para sua determinação criteriosa.

A energia é um fator de grande importância nos países em desenvolvimento, onde a irrigação é o principal usuário. No 14^o Congresso da Conferência do Comitê Mundial de Conservação de Energia realizado em 1989 em Montreal, estimou-se que o crescimento do consumo mundial de energia seria de 50 a 75% entre 1985 e 2020. Muito desse aumento é esperado em países em desenvolvimento (Alfaro & Marin, 2002).

O requerimento de energia cresce quando a aplicação d'água torna-se mais ineficiente. Em estudos realizados no Brasil, encontrou-se para sistemas de irrigação por aspersão convencional, gotejamento e microaspersão que o consumo estimado de energia aumentou cerca de 50,0, 41,7 e 41,6%, respectivamente. Considerando uma eficiência potencial de 60% e real de 40% para aspersão e uma eficiência potencial de 85% e real de 60% para a irrigação localizada (Alfaro & Marin, 2002).

Keller & Bliesner (1990) recomendam que o número máximo de horas de operação por dia não deve exceder 90% do tempo disponível (21,6 h). É necessário permitir alguma margem de segurança para falha do sistema ou outro contratempo. Porém, os sistemas devem ser operados o mais continuamente possível (pelo menos 12 h.dia⁻¹) para reduzir os custos de investimento.

Planells et al. (2001) elegem três aspectos fundamentais no dimensionamento e operação de uma rede de distribuição para irrigação com base na demanda em tempo real. O primeiro é determinação da descarga da parcela como uma função da taxa de aplicação média do sistema. O segundo, a determinação das curvas de máxima e mínima demandas. E o terceiro, o dimensionamento e regulação do sistema de bombeamento que minimize os custos de investimento e operação de acordo com as condições de uso na área irrigada e com a operação em horários com diferentes custos de energia.

Um fator importante no planejamento dos sistemas de irrigação é o horário de uso da energia. O período entre 17:00 e 22:00 h, conhecido como horário de ponta, pode gerar problemas no fornecimento, chegando em algumas épocas e regiões a sobrecargas no sistema de distribuição de energia. Deve-se ressaltar, também, que o produtor, bem como os técnicos do setor, devem tomar conhecimento de que existem formas de redução dos gastos com energia elétrica mediante uma simples mudança na tarifa a ser adotada pela empresa agrícola, pois os valores cobrados pelas concessionárias, pela demanda e pelo consumo unitário podem ser alterados conforme a tarifa contratada.

Com o objetivo de reduzir o consumo de energia nos horários de ponta e na época seca do ano o Departamento Nacional de Energia Elétrica (DNAEE) hoje Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), desenvolveu um sistema de tarifas diferenciadas de energia elétrica. Para isso os consumidores foram divididos em dois grupos, A e B. Os consumidores do grupo A compreendem àqueles atendidos por redes trifásicas, com transformadores de 112,5 a 1000 kVA, sob tensão acima de 2,3 kV. Ou os consumidores atendidos diretamente pela distribuição, com tensão acima de 69 kV. A tarifação desses consumidores é baseada na demanda de potência e no consumo de energia. Os consumidores do grupo B correspondem àqueles atendidos por rede monofásica, com transformadores de 5 a 37,5 kVA e redes trifásicas, com transformadores de 15 a 75 kVA. Atualmente, as tarifas que podem ser contratadas pelo consumidor do Grupo A, são classificadas em: convencional; horo-sazonal azul; horo-sazonal-verde; de emergência autoprodutor. Os produtores do setor agrícola, em particular os irrigantes, com tarifa convencional enquadram-se no grupo B, sub-grupo B2 que compreende: B2 - rural, B2 - cooperativa de eletrificação rural, B2 - serviço de irrigação.

O DNAEE estabeleceu, através da Portaria Nº 105 de abril de 1992, descontos especiais na tarifa de consumo de energia elétrica utilizada exclusivamente para fins de irrigação, para os consumidores classificados como rural, incluindo as cooperativas de eletrificação rural. Esses descontos, porém, incidem apenas para o período compreendido entre 23:00 e 05:00 h. Pela Resolução Nº 277 de 2000 (ANEEL), na Região Nordeste do País e outras regiões geoeconômicas incluídas na área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), atualmente ADENE, esses descontos são de 90 e 73% para o grupo A e grupo B, respectivamente. Nas Regiões Norte e Centro-Oeste de 80 e 76%, e nas demais regiões de 70 e 60%, respectivamente.

Assim como na irrigação o custo energético nos sistemas de abastecimento d'água também tem grande representatividade nos custos totais dos mesmos e representa a maior parcela dos custos operacionais nesses. Tsutiya (2001) após vários anos trabalhando na operação de redes de abastecimento d'água, elencou uma série de medidas que objetivam a redução do custo operacional devido ao consumo de energia elétrica. Essas medidas podem também servir como guia para que o setor de irrigação otimize o uso da energia. Em sua análise as medidas podem ser classificadas em dois grupos:

- a) Redução do custo sem diminuição do consumo de energia elétrica:

- Redução do custo sem investimentos (medidas administrativas): classificação, regularização da demanda contratada, alteração na estrutura tarifária, desativação, erro de leitura, negociação com as companhias energéticas para a redução de tarifas e operações emergenciais;
- Redução do custo com investimentos (medidas operacionais): correção do fator de potência, alteração da tensão de alimentação; melhoria do fator de carga.

b) Redução do custo com diminuição do consumo de energia elétrica:

- Redução da altura manométrica: redução de perdas de carga;
- Redução do volume de água: uso racional da água;
- Aumento do rendimento dos conjuntos eletrobomba: rendimento do motor e rendimento da bomba.

Segundo Xin et al. (1995), a necessidade de melhorar a gestão dos projetos de irrigação tem aumentado a importância dos sistemas de suporte à decisão. Esses utilizam o conhecimento heurístico requerido na tomada de decisão e podem ser operados em tempo real, trabalhando com dados dinâmicos e com respostas em tempo crítico. No entanto, apresentam altos custos devidos principalmente aos sensores e à estação agrometeorológica, que fornecem automaticamente os dados de entrada dos sistemas. Além disso, a construção da base de conhecimento dos modelos é tarefa bastante complexa, exigindo o esforço de especialistas de diversas áreas do conhecimento.

2.4. Modelos e técnicas de otimização

O uso da pesquisa operacional visa justamente a busca da solução mais viável, ou ótima, dentro de um determinado panorama onde existem limitações de várias naturezas, como a limitação de recursos econômicos. Assim, com a aplicação de técnicas de otimização pode-se encontrar a solução ótima para os problemas.

Um modelo é uma representação simplificada do sistema real que se deseja analisar onde apenas a essência do sistema, ou seja, os aspectos relevantes para a solução do problema devem ser considerados. Para que os resultados de um processo de otimização sejam válidos, é essencial que o modelo matemático represente com maior veracidade possível o processo que está sendo modelado, Porto & Azevedo (1997).

Alguns critérios devem ser analisados na escolha de um modelo, dentre os quais: precisão; simplicidade; robustez; transparência e adequação, Oren (1984).

Segundo Mateus & Luna (1986) o objetivo da otimização é encontrar a melhor solução dentre as possíveis para um problema específico. Otimização é a busca da melhor solução para um dado problema. Consiste em tentar várias soluções e utilizar a informação obtida neste processo de forma a encontrar soluções cada vez melhores. As técnicas de otimização, geralmente, apresentam: (1) um espaço de busca e (2) uma função objetivo. Em termos matemáticos a otimização consiste em achar a solução que corresponda ao ponto de máximo ou mínimo da função objetivo.

A função objetivo de um problema de otimização deve representar matematicamente o que se procura maximizar ou minimizar. Muitos aspectos podem ser inseridos em sua definição, como: custos e prejuízos, lucros e outros tipos de benefícios, indicadores econômicos e de desenvolvimento, indicadores sociais e funções estritamente matemáticas. A estrutura mais simples de função objetivo ocorre quando se busca minimizar custos e/ou maximizar lucros (Cirilo, 1997).

Em termos de eficiência econômica, um projeto deve focar sobre o máximo retorno do investimento (máxima relação benefício/custo (B/C) ou máximo rendimento $B - C$) (Figura 2.1) (Keller & Bliesner, 1990).

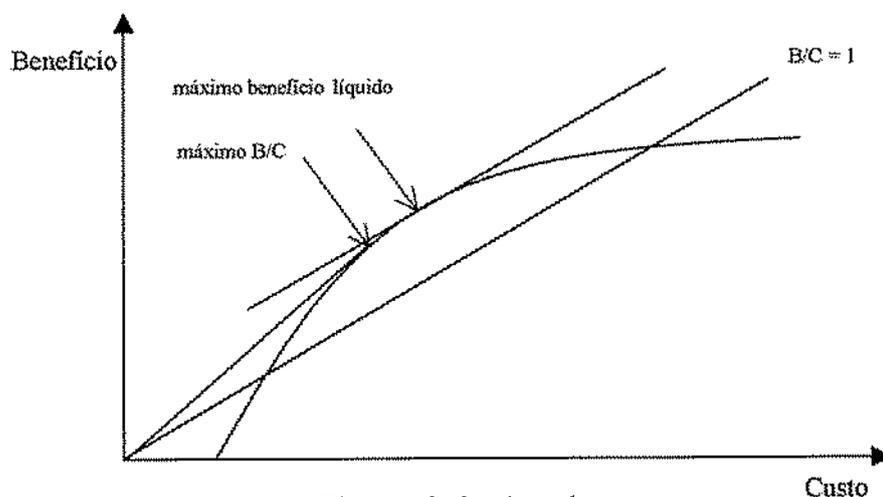


Figura 2.1. Relação benefício/custo na análise econômica de projetos.

Grande parte dos modelos de otimização desenvolvidos têm como critério de decisão uma relação benefício/custo. No entanto, esses modelos apresentam problemas em se quantificar confiavelmente os benefícios e os custos, ressaltando-se que alguns benefícios e custos são praticamente imensuráveis. Além disso, benefícios e custos podem ter significados diferentes para grupos de interesses diversos. A análise benefício/custo pode ser realizada sob

três enfoques: (1) maximização do benefício líquido; (2) maximização do benefício por unidade de investimento e (3) minimização dos custos (Porto & Azevedo, 1997).

Para Neufville et al. (1971) os métodos de otimização onde se utiliza uma função objetivo relativamente simples (ex. minimização de custos sujeitos à restrições) não refletem os vários critérios que normalmente são avaliados nos sistemas de abastecimento d'água. Os objetivos e medidas de êxito dos projetos não refletem completamente os verdadeiros interesses dos decisores e a experiência tem mostrado que raramente a programação matemática é usada na tomada de decisão crítica, isso porque os objetivos e restrições são vagos ou mesmo sujeitos a conflitos de interesses, apud (Walski, 2001).

Para Walski (2001) enquanto à primeira vista a minimização de custos deva parecer o objetivo no dimensionamento de sistemas de distribuição d'água, a otimização baseada na minimização tem sérias limitações pelos seguintes motivos: (1) Dificuldade em identificar o verdadeiro benefício e restrições no dimensionamento, principalmente pelas incertezas das demandas futuras; (2) Existirão muitas alternativas com o mesmo benefício líquido; (3) As reais demandas tendem a ser controladas para uma certa faixa de tamanhos de tubos de modo que o dimensionamento torna-se predito pela sua própria execução.

Houve uma grande evolução no campo da pesquisa operacional nas últimas décadas com o desenvolvimento de técnicas numéricas para solução de problemas complexos através de modelos computacionais. Problemas esses que não poderiam ser solucionados analiticamente. Dentre as técnicas determinísticas para solução de problemas matemáticos podem-se citar: Enumeração exaustiva; Programação linear; Programação não linear e Algoritmos genéticos. Sucintamente podemos descrever algumas características dessas técnicas:

Enumeração exaustiva - Nesse procedimento de otimização se utiliza um modelo de simulação para enumerar exaustivamente as alternativas decisórias, de modo a ser possível a identificação do ótimo. Esta enumeração pode ser aleatória ou utilizar técnicas iterativas de otimização (Lanna, 1997). No caso do dimensionamento de redes, por exemplo, a enumeração completa simula todas as combinações possíveis de diâmetros de tubos. A principal desvantagem é o tempo computacional envolvido. Dandy & Hassanli (1996) fazem a aplicação dessa técnica na análise de sistemas de irrigação localizada.

Programação linear (PL) - A técnica da programação linear, originada em 1947, teve suas primeiras aplicações em recursos hídricos na década de 60. É uma das técnicas pioneiras na otimização de redes de tubulações e uma das mais empregadas, de modo geral, nas diversas atividades de pesquisa operacional. São inúmeras as aplicações d PL, podendo-se

citar os trabalhos realizados por Karmeli et al. (1968), Gupta (1969), Saad et al. (1994) e Barbosa et al. (1999) para otimização do dimensionamento de redes hidráulicas pressurizadas. Nos modelos que usam a PL as incógnitas passam a ser os comprimentos de cada trecho com diâmetro comercial, podendo impor-se, como restrição, a pressão em qualquer nó da rede. Com isso, ao deixar os comprimentos como incógnitas, não haverá dúvida que se obterá o ótimo global. No entanto, a grande maioria dos problemas de engenharia são de natureza não lineares e a linearização desses, quando possível, pode ser complexa e levar à perda de precisão (Cirilo, 1997). Com relação à programação não linear tem algumas vantagens, quais sejam: a simplicidade do problema e a garantia de se encontrar o ótimo global com menor tempo computacional. Há uma grande disponibilidade de bons softwares para problemas de programação linear.

Programação não linear (PNL) - Há um grande número de programas computacionais disponíveis para a solução de problemas de programação não linear com ou sem restrições e que podem ser usados na otimização de redes hidráulicas. Muitos pacotes computacionais foram desenvolvidos e são de fácil acesso. Pode-se citar como exemplo: o programa ADS (Automated Design Synthesis) desenvolvido pela Universidade da Califórnia; o programa GAMS (General Algebraic Modeling System) da GAMS Development Corporation; o programa LANCELOT desenvolvido no Rutherford Appleton Laboratory da Inglaterra; o programa SOLVER existente em algumas planilhas eletrônicas como a EXCEL (Cirilo, 1997); o MATLAB; o MINOS; o GINO; entre outros. Os pacotes computacionais MINOS, GINO, GAMS e SOLVER baseiam-se na técnica do gradiente reduzido generalizado (GRG) para identificar o ótimo local do problema da rede. Algumas características dos algoritmos presentes nesses modelos de *PNL* são a inclusão, explicitamente, das restrições e os custos podem ser expressos como uma função não linear de diâmetro e comprimento do tubo.

Existem diversos trabalhos que utilizam a *PNL* em redes de distribuição d'água e sistemas de irrigação. As limitações dessa técnica na aplicação em redes hidráulicas são: (1) Quando na formulação do modelo os diâmetros são variáveis a ser otimizados, os valores ótimos obtidos serão contínuos e não coincidirão com os tubos disponíveis comercialmente, assim é necessário um ajuste da solução final com os diâmetros comerciais e a determinação dos novos comprimentos dos tubos. Esse problema, no entanto, não existe quando a variável a ser otimizada é o comprimento do tubo; (2) Apenas um ótimo local é obtido e (3) Existe uma limitação do número de restrições o que pode interferir no tamanho da rede.

O principal problema da programação não linear, enfatiza Cirilo (1997), está relacionado à incerteza de que a solução ótima global foi encontrada. E sua principal vantagem está na grande abrangência dos problemas práticos.

Programação dinâmica - Segundo Ventsel (1983) essa é uma técnica especialmente adaptada aos problemas com múltiplos passos ou estágios. Nela está incorporada a idéia da otimização gradual, cujo princípio é a consideração de que a solução de uma etapa é mais simples que a de todo o processo. Para Lanna (1997) existem dois problemas principais na sua utilização: o primeiro é que sendo um procedimento e não um método, não existem programas generalizados para aplicá-los em qualquer circunstância. O usuário com frequência deverá programar o seu próprio algoritmo. O segundo problema é a chamada "maldição da dimensionalidade" que ocorre em sistemas muito complexos.

Algoritmo genético (AG) - é um algoritmo de busca baseado na seleção natural e nos mecanismos da genética das populações. O AG tem por fundamento o processo biológico de sobrevivência e adaptação. Apresenta-se como um algoritmo eficiente e flexível que permite a solução de problemas complexos. Comparando-se com outras técnicas de programação matemática pode-se considerar como vantagens do AG, no contexto da otimização do dimensionamento de redes: (1) Trabalhar diretamente com uma parte da população de soluções a qualquer momento. Estas são estendidas através do espaço de solução, tal que a chance de obter o ótimo global é significativamente aumentada; (2) Cada solução consiste de um conjunto de diâmetros discretos, de modo que não é necessário o arredondamento dos diâmetros para a solução final; (3) É identificado um conjunto de soluções de configurações da rede que dão a solução de custo mínimo e (4) Usa apenas uma função objetivo ou de aptidão, em contraste com os métodos mais tradicionais que confia, sobretudo, na existência e continuidade de derivadas ou outras informações auxiliares. No entanto, assim como a maioria das técnicas, os AG não garantem a que o ótimo global seja obtido (Goldberg, 1989). Diversos estudos foram realizados com êxito na aplicação dos AG em redes de distribuição d'água McKinney & Lin (1994), Simpson et al. (1994) e Reis et al. (1997).

Diversos métodos de solução de problemas de PNL baseados em diferentes teorias têm sido desenvolvidos. Porém, devido às limitações matemáticas inerentes de cada método, nenhum destes assegura a convergência ótima para todos os problemas de PNL. Analiticamente, alguns métodos têm melhores propriedades de convergência, enquanto, numericamente, alguns métodos são mais robustos. Alguns "pacotes" computacionais comerciais desenvolvidos para PNL utilizam em seus códigos essas teorias e métodos

numéricos e podem ser classificados em três tipos: softwares convencionais, linguagem de modelamento e biblioteca de sub-rotinas.

O processo de decisão raramente é tomado em função de um único objetivo. A maioria dos projetos procura atingir diversos objetivos simultaneamente, muitos deles conflitantes e não mensuráveis em termos monetários. O número de grupos de interesses envolvidos nas decisões tende a aumentar e em geral estabelecem-se conflitos de interesse. Portanto, não é fácil se encontrar critérios e formular objetivos aceitos por todos. Nesse aspecto surge a necessidade de modelos mais complexos que analisem vários objetivos ao mesmo tempo e que utilizem as técnicas multi-objetivo (Porto & Azevedo, 1997).

Kao (1998) realizou um estudo comparativo entre seis “pacotes” computacionais para PNL. Em sua análise a performance desses pacotes foi avaliada quanto sua eficácia, eficiência, precisão e facilidade de uso. Dentre esses pacotes o MATLAB apresentou boa performance, e maior facilidade de uso, porém com maior tempo computacional. O MATLAB usa o algoritmo de programação quadrática seqüencial (SQP) para a solução de problemas restritos, que juntamente com o gradiente reduzido generalizado são considerados os melhores métodos de PNL.

Segundo Boggs & Tolle (2000) e Rodriguez-Toral et al. (2001) o SQP tem provado ser um algoritmo eficiente e robusto, tendo demonstrado ser um dos de maior sucesso para a solução de problemas de PNL. Tem a vantagem sobre o método GRG de não requerer convergência de restrições de igualdade em pontos intermediários, por exemplo. Além disso, uma vez baseado no método de Newton, tem a propriedade de convergência quadrática e geralmente requer poucas avaliações das funções.

2.5. Programação não linear

2.5.1. Introdução

Em grande parte dos problemas de engenharia os projetistas se deparam com situações onde a tomada de decisão se torna complexa em função da magnitude e complexidade das variáveis de decisão. Sempre que possível, dependendo do problema, a experiência do projetista é o fator mais utilizado para se chegar a uma solução viável. No entanto, a solução obtida, embora atenda às restrições do problema, pode não ser a mais economicamente viável.

Uma característica importante dos problemas de engenharia é a não linearidade dos modelos matemáticos que representam os processos físicos envolvidos. Um artifício utilizado por muito tempo foi a linearização dos modelos para que esses pudessem ser otimizados com uso da programação linear. Isso devido principalmente à inexistência de computadores potentes. O preço pago por esse procedimento era a perda de precisão e até a descaracterização do problema original (Cirilo, 1997). Com o advento dos superprocessadores problemas complexos podem ser facilmente resolvidos usando a programação não linear com a garantia de soluções precisas.

Os problemas não lineares, em geral não podem ser resolvidos utilizando técnicas clássicas de cálculo diferencial, devendo-se utilizar para resolvê-los, métodos numéricos iterativos que geram soluções intermediárias a cada passo do processo, e, portanto, necessitando do computador. Esses métodos acarretam algumas dificuldades tais como: a necessidade de uma solução inicial; o escalonamento de variáveis; a aproximação do problema original para uma função matemática; a exigência de continuidade e diferenciabilidade das funções envolvidas, entre outras (Formiga, 1999).

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

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

Os problemas de dimensionamento econômico de redes hidráulicas pressurizadas, dentre as quais as de irrigação, enquadram-se em um problema típico de programação não linear e vêm sendo estudado a décadas. O número de modelos desenvolvidos para otimização de sistemas de irrigação, comparando-se com os de redes de abastecimento d'água, são ainda limitados ou pouco expressivos, talvez por que os projetistas não tenham dado a devida importância às novas tecnologias ou a dificuldade em se formular tais modelos computacionalmente.

2.5.2. Descrição do modelo de programação não linear

Um modelo de otimização é composto basicamente por uma função que representa o objetivo a ser maximizado (ou minimizado) denominada *função objetivo*. E por um conjunto de *restrições* que determinam a região no espaço onde se encontram as *soluções viáveis*, às quais a *função objetivo* deve satisfazer. A *solução ótima* do problema é o conjunto de soluções viáveis que otimizam a *função objetivo*.

Cirilo (1997) representa o modelo matemático que define a programação não linear da seguinte forma:

$$\text{Maximizar (ou minimizar) } f(X) \quad (2.1)$$

Sujeito às restrições

$$g_i(X) > 0 \text{ ou } (< 0); \quad i = 1, 2, 3, \dots, S_1; \quad (2.2)$$

$$h_k(X) = 0; \quad k = 1, 2, \dots, S_2; \quad (2.3)$$

$$X^{\min} \leq X \leq X^{\max}.$$

onde:

$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$ é um vetor contendo n variáveis de decisão, cujos valores ótimos busca-se determinar;

$f(X)$ é a função objetivo, cujo valor pretende-se maximizar ou minimizar;

$g_i(X)$ e $h_k(X)$ são denominadas restrições de desigualdade e de igualdade, respectivamente;

X^{\min} e X^{\max} representam os vetores que contêm os valores mínimos e máximos que podem ser assumidos pelas variáveis de decisão.

Para que seja caracterizado como um problema típico de programação não linear é necessário que ao menos uma das funções $f(X)$, $g_i(X)$ ou $h_k(X)$, sejam não lineares. A programação não linear, da forma como está acima apresentada, chama-se Programação Não Linear Restrita, pois apresenta restrições à sua função objetivo; caso contrário, quando a função a ser otimizada não apresenta restrições, denomina-se Programação Não Linear Irrestrita, ou seja:

$$\text{Maximizar (minimizar) } f(X) \quad (2.4)$$

$$X \in \mathcal{R}^n \quad (2.5)$$

2.5.3. Condições de otimalidade

Em termos matemáticos otimizar significa achar o máximo ou mínimo de uma função objetivo. Para os problemas não lineares é comum a existência de vários pontos de máximos e de mínimos locais para uma função. Assim, a presença de ótimos locais em um certo intervalo caracteriza a função como multimodal. Existindo apenas um ótimo para o intervalo, esse também é o ótimo global, caracterizando a função como unimodal.

Na solução de problemas de programação não linear são utilizados métodos iterativos que geram uma seqüência de pontos, os quais convergirão, ou não, para um determinado ponto X^* ótimo, o qual é a solução do problema. Se $f(X) \geq f(X^*)$ para todo X na vizinhança de X^* , diz-se que X^* é um ponto de mínimo. Caso $f(X) > f(X^*)$, para todo o X diz-se que X^* é um mínimo global. Um máximo local X^* ocorre se $f(X) \leq f(X^*)$ para todo o X na vizinhança de X^* , enquanto um máximo global X^* ocorre se, para todo X , $f(X) < f(X^*)$ (Figura 2.2).

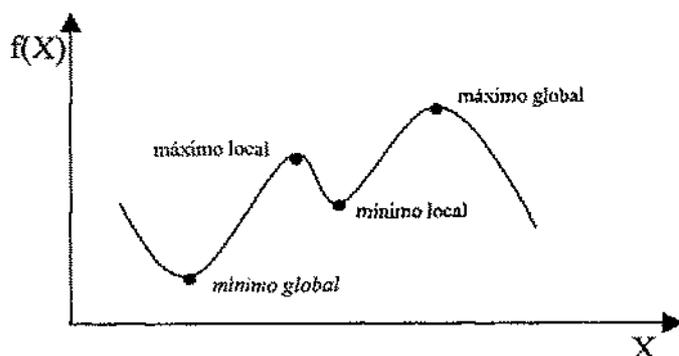


Figura 2.2 - Representação de uma função multimodal com os máximos e mínimos.

2.5.3.1. Vetor gradiente: Para uma função $f(X)$ que tem derivada parcial de primeira ordem o gradiente é definido pelo vetor:

$$\nabla f(X) = [\partial f / \partial X_1, \partial f / \partial X_2, \dots, \partial f / \partial X_n]^T \quad (2.6)$$

A importância do vetor gradiente é a indicação da direção em que $f(X)$ tem maior variação, para pequenos deslocamentos de X^* , permitindo uma convergência mais rápida para o ótimo da função (Mateus & Luna, 1986; Cirilo, 1997).

Cirilo (1997) apresenta os teoremas do cálculo diferencial que auxiliam o entendimento dos ótimos de uma função.

Teorema 1: Se $f(X)$ é uma função contínua, definida em uma região fechada e limitada, então essa função apresenta um máximo e um mínimo globais nesta região;

Teorema 2: Se $f(X)$ apresenta um máximo ou mínimo local em X^* e se $\nabla f(X)$ existe na vizinhança de X^* , então $\nabla f(X^*) = 0$;

Teorema 3: Se $f(X)$ possui derivadas parciais de segunda ordem na vizinhança de X^* com $\nabla f(X^*) = 0$ e $\nabla^2 f(X^*) > 0$, então $f(X^*)$ é mínimo local. Se $\nabla f(X^*) = 0$ e $\nabla^2 f(X^*) < 0$, então $f(X^*)$ é um máximo local.

2.5.3.2. Matriz Hessiana: seja $f(X)$ continuamente diferenciável de segunda ordem, uma matriz *Hessiana* é uma matriz quadrada simétrica de derivadas segunda de $f(X)$.

Seja $H(X^*)$ o valor da matriz *Hessiana* em um ponto X^* e seja $X \neq 0 \in \mathfrak{R}$ um vetor:

Se $X^T H(X) > 0$ diz-se que a matriz *Hessiana* é dita definida positiva;

Se $X^T H(X) \geq 0$ diz-se que a matriz *Hessiana* é semidefinida positiva;

Se $X^T H(X) < 0$ diz-se que a matriz *Hessiana* é definida negativa;

Se $X^T H(X) \leq 0$ diz-se que a matriz *Hessiana* é semidefinida negativa;

onde:

$$H(X) = \nabla^2 f(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Na otimização multivariável devem ser observados ainda os seguintes teoremas (Cirilo, 1997):

Teorema 4: Se $f(X)$ é uma função contínua, definida em uma região fechada e limitada, então essa função apresenta um máximo e um mínimo globais nesta região;

Teorema 5: Se $f(X)$ apresenta um máximo ou mínimo local em X^* e se $\nabla f(X)$ existe na vizinhança de X^* , então $\nabla f(X^*) = 0$;

Teorema 6: Se $f(X)$ possui derivadas parciais de segunda ordem na vizinhança de X^* e $\nabla f(X^*) = 0$, com também $H_f(X)$ for definida negativa, então $f(X)$ possui um máximo local em X^* .

2.5.4. Funções convexas e côncavas

Um dos principais obstáculos ao uso da programação não linear é a incerteza de que um ótimo local também seja um ótimo global. Para funções unimodais pode-se garantir que o ótimo global foi obtido com o conhecimento dos conceitos de convexidade e concavidade.

Diz-se que uma função $f(X)$ é convexa sobre um conjunto \mathfrak{R} , se para quaisquer dois pontos X_1 e X_2 pertencentes ao conjunto \mathfrak{R} teremos:

$$f(\lambda X_1 + (1 - \lambda)X_2) \leq \lambda f(X_1) + (1 - \lambda)f(X_2) \quad (2.8)$$

Onde λ é um escalar $0 \leq \lambda \leq 1$.

Para que a função seja estritamente convexa faz-se necessário que para todo $X_1 \neq X_2$ e para todo λ no intervalo $0 < \lambda < 1$ a equação anterior torne-se:

$$f(\lambda X_1 + (1 - \lambda)X_2) < \lambda f(X_1) + (1 - \lambda)f(X_2) \quad (2.9)$$

A função será côncava se a função $-f(X)$ for convexa, ou estritamente côncava se $-f(X)$ for estritamente convexa (Figura 2.3).

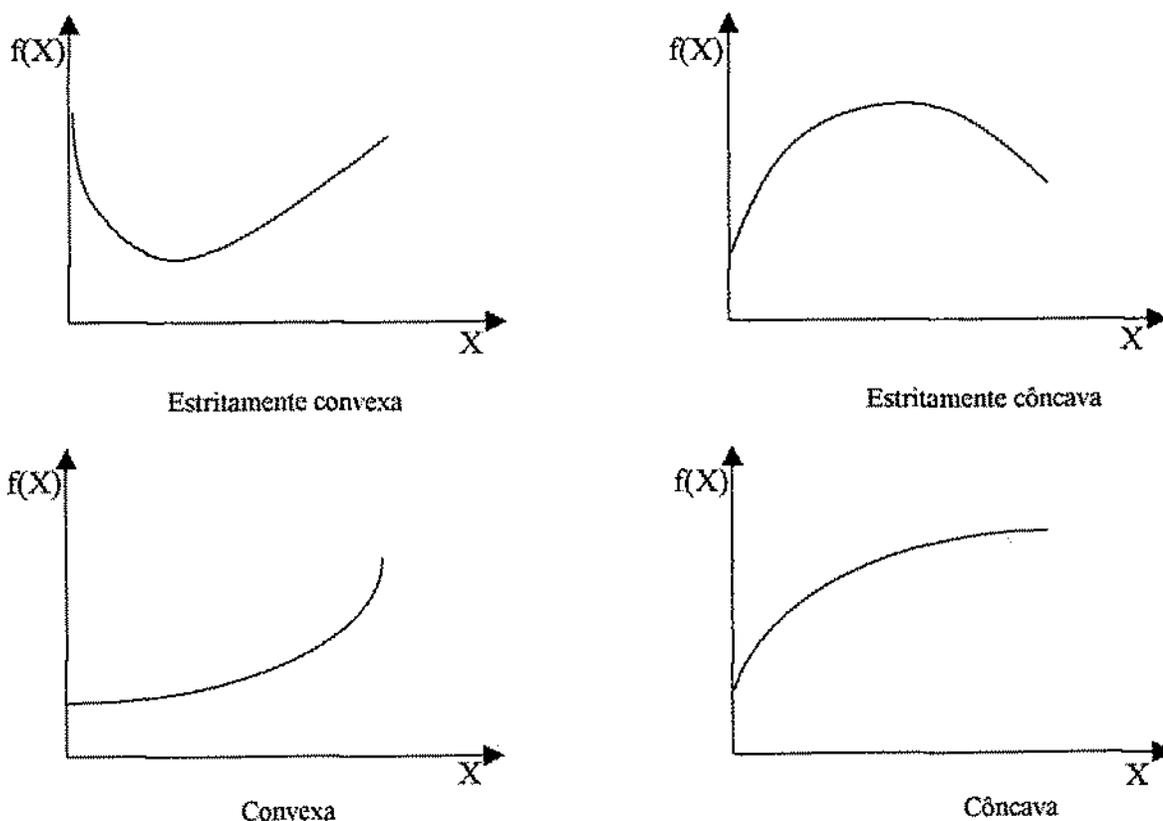


Figura 2.3. Representação gráfica de funções côncavas e convexas.

Pode-se escrever que:

Teorema 7: Se $f(X)$ possui derivadas de segunda ordem em \mathcal{R} , $f(X)$ é convexa (ou estritamente convexa) se e somente se uma matriz *Hessiana* $H(X)$ for semidefinida (ou definida) positiva para todo X em \mathcal{R} .

Teorema 8: Se $f(X)$ for côncava em \mathcal{R} , então todo máximo local em \mathcal{R} será também um máximo global.

Com os teoremas 1 e 2 conclui-se que se a função é contínua num intervalo fechado, assume ótimos nos pontos em que $\nabla f(X)$ é nulo, inexistente ou nos limites do intervalo. Analisando os teoremas 4 e 5 pode-se concluir que existe um único ponto de máximo e este será um máximo global quando a função é estritamente côncava, ou seja, a matriz *Hessiana* é definida positiva em todo o intervalo de pesquisa.

A avaliação de que uma função é convexa ou não é feita através da matriz *Hessiana*, o que para problemas de médio e grande porte torna-se impraticável analiticamente. Logo, caberá ao analista procurar outras formas de avaliar se a solução obtida é global ou não. Uma maneira seria solucionar o problema por enumeração completa, quando possível, e comparar os resultados.

2.5.5. Classificação da programação não linear

A classificação da programação não linear é bastante variável e está diretamente associada à técnica utilizada para a solução de problemas (Cirilo, 1997). Dividindo-se esses métodos em duas categorias tem-se:

2.5.5.1. Técnicas analíticas: A solução ótima é determinada resolvendo sistemas de equações, com o auxílio das derivadas dessas. A otimização pode reduzir-se à procura das raízes desses sistemas. Dentre eles podemos citar o Método do Cálculo Diferencial, o Método dos Multiplicadores de Lagrange e a Programação Geométrica (Cirilo, 1997).

2.5.5.2. Técnicas de busca numérica: São métodos iterativos que usam informações de soluções anteriores para gerar melhores soluções em cada etapa ou iteração. Tais técnicas são mais abrangentes, permitindo a solução de uma gama mais ampla de problemas de otimização. Estes ainda podem ser classificados em: Métodos de busca unidirecional, Métodos de minimização irrestrita e Métodos de otimização restrita (Cirilo, 1997).

- Busca unidirecional
 - Reduções sucessivas de intervalos
 - Métodos finitos de aprofundamento
- Otimização irrestrita
 - Com busca através de derivadas
 - Método do gradiente
 - Método de Newton – Raphson
 - Método das direções conjugadas
 - Métodos Quase-Newtonianos
 - Com busca sem o auxílio de derivadas
 - Método de Hook e Jeeves
 - Método de Roseenbrock
 - Método de Powell
- Otimização restrita
 - Funções de penalidades
 - Método de barreira
 - Método de pontos extremos
 - Métodos Primais
 - Métodos de linearização
 - Métodos do gradiente reduzido

2.6. Modelos para análise hidráulica e econômica de sistemas de irrigação pressurizados

O dimensionamento de um sistema de irrigação deve considerar além do problema puramente hidráulico, de determinação dos diâmetros das tubulações da rede, que propiciem a obtenção dos requerimentos de pressão e de vazão exigidos para o funcionamento adequado do sistema, os custos envolvidos na implantação e na operação ao longo da vida útil do projeto. Os custos de implantação (custos fixos) e operacionais (custos variáveis) são opostos, exigindo uma análise minuciosa das alternativas possíveis. A redução dos custos de investimento implica na utilização de diâmetros mínimos admissíveis na rede, porém isso provoca a elevação das velocidades nas tubulações, conseqüentemente maiores perdas de carga, maiores alturas manométricas e, portanto, maior potência do sistema elevatório levando à elevação do consumo energético. Por outro lado, diâmetros maiores reduzem as perdas de

carga, a altura manométrica e a potência do sistema elevatório, com menor consumo energético. Porém, os custos de investimentos tornam-se bastante elevados. O dimensionamento ótimo visa, portanto, a obtenção do custo de equilíbrio de investimento e operacionais. Na Figuras 2.4 e 2.5 podemos observar o comportamento desses custos.

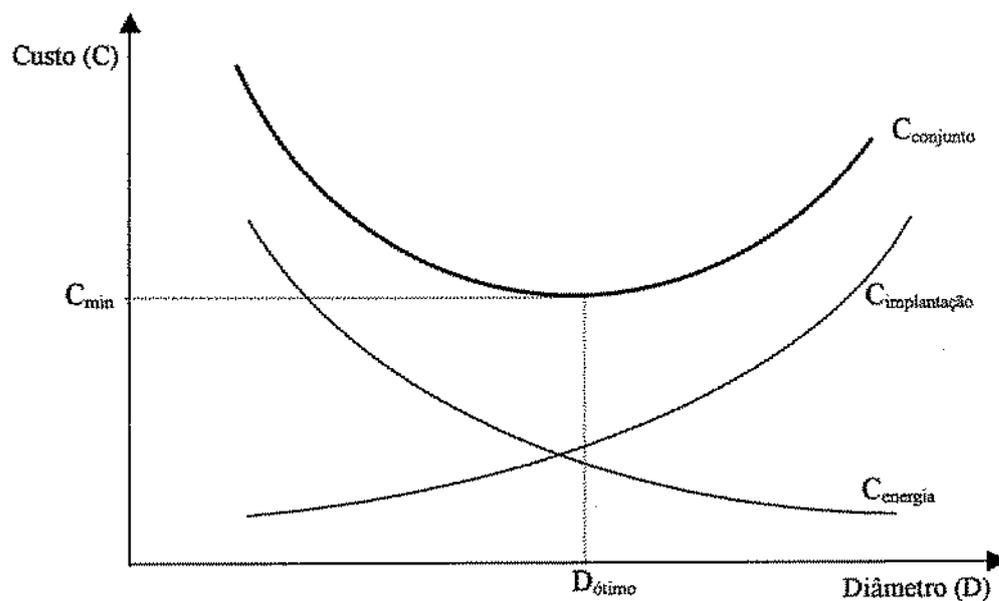


Figura 2.4. Comportamento dos custos de sistemas adutores com relação ao diâmetro.

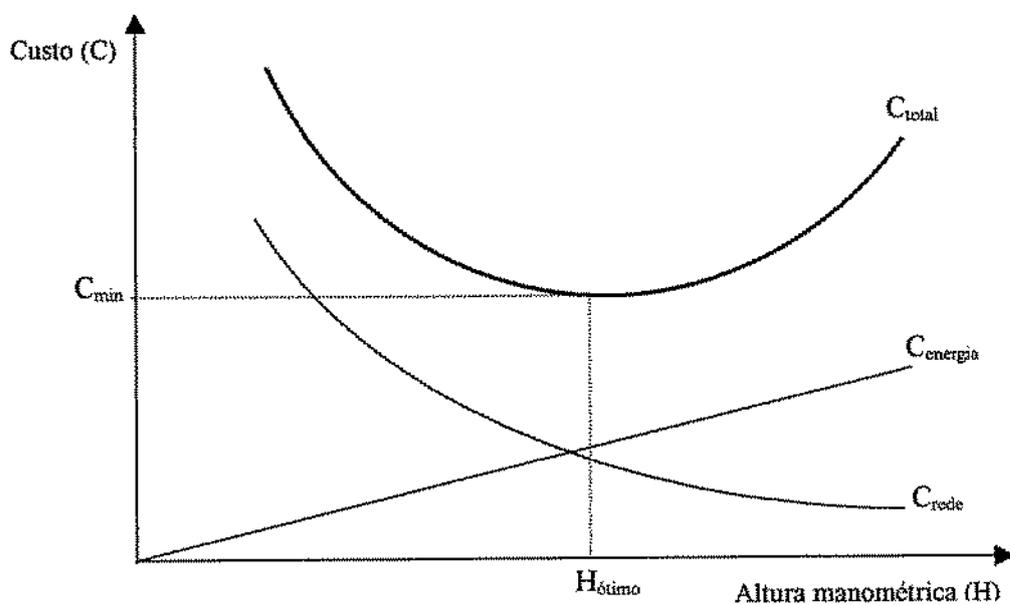


Figura 2.5. Comportamento dos custos de sistemas adutores com relação à altura manométrica.

Nos últimos anos tem tido ênfase o uso de técnicas matemáticas de otimização no dimensionamento de redes de menor custo. Tem-se proposto método de programação não linear em que os diâmetros são as variáveis, impondo perdas fixas ao longo dos trechos da rede. Em tais modelos, porém, a condição de ótimo se perde quando os diâmetros teóricos são finalmente normalizados. Outros, ao contrário, abordam o problema com variáveis discretas de maneira que os diâmetros ótimos de cada trecho, assim como as características dos acessórios dependendo do caso, devem ser eleitos dentre uma gama possível. Os métodos de programação dinâmica têm sido usados para esta formulação, mas à medida que a rede cresce torna o método pouco prático.

No projeto de irrigação o somatório dos custos de investimentos em tubulações de recalque, motobomba e rede elétrica equivale geralmente a cerca de 50% do custo total dos investimentos iniciais, variando de 40 a 60% dependendo do sistema. O sistema de irrigação deve ser dimensionado de tal forma que o somatório do custo energético com o seu custo de investimento seja minimizado. A manutenção elétrica corresponde a 2% do custo investimento PRONI (1987) apud Carvalho et al. (2000).

Um dos principais problemas do dimensionamento ótimo de um sistema de microirrigação é a definição do tamanho ótimo da sub-unidade para um determinado layout. A área da sub-unidade dependerá de: tamanho total da área, número de unidades operacionais, número de sub-unidades que constituem uma unidade operacional, características do emissor, pressão de operação, restrições hidráulicas, vazão disponível na fonte, custo e de aspectos subjetivos ou particulares do proprietário.

A sub-unidade é um componente básico de sistemas de microirrigação e é também uma unidade de rotação básica do sistema como um todo. Todas as sub-unidades em um sistema são relativamente independentes em termos hidráulicos e operacionais. O principal trabalho no dimensionamento de uma sub-unidade é determinar o comprimento ou diâmetro da lateral e da derivação, e a pressão de operação da mesma sob as condições requeridas de vazão média do emissor e uniformidade de aplicação. Em geral, o procedimento é planejar o layout das tubulações e escolher o tipo de emissor e os diâmetros da lateral e derivação. Muitos métodos têm sido desenvolvidos para o dimensionamento da sub-unidade. Porém, esses usualmente se restringem a uma variação de pressão para uma uniformidade de aplicação desejada.

Do ponto de vista econômico a sub-unidade de menor custo deveria ter os menores diâmetros na composição da sua tubulação, porém os menores diâmetros levariam a um maior custo operacional. Uma sub-unidade de dimensões elevadas, mesmo com a exigência de

uniformidade atendida o custo operacional também será elevado. Logo, são diversas as possibilidades de projeto para a obtenção da condição mais adequada.

Há décadas que se vem realizando estudos para o desenvolvimento de métodos e técnicas de dimensionamento hidráulico e de otimização econômica dos sistemas de irrigação pressurizados. Os sistemas de irrigação normalmente têm redes ramificadas de tubulações, ao contrário dos grandes sistemas de distribuição d'água urbanos, em que as redes são denominadas malhadas. Nessas pode-se verificar um significativo esforço na busca de tecnologias para análise do seu dimensionamento, de sua operação e reabilitação. As redes ramificadas, como as de irrigação, são hidraulicamente de mais fácil análise, principalmente porque o fluxo nas tubulações apenas ocorre em um sentido, as demandas são fixas e as pressões na rede não variam em um mesmo ponto. A grande maioria dos estudos em redes pressurizadas de irrigação, respeitando suas particularidades, concentram-se na obtenção da melhoria dos métodos e técnicas que propiciem: o conhecimento da distribuição de pressão e das descargas dos emissores, a melhor configuração do sistema, a minimização de custos de investimento ou a maximização de receitas.

Em termos de sistemas de microirrigação e por aspersão são vários os trabalhos desenvolvidos. Howell & Hiler (1974) desenvolveram, com base em princípios de mecânica dos fluidos e nas características hidráulicas dos emissores e da lateral, equações para determinação do comprimento de linhas laterais em função de uma uniformidade de distribuição selecionada. Wu & Gitlin (1975) utilizaram o conceito do gradiente da linha de energia (EGL) para encontrar a variação de pressão ao longo da lateral. Perold (1974) desenvolveu um método para encontrar custo mínimo dos tubos em um sistema ramificado, considerando que o diâmetro econômico dos tubos varia com a vazão e o tempo de bombeamento anual.

Gillespie et al. (1979) analisaram cinco tipos de perfis de pressões em linhas laterais ou linhas de derivação com desníveis uniformes, para o dimensionamento de sistemas por gotejamento. As equações obtidas baseiam-se na variação de pressão e podem ser solucionadas usando o Método de Newton.

Com relação à otimização da configuração do sistema de irrigação, sua divisão em sub-unidades e o tamanho dessas, poucos estudos têm sido realizados. Oron & Karmeli (1979) desenvolveram um modelo de otimização usando programação geométrica generalizada e a técnica "Branch and Bound". Esse modelo foi aplicado para encontrar os valores ótimos de linhas laterais nas linhas de terciária, número de aspersores nas laterais, diâmetros das tubulações e as vazões nas laterais e dos aspersores. Em sua análise estudou-se

apenas o custo capital para uma configuração fixa de um sistema de irrigação por aspersão. Enquanto isso, Karmeli & Oron (1979) utilizaram as mesmas técnicas para o dimensionamento de sistemas de microirrigação com o objetivo de minimizar os custos de equipamentos, energia e mão-de-obra e encontrar a configuração ótima do mesmo. Nesse trabalho a subdivisão da área depende do número ótimo de saídas nas linhas laterais (emissores) e de saídas nas linhas de derivação (laterais) e verificou-se que a maior influência na otimização é devida às restrições hidráulicas, principalmente relativas à uniformidade de distribuição d'água. A linha lateral selecionada tem o diâmetro mínimo comercial e reflete a tendência de usar a máxima energia disponível em vez de tubos de maiores diâmetros.

Oron & Walker (1981) apresentaram um modelo de otimização para sistemas de irrigação por aspersão considerando várias áreas, tendo como objetivo principal encontrar o número de sub-unidades, otimizar o tamanho das sub-unidades e os diâmetros dos tubos. O custo do sistema foi avaliado em função da geometria da área, do uso consuntivo e pressão de operação. Os resultados indicaram que a divisão da área em sub-unidades é grandemente afetada pela sua geometria, ou seja, pela relação largura/comprimento.

Pleban et al. (1984) desenvolveram um procedimento para minimizar o custo de investimento em tubulações com múltiplas saídas compostas de mais de um diâmetro. O modelo assume um desnível uniforme, saídas nas tubulações igualmente espaçadas e descarga igual para uma faixa de pressões. O modelo tem formulação do tipo programação não linear convexo para o qual não há um procedimento eficiente de solução disponível. O problema foi resolvido em dois estágios, o primeiro estágio para resolver o problema sem restrições. O segundo estágio para corrigir a solução devido às restrições não consideradas. A técnica de otimização sugerida é dos Multiplicadores de Lagrange usando o Método de Newton-Rapson para solucionar o sistema de equações não lineares. Esse procedimento foi aplicado em linhas laterais de sistemas de irrigação por aspersão e localizada e para linhas de derivação com um grupo de laterais. A principal vantagem desse procedimento está na redução do tempo de dimensionamento pelo uso de computadores sobre os procedimentos gráficos e manuais.

Sammis & Wu (1985) apresentaram um método para analisar o efeito do manejo e do dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento na produção da cultura, onde foram considerados os efeitos hidráulicos e de fabricação dos emissores na uniformidade de aplicação, o efeito do entupimento e da quantidade de água aplicada com relação à máxima evapotranspiração prevista. Constatou-se que a irrigação pode aumentar até que o valor marginal da água seja igual ao valor marginal da produção, ou até que nenhuma redução na produção ocorra em qualquer parte do campo. O manejo inadequado do sistema de irrigação

pode causar a diminuição do coeficiente de uniformidade estatístico para 60% ou menos, resultando em aumento da aplicação d'água para compensar esse efeito ou redução na produção. E, que a lâmina diária d'água aplicada é uma decisão de manejo que depende, sobretudo da disponibilidade d'água e seu custo.

Gessler (1985) propôs o uso da enumeração seletiva, de modo a restringir severamente a quantidade de soluções possíveis para uma rede de distribuição d'água. Sugeriu também algumas diretrizes para a redução da quantidade de cálculo efetuado pelo computador. No entanto, Simpson et al. (1994) comentam que apesar dessas diretrizes ainda se exige grande tempo computacional para grandes redes e não existe garantia de que a solução ótima tenha sido eliminada do espaço das soluções viáveis pela imposição dessas diretrizes.

Gohring & Wallender (1987) otimizaram a receita anual para um sistema de irrigação por aspersão com laterais movimentadas manualmente, usando o espaçamento entre aspersores, a água aplicada e a pressão de serviço como variáveis independentes, sob condições sem vento. O modelo calcula o rendimento usando uma função de produção para o algodão e os custos são constituídos pelo consumo d'água, de energia, pela tubulação, aspersores e sistema de bombeamento. O rendimento mostrou-se relativamente insensível à variação de pressão, mas o espaçamento ótimo entre aspersores variou com a pressão. Os valores ótimos de lâmina d'água aplicada mantiveram-se de 50 a 100 mm abaixo das lâminas de pico da produção. O rendimento não foi significativamente diferente para altas ou baixas pressões, apresentou-se altamente sensível ao preço da cultura, mas relativamente insensível ao custo da água e energia e diâmetro de laterais.

Pitts et al. (1986) desenvolveram um modelo computacional que usa relações fundamentais de hidráulica para simular o fluxo em uma linha lateral. O modelo pode prever as taxas de fluxo na lateral e a variação de descarga dos emissores, individualmente, em função das variações de pressão, conhecendo-se as características hidráulicas dos emissores. O modelo também pode prever a uniformidade de aplicação.

Fujiwara & Dey (1988) desenvolveram um método computacional eficiente em dois estágios para o dimensionamento ótimo de redes ramificadas de distribuição d'água com terreno em nível. No estágio inicial o método dos multiplicadores de Lagrange é usado para obter tubos de diâmetros contínuos ótimos. Segundo os autores em problemas onde os diâmetros contínuos são transformados em discretos, procedimentos heurísticos são usados. No segundo estágio uma lista restrita de tubos comerciais é selecionada com base na solução do primeiro estágio e servirão de entrada para um modelo de programação linear. O modelo

desenvolvido mostrou-se mais eficiente computacionalmente que o de programação linear, mas a mesma solução foi obtida pelos dois métodos.

Uma metodologia eficiente para o dimensionamento de redes ramificadas foi desenvolvida por Granados (1990). Um procedimento iterativo busca o menor custo da rede através da redução do excesso de pressão. O processo pode ser dividido em duas etapas: Na primeira etapa encontra-se os menores diâmetros admissíveis que atendam às restrições de pressão e de velocidade. Na segunda etapa ocorre uma redução gradual da cota piezométrica de cabeceira, a partir da solução inicial, até que se atinja a cota desejada para o projeto ou a cota que leva ao menor custo da rede. Esse método apresenta uma vantagem de se trabalhar com os diâmetros comerciais dos tubos.

Holzapfel et al. (1990) desenvolveram um modelo de otimização para o dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação por gotejamento. A função objetivo do modelo foi construída com base na função de produção d'água e dos custos de implementação e operação. O modelo considera como os seguintes parâmetros de dimensionamento: diâmetro do tubo; comprimento do tubo; número de emissores na lateral; número de sub-unidades operando simultaneamente; tempo de irrigação por unidade operacional; descarga do emissor e pressão de operação dos emissores. O modelo mostrou que a água é um fator de grande importância no processo de produção em comparação com o custo de implementação do sistema de irrigação. Uma análise de sensibilidade mostrou que o preço do produto é o parâmetro de entrada com maior impacto na função objetivo (maximização do benefício). O preço da energia, que é importante devido ao alto risco de aumento, tem um efeito leve sobre os custos para o máximo rendimento. Da mesma forma, o preço dos tubos tem um pequeno efeito na função objetivo.

Wu & Yue (1993) aplicaram o procedimento do gradiente da linha de energia para o dimensionamento de linhas laterais de irrigação por gotejamento. Esse procedimento permite o cálculo da descarga de todos os emissores ao longo da linha lateral e permite a determinação da uniformidade de aplicação do sistema. Mas, embora o método do gradiente da linha de energia ofereça um cálculo simples e direto de todo o fluxo ao longo da lateral pode implicar em erros no dimensionamento, uma vez que os cálculos baseiam-se em um perfil preestabelecido da linha de energia.

Hathoot & Al-Amoud (1993) apresentaram um método de alta precisão para análise e dimensionamento de laterais em nível utilizando a técnica de cálculo passo a passo.

Guimarães Junior (1993) propôs uma alternativa de procedimento de dimensionamento ao de Keller & Karmeli (1975) para uma sub-unidade de gotejamento. Na

otimização do layout da parcela e a relação ótima das perdas de carga nas laterais e derivação, optou-se por um modelo analítico clássico, onde as condições de otimização são determinadas a partir das técnicas tradicionais de minimização de funções de múltiplas variáveis. O modelo baseia-se nas primeiras e segundas derivadas parciais da função objetivo que é definida pelos custos das laterais e da derivação, como sendo os custos da sub-unidade. Os fatores de otimização identificados pela pesquisa foram: o formato da parcela definido pelo comprimento da lateral, a relação entre as perdas de carga das tubulações da parcela e o ponto de entrega da água nesta tubulação. Os diferentes layouts das tubulações nas parcelas dimensionadas foram denominados de H, T, C e L. O layout mostrou-se um elemento de projeto importante e o que resultou em um menor custo foi o denominado H. Como principais limitações do modelo podem-se citar: a otimização de uma sub-unidade individual não garante a obtenção do custo mínimo de um sistema composto por várias sub-unidades; os custos operacionais do sistema não são otimizados.

Saad et al. (1994) desenvolveram um modelo de programação linear para minimização do custo anual do sistema de irrigação por gotejamento sob duas situações: uma considerando o custo da tubulação e o custo da energia consumida, e a outra, considerando apenas o custo da tubulação.

Simpson et al. (1994) apresentaram uma metodologia para a aplicação da técnica de algoritmos genéticos para otimização de redes hidráulicas e comparou com outras técnicas normalmente utilizadas. Chegaram às seguintes conclusões: a enumeração exaustiva deve ser usada apenas em pequenas redes; a programação não linear é eficiente em pequenas redes, porém o arredondamento dos diâmetros contínuos para os comerciais deve ser feito, além disso apenas uma única solução é obtida; o maior benefício dos algoritmos genéticos é o de produzirem um grupo de soluções próximas do ótimo e que a seleção da melhor solução pode ser feita por valores não mensuráveis.

Rodrigo & Bonnet (1995) desenvolveram um modelo matemático para calcular a taxa de fluxo do emissor em uma sub-unidade de microirrigação usando a fórmula de Darcy-Weisbach com a equação de Colebrook para determinação das perdas de carga. A instalação do emissor é estocasticamente simulada assumindo uma distribuição normal para o coeficiente de variação de fabricação dos emissores. O programa pode ser usado para calcular a descarga dos emissores e a uniformidade de distribuição para áreas retangulares e não retangulares com desníveis uniformes e não uniformes.

Shete et al. (1995) avaliaram a influência dos parâmetros geométricos de áreas retangulares no dimensionamento de sistemas de irrigação por gotejamento e o efeito da

relação área/perímetro (A/P) no custo de investimento, operacional e no benefício líquido com a cultura da banana. Verificou-se que para uma relação fixa entre a largura (L) e o comprimento (C) da área, L/C de 0,5, a taxa A/P tem uma relação direta com os custos. Isto é, se A/P aumenta o benefício líquido cresce e os custos diminuem.

O advento dos microcomputadores tem promovido a análise da hidráulica de sistemas de microirrigação sem comprometer os aspectos agrônômicos dos sistemas. Muitos dos métodos numéricos usados na análise hidráulica desses sistemas utilizam o procedimento passo a passo. Essas técnicas expandiram-se para sub-unidades, mas não foram consideradas práticas.

Bralts & Segerling (1985) propuseram o uso da técnica dos elementos finitos para a análise de sub-unidades de microirrigação. Dentre as vantagens desse procedimento incluem-se o baixo requerimento computacional, simplicidade de aplicação a grandes redes de irrigação e convergência relativamente rápida. Porém, constatou-se que para grandes sistemas de microirrigação a análise através de microcomputadores não foi possível em função do excessivo número de elementos de tubos. Bralts et al. (1993) implementaram o conceito de nó virtual, representando as linhas laterais do sistema, para análise do dimensionamento hidráulico de sistemas de microirrigação, usando a técnica dos elementos finitos. A principal vantagem admitida para o modelo é a velocidade de convergência quando são analisados grandes sistemas de microirrigação com 10.000 emissores ou mais.

Kang & Nishiyama (1996a) desenvolveram um método para dimensionamento e análise de linhas laterais de microirrigação usando elementos finitos. Nessa análise verificou-se que o comprimento da lateral, para uma uniformidade de aplicação requerida, tem três soluções e o diâmetro pode ter até duas soluções quando se instalam as laterais em terrenos com desníveis. A melhor posição da derivação e a pressão de operação podem ser precisamente determinados computacionalmente.

Kang & Nishiyama (1996b) aplicaram também a técnica dos elementos finitos para dimensionamento de sub-unidades de microirrigação de qualquer tamanho e verificaram que o comprimento da lateral e da linha de derivação, para uma uniformidade de aplicação requerida, também têm três soluções e os diâmetros podem ter duas soluções para laterais em terrenos inclinados.

Dandy & Hassanli (1996) desenvolveram um modelo para otimização e operação de sistemas de irrigação por gotejamento para áreas retangulares, estendendo o trabalho preliminar de Oron & Walker (1981). O modelo tem como variáveis: 1) as dimensões da sub-unidade; 2) o número de unidades operacionais; 3) diferentes combinações de operação das

sub-unidades; 4) os comprimentos das tubulações; 5) pressão de operação e potência do sistema. O modelo além de dividir a área em sub-unidades de tamanhos ótimos identifica a combinação ótima de sub-unidades que operam simultaneamente. O processo de busca da melhor solução foi o de enumeração exaustiva. Os resultados obtidos com seu modelo notificaram que a configuração de custo ótimo é a que promove a irrigação de toda área ao mesmo tempo, ou seja, com apenas uma unidade operacional, seguido de duas unidades operacionais e quatro unidades. O dimensionamento ótimo do sistema eliminou a necessidade de linha principal, contendo apenas duas linhas secundárias. Com relação à distribuição dos custos, o dimensionamento ótimo apresentou que as linhas laterais representaram 36,2%, os emissores 27,4% e a operação 18,6% do custo total. Em seu estudo a relação entre as duas dimensões da área (comprimento/largura) foi de 5,33:1, o que diferiu das taxas normalmente encontradas no dimensionamento de sub-unidades individuais, no entanto, foi considerada razoável em função dos custos envolvidos.

Saad & Frizzone (1996) desenvolveram um modelo de PNL para otimizar o layout e a operação de sistemas de microirrigação cujo objetivo foi a maximização do benefício líquido sujeito a restrições geométricas e hidráulicas. Esse modelo é aplicável a áreas retangulares ou quadradas com desníveis uniformes e tem como entrada a função produção-água, a função de custo, o custo dos componentes do sistema e as variáveis de dimensionamento. A saída do modelo fornece o benefício líquido anual e os diâmetros e comprimentos das tubulações. Os resultados obtidos pelo modelo sugerem que a maximização do benefício é obtida com a maior área irrigada, área com layout quadrado, desnível nulo e menor descarga do emissor, dentre as situações testadas. O benefício líquido otimizado por Saad & Frizzone (1996) foi determinado pela expressão:

$$B_n = B_a - C_{ie} - C_p \quad (2.10)$$

$$B_a = PY_m Y_r \quad (2.11)$$

$$Y_r = 1 - K_y + \left(K_y \frac{ET_a}{ET_s} \right) \quad (2.12)$$

Onde: B_n é o benefício anual líquido, US\$.ha⁻¹.ano; B_a benefício anual, US\$.ha⁻¹.ano; C_{ie} o custo anual do investimento e de energia, US\$.ha⁻¹.ano; C_p o custo de produção, sem irrigação, US\$.ha⁻¹.ano; P o preço do produto, US\$.Kg⁻¹; Y_m máxima produção anual, Kg.ha⁻¹.ano⁻¹; Y_r produção relativa, Kg.ha⁻¹.ano⁻¹, K_y fator de produção, ET_a evapotranspiração real por estação, m; e ET_s máxima evapotranspiração por estação, m.

Silva (1997) aplicou a programação não linear na otimização de redes ramificadas de sistemas de distribuição urbanos. O problema foi resolvido em duas etapas: na primeira etapa foram considerados variáveis de decisão a cota de cabeceira e os diâmetros contínuos dos tubos. Na segunda fase adotam-se os diâmetros discretos, dentre os comercialmente disponíveis e utiliza-se como variável de decisão o comprimento dos tubos juntamente com a cota de cabeceira. Verificou-se que para redes ramificadas, a programação não linear apresenta resultados semelhantes àqueles obtidos pelas metodologias de Granados (Granados, 1990) e da programação linear (Karmeli et al., 1968).

Valiantzas (1998) desenvolveu um método analítico para o dimensionamento de laterais de gotejamento de mais fácil solução. Testes numéricos indicaram que metodologia proposta gera resultados muito próximos do método passo a passo. Nesse modelo a descarga do emissor varia ao longo da lateral.

Guimarães Junior (1998) desenvolveu um modelo computacional iterativo para minimização dos custos totais de sistemas de irrigação localizada. Esse modelo baseia-se no cálculo inverso da rede onde são considerados como variáveis de decisão: a seleção da bomba, o diâmetro do rotor e as cargas de pressão nos terminais da rede principal e nos pontos de alimentação das parcelas ou sub-unidades. O dimensionamento das sub-unidades é realizado com base na metodologia proposta por Guimarães Junior (1993).

Matos (2000) elaborou um modelo de programação não linear para otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação por microaspersão para cultura da goiaba, utilizando o pacote computacional GAMS. As variáveis de decisão do modelo foram a evapotranspiração, a declividade do terreno e o tamanho da área a ser irrigada. Foi constatado que os custos totais anuais por unidade de área aumentaram com a evapotranspiração, declividade e tamanho da área. Desses fatores a evapotranspiração foi o mais significativo. O custo anual da energia com relação ao custo total anual por unidade de área variou de 16,1 a 37,8%. As maiores variações nos custos da energia ocorreram em função das diferentes taxas de evapotranspiração e da declividade do terreno, porém com relação à área irrigada foram consideravelmente menores. Os emissores contribuíram de 20,3 a 29,6% do custo total, sendo mais representativos nas combinações de menor evapotranspiração e menor área. Os custos das linhas laterais implicaram em variações de 14,8 a 22,1% sobre os custos totais do sistema, em função do tamanho da área e foram superiores ao custo do PVC. Analisando o efeito de diferentes uniformidades de emissão nos custos, 85, 90 e 95%, verificou-se que quanto maior a uniformidade menor o custo por unidade de área em todas as configurações testadas.

Vallesquino & Luque-Escamilla (2001) desenvolveram um novo algoritmo para o dimensionamento hidráulico de linhas laterais. Nesse algoritmo problemas de fluxo laminar ou turbulento podem ser resolvidos através de um procedimento de aproximações sucessivas, com resultados satisfatórios.

Saad & Mariño (2002) analisaram o dimensionamento e operação de um sistema de microaspersão para citros, através de quatro modelos de otimização resultantes da maximização da receita e da minimização de custos, aplicando programação linear (PL) e não linear (PNL). Chegaram às seguintes observações: Os modelos de PNL de maximização e de minimização forneceram maior incremento de receita líquida comparados aos de PL; os modelos de PNL e PL para maximização foram mais eficazes na obtenção de lucro que os de minimização; com a utilização de funções de produção aumenta-se consideravelmente o universo de soluções viáveis; o uso de maior vazão no sistema foi a principal causa do desempenho inferior dos modelos de PL; Os modelos de PNL encontram a divisão ótima do sistema em oito sub-unidades com oito unidades operacionais, ou seja, apenas uma sub-unidade era operada por vez.

Embora o crescente progresso computacional tenha levado ao desenvolvimento de vários métodos numéricos, ainda, os métodos analíticos simples e precisos permanecem mais atrativos nas aplicações de rotinas da engenharia.

Valiantzas (2002) desenvolveu um novo procedimento para análise do fluxo em laterais com saídas contínuas e uniformes. Uma nova equação analítica descreve a forma da linha de energia ao longo de laterais e derivação de aspersão e localizada, considerando o desnível e a carga de velocidade. A principal limitação é que as descargas são consideradas iguais. É mais preciso que outros métodos similares principalmente quando o número de saídas é pequeno.

2.7. Hidráulica dos sistemas de microirrigação

2.7.1. Introdução

Segundo Rodrigo & Bonnet (1995) o objetivo do dimensionamento de sistemas de microirrigação é obter uma uniformidade de aplicação adequada. Baixas uniformidades estão, normalmente, associadas à baixa eficiência de irrigação, implicando em reduzido controle d'água criando, entre outros problemas, a possibilidade de degradação ambiental. Solomon

(1985) relaciona como os principais fatores que influenciam a uniformidade, em ordem decrescente de importância: (1) entupimento (função das práticas de manejo); (2) número de emissores por planta (dimensionamento agrônomico); (3) coeficiente de variação de fabricação (qualidade do emissor); (4) expoente do emissor (regime de fluxo); (5) hidráulica das sub-unidades (diferenças de pressão). Quando não se considera o coeficiente de variação de fabricação dos emissores no dimensionamento, não se justifica economicamente o uso de emissores de alta qualidade.

Um sistema de microirrigação é composto por uma extensa rede de tubulações, emissores, conexões, acessórios entre outros. Essas tubulações compreendem as linhas principal, secundária, terciária ou de derivação e laterais, dependendo da configuração do sistema. As tubulações empregadas usualmente são em PVC para linhas principal, secundária e de derivação, e em polietileno de baixa densidade para as linhas laterais.

O dimensionamento hidráulico do sistema visa, portanto, garantir uma elevada uniformidade de distribuição d'água. Em sistemas de microirrigação é usual, em fase de projeto, a obtenção de uniformidades superiores a 90%. As variações de descarga dos emissores são função das variações de pressões, da variabilidade de fabricação dos emissores, do entupimento parcial ou total dos emissores e da sensibilidade desses à temperatura da água. Sendo que os dois primeiros fatores são os mais importantes para o dimensionamento. As variações de pressões são provocadas pelas perdas de carga por atrito e pela topografia.

As variações nas descargas dos emissores, embora pequenas em valor absoluto, podem representar grandes variações percentuais ou relativas. Muitos fatores afetam a uniformidade de distribuição, porém a importância das características de performance do emissor é freqüentemente desconsiderada no dimensionamento e operação dos sistemas de microaspersão.

O dimensionamento do sistema deve ser baseado na real descarga do emissor, não necessariamente nas especificações dos fabricantes, que geralmente não incluem as perdas de carga nos microtubos dos microaspersores. Emissores com vazão menor que a de projeto leva a tempos maiores de irrigação, aumentando os custos de operação e manutenção. Nos sistemas com funcionamento contínuo para o atendimento da máxima demanda evapotranspirométrica, vazões sub-dimensionadas podem provocar um estresse hídrico indesejado na cultura, Boman & Parsons (1995).

2.7.2. Hidráulica dos emissores

Os emissores são os responsáveis pela aplicação d'água no solo. Em sistemas de microirrigação, esses podem ser denominados de gotejadores, microaspersores, entre outros, caracterizando o tipo de sistema utilizado, por exemplo: por gotejamento, por microaspersão.

Os emissores são hidráulicamente caracterizados por uma relação entre a pressão de operação e a vazão. Essa relação é conhecida como equação característica:

$$q = k_d h^x \quad (2.13)$$

onde:

q = vazão do emissor, L.h⁻¹;

h = pressão de operação, m;

k_d, x = coeficiente e expoente característicos de cada emissor.

O expoente x indica o regime hidráulico do emissor e possibilita o conhecimento da sensibilidade da vazão à variação de pressão. Os fabricantes normalmente não fornecem essas equações, mas apresentam tabelas, ábacos e curvas para o dimensionamento das linhas laterais.

Atualmente fabricam-se emissores com alta uniformidade de fabricação e que possuem mecanismos que permitem uma autorregulação das vazões em uma ampla faixa de pressão de operação, são os autocompensantes. Esses emissores facilitam o dimensionamento da sub-unidade, mas são ainda de elevado custo. Um outro aspecto que pode ser uma desvantagem dos emissores autocompensantes é que esses não permitem flexibilidade na taxa de descarga, ou seja, caso se deseje aumentar a lâmina d'água o único recurso operacional disponível é o aumento do tempo de irrigação. O que não ocorre nos emissores convencionais que permitem o aumento da descarga com o aumento de pressão dentro da faixa operacional. Além dessas características citadas existem emissores que também possibilitam sua auto-limpeza, o que é muito importante na prevenção de entupimentos.

Os microaspersores e alguns emissores recentemente desenvolvidos que trabalham com fluxo turbulento são fabricados com 2 a 5% de variação de fabricação e baixo potencial ao entupimento. A maioria dos microaspersores podem ser considerados livres do perigo de entupimento e emissores com fluxo turbulento podem manter uma porcentagem de entupimento em 5% sob um manejo adequado da filtragem em sistemas de microirrigação, segundo Wu (1995). A ASAE (1988) classifica os microaspersores quanto ao seu coeficiente

de variação de fabricação (C_{VF}) em: excelente ($C_{VF} < 0,05$); médio ($0,05 \leq C_{VF} < 0,07$); marginal ($0,07 \leq C_{VF} < 0,11$); pobre ($0,11 \leq C_{VF} < 0,15$) e inaceitável $C_{VF} \geq 0,15$.

A irrigação por microaspersão é o método mais popular para culturas de amplo espaçamento e é especialmente usada para citrus na Estado da Flórida (EUA). Os sistemas utilizam emissores com vazão entre 38 e 70 L.h⁻¹, com microtubos de 0,6 a 0,7 m de comprimento e diâmetro de 4 mm. Essa preferência pela microaspersão deve-se, particularmente, à maior proteção contra o frio para as árvores jovens e ao maior diâmetro molhado, o que é especialmente importante em solos de textura arenosa com pouca movimentação lateral d'água.

2.7.3. Dimensionamento das tubulações

2.7.3.1. Linhas laterais e linhas de derivação

Considerando que os emissores instalados em uma linha lateral apresentam a mesma vazão, o fluxo na lateral pode ser considerado permanente e espacialmente variado em função das saídas de descarga dos emissores. Da mesma forma se considerarmos que as linhas laterais abastecidas pela linha de derivação têm a mesma vazão o fluxo na linha de derivação também pode ser considerado permanente e espacialmente variado em função das saídas de descarga nas laterais. Desse modo, as linhas laterais e de derivação são caracterizadas por não conduzirem a vazão de entrada até o final da tubulação, ou seja, há uma distribuição de vazão ao longo da mesma. Essas tubulações são também conhecidas como de múltiplas saídas (multiple-outlets). A perda de carga nessas tubulações será inferior, já que haverá uma redução de vazão conduzida até o final da tubulação. O cálculo da perda de carga nessas tubulações requer, portanto, uma análise passo a passo, seção por seção, que pode ser iniciada pela entrada ou pelo final da tubulação, acumulando-se as perdas de carga de todas as seções. Esse processo, porém, é consideravelmente exaustivo sem o auxílio de computador, levando-se em conta que podem-se ter linhas laterais com muitos emissores. Desse modo, o cálculo da perda de carga é bastante diferenciado de uma tubulação convencional.

Vários modelos hidráulicos foram desenvolvidos para a análise hidráulica dessas tubulações. Esses modelos baseiam-se em duas condições de fluxo: (i) O primeiro considera uma distribuição de vazão contínua ao longo da tubulação; (ii) O segundo considera uma distribuição de vazão discreta ao longo da tubulação. A base para desenvolvimento da maioria desses modelos é a consideração de que as descargas das múltiplas saídas são iguais, o que na

realidade não ocorre em função das diferenças de energia ao longo da tubulação e das variações devido ao processo de fabricação dos emissores.

i) Perda de carga considerando uma distribuição de vazão contínua e uniforme

Considerando uma tubulação com diâmetro D , comprimento L e uma vazão Q distribuída contínua e uniformemente e sem fluxo no final, verifica-se que a taxa de distribuição é:

$$q = \frac{Q}{L} \quad (2.14)$$

Tomando-se para análise um elemento de tubulação dl , a perda de carga será determinada por:

$$dh_f = C \frac{dl}{D^n} Q_l^m, \quad (2.15)$$

Integrando em todo o seu comprimento L , tem-se:

$$h_f = \int_0^L C \frac{dl}{D^n} Q_l^m = \frac{1}{(m+1)} \frac{C Q^m L}{D^n} \quad (2.16)$$

onde: C é o coeficiente de rugosidade. O primeiro termo da equação, $\frac{1}{(m+1)}$, representa o fator de correção da perda de carga em tubulações com saídas contínuas e uniformes. O segundo termo representa a perda de carga em uma tubulação sem saídas ao longo da mesma. E m o expoente da vazão da equação de perda de carga.

Aplicando-se esse modelo para uma tubulação com mais de um diâmetro ou com vazão não nula no final, obtém-se:

Perda de carga no trecho com D_1 :

$$h_{f1} = \frac{C}{D_1^n} \frac{1}{q(m+1)} (Q_{e1}^{m+1} - Q_{s1}^{m+1}) \quad (2.17)$$

onde: Q_{e1} é a vazão na entrada da tubulação com D_1 e Q_{s1} é a vazão na entrada da tubulação com D_2 .

Perda de carga no trecho com D_2 :

$$h_{f2} = \frac{C}{D_2^n} \frac{1}{q(m+1)} (Q_{s1}^{m+1} - Q_{s2}^{m+1}) \quad (2.18)$$

onde: Q_{s2} é a vazão na entrada da tubulação com D_2 .

Perda de carga no trecho com D_n , sem fluxo no final:

$$h_{fn} = \frac{1}{(m+1)} \frac{C Q_n^m L_n}{D_n^n} \quad (2.19)$$

onde: Q_n é a vazão na entrada da tubulação com D_n , L_n comprimento do último trecho da tubulação.

Porém, considerando-se o espaçamento entre os emissores ou saídas na linha a perda de carga será, nos trechos que antecedem o último, trecho 1 por exemplo, dada por:

$$h_{f1} = \frac{C}{D_1^n} \frac{S_e}{q(m+1)} (Q_{e1}^{m+1} - Q_{s1}^{m+1}) \quad (2.20)$$

A perda de carga total na tubulação será:

$$h_f = h_{f1} + h_{f2} + \dots + h_{fn} \quad (2.21)$$

Dandy & Hassanli (1996) usando a equação de Hazen-Williams para o cálculo da perda de carga em laterais com dois diâmetros obtiveram:

$$h_{fHW} = 3,745 \left(\frac{2,78 \cdot 10^{-7} q_e}{C_{HW} S_e} \right)^{1,852} \left\{ \frac{[(L_1 + L_2)^{2,852} - L_2^{2,852}]}{D_1^{4,87}} + \frac{L_2^{2,852}}{D_2^{4,87}} \right\} \quad (2.22)$$

onde: C_{HW} é o coeficiente de rugosidade; L_1 e L_2 comprimentos dos trechos da lateral (m); D_1 e D_2 diâmetros dos trechos de lateral (m); q_e vazão do emissor em L/h e S_e espaçamento entre emissores.

i.1) Perda de carga considerando uma distribuição de vazão contínua e não uniforme

Scaloppi & Allen (1993) desenvolveram um modelo onde considera que a distribuição de vazão não é constante ao longo da linha lateral ou de derivação. Considerando que a vazão numa seção qualquer l é dada por Q_l , tem-se:

$$Q_l = Q_0 \left[1 - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right], \text{ Onde: } Q_0 \text{ é a vazão no início da tubulação.} \quad (2.23)$$

A perda de carga será:

$$h_f = \frac{CQ_0^m}{D^n} \int_0^L \left[1 - \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right]^m dl, \text{ obtendo-se:} \quad (2.24)$$

$$h_f = h_{f0} \frac{\Gamma(0,5)\Gamma(m+1)}{2\Gamma(m+1,5)}, \quad (2.25)$$

onde: h_{f0} é a perda de carga na linha sem considerar as múltiplas saídas; Γ é a função Gamma.

O mesmo raciocínio foi utilizado por Valiantzas (1998), quando considera a vazão distribuída pelos emissores variável ao longo da lateral. Em seu modelo foi considerado que a vazão Q_l varia de acordo com:

$$Q_l = Q_0 \left(\frac{l}{L} \right)^\alpha, \text{ onde: } \alpha \text{ é um expoente empírico.} \quad (2.26)$$

A vazão do emissor q_e em uma seção qualquer l pode ser obtida diferenciando-se a equação anterior. Desse modo:

$$q_l = \frac{a q_m}{S_e} \left(\frac{l}{L} \right)^{\alpha-1}, \quad (2.27)$$

onde: q_m é a vazão média do emissor; S_e o espaçamento entre emissores; a constante de diferenciação.

ii) Perda de carga considerando uma distribuição discreta da vazão

O modelo de distribuição discreta da vazão na análise hidráulica de tubulações com múltiplas saídas dos sistemas de microirrigação é o que mais se aproxima das situações práticas e, portanto, mais preciso. Isso porque os emissores são distanciados entre si em função do espaçamento da cultura que pode ser de alguns metros. O modelo de distribuição contínua da vazão pode gerar erros significativos principalmente para um número de saídas de fluxo pequeno com a distância entre saídas relativamente grande.

Christiansen (1942) desenvolveu um fator de correção (F) de perda de carga para essas tubulações, assumindo: (1) ausência de fluxo no final da linha; (2) saídas igualmente espaçadas; (3) todas as saídas têm a mesma vazão; (4) a distância entre a primeira saída e a

entrada da linha é igual ao espaçamento entre saídas. Esse fator é uma função do número de saídas (N) e do expoente da vazão (m) da equação de perda de carga empregada.

A perda de carga corrigida (h_{fc}) é obtida multiplicando-se a perda de carga, calculada para a tubulação sem saídas conduzindo a vazão total (h_{f0}), pelo fator F .

$$h_{fc} = h_{f0} F \quad (2.28)$$

Em algumas situações, porém, a distância entre a primeira saída e a entrada da linha não é igual ao espaçamento entre saídas. Para solucionar essa limitação Scaloppi (1988) ajustou o fator F , através de um fator F_a .

$$F_a = \frac{NF + s - 1}{N + s - 1}, \quad (2.29)$$

onde: s é a fração entre a distância da primeira saída à entrada da linha e o espaçamento entre saídas, $0 \leq s \leq 1$.

O emprego dos fatores F e F_a em tubulações com mais de um diâmetro não pode ser direto, mas através de processo iterativo.

ii.1) Perda de carga considerando uma distribuição discreta de vazão em linhas com mais de um diâmetro ou com fluxo no final.

Anwar (1999a) desenvolveu um fator G que permite o cálculo da perda de carga em tubulações com múltiplas saídas com fluxo no final ou com mais de um diâmetro. Em uma tubulação cujo último trecho tem fluxo nulo no final o fator G torna-se idêntico ao fator F , nesse trecho.

Assim, a perda de carga em linhas laterais ou de derivação com mais de um diâmetro será determinada por:

$$h_{fc} = \sum h_{f0i} G_i \quad (2.30)$$

onde: h_{f0i} é a perda de carga em cada trecho i sem considerar as saídas e G_i o respectivo fator de correção do trecho i .

Lucena (2002) analisou a aplicabilidade de diversos fatores de correção de perda de carga em tubulações com múltiplas saídas, e constatou que o fator G tem excelente precisão e usabilidade, sendo adequado para o cálculo da perda de carga em linhas laterais de

microirrigação. A principal limitação desse fator, no entanto, é a necessidade de que os trechos anteriores de uma tubulação, com vários diâmetros, existam.

Analogamente ao F_a obtido por Scaloppi (1988) pode-se obter um fator G_a que ajusta o fator G para qualquer distância entre a primeira saída e a entrada da tubulação (Anwar, 1999b).

$$G_a = \frac{n_s G + s - 1}{n_s + s - 1} \quad (2.31)$$

A perda de carga localizada provocada pela conexão dos emissores é considerada, normalmente, em termos de comprimento equivalente de tubulação ou como uma porcentagem da perda contínua, um valor comum adotado é de 5%. Segundo o SCS (1984) apud Rodrigo & Bonnet (1995) os comprimentos equivalentes (f_e) para as conexões dos emissores do tipo grande, padrão, pequena on-line ou in-line, respectivamente, podem ser obtidos pelas equações abaixo, com o diâmetro da conexão D em mm e f_e em m:

$$f_g = \frac{23,04}{D^{1,84}}, f_p = \frac{18,91}{D^{1,87}}, f_o = \frac{14,38}{D^{1,89}}, f_i = 0,23 \quad (2.32)$$

O cálculo das perdas nas linhas de derivação é, comumente, realizado utilizando-se a Equação de Hazen-Williams. Essa equação, no entanto, por ser empírica não é dimensionalmente homogênea e sua faixa de aplicação é limitada, o que pode levar a erros significativos, principalmente quando empregada nas linhas laterais cujos diâmetros são pequenos. A fim de minimizar esses erros Moghazi (1998) encontrou experimentalmente coeficientes de rugosidade da equação de Hazen-Williams para tubos de polietileno com diâmetros de 13, 16, 19 e 22 mm, que foram, respectivamente, 129, 136, 144 e 148.

No dimensionamento da linha lateral tem-se três possibilidades em termos de layout, considerando que as mesmas podem ser alimentadas por uma extremidade, por um ponto intermediário ou pelos dois extremos. Sendo, porém, a segunda a mais comum.

A distribuição de pressão na linha lateral, alimentada por uma extremidade, pode ser analisada para uma situação de distribuição contínua de vazão através do modelo de WU & Gitlín (1975). Assumindo que a perda de carga na linha lateral é contínua, pode-se obter, em qualquer ponta da tubulação, a perda de carga por:

$$h_{\mu} = \left(1 - (1 - i)^{m+1}\right) h_{\mu,0}, \text{ com } i = \frac{l}{L} \quad (2.33)$$

Considerando que o dimensionamento é elaborado para que a pressão média na lateral coincida com a pressão nominal do emissor (h_m), tem-se que a pressão no início da lateral com um diâmetro, como sendo:

$$h_{L0} = h_m + \frac{m+1}{m+2} h_{fL} \pm \frac{Z_L}{2} \quad (2.34)$$

onde: h_{fL} é a perda de carga na lateral e Z_L o desnível na lateral.

Aplicando o mesmo critério de dimensionamento à linha de derivação, a pressão média na sub-unidade deve coincidir com a pressão nominal do emissor, daí tem-se:

$$h_{D0} = h_m + \frac{m+1}{m+2} (h_{fL} + h_{fD}) \pm \frac{Z_L}{2} \pm \frac{Z_D}{2} \quad (2.35)$$

onde: h_{fD} é a perda de carga na derivação e Z_D o desnível na derivação.

A pressão média na linha lateral ou na linha de derivação, ambas com dois trechos (dois diâmetros), pode ser obtida por (Anwar, 2000):

$$h_m (L_1 + L_2) = (h_{m1} L_1) + (h_{m2} L_2) \quad (2.36)$$

onde: h_m é a pressão média na linha, h_{m1} é a pressão média no segundo trecho da linha, h_{m2} é a pressão média no primeiro trecho da linha, L_1 comprimento do último trecho e L_2 comprimento do primeiro trecho.

A pressão no início da linha com dois trechos será, então:

$$h_m = h_{f1} + h_{f2} + h_{min} \quad (2.37)$$

onde: h_m é a pressão no início da linha, h_{f1} e h_{f2} perdas de carga no segundo e primeiro trechos, respectivamente e h_{min} a pressão mínima na linha (Anwar, 2000).

Keller & Bliesner (1990) encontraram para pressão no início da linha, com dois trechos e com três ou mais trechos as seguintes expressões, respectivamente:

$$h_m = h_m + 0,63 h_f \quad (2.38)$$

$$h_m = h_m + 0,5 h_f \quad (2.39)$$

onde: h_f é a perda de carga total na linha.

A equação universal apesar de ser a mais recomendada para o cálculo da perda de carga em tubulações apresenta o inconveniente da realização de cálculos iterativos para obtenção do fator de atrito f da fórmula de Colebrook-White. No entanto, Koide (1998) analisando as equações para determinação do fator f da equação universal, encontrou que as equações de Shacham 1 e 2, de Chen e de Murdock 2 apresentam excelente precisão quando comparadas à equação Colebrook-White, com erros inferiores a 1%. Contudo, segundo Koide (1998), a fórmula de Shacham 1 tem sido preferida em função de sua simplicidade de cálculo.

$$f = \left\{ -2 \log \left[\left(\frac{e}{3,7D} \right) - \left(\frac{5,02}{Re} \right) \log \left(\frac{e}{3,7D} + \frac{14,5}{Re} \right) \right] \right\}^{-2} \quad (2.40)$$

onde: Re é o número de Reynolds, e a rugosidade e D o diâmetro do tubo.

O cálculo de perda de carga nas laterais, porém, comumente tem sido determinado através da Equação Darcy-Weisbach com o fator de atrito f obtido empiricamente para cada condição de fluxo. Para tubulações consideradas lisas e $3000 < Re < 10^5$ o fator mais empregado é o fator de atrito f de Blasius: $f = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$. Combinando-se com a equação de Darcy-Weisbach, obtém-se:

$$h_f = 0,0007794 \frac{L Q^{1,75}}{D^{4,75}}, \text{ para temperatura da água de } 20 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (2.41)$$

onde: L comprimento da tubulação em m; Q vazão em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e D diâmetro interno do tubo em m.

Para regime laminar $Re < 2000$, $f = \frac{64}{Re}$. Na região crítica recomenda-se $f = 3,42 \cdot 10^{-5} Re^{0,85}$, com $2 \cdot 10^3 < Re < 4 \cdot 10^3$. Para $10^5 < Re < 10^7$, recomenda-se $f = \frac{0,13}{Re^{0,172}}$ (Fernández, 1996).

Keller & Bliesner (1990) recomendam as seguintes equações:

$$h_f = 0,000789 \frac{L Q^{1,75}}{D^{4,75}}, \text{ para } D \leq 125 \text{ mm} \quad (2.42)$$

$$h_f = 0,000958 \frac{L Q^{1,83}}{D^{4,83}}, \text{ para } D \geq 125 \text{ mm} \quad (2.43)$$

O equilíbrio de pressões nas linhas laterais torna-se mais difícil de ser obtido quando as mesmas estão em terreno não nivelado. As alternativas para se resolver o problema hidráulico podem ser: o uso de linhas laterais com comprimentos diferentes acima e abaixo da derivação, ou seja, a derivação não é localizada simetricamente às laterais; o uso de diâmetros diferentes para laterais de mesmo comprimento em ambos os lados da derivação, sem redução de diâmetros na mesma linha e, o uso de redução de diâmetros para laterais com mesmo comprimento. Keller & Bliesner (1990) afirmam que a melhor posição da linha de derivação é aquela em que a mesma pressão mínima ocorra nas laterais acima e abaixo.

O dimensionamento visa encontrar os diâmetros e comprimentos das tubulações de modo que a uniformidade de aplicação mínima recomendada seja garantida. Assim, a variação piezométrica não pode ultrapassar os limites preestabelecidos para o dimensionamento da sub-unidade ou unidade operacional.

São vários os critérios aplicados no dimensionamento de sub-unidades de microirrigação. Um modo bastante utilizado para se obter a variação de pressão na sub-unidade é pré-fixando a variação de vazão máxima entre os emissores (Δq) em condição mais desfavorável em termos de energia. As pressões que fornecem essas pressões são determinadas através da equação característica do emissor. Um valor normalmente adotado para a variação máxima de vazão entre emissores na sub-unidade é de 10%, o que implica numa variação de pressão de 20%, considerando que o emissor trabalha em regime turbulento, ou seja, expoente de descarga do emissor, $x = 0,5$. Esse critério pode fracassar no objetivo de atingir determinada uniformidade de aplicação, pois não considera as variações de vazão dos emissores devido a sua fabricação. No entanto, considerando-se que o coeficiente de variação de fabricação é inferior a 5% pode-se obter uniformidades de aplicação superiores a 90%. Com esse critério:

$$\frac{\Delta q}{q_{med}} = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{med}} = 10\% = 0,1 q_{med} \quad (2.44)$$

Atualmente uma estimativa amplamente utilizada para fins de projeto é expressão desenvolvida por Keller & Karmeli (1975) para uniformidade de aplicação. Conhecendo-se os parâmetros dessa expressão e a equação característica do emissor pode-se encontrar a máxima variação de pressão na sub-unidade para uma uniformidade de aplicação desejada. Essa equação considera conjuntamente as variações de descarga dos emissores devido às causas hidráulicas e devido ao processo de fabricação.

$$U_E = 100 \left(1 - 1,27 \frac{C_{VF}}{N_{EP}} \right) \frac{q_{min}}{q_{med}} \quad (2.45)$$

onde:

U_E - uniformidade de aplicação de projeto, %;

C_{VF} - coeficiente de variação de fabricação;

N_{EP} - número de emissores por planta;

q_{min} - vazão mínima do emissor relativa a menor pressão (h_{min}), L.h⁻¹;

q_{med} - vazão média ou de projeto do emissor relativa a pressão média (h_{med}) da sub-unidade, L.h⁻¹.

Conhecendo-se os valores de h_{med} e h_{min} , a variação de pressão admissível na sub-unidade pode ser determinada por:

$$\Delta h_s = M(h_{med} - h_{min}) \quad (2.46)$$

onde:

M - fator que depende do número de diâmetros diferentes que são utilizados na subunidade. Para diâmetro constante $M = 4,3$, com dois diâmetros $M = 2,7$, com três diâmetros $M = 2$ (Fernández, 1996). Na fase de projeto Keller & Bliesner (1990) recomendam $M = 2,5$.

Δh_s - variação de pressão admissível na sub-unidade para uma U_E desejada, m;

h_{med} - pressão que gera q_{med} , m;

h_{min} - pressão que gera q_{min} , m.

Algumas recomendações quanto à uniformidade de emissão podem ser obtidas pela ASAE (1988).

Keller & Karmeli (1975) desenvolveram uma expressão para determinação do comprimento das laterais, que otimiza o formato da sub-unidade. O comprimento da laterais apresenta-se diretamente relacionado com a área da sub-unidade e é determinado por:

$$L_L = K A^{0,45}, \quad (2.47)$$

onde: $K = 1$ e $0,685$, para uma ou duas laterais, respectivamente.

Karmeli & Peri (1972) apud Keller & Karmeli (1975) encontraram que a distribuição mais econômica da perda de carga na sub-unidade, mantendo-se níveis elevados de uniformidade de aplicação, é aproximadamente 55% na lateral e 45% na linha de derivação.

Considerando o critério de $h_{fL} = 0,55 \Delta h_s$ e $h_{fD} = 0,45 \Delta h_s$, tem-se: $h_{fL} / h_{fD} = 1,22$, ou $h_{fL} = 1,22 h_{fD}$, $\Delta h_s = 2,22 h_{fD}$ e $\Delta h_s = 1,82 h_{fL}$.

Segundo a metodologia de Guimarães Junior (1993) a relação ótima encontrada entre as perdas de carga na sub-unidade, associada com o formato da mesma e sem restrições é dada por:

$$\frac{h_{fL}}{\Delta h_s - h_{fL}} = \frac{n+1}{m+1} \quad (2.48)$$

$$h_{fD} = \Delta h_s - h_{fL} \quad (2.49)$$

onde: m é expoente da vazão e n é expoente do diâmetro na equação de perda de carga.

Pela metodologia de Guimarães Júnior (1993) a perda de carga na lateral (h_{fL}) seria igual a $2,09 h_{fD}$, usando-se a equação de Darcy-Weisbach. Em ambas os procedimentos, porém, não se consideram os custos operacionais.

2.7.3.2. Linhas principal e secundária

As linhas principal e secundária, quando necessárias, em função do layout, têm a função de conduzir a água às sub-unidades com a pressão e vazão desejadas. Portanto, o dimensionamento das mesmas consiste na seleção adequada do diâmetro ou diâmetros, procurando minimizar custos totais do sistema. As perdas de carga nessas tubulações são computadas através da Equação de Hazen-Williams ou de Darcy-Weisbach. Enquanto nas linhas laterais e de derivação não se recomendam usar mais de dois diâmetros, nas linhas principal e secundária esse critério não é tão rígido. Entretanto, as vazões transportadas nessas tubulações são limitadas pelas restrições de velocidades, que não devem ultrapassar $2,5 \text{ m.s}^{-1}$.

A fim de minimizar os custos da linha principal é freqüentemente vantajoso usar um número maior que o mínimo de sub-unidades. Uma vez que isso permite a divisão do fluxo reduzindo o diâmetro dos tubos. Além disso, sub-unidades menores requerem menores comprimentos de laterais e de linhas de derivação e as diferenças de níveis diminuem. Porém, em alguns casos, o tamanho da sub-unidade é determinado por fatores físicos que não podem ser alterados pelos projetistas. Em geral, o dimensionamento economicamente ótimo, leva a linha de derivação ter entre 1,5 e 3,0 vezes o comprimento da lateral e as perdas de carga devem ser igualmente distribuídas entre essas tubulações, Keller & Karmeli (1975).

3. METODOLOGIA

3.1. Descrição geral da metodologia

Neste estudo foram avaliados, no dimensionamento e operação do sistema de microirrigação, os efeitos do requerimento hídrico da cultura, considerando o balanço hídrico climático anual e o balanço hídrico mensal no solo, da disponibilidade de duas ou de uma tarifa de energia elétrica diária, de diferentes estratégias de divisão da área em sub-unidades e em unidades operacionais, a aplicabilidade do modelo em áreas com desníveis e, finalmente, do dimensionamento sem levar em consideração os custos operacionais. Neste capítulo é descrita a metodologia adotada, que sinteticamente é apresentada na Figura 3.1.

Assumiu-se que:

- A área a ser irrigada é retangular ou quadrada, em nível ou não e com layout preestabelecido (Figura 3.2).
- As linhas laterais e de derivação têm a primeira saída (emissor ou lateral) localizada na metade do espaçamento entre duas saídas;
- As unidades operacionais têm reguladores de pressão;
- O número de sub-unidades é múltiplo do número de unidades operacionais;
- A largura e o comprimento da área são múltiplos do espaçamento entre emissores na lateral e do espaçamento entre laterais na linha de derivação, respectivamente;
- A sub-unidade é composta de válvula automática, linha de derivação, linhas laterais, emissores, conectores de linhas e adaptadores de diâmetros;
- Não há restrições quanto à quantidade e à qualidade de água da fonte;
- As perdas de carga no sistema de tratamento d'água e válvulas são constantes.

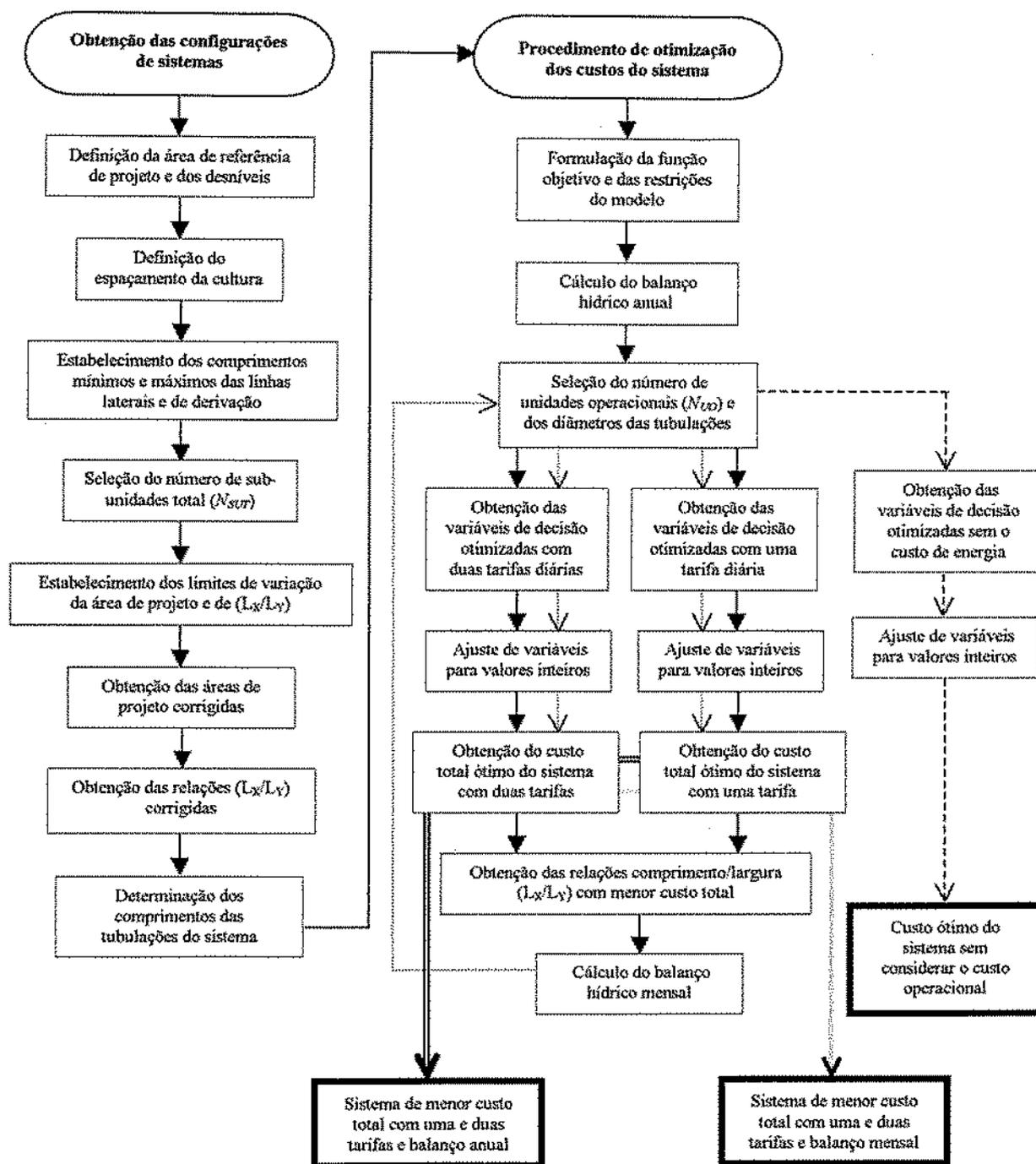


Figura 3.1. Metodologia para otimização do dimensionamento e operação de sistemas de microirrigação.

Para avaliação do efeito da divisão da área em sub-unidades (N_{SUR}) e de unidades operacionais (N_{UO}) foi permitida uma certa tolerância na área de referência, para que fosse minimizada a influência do tamanho da área nos custos totais do sistema e que se permitisse a obtenção de maior número de configurações de sistema. Desse modo, considerando-se o espaçamento entre plantas, entre emissores e entre linhas laterais, foram obtidas as possíveis configurações dos sistemas de irrigação. Para cada conjunto de sub-unidades, por área, foram

determinadas as possíveis relações L_X/L_Y (comprimento)/(largura) da área, para variações preestabelecidas dentro de limites máximos e mínimos das mesmas.

Na divisão da área em sub-unidades foram impostos os limites de comprimentos das linhas laterais mínimos (L_{Lmin}) e máximos (L_{Lmax}), e o comprimento máximo da linha de derivação (L_{Dmax}). Para realização desse procedimento de divisão da área em sub-unidades, elaborou-se um programa em linguagem MATLAB.

Em função do número de sub-unidades foram determinadas as possíveis unidades operacionais para cada configuração de sistema levando-se em consideração a restrição de que o número de unidades operacionais (N_{UO}) deve ser sub-múltiplo do número de sub-unidades (N_{SUT}) e, além disso, que o número de sub-unidades funcionando simultaneamente (N_{SUS}) seja divisível por dois, para que o sistema tenha uma distribuição d'água simétrica e um melhor balanceamento hidráulico da rede, com exceção da operação em que o $N_{UO} = 1$, onde todas as sub-unidades funcionam simultaneamente.

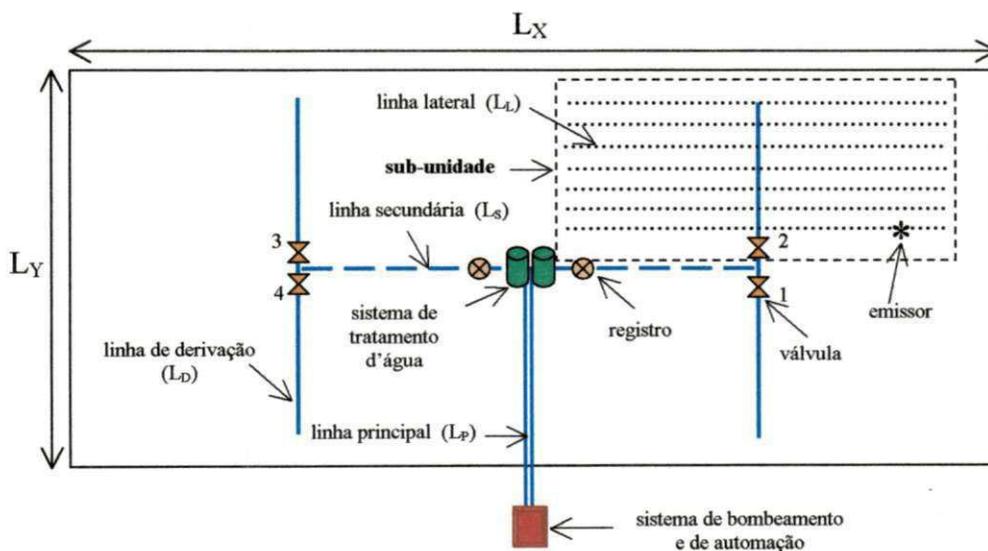


Figura 3.2. Layout característico do sistema de microirrigação aplicado neste trabalho.

De posse das diferentes configurações possíveis do sistema, foi realizada a seleção dos diâmetros comerciais das tubulações para cada número de unidades operacionais. Esse processo foi executado tanto para o requerimento hídrico do projeto obtido pelo balanço anual como para o balanço mensal. Os diâmetros das tubulações das sub-unidades foram selecionados de modo que fosse possível a utilização de toda a faixa de pressões de trabalho do emissor. Os diâmetros das tubulações secundárias e da principal foram selecionados com base nas velocidades máximas e mínimas admissíveis (Tabela 3.1). Conhecidos os diâmetros

comerciais aplicou-se o modelo de otimização para se obter o custo mínimo de cada concepção de projeto.

Tabela 3.1. Relação de diâmetros comerciais aplicáveis em cada uma das tubulações da rede e seus respectivos custos.

Principal (L_P)			Secundária (L_S)			Derivação (L_D)			Lateral (L_L)		
DN (mm)	DI (mm)	Custo (UMS.m ⁻¹)	DN (mm)	DI (mm)	Custo (UMS.m ⁻¹)	DN (mm)	DI (mm)	Custo (UMS.m ⁻¹)	DN (mm)	DI (mm)	Custo (UMS.m ⁻¹)
50	48,05	0,81	50	48,05	0,81	50	48,05	0,81	12	9,95	0,167
75	72,45	1,55	75	72,45	1,55	75	72,45	1,55	16	13,2	0,223
100	97,45	2,47	100	97,45	2,47	100	97,45	2,47	20	17,0	0,303
125	119,75	3,67	125	119,75	3,67	125	119,75	3,67	25	21,2	0,367
150	143,70	4,43	150	143,70	4,43	150	143,70	4,43	30	27,2	0,480
200*	212,45	7,17	200	212,45	7,17	200	212,45	7,17	-	-	-
250	262,35	9,13	250	262,35	9,13	-	-	-	-	-	-
300	312,20	11,07	300	312,20	11,07	-	-	-	-	-	-

* Para DN \geq 200 mm, pressão nominal (PN) de 60 m.c.a. (600 kPa), para as demais PN de 40 m.c.a. (400 kPa).

* Nesse trabalho convencionou-se m.c.a. por m.

O número mínimo de sub-unidades, determinado em função do layout pré-definido para o sistema, foi igual a quatro, o que implicou no maior tamanho de sub-unidade. Logo, a área foi dividida em um número de sub-unidades múltiplo de quatro. Isso garantiu que a área fosse irrigada com sub-unidades de tamanhos diferentes e operações diferentes para uma análise econômica mais eficaz. Desse modo, em um sistema com apenas uma unidade operacional todas as sub-unidades encontravam-se em operação, um sistema com duas unidades operacionais teve a metade das sub-unidades operando simultaneamente, equilibradas em ambos os lados da linha principal, para que fosse reduzida a vazão na linha secundária. Pelo esquema da Figura 3.3 com 12 sub-unidades são possíveis 1, 2, 3, 6 e 12 unidades operacionais. Sendo que para 2, 3, 6 e 12 unidades operacionais, várias combinações de operações ou de sub-unidades simultâneas são possíveis.

A seleção das sub-unidades simultâneas, para cada número de unidades operacionais, baseou-se na melhor divisão do fluxo nas linhas secundárias. Seleccionadas as sub-unidades em funcionamento, o dimensionamento hidráulico baseou-se na seleção da situação mais desfavorável, isto é, na condição que demandou maior altura manométrica.

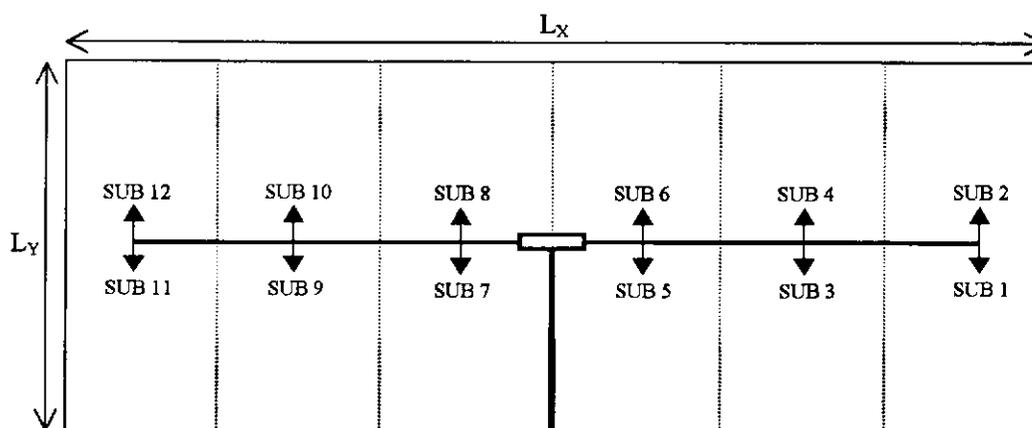


Figura 3.3. Configuração de um sistema de microirrigação com doze sub-unidades ($N_{SUT} = 12$).

3.2. Demandas hídricas

3.2.1. Balanço hídrico anual simplificado

O requerimento anual de irrigação foi estimado através de observações históricas de precipitação e de evapotranspiração de referência. Foram empregadas a precipitação média anual com 75% de probabilidade de ocorrência (precipitação dependente) e a demanda anual de evapotranspiração de referência (Samani & Hargreaves, 1985). Determinou-se deficiência hídrica anual líquida, ou requerimento hídrico anual líquido, por:

$$DEFa = (ET_o Kc_{med} Ks) - P \quad (3.1)$$

onde:

$DEFa$ - deficiência hídrica anual, mm;

P - precipitação anual média com 75% de probabilidade de ocorrência, mm;

Kc_{med} - coeficiente de cultivo médio;

Ks - coeficiente de sombreamento;

ET_o - evapotranspiração de referência anual, mm.

Para que fosse possível o emprego de diversos custos de energia elétrica, para diferentes horários do dia, foi necessária a determinação de tempos de irrigação diários. Com base em $DEFa$ e no requerimento hídrico médio diário da cultura, obteve-se o número de dias irrigados por ano:

$$NDIa = \frac{DEFa}{R_{HC\ med}} \quad (3.2)$$

onde:

$NDIa$ - número de dias irrigados por ano;

$R_{HC\ med}$ - requerimento hídrico médio diário da cultura, mm.dia⁻¹.

$$R_{HC\ med} = ETC_{med} Ks \quad (3.3)$$

ETC_{med} - evapotranspiração média diária da cultura (mm.dia⁻¹), obtida a partir da evapotranspiração de referência média ($ET_{o\ med}$) diária e do coeficiente da cultura médio (Kc_{med}):

$$ETC_{med} = ET_{o\ med} Kc_{med} \quad (3.4)$$

No cálculo dos custos operacionais do projeto utilizou-se o requerimento hídrico médio diário da cultura, enquanto que o requerimento hídrico máximo diário ($R_{HC\ max}$) foi usado como critério de restrição para o tempo de operação e, conseqüentemente, do número máximo de unidades operacionais. Determinou-se o requerimento hídrico máximo diário da cultura ($R_{HC\ max}$) com base na evapotranspiração máxima diária da cultura (ETC_{max}) e no Ks . A ETC_{max} foi obtida a partir da máxima evapotranspiração de referência diária ($ET_{o\ max}$) e do coeficiente da cultura máximo. Assim, tem-se que:

$$R_{HC\ max} = ETC_{max} Ks \quad (3.5)$$

$$ETC_{max} = ET_{o\ max} Kc_{max} \quad (3.6)$$

3.2.2. Balanço hídrico mensal no solo simplificado

O balanço hídrico no solo foi determinado segundo a metodologia de Thornthwaite & Mather (1955) apud Mota (1989). Foram utilizados valores médios mensais dos dados de precipitação com 75% de probabilidade de ocorrência, e de evapotranspiração de referência.

Do mesmo modo que o balanço anual, as necessidades hídricas mensais foram transformadas em diárias para o emprego de diferentes custos de energia com o horário de operação. O consumo médio mensal obtido com a ETC_{med} mensal e o Ks , foi transformado em

consumo médio diário em cada mês do ano, distribuindo toda a deficiência hídrica nos dias do mês, para o cálculo dos custos operacionais. Assim, o requerimento hídrico diário médio da cultura foi obtido por:

$$R_{HC\ med\ j} = \frac{DEFm_j}{NDIm_j} \quad (3.7)$$

onde:

$R_{HC\ med\ j}$ - requerimento hídrico diário médio da cultura no mês j , $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$;

$NDIm_j$ - número de dias do mês j , dia;

$DEFm_j$ - deficiência hídrica mensal líquida em mm, obtida pelo balanço hídrico no mês j .

Analogamente, com base na máxima deficiência hídrica mensal, obtida com a ETc_{max} e o Ks , determinou-se o máximo consumo diário da cultura $R_{HC\ max}$, através do qual se restringiu o número máximo de unidades operacionais.

3.3. Função objetivo

O modelo de otimização teve como função objetivo a minimização dos custos totais, compostos pelos custos fixos ou de investimento (equipamentos do sistema) e custos operacionais:

$$\text{Min } f(X) = C_T = \frac{\sum C_F + \sum C_{OP}}{A_I} \quad (3.8)$$

onde:

$f(X)$ - função objetivo;

A_I - área irrigada, ha;

C_T - custos totais, $\text{UM\$}\cdot\text{ano}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$;

C_F - custos fixos amortizados, $\text{UM\$}\cdot\text{ano}^{-1}$;

C_{OP} - custos operacionais, $\text{UM\$}\cdot\text{ano}^{-1}$;

Equivalência entre moedas: $\text{UM\$} = \text{US\$} = \text{UR\$ } 3,0$.

3.3.1. Custos fixos

Os custos fixos (C_F) foram representados por um conjunto de equipamentos que constituíram a estrutura física do sistema de irrigação. Compreenderam, portanto, os custos relativos a: tubulações de polietileno (C_{PE}) e de PVC (C_{PVC}), conjunto de sucção (C_{SUC}),

sistema de bombeamento (C_{SB}), sistema de tratamento d'água (C_{ST}), centro de controle (C_{CC}), válvulas (C_{VR}), adaptadores de linhas laterais (C_{AD}), conectores (C_{CON}), emissores (C_{EM}) e medidor de energia (C_{MEN}).

A vida útil dos equipamentos é variável com o tipo de equipamento, com o fabricante e como mesmo é utilizado. Uma estimativa de vida útil, segundo Keller & Bliesner (1990), para alguns equipamentos é a seguinte: microaspersores de 10 a 20 anos, tubos de PVC permanentes de 20 anos, eletrobombas de 15 anos. Para o cálculo dos custos fixos, constituídos pelos equipamentos do sistema estimou-se, neste trabalho, uma vida útil do projeto e dos equipamentos por um período de 15 anos, e aplicou-se uma taxa anual de juros de 6%, desse modo resultando num Fator de Recuperação do Capital (FRC) de 0,10296 (Eq. 3.10).

$$C_F = (C_{PVC} + C_{PE} + C_{SUC} + C_{SB} + C_{ST} + C_{CC} + C_{VR} + C_{AD} + C_{CON} + C_{EM} + C_{MEN}) FRC \quad (3.9)$$

sendo:

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.10)$$

FRC - fator de recuperação do capital;

i - taxa de juros anual, decimal;

n - número de anos de amortização do capital.

$$C_{PVC} = \sum (C_{Pi} L_{Pi}) + (C_{Dai} L_{Dai} + C_{Ddi} L_{Ddi}) \frac{N_{SUT}}{2} + (C_{Saij} L_{Saij} + C_{Sdij} L_{Sdij}) \quad (3.11)$$

onde:

C_{Pi} - custo do PVC na linha principal no trecho com diâmetro D_{Pi} e comprimento L_{Pi} , $UM\$.m^{-1}$;

C_{Dai} - custo do PVC nas linhas de derivação ascendentes (active) nos trechos com D_{Dai} e comprimento L_{Dai} , $UM\$.m^{-1}$;

C_{Ddi} - custo do PVC nas linhas de derivação descendentes (declive) nos trechos com D_{Ddi} e comprimento L_{Ddi} , $UM\$.m^{-1}$;

C_{Saij} - custo do PVC na secundária ascendente na seção com D_{Saij} e comprimento L_{Saij} , $UM\$.m^{-1}$;

C_{Sdij} - custo do PVC na secundária descendente na seção com D_{Sdij} e comprimento L_{Sdij} , $UM\$.m^{-1}$.

N_{SUT} - número de sub-unidades total do sistema.

A linha principal e cada trecho de secundária foram compostos por ter até cinco diâmetros (seções) diferentes. Um trecho de secundária correspondeu ao comprimento entre duas linhas de derivação e entre a primeira derivação e a linha principal. As linhas de derivação foram compostas por dois trechos, cada um com um diâmetro distinto. Desse modo, o número de trechos da secundária variou com o número de sub-unidades.

$$C_{PE} = \sum (C_{Laai} L_{Laai} + C_{Ladi} L_{Ladi} + C_{Ldai} L_{Ldai} + C_{Lddi} L_{Lddi}) \frac{N_{SUT}}{2} N_S \quad (3.12)$$

onde:

C_{Laai} - custo do polietileno no trecho de lateral ascendente da derivação ascendente com diâmetro D_{Laai} e comprimento L_{Laai} , UM\$.m⁻¹;

C_{Ladi} - custo do polietileno no trecho de lateral descendente da derivação ascendente com diâmetro D_{Ladi} e comprimento L_{Ladi} , UM\$.m⁻¹;

C_{Ldai} - custo do polietileno no trecho de lateral ascendente da derivação descendente com diâmetro D_{Ldai} e comprimento L_{Ldai} , UM\$.m⁻¹;

C_{Lddi} - custo do polietileno no trecho de lateral descendente da derivação descendente com diâmetro D_{Lddi} e comprimento L_{Lddi} , UM\$.m⁻¹;

Assim como as linhas de derivação as linhas laterais poderão ser compostas por dois trechos, cada um com seu diâmetro.

N_S - número de saídas de linhas laterais na derivação, computando apenas um lado da derivação.

Considerando-se a sub-unidade como a unidade básica do dimensionamento achou-se conveniente a determinação de seu custo para a análise do dimensionamento e operação do sistema. Na composição do custo médio da sub-unidade foram considerados as tubulações, os emissores, os conectores de linhas e aos adaptadores de diâmetros, excluindo-se a válvula automática. Obteve-se, então:

$$C_{SUB} = \frac{\left(\frac{C_{EM} + C_{PE} + C_{AD} + C_{CON}}{N_{SUT}} \right) + (C_{Di} L_{Di})}{A_{SUB}} \quad (3.13)$$

onde:

C_{SUB} - custo da sub-unidade, UM\$.ha⁻¹;

A_{SUB} - área da sub-unidade, ha;

C_{Di} - custo do PVC nas linhas de derivação nos trechos com D_{Di} e comprimento L_{Di} , UM\$.m⁻¹.

Com base em valores praticados no mercado foram obtidas equações para determinação dos custos dos demais componentes do sistema. Os parâmetros dessas equações encontram-se na Tabela 3.2.

- Custo da sucção:

$$C_{SUC} = \hat{\theta} D_{SUC} + \xi \quad (3.14)$$

$\hat{\theta}$ e ξ - parâmetros de regressão;
 D_{SUC} - diâmetro da tubulação de sucção, m.

- Custo do sistema de bombeamento:

$$C_{SB} = \omega P_{OT}^{\beta} \quad (3.15)$$

ω e β - parâmetros de regressão;
 P_{OT} - potência do sistema motobomba, kW.

- Custo do sistema de tratamento d'água:

$$C_{ST} = \sigma Q_P^{\varphi} \quad (3.16)$$

σ e φ = parâmetros de regressão,
 Q_P - vazão na linha principal, $m^3 \cdot s^{-1}$.

- Custo do centro de controle:

$$C_{CC} = \psi N_{UO} + \tau \quad (3.17)$$

ψ e τ - parâmetros de regressão;
 N_{UO} - número de unidades operacionais.

- Custo de válvulas automáticas:

$$C_{VR} = C_{vr} N_{SUT} \quad (3.18)$$

C_{vr} - custo unitário de válvulas e registros, UMS\$;
 N_{SUT} - número de sub-unidades total.

- Custo de adaptadores de diâmetros:

$$C_{AD} = C_{ad} N_{TL} \quad (3.19)$$

C_{ad} - custo unitário dos adaptadores de diâmetros nas laterais, UMS\$;
 N_{TL} - número total de linhas laterais no sistema.

- Custo de conectores de laterais:

$$C_{CON} = C_{con} N_{TL} \quad (3.20)$$

C_{con} - custo unitário dos conectores de laterais nas linhas de derivação, UM\$.

- Custo de emissores:

$$C_{EM} = C_{em} N_{TE} \quad (3.21)$$

C_{em} - custo unitário do emissor, UM\$;
 N_{TE} - número total de emissores no sistema.

- Custo do medidor de energia:

$$C_{MEN} = \frac{T_j}{(T_j + 0,0001)} C_{men} \quad (3.22)$$

T_j - tempo de irrigação diário no período com tarifa reduzida ou com desconto, seja o balanço anual ou mensal no mês j . Aplicou-se um desconto de 73% à tarifa convencional para o sub-grupo B2, nesse caso, caracterizado pelos serviços de irrigação, conforme Portaria Nº 105 de abril de 1992 do DNAEE e Resolução Nº 277 de 2000 da ANEEL (Tabela 3.2).

C_{men} - custo do medidor de energia elétrica, UM\$. O custo do medidor de energia especial só afeta a função objetivo quando a otimização é realizada considerando os dois custos de energia diários (reduzido e normal) e quando a tarifa com desconto é alocada.

3.3.2. Custos operacionais

Neste trabalho os custos operacionais foram representados apenas pelos custos de energia elétrica consumida para condução d'água requerida anualmente pelo projeto.

Como foram consideradas duas formas de determinação de requerimento hídrico anual para o projeto, através dos balanços hídrico anual e mensal, os custos operacionais para os dois balanços hídricos foram determinados, respectivamente, por:

$$C_{OPa} = \frac{\sum (C_{ENi} T_{ij}) NDIa P_{OT}}{I_F} \quad (3.23)$$

$$C_{OPm} = \frac{\sum (C_{ENi} T_{ij}) NDIm_j P_{OT}}{I_F} \quad (3.24)$$

onde:

C_{OPa} - custo operacional considerando o balanço hídrico anual, UMS.ano⁻¹;

C_{OPm} - custo operacional considerando o balanço hídrico mensal, UMS.ano⁻¹;

C_{ENi} - custo da energia elétrica para período de tarifa i , UMS.kWh⁻¹;

T_{ij} - tempo de irrigação diário no horário com tarifa i (T_r ou T_n) no ano (balanço hídrico anual) ou mês j (balanço hídrico mensal). T_{ij} é função do requerimento hídrico diário da cultura, da vazão do emissor, da frequência de irrigação e do número de unidades operacionais;

I_F - frequência de irrigação, dia.

Para facilitar o entendimento nas discussões ao longo do trabalho, foram considerados os dois horários com custos diferentes de energia, como sendo duas tarifas diárias distintas (T_2), isto é, o tempo de operação na tarifa com desconto ou reduzida (T_r) e o tempo de operação na tarifa normal sem desconto (T_n). Quando não foram aplicados os descontos na tarifa convencional, considerou-se apenas uma tarifa diária (T_1), sendo essa T_n .

Os valores das tarifas de energia aplicados no modelo basearam-se nos praticados pelas companhias de eletrificação da região. Os valores dos descontos das tarifas e os horários das mesmas basearam-se na Portaria N^o 105 de abril de 1992 e na Resolução N^o 277 de 2000 da ANEEL.

Tabela 3.2. Parâmetros das equações para composição de custos dos equipamentos.

Equação	Parâmetros das equações				R ²
C_{SUC}	∂	2401,60	ξ	16,913	0,9645
C_{SB}	ω	140,71	β	0,86	0,9906
C_{ST}	σ	74968,00	φ	0,6917	0,9807
C_{CC}	ψ	44,203	τ	216,67	0,9956
C_{VR}	C_{vr}	200,00	-	-	1,0000
C_{AD}	C_{ad}	0,33	-	-	1,0000
C_{CON}	C_{con}	0,33	-	-	1,0000
C_{EM}	C_{em}	2,00	-	-	1,0000
C_{MEN}	C_{men}	200,00	-	-	1,0000
C_{OP}	C_{ENr}	0,0385	C_{ENn}	0,0104	-

3.4. Variáveis de decisão do modelo

As variáveis de decisão do modelo foram definidas em função da situação de configuração de sistema e de condição de operação. Assim, o modelo teve um conjunto de variáveis para o problema de otimização considerando o balanço hídrico anual e outro considerando o balanço hídrico mensal. O modelo teve como variáveis de decisão: os comprimentos dos trechos de tubos com diferentes diâmetros, o tempo total diário de irrigação, os tempos de funcionamento do sistema em diferentes tarifas de energia elétrica, a uniformidade de aplicação d'água, a frequência de irrigação e a pressão média de operação do emissor.

3.4.1. Variáveis para o balanço hídrico anual simplificado

- a) h – pressão média de operação da sub-unidade;
- b) U_E – uniformidade de emissão;
- c) I_F – frequência de irrigação;
- d) T_{rj} – tempo de operação no período de tarifa reduzida r no ano ou mês j ;
- e) T_{nj} – tempo de operação no período de tarifa normal n no ano ou mês j ;
- f) N_{e1} – número de emissores no primeiro trecho da lateral e derivação ascendentes;
- g) N_{e2} – número de emissores no segundo trecho da lateral e derivação ascendentes;
- h) N_{e3} – número de emissores no primeiro trecho da lateral descendente e derivação ascendente;
- i) N_{e4} – número de emissores no segundo trecho da lateral descendente e derivação ascendente;
- j) N_{e5} – número de emissores no primeiro trecho da lateral ascendente e derivação descendente;
- k) N_{e6} – número de emissores no segundo trecho da lateral ascendente e derivação descendente;
- l) N_{e7} – número de emissores no primeiro trecho da lateral e derivação descendentes;
- m) N_{e8} – número de emissores no segundo trecho da lateral e derivação descendentes;
- n) N_{S1} – número de saídas de laterais no primeiro trecho da derivação ascendente;
- o) N_{S2} – número de saídas de laterais no segundo trecho da derivação ascendente;
- p) N_{S3} – número de saídas de laterais no primeiro trecho da derivação descendente;
- q) N_{S4} – número de saídas de laterais no segundo trecho da derivação descendente;

- r) $L_{S_{aij}}$ – comprimento da seção i do primeiro trecho j da secundária ascendente;
- s) $L_{S_{dij}}$ – comprimento da seção i do primeiro trecho j da secundária descendente;
- t) L_{P1} – comprimento da primeira seção da linha principal;
- u) L_{P2} – comprimento da segunda seção da linha principal;
- v) L_{P3} – comprimento da terceira seção da linha principal;
- w) L_{P4} – comprimento da quarta seção da linha principal;
- x) L_{P5} – comprimento da quinta seção da linha principal.

O número de trechos da linha secundária variou de acordo com o número de sub-unidades total do sistema. Assim, quanto maior o número de sub-unidades maior o número de trechos da secundária. Na Figura 3.4 pode-se observar a configuração de um sistema com oito sub-unidades e algumas das variáveis de decisão do modelo. Nessa configuração tem-se: um trecho de linha principal, quatro trechos de linhas secundárias (2 ascendentes e 2 descendentes), quatro trechos de linhas de derivação (2 ascendentes e 2 descendentes) e oito trechos de linhas laterais (4 ascendentes e 4 descendentes).

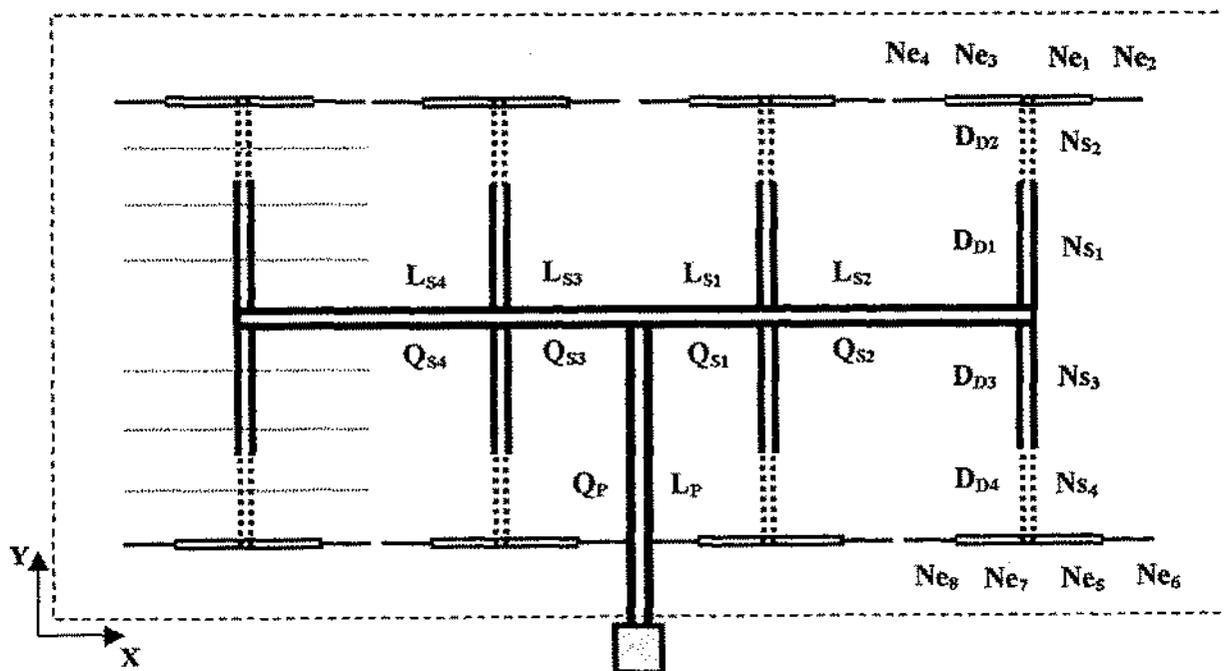


Figura 3.4. Configuração de um sistema com oito sub-unidades ($N_{SUT} = 8$).

3.4.2. Variáveis para o balanço hídrico mensal no solo simplificado

No caso do balanço hídrico mensal as mesmas variáveis de decisão do balanço anual foram otimizadas, sendo que o número de variáveis dos tempos, nas diferentes tarifas de energia, foi ampliado. Isto é, com dois valores de tarifas para cada mês obteve-se um total de 24 variáveis relacionadas ao tempo total de irrigação diário.

3.5. Layout e operação do sistema

O layout de um sistema de microirrigação e a estratégia de operação são fundamentais na busca da melhor concepção de projeto. O layout definido neste trabalho (Figura 3.2) é um dos mais empregados pelos projetistas, quando o tamanho da área permite. Sua geometria e o sentido de fluxo na rede, normalmente ramificada, facilita o desenvolvimento de algoritmos para a aplicação em modelos de otimização. Porém, o dimensionamento dos sistemas comumente não é flexível para diversas operações, ou seja, definida a operação do sistema, obtém-se o dimensionamento ótimo para uma determinada configuração da rede. Portanto, a seleção da melhor configuração do sistema e da operação do sistema deve ser criteriosamente determinada. Alguns modelos apresentam como variáveis de decisão o número de sub-unidades e de unidades operacionais. No entanto, levando-se em consideração a importância das mesmas no dimensionamento e as limitações dos modelos de otimização, optou-se pela análise do dimensionamento e operação para cada configuração de sistema obtida pela metodologia proposta (Figura 3.1).

As equações que seguem auxiliaram na definição da configuração e operação do sistema de microirrigação:

- Número máximo de unidades operacionais (N_{UOmax}).

$$N_{UOmax} = \frac{T_{ID}}{T_{UOmax}} \quad (3.25)$$

onde:

T_{ID} - tempo disponível de irrigação diário, h.

$$T_{UOmax} = \frac{Vol_{max}}{q_e N_{EP}} \quad (3.26)$$

$$Vol_{max} = \frac{R_{HCmax} \cdot E_E \cdot E_L \cdot I_F}{E_a} \quad (3.27)$$

sendo:

Vol_{max} - a máxima demanda bruta diária d'água da cultura (L), q_e - a vazão do emissor ($L \cdot h^{-1}$), E_E e E_L - o espaçamento entre plantas na fileira e entre fileiras (m), respectivamente, I_F - a frequência de irrigação (dia), N_{EP} - o número de emissores por planta e Ea - a eficiência de aplicação d'água.

$$q_e = k_d h^x \quad (3.28)$$

onde:

h - pressão de serviço do emissor, m;

k_d - coeficiente de descarga do emissor;

x - expoente que caracteriza o regime de fluxo do emissor.

- Número de sub-unidades que compõem uma unidade operacional e trabalham simultaneamente (N_{SUS}).

$$N_{SUS} = \frac{N_{SUT}}{N_{UO}} \quad (3.29)$$

- Área da unidade operacional (A_{UO}), ha.

$$A_{UO} = \frac{A_I}{N_{UO}} \quad (3.30)$$

onde:

A_I - área irrigada total, ha.

- Área da sub-unidade (A_{SUB}), ha.

$$A_{SUB} = \frac{A_I}{N_{SUT}} \quad (3.31)$$

- Comprimento máximo das linhas laterais (L_L), m.

$$L_X L_Y = N_{SUT} L_L (2L_D) = 10000 A_I \quad (3.32)$$

$$L_L = \frac{10000 A_I}{N_{SUT} (2L_D)} \text{ ou} \quad (3.33)$$

$$L_L = \frac{L_X}{N_{SUT}} \quad (3.34)$$

A_I - área irrigada total, ha;

10000 - fator de conversão de ha para m^2 ;

L_X - dimensão da área no sentido das linhas laterais, m;

L_Y - dimensão da área no sentido das linhas de derivação, m;

L_D - comprimento máximo das linhas de derivação, m.

- Comprimento máximo das linhas de derivação (L_D), m.

$$L_D = \frac{L_Y}{2} \quad (3.35)$$

- Comprimento máximo das linhas secundárias (L_S), m.

Comprimento total da secundária:

$$L_S = \frac{L_X}{2} - L_L \quad (3.36)$$

Comprimento do primeiro trecho da secundária:

$$L_{Sj} = L_L \quad (3.37)$$

Comprimento dos demais trechos da secundária:

$$L_{Sj} = 2 L_L \quad (3.38)$$

- Comprimento máximo da linha principal (L_P), m.

$$L_P = \frac{L_Y}{2} \quad (3.39)$$

3.6. Modelo hidráulico

Os sistemas de microirrigação apresentam a particularidade de distribuírem água em toda a área através de emissores instalados com pequenos espaçamentos entre si, menores que 10 m, o que implica numa rede hidráulica geralmente com milhares de pontos de aplicação d'água. O desafio do dimensionamento hidráulico é a minimização das variações nas descargas desses emissores levando-se em consideração também critérios econômicos. Tem havido uma evolução significativa nos procedimentos de cálculos hidráulicos desses sistemas, assim como se tem desenvolvido equipamentos que permitem o melhor controle da aplicação d'água no solo, a exemplo dos emissores autocompensantes. Neste item descreve-se o procedimento utilizado para a obtenção do dimensionamento da rede hidráulica de um sistema microirrigação.

3.6.1. Perdas de carga

- Perdas de carga nas linhas laterais (h_L), m.

As perdas de carga nas linhas laterais foram determinadas pela equação de Darcy-Weisbach, com o fator de atrito f de Blasius (Eq 2.41). As laterais foram formadas por dois trechos, com dois diâmetros distintos. A correção das perdas de carga devido às múltiplas saídas foram corrigidas no primeiro trecho pelo fator G e, no segundo trecho, pelo fator F . A aplicação desses dois fatores em conjunto não é comumente observada, mas representam um método muito eficaz para esse tipo de dimensionamento. Desse modo, resulta na equação:

$$h_{\text{L}} = 7,794 \cdot 10^{-4} \left\{ \left[\left(N_{ei} S_e - \frac{S_e}{2} \right) \left((N_{ei} + N_{ej}) q_e \cdot 0,277 \cdot 10^{-6} \right)^{1,75} D_{Li}^{-4,75} \right] G + \dots \right. \\ \left. \dots + \left[(N_{ej} S_e) \left(N_{ej} q_e \cdot 0,277 \cdot 10^{-6} \right)^{1,75} D_{Lj}^{-4,75} \right] F \right\} \quad (3.40)$$

onde:

N_{ei} - número de emissores no primeiro trecho da lateral (índices 1, 3, 5 e 7);

S_e - espaçamento entre emissores na lateral, m;

N_{ej} - número de emissores no segundo trecho da lateral (índices 2, 4, 6 e 8);

D_{Li} - diâmetro do primeiro trecho da lateral, m;

D_{Lj} - diâmetro do segundo trecho da lateral, m.;

q_e - vazão do emissor. L.h⁻¹;

G - fator de correção das perdas de carga no primeiro trecho da lateral e da derivação

(Anwar, 1999a).

$$G = \frac{1}{n_s^{m+1} (1+r)^m} \sum_{k_s=1}^{n_s} (k_s + n_s r)^m, \text{ que desenvolvido gera:} \quad (3.41)$$

$$G = \frac{1}{n_s^{m+1} (1+r)^m} (A + B + C), \text{ com:} \quad (3.42)$$

$$A = \left\{ \frac{1}{m+1} \left[(n_s (1+r) + 1)^{m+1} - (n_s r)^{m+1} \right] \right\} \quad (3.43)$$

$$B = \left\{ -\frac{1}{2} \left[(n_s (1+r) + 1)^m + (n_s r)^m \right] \right\} \quad (3.44)$$

$$C = \left\{ \frac{1}{12} \left[m(n_s (1+r) + 1)^{m-1} - m(n_s r)^{m-1} \right] \right\} \quad (3.45)$$

onde: k_s seção da tubulação ($1 \leq k_s \leq n_s$); n_s número de seções e r razão entre a vazão total do trecho posterior (Q_p) e o trecho anterior (Q_a) da tubulação.

$$r = \frac{Q_p}{Q_a} \quad (3.46)$$

F - fator de correção das perdas de carga no segundo trecho da lateral e da derivação (Christiansen, 1942).

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{(m-1)^{0,5}}{6N^2} \quad (3.47)$$

onde:

m - expoente da velocidade na equação de perda de carga.

N - número de saídas de descarga na tubulação.

As perdas de carga nas tubulações que não são de polietileno (sucção, principal, secundária e de derivação) foram determinadas pela equação de Hazen-Williams. Para as correções das perdas de carga, devido às múltiplas saídas, procedeu-se igualmente às linhas laterais. As linhas de derivação também foram constituídas por dois trechos com diâmetros distintos. Assim obteve-se:

- Perda de carga nas linhas de derivação (h_{fD}), m.

$$h_{fD} = 10,67 C^{-1,852} \left\{ \left[\left(N_{S1} S_L - \frac{S_L}{2} \right) \left((N_{S1} + N_{S2}) 2 Q_{L1} \right)^{1,852} D_{D1}^{-4,87} \right] G + \dots \right. \\ \left. \dots + \left[(N_{S2} S_L) (N_{S2} 2 Q_{L1})^{1,852} D_{D2}^{-4,87} \right] F \right\} \quad (3.48)$$

Onde:

C - coeficiente de rugosidade, adimensional;

S_L - espaçamento entre linhas laterais, m;

N_{S1} - número de saídas de laterais no primeiro trecho da derivação (índices 1 e 3);

N_{S2} - número de saídas de laterais no segundo trecho da derivação (índices 2 e 4);

D_{D1} - diâmetro da lateral no primeiro trecho, m;

D_{D2} - diâmetro da lateral no segundo trecho, m;

Q_{L1} - vazão no primeiro trecho da lateral, $m^3 \cdot s^{-1}$.

- Perda de carga por trecho de secundária (h_{fS}), m.

$$h_{fS} = 10,67 C^{-1,852} \left[Q_{Sj}^{1,852} \sum_1^5 (L_{Sij} D_{Sij}^{-4,87}) \right] \quad (3.49)$$

onde:

C - coeficiente de rugosidade, adimensional;

L_{Sij} - comprimento da seção i do trecho j da secundária, m;

D_{Sij} - diâmetro da seção i do trecho j da secundária, m;

Q_{Sj} - vazão no trecho j da secundária, $m^3 \cdot s^{-1}$.

- Perda de carga na principal (h_{fp}), m.

$$h_{fp} = 10,67 C^{-1,852} \left[\left(N_{SUS} Q_{Di} \right)^{1,852} \sum_1^5 \left(L_{Pi} D_{Pi}^{-4,87} \right) \right] \quad (3.50)$$

onde:

C - coeficiente de rugosidade, adimensional;

L_{Pi} - comprimento da seção i da principal, m;

D_{Pi} - diâmetro da seção i da principal, m;

Q_{Di} - vazão no primeiro trecho da linha de derivação, $m^3 \cdot s^{-1}$.

- Perda de carga na sucção (h_{fSUC}), m.

$$h_{fSUC} = 10,67 C^{-1,852} \left(N_{SUS} Q_{Di} \right)^{1,852} L_{SUC} D_{SUC}^{-4,87} \quad (3.51)$$

onde:

C - coeficiente de rugosidade, adimensional;

L_{SUC} - comprimento da sucção, m;

D_{SUC} - diâmetro da sucção, m.

- Vazões (Q), $m^3 \cdot s^{-1}$.

Vazão no início da linha lateral

$$Q_{Li} = \left((N_{ei} + N_{ej}) q_e \right) 0,277 \cdot 10^{-6} \quad (3.52)$$

Vazão no início da linha de derivação

$$Q_{Di} = \left((N_{si} + N_{sj}) 2 Q_{Li} \right) \quad (3.53)$$

Vazão na linha principal e sucção

$$Q_P = Q_{SUC} = N_{SUS} Q_{Di} \quad (3.54)$$

com:

N_{SUS} - número de sub-unidades que trabalham simultaneamente.

Q_{Sj} - A vazão em cada trecho j da secundária varia em função do N_{UO} e do N_{SUS} e da escolha das sub-unidades em funcionamento. Essa escolha baseou-se na melhor divisão da

vazão ao longo da secundária e da situação hidráulicamente mais desfavorável, ou seja, que requereu a maior altura manométrica.

3.6.2. Altura manométrica

$$H_{man} = P_{IND} + h_{js_a} + h_{jp} + h_{jsuc} + h_{jst} + Z_{suc} + \Delta_P + \Delta_S \quad (3.55)$$

onde:

H_{man} - altura manométrica, m;

P_{IND} - pressão no início da linha de derivação ou da sub-unidade, m;

h_{js_a} - perda de carga na secundária ascendente, m;

h_{jst} - perda de carga no sistema de tratamento, m;

Z_{suc} - desnível geométrico da sucção, m;

Δ_P - desnível na linha principal, m (direção Y);

Δ_S - desnível na linha secundária ascendente, m (direção X).

$$P_{IND} = h + 0,63h_{fl_{aa}} + 0,63h_{jD_a} + 0,5\Delta_L + 0,5\Delta_D$$

$h_{fl_{aa}}$ - perda de carga na linha lateral ascendente da derivação ascendente, m;

h_{jD_a} - perda de carga na derivação ascendente, m;

Δ_L - desnível na lateral ascendente, m (direção X);

Δ_D - desnível na derivação ascendente, m (direção Y).

As perdas de carga em todas as tubulações foram acrescidas em 5% para compensação das perdas de carga localizadas.

3.6.3. Potência do conjunto eletrobomba

$$P_{OT} = \frac{9,8Q_P H_{man}}{\eta} 1,1 \quad (3.56)$$

onde:

P_{OT} - potência do conjunto eletrobomba, kW;

Q_P - vazão na linha principal, $m^3 \cdot s^{-1}$;

H_{man} - altura manométrica, m;

η - rendimento da eletrobomba, adimensional;

1,1 - acréscimo de potência com fator de segurança.

3.7. Restrições do modelo

A obtenção do custo total mínimo do sistema está sujeita às limitações relacionadas ao emissor selecionado, à hidráulica da rede, ao requerimento hídrico da cultura, às propriedades físicas do solo, às condições de operação e ao layout do sistema. As restrições apresentadas nesta seção descrevem essas limitações. O modelo apresentou restrições lineares e não-lineares, e de contorno para variáveis:

- Pressão de operação do emissor, m.

$$h_{min} \leq h \leq h_{max} \quad (3.57)$$

onde:

$h = h_{med}$ - pressão média ou de serviço do emissor na sub-unidade, m;

h_{min} - mínima pressão de operação do emissor, m;

h_{max} - máxima pressão de operação do emissor, m.

- Variação de pressão na sub-unidade (Δh_S), m.

Combinando-se as equações da uniformidade de emissão (U_E) de Keller & Karmeli (1975), (Eq. 2.45), com a recomendação de Keller & Bliesner (1990) (Eq. 2.46), para máxima variação de pressão na sub-unidade na fase de projeto, tem-se a perda de carga admissível (h_{adm}):

$$h_{adm} = \Delta h_S \leq 2,5h \left\{ 1 - \left[\left(\frac{U_E}{100(1 - 1,27 C_{VF} N_{EP}^{-0,5})} \right) \right]^{\frac{1}{X}} \right\} \quad (3.58)$$

- Perda de carga na sub-unidade, m.

$$0 \leq h_{fL} + h_{fD} \leq \Delta h_S \quad (3.59)$$

- Perdas de carga nas laterais em nível, m.

$$h_{fLaa} = h_{fLda} = h_{fLad} = h_{fLdd} \quad (3.60)$$

onde:

h_{fLaa} - perda de carga na linha lateral ascendente da derivação ascendente;

h_{fLad} - perda de carga na linha lateral descendente da derivação ascendente;

h_{fLda} - perda de carga na linha lateral ascendente da derivação descendente;

h_{fLda} - perda de carga na linha lateral descendente da derivação descendente.

- Perdas de carga nas linhas de derivação em nível, m.

$$h_{fDa} = h_{fDd} \quad (3.61)$$

onde:

h_{fDa} - perda de carga na derivação ascendente;

h_{fDd} - perda de carga na derivação descendente.

- Perdas de carga nas secundárias em nível, m.

$$h_{fSa} = h_{fSd} \quad (3.62)$$

onde:

h_{fSa} - perda de carga na secundária ascendente;

h_{fSd} - perda de carga na secundária descendente.

- Perdas de carga nas secundárias em desnível, m.

$$h_{fSa} \leq h_{fSd} \quad (3.63)$$

- Variação de pressão nas sub-unidades em desnível, m.

Com derivação ascendente:

$$h_{fLa} + \Delta_L + h_{fDa} + \Delta_D \leq \Delta h_S \quad (3.64)$$

$$|h_{fLad} - \Delta_L + h_{fDa} + \Delta_D| \leq \Delta h_S \quad (3.65)$$

Com derivação descendente:

$$|h_{fLdd} - \Delta_L + h_{fDd} - \Delta_D| \leq \Delta h_S \quad (3.66)$$

$$|h_{fLda} - \Delta_L + h_{fDd} + \Delta_D| \leq \Delta h_S \quad (3.67)$$

onde:

Δ_L - desnível na lateral, m;

Δ_D - desnível na derivação, m.

- Comprimento da linha lateral, m.

$$(N_{ei} + N_{ej})S_e = L_L \quad (3.68)$$

- Comprimento da linha de derivação, m.

$$(N_{s_i} + N_{s_j})S_L = L_D \quad (3.69)$$

- Comprimento da linha secundária, m.

$$L_S = \sum L_{Sij} = \frac{L_x}{2} - L_L \quad (3.70)$$

$$L_{S1} = L_L \quad (3.71)$$

$$L_{Sj} = 2L_L, \text{ para } j \neq 1 \quad (3.72)$$

- Comprimento da linha principal, m.

$$L_P = L_{P1} + L_{P2} + L_{P3} + L_{P4} + L_{P5} = \frac{L_y}{2}, \quad (3.73)$$

- Velocidades nas tubulações, por trecho de lateral (V_L), derivação (V_D), secundária (V_S) e principal (V_P), m.s^{-1} .

Foram impostos limites às velocidades para a melhor adequação das equações de perda de carga utilizadas e evitar danos às tubulações. Procedeu-se dessa forma porque as tubulações com múltiplas saídas têm uma redução de vazão com seu comprimento, podendo haver mudança no regime de fluxo, que é caracterizado pelo Número de Reynolds (Re). Assim, tanto o fator de atrito f de Blasius como a equação de Hazen-Williams, serão mais precisas trabalhando dentro dos regimes de fluxo para os quais foram desenvolvidas.

$$V_{Lmin} \leq V_L = 1,273 \frac{Q_L}{D_L^2} \leq V_{Lmax} \quad (3.74)$$

$$V_{Dmin} \leq V_D = 1,273 \frac{Q_D}{D_D^3} \leq V_{Dmax} \quad (3.75)$$

$$V_{Smin} \leq V_{Sj} = 1,273 \frac{Q_{Sj}}{D_{Sj}^2} \leq V_{Smax} \quad (3.76)$$

$$V_{Pmin} \leq V_P = 1,273 \frac{Q_P}{D_P^2} \leq V_{Pmax} \quad (3.77)$$

- Tempo de irrigação disponível diário (T_{ID}), h.

$$T_{I_{UOmax}} N_{UOmax} \leq T_{ID} \quad (3.78)$$

- Tempo total de irrigação diário (T_{TID}), h.

$$T_{Tj} + T_{nj} = T_{TID} \quad (3.79)$$

onde:

$$T_{TID} = T_{IWO\ med} N_{UO} \quad (3.80)$$

$$T_{IWO\ med} = \frac{Vol_{med}}{q_e N_{EP}} \quad (3.81)$$

$$Vol_{med} = \frac{R_{HC\ med} E_E E_L I_F}{Ea} \quad (3.82)$$

onde:

Vol_{med} - demanda média bruta diária d'água da cultura (L). T_{Tj} , T_{nj} - tempos de operação nas diferentes tarifas diárias de energia elétrica, para o balanço hídrico anual e mensal (índice j).

- Máxima precipitação do emissor (P_m), mm.h⁻¹.

$$P_m \leq I_s \quad (3.83)$$

onde:

$$P_m = \frac{4q_e}{\pi D_m^2} \quad (3.84)$$

q_e - vazão do emissor, L. h⁻¹;

D_m - diâmetro molhado do emissor, m;

I_s - capacidade de infiltração máxima d'água no solo, mm.h⁻¹.

- Máxima área molhada pelo emissor (A_M), %.

$$A_M = \frac{0,785 D_m^2}{E_E E_L} 100 \leq A_{M\ max} \quad (3.85)$$

- Máxima lâmina armazenável no solo (L_M), mm.

$$L_M = \frac{R_{HC\ max} I_F}{Ea} \leq \frac{L_{M\ max} A_M}{100} \quad (3.86)$$

- Restrições numéricas às variáveis.

$$N_{ei}, N_{ej}, N_{Si}, N_{Sj} \geq 1, \text{ inteiro.} \quad (3.87)$$

$$U_{E\ min} \leq U_E \leq U_{E\ max} \quad (3.88)$$

$$T_{rj \min} \leq T_{rj} \leq T_{rj \max} \quad (3.89)$$

$$T_{nj \min} \leq T_{nj} \leq T_{nj \max} \quad (3.90)$$

3.8. Método de otimização

Após o desenvolvimento matemático do modelo foi realizada a sua implementação numérica, uma vez que sua solução por métodos analíticos não é exequível. O ambiente MATLAB foi selecionado por possuir ferramentas para solução de problemas especiais, as “*Toolboxes*” ou módulos, que para este estudo trata-se do módulo de otimização. Nesse módulo tem-se diferentes algoritmos para otimização restrita e irrestrita, baseados em técnicas numéricas para a solução de problemas não lineares, tais como: Método Quasi-Newton; Método Gauss-Newton; Programação Quadrática Seqüencial (SQP), entre outros.

Foi escolhido o algoritmo de Programação Quadrática Seqüencial, que se baseia na formulação de um subproblema de Programação Quadrática (QP) através de uma aproximação quadrática da função *Lagrangeana*. Para simplificação do problema as restrições de contorno são transformadas em restrições de desigualdade. O subproblema de Programação Quadrática é obtido pela linearização de restrições não lineares. Esse pode, então, ser solucionado por qualquer algoritmo de QP. A solução obtida é usada para formar uma nova iteração. O sistema do modelo é resolvido atendendo simultaneamente com as condições de otimalidade de 1ª e 2ª ordens de Kuhn-Tucker para a solução do problema de PNL. Problemas com restrições não lineares podem ser resolvidos, normalmente, em menos iterações que problemas irrestritos usando o SQP. Isso ocorre principalmente porque com a limitação da região viável o otimizador pode tomar decisões com melhores informações, considerando as direções de busca e comprimento do passo.

A implementação do SQP no MATLAB consiste de três principais estágios: (1) processamento da matriz *Hessiana* da função *Lagrangeana*; (2) solução do problema de Programação Quadrática; e (3) cálculo da linha de pesquisa e da função de mérito.

O módulo de otimização para problemas não lineares do MATLAB classifica os problemas em dois grupos: 1) “Large-scale”: quando o problema tem apenas limites de contorno superiores e inferiores ou apenas restrições lineares de igualdade. Usa o método reflexivo-interior de Newton e o pré-condicionado gradiente conjugado (PCG); 2) “Medium-scale”: é aplicado quando o problema tem restrições de igualdade e de desigualdade e limites de contorno superiores e inferiores. O problema matemático do modelo em estudo é

caracterizado como do tipo programação não linear com restrições de igualdade e de desigualdade e limites de contorno superiores e inferiores, para o qual o algoritmo a ser empregado é o "Medium-scale".

O algoritmo de SQP tem como principais limitações a exigência de que as funções objetivo e as restrições sejam funções contínuas. A menos que a função objetivo seja estritamente convexa, o algoritmo pode fornecer apenas um mínimo local. No entanto, essas limitações estão presentes na maioria dos algoritmos de otimização.

3.9. Casos para aplicação do modelo

O modelo proposto neste trabalho foi aplicado na análise do dimensionamento e operação de um sistema do tipo microaspersão. Com o objetivo de se avaliar a influência das demandas hídricas no dimensionamento e operação dos sistemas de microirrigação, inicialmente, realizou-se o balanço hídrico anual com base em valores de precipitação pluviométrica com 75% de probabilidade de ocorrência e de evapotranspiração potencial de uma série com 56 anos do posto localizado na Cidade de Iguatu, Estado do Ceará (CE) (LAT 6° 22' S, LONG 39° 18' W e ELEV 213 m). Numa segunda etapa do trabalho, avaliou-se o efeito do balanço hídrico mensal no solo sobre dimensionamento e operação do sistema. Foram realizados os balanços hídricos mensais no solo para as localidades: Iguatu (CE), inserida em região semi-árida (posto anterior), e João Pessoa, Estado da Paraíba (PB), inserida em região litorânea (LAT. 7° 8' S, LONG. 34° 53' W e ELEV. 5 m), com base em valores de precipitação pluviométrica com 75% de probabilidade de ocorrência e de evapotranspiração potencial, para séries com 56 anos e 54 anos de observação para as duas localidades, respectivamente, (Tabelas A13 e A14) em anexo.

3.9.1. Cultura selecionada

- Cultura: manga (*Mangifera indica* L.);
- Espaçamento da cultura: 6 x 6 m (EMBRAPA, 2002);
- Coeficientes de cultivo (Teixeira, 2001):
 - médio ($K_{c_{med}}$) = 0,71
 - máximo ($K_{c_{max}}$) = 0,85
- Coeficiente de sombreamento (K_s) = 0,80 (Bernardo, 1989).

- Máxima área molhada (A_{Mmax}) = 67% (Keller & Bliesner, 1990)
- Uniformidade de emissão (%):

$$90 \leq U_E \leq 100$$
- Eficiência de aplicação (Ea) = 90%
- Tempo total disponível diário (h): 21
- Tempo disponível de operação com tarifa reduzida (h):

$$0 \leq T_{rj} \leq 6$$
- Tempo disponível de operação com tarifa normal (h):

$$0 \leq T_{nj} \leq 15$$
- Coeficiente de rugosidade da Equação de Hazen-Williams (C) = 150
- Altura geométrica de sucção: 6 m
- Comprimento da sucção: 10 m
- Perda de carga no sistema de tratamento d'água: 8 m
- Rendimento do conjunto eletrobomba (η): 0,70
- Limites de velocidades nas linhas laterais, de derivação, secundária e principal:

Considerando o limite inferior do Número de Reynolds (Re) para aplicação do fator f de Blasius, a viscosidade da água a 20 °C e uma velocidade máxima segura, foram obtidos os seguintes limites:

$$0,29 \leq V_L = 1,273 \frac{Q_L}{D_L^2} \leq 2,5 \text{ m.s}^{-1}, \text{ para } D_L \leq 0,00995 \text{ m}$$

$$0,23 \leq V_L = 1,273 \frac{Q_L}{D_L^2} \leq 2,5 \text{ m.s}^{-1}, \text{ para } D_L \leq 0,0132 \text{ m}$$

$$0,18 \leq V_L = 1,273 \frac{Q_L}{D_L^2} \leq 2,5 \text{ m.s}^{-1}, \text{ para } D_L \leq 0,017 \text{ m}$$

$$0,14 \leq V_L = 1,273 \frac{Q_L}{D_L^2} \leq 2,5 \text{ m.s}^{-1}, \text{ para } D_L \leq 0,0212 \text{ m}$$

$$0,11 \leq V_L = 1,273 \frac{Q_L}{D_L^2} \leq 2,5 \text{ m.s}^{-1}, \text{ para } D_L \leq 0,0272 \text{ m}$$

- Limites de velocidades nas linhas de derivação, secundária, principal e sucção:

$$0,50 \leq V = 1,273 \frac{Q}{D^2} \leq 2,5 \text{ m.s}^{-1}, \text{ para } D \geq 0,048 \text{ m}$$

- Desnível do terreno: a influência dos desniveis foi considerada em tópico específico do trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Configurações e operações possíveis do sistema

Foram obtidas 14 configurações possíveis de sistema, que variaram de 4 a 20 sub-unidades com diferentes relações L_X/L_Y (Tabela 4.1). Tendo, conseqüentemente, a maior sub-unidade o sistema com 4 sub-unidades e a menor sub-unidade o sistema com 20 sub-unidades. A maior área obtida foi de 34,6752 ha (346752 m²), superior em 1,98% à área de referência e a menor área foi de 33,4368 ha (334368 m²), inferior em 1,68% à área de referência. A máxima variação de áreas foi, portanto, de 3,70%. As relações L_X/L_Y ajustadas das áreas variaram de 0,98 a 2,45, ou seja, de uma área praticamente quadrada a uma área retangular. Isso implicou em comprimentos de linhas laterais (L_L) que variaram de 180 a 42 m e linhas de derivação (L_D) que variaram de 294 a 186 m. Esses resultados evidenciam que, para uma mesma área, pode-se ter várias possibilidades de configurações de sistemas, o que merece uma análise detalhada das implicações hidráulicas e econômicas envolvidas.

De posse das configurações de sistemas pôde-se determinar as diferentes estratégias de operação dos sistemas, selecionando-se o número de unidades operacionais (N_{UO}) que são apresentadas na Tabela 4.2. Considerando-se as configurações de sistemas e as diferentes operações, 59 situações de projeto são possíveis. Considerando que para cada opção de projeto foi otimizado o sistema para a operação com duas e com uma tarifa de energia, um total de 118 situações foram analisadas.

Tabela 4.1. Configurações de áreas irrigadas aplicadas no modelo de otimização.

N_{SUT}	L_X/L_Y	L_L (m)	L_D (m)	L_X (m)	L_Y (m)	A_I (ha)
4	0,98	144	294	576	588	33,8688
	1,26	162	258	648	516	33,4368
	1,50	180	240	720	480	34,5600
8	0,98	72	294	576	588	33,8688
	1,30	84	258	672	516	34,6752
	1,50	90	240	720	480	34,5600
	1,73	96	222	768	444	34,0992
	2,45	114	186	912	372	33,9264
12	0,98	48	294	576	588	33,8688
	1,26	54	258	648	516	33,4368
	1,50	60	240	720	480	34,5600
16	1,30	42	258	672	516	34,6752
	1,73	48	222	768	444	34,0992
20	2,06	42	204	840	408	34,2720

Tabela 4.2. Potenciais operações (N_{VO}) do sistema para cada configuração (N_{SUT}).

N_{SUT}				
4	8	12	16	20
N_{VO}				
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
4	4	3	4	5
-	8	6	8	10
-	-	12	16	20

4.2. Análise do dimensionamento e operação do sistema considerando o balanço hídrico anual

O modelo de otimização apresentou diferentes números de variáveis de decisão e de restrições em função da configuração do sistema (N_{SUT}). Assim, para $N_{SUT} = 4$ o problema foi composto por 32 variáveis de decisão e 142 restrições, enquanto para $N_{SUT} = 20$ tinha-se 72 variáveis e 310 restrições. Logo, quanto maior o N_{SUT} , maior a exigência do algoritmo de otimização.

Os custos totais (C_T) do sistema foram constituídos pelos equipamentos, considerados como os custos fixos (C_F), e pelo custo de energia, considerado como custos operacionais

(C_{OP}). Desse modo, para uma melhor análise dos custos optou-se por uma abordagem individual dos mesmos, nessa etapa do trabalho.

4.2.1. Demandas hídricas

O requerimento hídrico bruto anual ou deficiência hídrica anual ($DEFa$) (Eq. 3.1), com uma eficiência de aplicação de 90%, foi de 573,6 mm, em Iguatu (CE). Para que fosse possível a aplicação das duas tarifas diárias de energia elétrica todo esse requerimento d'água foi distribuído igualmente ao longo do ano em função da evapotranspiração de referência líquida média diária ($ET_{o_{med}}$) de 5,22 mm, que implicou numa avapotranspiração da cultura média diária ($ET_{c_{med}}$) de 3,71 mm (Eq. 3.4). Com isso, o requerimento hídrico da cultura médio diário ($R_{HC_{med}}$) líquido foi de 2,96 mm e o bruto de 3,29 mm (Eq. 3.3). Desse modo, o número de dias irrigados anual ($NDIa$) foi de aproximadamente 174,4 dias (Eq. 3.2). De posse das necessidades hídricas diárias e do número de unidades operacionais (N_{UO}) pôde-se determinar os tempos de irrigação diários e conseqüentemente os tempos de operação nas diferentes tarifas de energia.

Com a evapotranspiração referência máxima diária ($ET_{o_{max}}$) de 6,22 mm, obteve-se um requerimento hídrico da cultura máximo diário da cultura ($R_{HC_{max}}$) (Eq. 3.5) bruto de 4,70 mm, considerando uma eficiência de aplicação de 90%. Esse procedimento foi empregado para que o sistema possa garantir o fornecimento d'água nos períodos de maior demanda hídrica da cultura sem que haja a necessidade de aplicação de estresse hídrico.

4.2.2. Análise dos custos fixos

Os custos fixos, representados pelos equipamentos do sistema, foram determinados pela Equação 3.9, amortizados segundo a Equação 3.10. Em todas as configurações de sistemas, ou seja, número de sub-unidades total (N_{SUT}) iguais a 4, 8, 12, 16 e 20, foram obtidos custos fixos ótimos para cada estratégia de operação testada, ou número de unidades operacionais (N_{UO}), Tabelas A1, A3, A5, A7 e A9 em anexo.

Pôde-se observar que os custos fixos reduzem-se consideravelmente com o N_{UO} , o que é uma conseqüência de um fator principal, o aumento de N_{UO} reduz a vazão conduzida no sistema, implicando em: 1) menores diâmetros das tubulações, que atendam às restrições impostas, e nos menores custos; 2) em menor custo de alguns componentes do sistema, que têm seus custos determinados diretamente pela vazão aduzida, a exemplo do sistema de

bombeamento (Eq. 3.15) e do sistema de tratamento d'água (Eq. 3.16). Logo, o menor custo fixo foi obtido, em todas as configurações, com o máximo N_{UO} . Na Figura 4.1 têm-se os custos fixos médios otimizados, em função do N_{UO} , trabalhando com duas tarifas de energia.

Na Tabela 4.2 foram apresentadas as potenciais possibilidades de operações do sistema, isto é, o máximo número de unidades operacionais, com base na melhor seleção do número de sub-unidades em funcionamento simultâneo. No entanto, em função do máximo requerimento hídrico diário da cultura (Eq. 3.5), das características hidráulicas do emissor, da frequência de irrigação e do tempo disponível diário de operação, o máximo N_{UO} foi igual a 8. Assim, o maior custo fixo do sistema foi obtido para $N_{UO} = 1$, em todas as situações, e o menor custo fixo para $N_{UO} = 8$, que só foi possível com $N_{SUT} = 8$ e 16. Para duas tarifas diárias, os custos médios máximos ($N_{UO} = 1$) foram superiores em 42,8% aos mínimos ($N_{UO} = 8$) considerando todas as configurações analisadas.

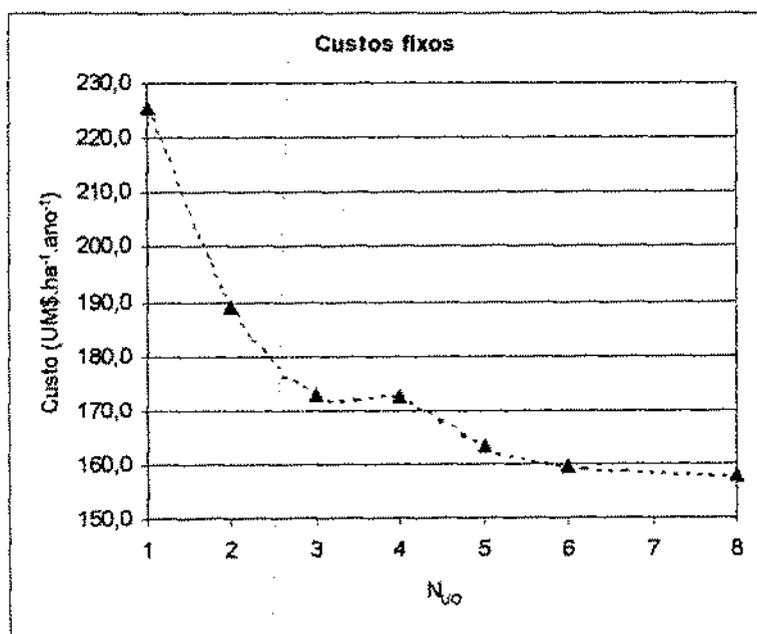


Figura 4.1. Custos fixos médios ótimos, considerando todas as configurações de sistema, operando com duas tarifas diárias, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).

A obtenção da melhor configuração do sistema (N_{SUT}) é fundamental para o dimensionamento por dois motivos: afeta diretamente a forma de operação do sistema, pois influencia na determinação do número máximo de unidades operacionais (N_{UO}), e, quanto maior o N_{SUT} para uma determinada área, menores serão as sub-unidades, que terão seus custos reduzidos. O comportamento dos custos fixos médios mínimos e máximos, para cada configuração de sistema (N_{SUT}), obtidos pelas médias dos custos obtidos em todos os formatos da área (relações comprimento/largura, L_X/L_Y), pode ser observado na Figura 4.2.

Para uma mesma operação (N_{UO}), ocorreram variações de custos inferiores a 12,2% nas diferentes configurações de sistema (N_{SUT}), por exemplo, $N_{UO} = 1$ para $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20. Porém, em termos médios, os custos fixos apresentaram máximos e mínimos nas mesmas operações, isto é, mesmo (N_{UO}) quando foi possível essa comparação, uma vez que algumas configurações não apresentaram operações em comum, a exemplo e $N_{UO} = 3$ para $N_{SUT} = 12$ ou $N_{UO} = 5$ para $N_{SUT} = 20$.

Constatou-se que os custos fixos reduziram, para um mesmo N_{UO} , até $N_{SUT} = 16$ voltando a crescer com $N_{SUT} = 20$. Uma justificativa seria a observação de que a redução do tamanho da sub-unidade leva a menores custos com as tubulações da mesma. Porém, essa redução está limitada pelo uso dos diâmetros comerciais disponíveis no mercado. Assim, haverá um limite no aumento do N_{SUT} que resultará em redução do custo da sub-unidade. A partir desse limite os custos com outras tubulações, como as linhas secundárias, e com válvulas resultarão em aumentos nos custos fixos do sistema.

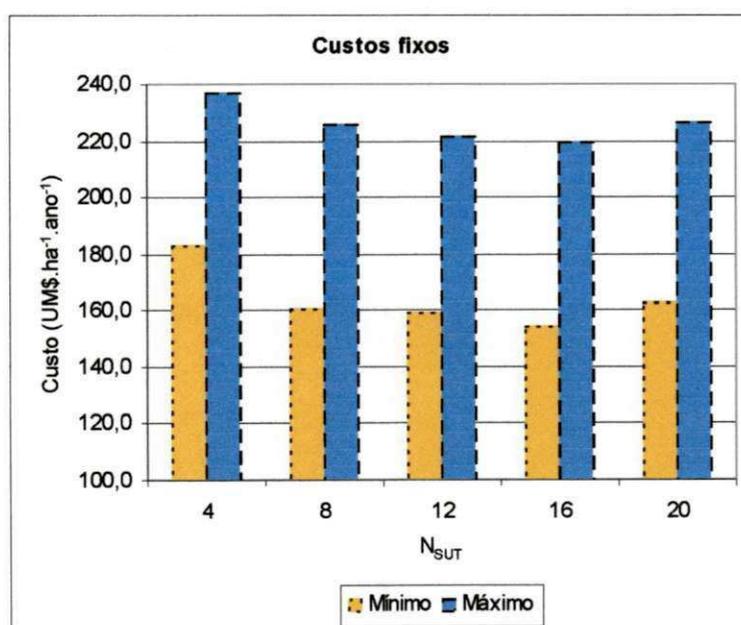


Figura 4.2. Custos fixos médios ótimos, considerando todas as operações (N_{UO}) do sistema, para duas tarifas diárias, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).

A importância da divisão do sistema em sub-unidades pode ser verificada pelas diferenças nos custos fixos ocorridas. Os custos fixos máximos foram superiores aos mínimos em cerca de 29,3%, 40,4%, 38,9%, 42,2% e 36,3%, para $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20, respectivamente, para duas tarifas. O máximo custo fixo médio de $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 237,1 ($N_{SUT} = 4$) foi superior, em 53,4%, ao mínimo de $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 154,6 ($N_{SUT} = 16$), com duas tarifas de energia.

Os custos fixos não foram afetados, de maneira representativa, pela operação com uma ou duas tarifas de energia diárias, mesmo com a redução aplicada de 73% na tarifa normal. Os resultados evidenciam que o valor da tarifa tem pouco efeito no dimensionamento do sistema sendo este definido principalmente pelas restrições hidráulicas e operacionais impostas no modelo. Na Tabela 4.3 tem-se esse efeito para $N_{UO} = 2$, cujo comportamento foi semelhante nas demais operações. Na Figura 4.3 tem-se o comportamento dos custos fixos médios para a operação com uma e duas tarifas diárias em todas as configurações analisadas.

Tabela 4.3. Custos fixos médios (UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹) em função do número de sub-unidades (N_{SUT}), para duas unidades operacionais ($N_{UO} = 2$).

N_{SUT}	Duas Tarifas	Uma tarifa
4	201,9	201,5
8	189,4	188,8
12	185,2	184,9
16	182,8	183,0
20	186,7	183,4

A variação da relação L_X/L_Y , entre 0,98 e 2,45, evidencia que o efeito de mudanças nas dimensões de uma mesma área e, para o layout em estudo, não é representativo comparado aos dois fatores N_{SUT} e N_{UO} , abordados anteriormente. As máximas diferenças de custos fixos em todas as configurações testadas foram de 4,3, 4,2, 2,1 e 0,8% ocorridas com $N_{SUT} = 4, 8, 12$ e 16 , respectivamente com duas tarifas diárias. Com relação aos custos totais essas diferenças foram de 4,6, 3,3, 1,9 e 0,7%. Houve uma tendência de aumento dos custos com a relação L_X/L_Y , apenas para $N_{SUT} = 4$ e 8 . Porém, para $N_{SUT} = 12$ observou-se que os custos fixos tenderam a decrescer com a relação L_X/L_Y em função dos diâmetros da tubulação lateral selecionada. Reduzindo os diâmetros das linhas laterais, nesse caso, o comportamento passou a ser oposto. Com $N_{SUT} = 16$ os custos apresentaram valores praticamente invariáveis e $N_{SUT} = 20$ permitiu apenas uma relação L_X/L_Y . Essas informações são importantes, pois permitem ao projetista ajustar adequadamente o layout do sistema à área projetada sem que ocorram interferências relevantes nos custos dentro de certos limites. Na Figura 4.4 pode-se avaliar as variações dos custos fixos com a relação L_X/L_Y .

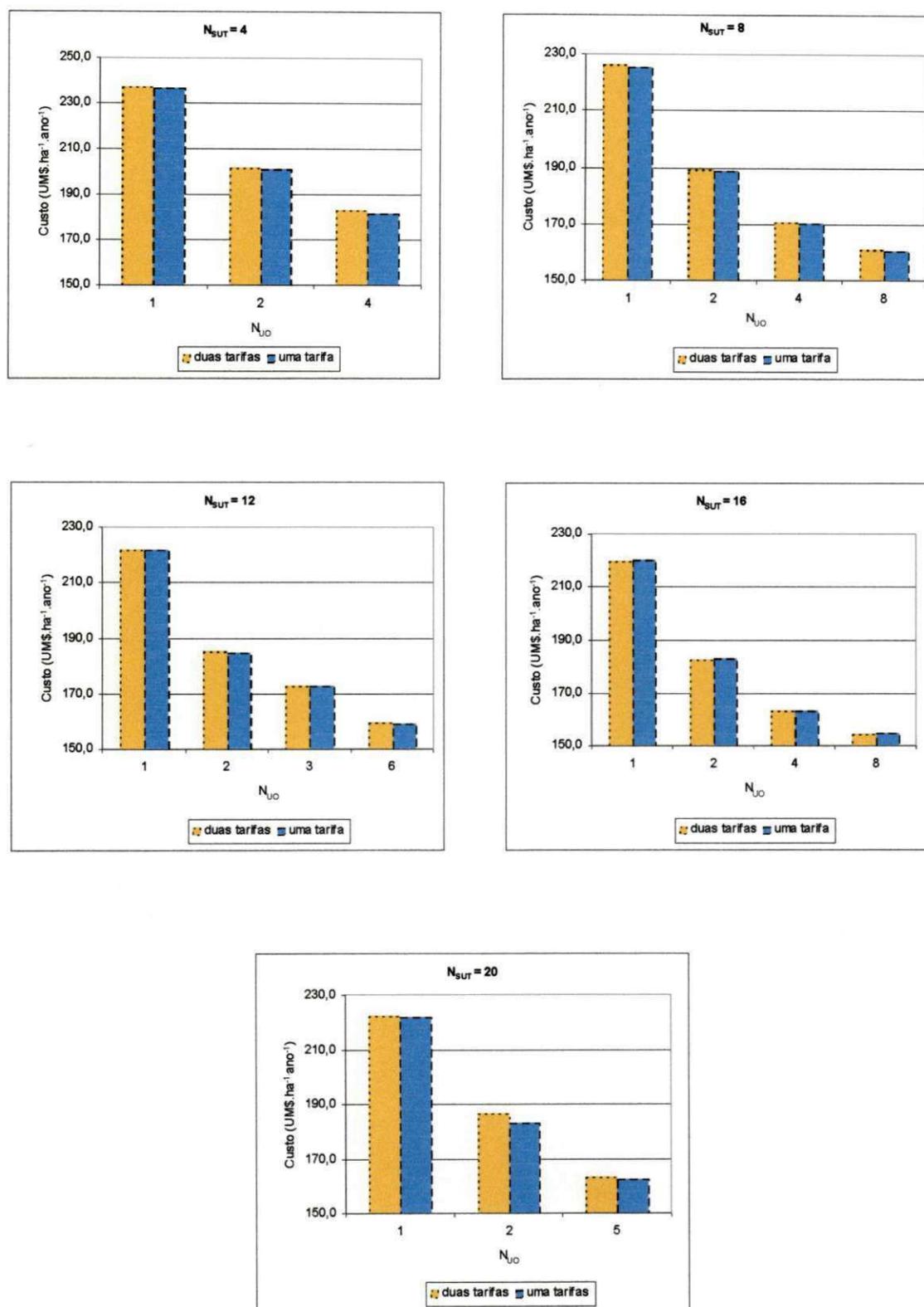


Figura 4.3. Custos fixos médios para as diferentes configurações de sistemas com uma e duas tarifas de energia diárias, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).

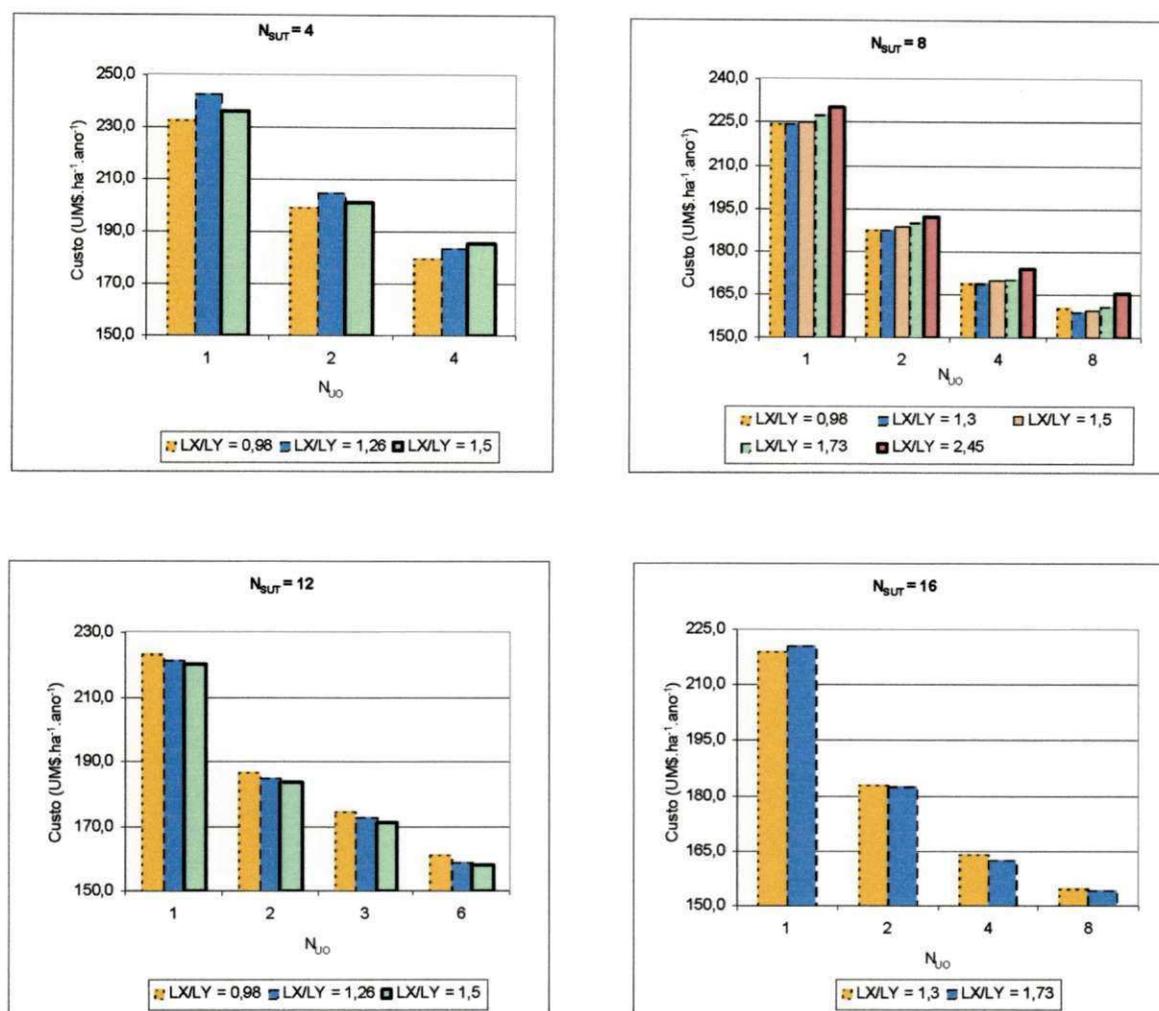


Figura 4.4. Variação dos custos fixos médios para as diferentes relações L_x/L_y , com duas tarifas de energia diárias, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).

Dos componentes que constituíram os custos fixos do sistema, apresentaram-se como mais importantes os seguintes equipamentos: emissores (C_{EM}), tubulações de polietileno (C_{PE}), tubulação em PVC (C_{PVC}), sistema de tratamento d'água (C_{ST}) e sistema de bombeamento (C_{SB}). Em termos percentuais sobre os custos fixos houve variações para as diferentes configurações (N_{SUR}) (Tabela 4.4) e nas diferentes operações (N_{UO}).

Pôde-se perceber que à medida que N_{SUR} aumenta há uma redução nos custos com a tubulação de polietileno (linhas laterais), enquanto que para a tubulação de PVC e os emissores o efeito é oposto. Portanto, não se pode definir, genericamente, qual o componente com maior efeito nos custos fixos do sistema para qualquer configuração.

A operação do sistema também tem grande influência na relatividade dos custos dos equipamentos. Alguns dos componentes têm seus custos diretamente influenciados pela vazão bombeada, quais sejam: o sistema de bombeamento (Eq. 3.15), sistema de tratamento d'água

(Eq. 3.16) e o centro de controle (Eq. 3.17). Outros são afetados indiretamente, como as tubulações, em função das perdas de carga e velocidades de fluxo. Assim, também não se pode afirmar que determinado componente é o de maior significância nos custos fixos sem que se tenha definida a operação. Na Figura 4.5 é apresentado o comportamento dos custos relativos desses equipamentos para o sistema com $N_{SUT} = 8$, que pode representar as demais configurações. De modo geral, apresentaram-se como os mais importantes os emissores (EM), o polietileno (PE), o PVC e o sistema de tratamento d'água (ST).

Tabela 4.4. Custos relativos médios dos principais componentes dos custos fixos do sistema, em %.

N_{SUT}	Componente do custo fixo				
	C_{PE}	C_{EM}	C_{ST}	C_{PVC}	C_{SB}
4	30,0	27,9	18,6	14,9	5,3
8	31,1	25,0	17,0	17,0	4,5
12	20,3	31,4	18,1	18,1	4,8
16	16,9	32,3	17,5	16,8	4,8
20	16,5	30,4	19,1	18,6	5,3

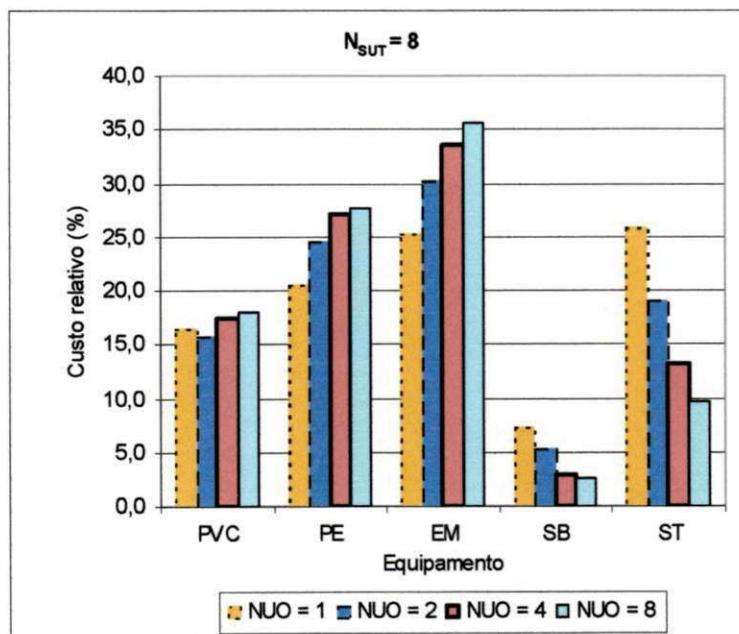


Figura 4.5. Custos relativos médios de alguns componentes do sistema para a configuração com $N_{SUT} = 8$, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).

Os custos fixos representaram o maior percentual dos custos totais do sistema. Esse aspecto ainda é o mais crítico no dimensionamento de sistemas de microirrigação. Com duas tarifas de energia diárias os custos fixos médios representaram 91,7, 91,7, 89,1, 90,6 e 89,3%,

dos custos totais médios ótimos (mínimos), para $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20 , respectivamente. Enquanto, com uma tarifa diária esses percentuais reduziram para $84,2, 85,1, 84,8, 84,1$ e $83,4\%$. Verifica-se, portanto, que quando se reduzem os custos operacionais com as tarifas reduzidas, os custos fixos ganham mais importância.

Os custos das sub-unidades foram determinados através da Equação 3.13, na qual consideraram-se os custos dos seguintes componentes: linhas laterais de polietileno, linha de derivação em PVC, emissores, conectores e adaptadores de diâmetros. Variações representativas nos custos das sub-unidades (Tabelas A2, A4, A6, A8 e A10) foram observadas entre as diferentes configurações de sistemas, isto é, para diferentes divisões do sistema em sub-unidades, o que está em concordância com os resultados obtidos por Oron (1982). As sub-unidades tiveram seus custos reduzidos com o aumento do N_{SUT} . Isso é justificado em virtude de que um maior N_{SUT} implica em uma menor área irrigada por sub-unidade, com isso menores são os comprimentos de linhas laterais e de derivação que permitem o uso de menores diâmetros nessas tubulações, respeitando as variações de pressões admissíveis e os limites de velocidades, para a obtenção da uniformidade de aplicação desejada. Assim, entre as configurações com $N_{SUT} = 20$ e $N_{SUT} = 4$, verificaram-se aumentos médios nos custos das sub-unidades de $49,5$ e $51,6\%$, para a operação com uma e duas tarifas de energia, respectivamente. A redução dos custos fixos com N_{SUT} foi devida principalmente à redução de custos da sub-unidade com N_{SUT} (Tabela 4.5).

Para uma determinada configuração de sistema, ou N_{SUT} , as variações de custos das sub-unidades, com a relação L_X/L_Y , foram inferiores a $6,0\%$. Assim como observado por Oron & Walker (1981), o formato quadrado da sub-unidade, ou seja, $L_X/L_Y = 0,98$ tendeu a ser o de menor custo, embora não seja um resultado conclusivo.

Tabela 4.5. Custos médios das sub-unidades (UM\$.ha⁻¹), em função de N_{SUT} .

N_{SUT}	Duas Tarifas	Uma tarifa
4	789,7	787,3
8	632,5	632,8
12	571,0	571,0
16	520,0	523,9
20	528,3	519,3

O comportamento dos custos médios das sub-unidades foi semelhante ao dos custos fixos, isto é, reduziu até $N_{SUT} = 16$ e aumentou $1,6\%$ com $N_{SUT} = 20$ para duas tarifas. Porém, com uma tarifa, os menores custos das sub-unidades foram obtidos com $N_{SUT} = 20$. Essas

diferenças de custos influenciaram as uniformidades de emissão. Pela Figura 4.6 observa-se que as diferenças nos custos e no dimensionamento da sub-unidade com uma tarifa ou duas tarifas diárias são irrelevantes e que os mesmos reduziram de forma potencial com o N_{SUT} considerando duas tarifas diárias.

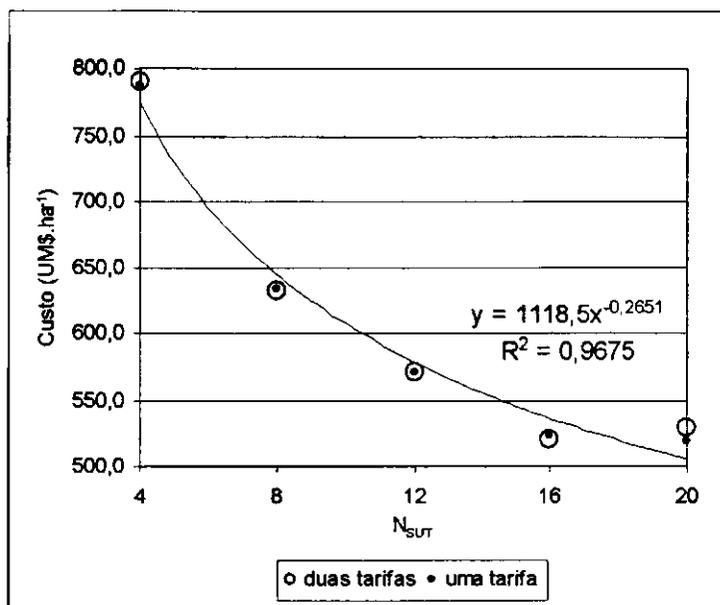


Figura 4.6 Custos médios das sub-unidades em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}), com duas tarifas diárias.

O número de unidades operacionais (N_{UO}) tem influência no dimensionamento da sub-unidade, para um determinado N_{SUT} , apenas quando a pressão de serviço é elevada para atender ao tempo disponível de operação e/ou às variações de pressões. Com isso, haverá uma maior perda de carga admissível, podendo-se reduzir os diâmetros na sub-unidade e, portanto, seu custo. Pode-se citar como exemplos os sistemas com $N_{UO} = 8$ ($N_{SUT} = 8$ e 16), em que a pressão de serviço ótima se elevou de 15,0 m para 24,2 m. Portanto, para uma determinada área irrigada o dimensionamento ótimo da sub-unidade, que é baseado na uniformidade de emissão desejada, será governado por dois fatores: o N_{UO} e o tamanho da mesma, obtido pelo N_{SUT} . Esses fatores, em conjunto, e associados aos diâmetros das tubulações, determinarão a pressão de serviço ótima.

A sub-unidade de custo mínimo é obtida com uma maior pressão de serviço (h), que permite uma maior variação de pressão e, conseqüentemente, menores diâmetros nas tubulações. O aumento de h também implicará em maior vazão do emissor e menor tempo de irrigação por unidade operacional. Com isso, pode-se ter um maior N_{UO} , reduzindo os custos fixos do sistema.

Para uma pressão ótima, o custo mínimo da sub-unidade, que poderá resultar no menor custo total do sistema, será obtido quando toda a variação de pressão admissível na sub-unidade for utilizada, não havendo alteração na uniformidade de emissão de projeto. Em sub-unidades com formato pré-estabelecido a obtenção da máxima variação de pressão admissível, comumente, só será possível com o uso de múltiplos diâmetros nas linhas laterais e de derivação.

Os custos médios das sub-unidades representaram, com relação aos custos totais do sistema, para duas unidades operacionais ($N_{UO} = 2$) e duas tarifas de energia, os seguintes percentuais: 38,5, 33,1, 30,3, 28,1 e 27,9%, para $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20 , respectivamente. Esses valores refletem também a redução de custos da sub-unidade com N_{SUT} e sua importância nos custos totais. Da mesma forma que os custos fixos, esses percentuais reduzem para a operação com uma tarifa.

4.2.3. Análise dos custos operacionais

Os custos operacionais do sistema de irrigação foram gerados pelo consumo de energia elétrica para o bombeamento da água requerida pela cultura anualmente e calculados pela Eq. 3.23, computando o consumo de energia diário e aplicando para todos os dias de operação no ano, o que se convencionou como o número de dias irrigados no ano ($NDIa$).

Determinados os tempos de irrigação totais diários (T_{ITD}) ótimos (Eq. 3.80) foram obtidas as configurações e operações de sistemas, dentre as apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, considerando: 1) apenas uma tarifa diária sem desconto, ou tarifa normal (T_n), aplicável por um período de 21h diárias; e 2) considerando duas tarifas diárias, tendo a tarifa com desconto ou reduzida (T_r) uma redução de custo de 73% com relação à normal e aplicável num período de seis horas diárias, entre as 23 00h e as 05 00h. Nesse caso a tarifa normal (T_n) teve 15 horas disponíveis diárias.

No caso em estudo, a frequência de irrigação (I_F) ótima, em todas as situações de projeto analisadas, foi de um dia. Com isso, foram obtidos o volume diário médio (Vol_{med}) e máximo (Vol_{max}) de água requeridos pela cultura de 118,6 L.dia⁻¹ e 169,2 L.dia⁻¹, considerando uma eficiência de aplicação de 90%. O número de dias irrigados por ano ($NDIa$) foi igual a 174,4. O volume médio foi utilizado no cálculo do custo operacional, enquanto o volume máximo foi usado para limitar o número de unidades operacionais (N_{UO}).

Em todas as combinações de configurações (N_{SUT}) e operações (N_{UO}) dos sistemas, a disponibilidade de duas tarifas de energia diária resultou em menores custos operacionais,

comparando-se com apenas uma tarifa diária. O período de tempo com a tarifa normal só foi alocada quando o tempo total de irrigação diário ultrapassou o período com desconto (6 horas), demonstrando que o otimizador aplicou eficientemente as tarifas de energia.

O aumento do N_{UO} , como foi discutido anteriormente, reduz a vazão bombeada, e com isso, as perdas de carga no sistema, a altura manométrica e, conseqüentemente, a potência consumida. Logo, esperava-se uma redução nos custos operacionais, que dependem da potência requerida. No entanto, o aumento de N_{UO} eleva o tempo de irrigação, uma vez que o sistema passa a ser operado um número maior de vezes. A elevação no tempo de irrigação supera a contribuição da potência nos custos operacionais, promovendo um aumento considerável desses. Assim, para duas tarifas diárias, os custos operacionais aumentaram com N_{UO} em todas as situações testadas (Tabelas A1, A3, A5, A7 e A9 em anexo).

Considerando apenas uma tarifa diária os custos operacionais aumentam com N_{UO} até um certo limite, passando a diminuir e posteriormente voltando a elevar-se. Isso pode ser explicado pelo fato de existir um ponto de equilíbrio em que o aumento de N_{UO} reduz a potência e eleva o tempo de operação sem afetar consideravelmente os custos operacionais. A partir desse ponto o aumento de N_{UO} reduz a potência, mas o tempo de operação passa a ser excessivo. Para $N_{SUT} = 4, 8$ e 16 esse ponto de equilíbrio foi $N_{UO} = 4$. Para $N_{SUT} = 12$ e 20 os pontos de equilíbrio foram $N_{UO} = 6$ e 5 , respectivamente (Figura 4.7).

A frequência de irrigação teve grande influência nos custos operacionais, uma vez que a alocação de frequências superiores a um dia implicaria em maior tempo de operação diário por unidade operacional, provocando um maior tempo de trabalho no período de tarifa normal, elevando os custos com energia. Outro aspecto é que uma maior frequência de irrigação poderia também reduzir o número de unidades operacionais, o que afetaria diretamente os custos fixos e os custos totais.

Com relação à aplicação de uma tarifa ou duas tarifas de energia diárias pôde-se verificar que os custos fixos não são afetados pelas tarifas. No entanto, as tarifas afetam consideravelmente os custos operacionais. Em todas as opções de projeto ótimas, ou de menor custo total, a mesma combinação de N_{SUT} e N_{UO} foram obtidas, com uma e com duas tarifas.

Além da economia de energia resultante da operação com duas tarifas, uma outra vantagem está no período do dia em que foi aplicado o desconto na tarifa de energia (23 h a 05h), que permite uma aplicação d'água mais eficiente pela redução nas perdas por evaporação, verificadas por Sardo & Germanà (1995) e Koumanov et al. (1997).

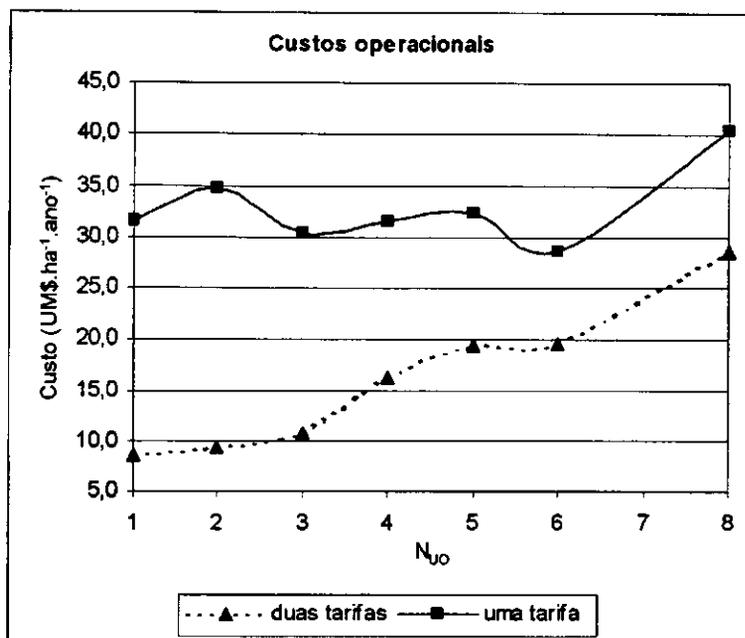


Figura 4.7. Custos operacionais médios em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).

Pela Figura 4.7 percebe-se a influência das tarifas nos custos operacionais. A operação com apenas uma tarifa diária promoveu aumentos médios nos custos com energia de 268,9, 268,2, 184,1, 93,1, 65,6, 45,4 e 41,0%, para N_{UO} variando de 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 8, respectivamente. As maiores diferenças ocorreram com o menor N_{UO} devido ao fato de que quanto menor N_{UO} , menor será o tempo total de irrigação diário, proporcionando a máxima alocação da tarifa com desconto. Logo, à medida que o tempo total de irrigação diário cresceu com N_{UO} , passou-se a utilizar a tarifa sem desconto, reduzindo a economia com energia. Nesse estudo observou-se que até $N_{UO} = 3$, não foi necessária a alocação do período com tarifa normal, ou sem desconto.

Os custos operacionais com duas tarifas, representaram, em média, 8,3, 8,3, 10,9, 9,4 e 10,7% dos custos totais mínimos, para $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20 , respectivamente. Para a operação com apenas uma tarifa os custos com energia passaram a representar 15,8, 14,9, 15,2, 15,9 e 16,6%. Dandy & Hassanli (1996) otimizando sistemas de gotejamento e Saad & Frizzone (1996), Matos (2000), Saad & Mariño (2002), sistemas de microaspersão, encontraram custos operacionais que representaram entre 13,1 e 37,8% dos custos totais, considerando apenas uma tarifa.

A aplicação de tarifas de energia com descontos apresentou-se como uma estratégia operacional de grande importância na economia e racionalização desse recurso, podendo tornar o projeto de irrigação mais competitivo.

Verificou-se que o dimensionamento do sistema não é afetado pela aplicação de uma ou duas tarifas diárias, aspecto importante para a adaptação de sistemas que não foram dimensionados para trabalharem nesse padrão. A principal desvantagem da operação, nos horários com descontos de energia, é a necessidade de automação do sistema que implica em elevados custos, mas que serão recuperados pela economia com energia.

4.2.4. Análise dos custos totais

Os custos totais (Eq. 3.8) dos sistemas de irrigação compreenderam a somatória dos custos de investimento anualizados (Eq. 3.9), considerados como custos fixos, com os custos relativos ao consumo de energia elétrica, aqui considerados como custos operacionais (Eq. 3.23). Nas Tabelas A1, A3, A5, A7 e A9 em anexo encontram-se os custos totais ótimos.

Anteriormente verificou-se que os custos fixos têm uma importância muito superior aos custos operacionais no dimensionamento e operação do sistema de irrigação. No entanto, a condição de projeto ótima exige a análise desses dois fatores em conjunto, uma vez que os mesmos têm efeitos opostos nos custos totais do sistema e, por menor que seja a participação dos custos operacionais, sua influência não pode ser desprezada quando se busca eficiência econômica do projeto.

Os custos totais variaram com o formato da área, ou seja, a relação L_X/L_Y , porém as máximas variações constatadas foram de 5,2%, com $N_{SUT} = 4$ e uma tarifa diária. Nas demais configurações e operações estudadas essas variações não ultrapassaram 4,2% (Tabelas A1, A3, A5, A7 e A9). Os menores custos totais tenderam a ser obtidos com a menor relação L_X/L_Y e com a sub-unidade de custo mínimo para cada N_{SUT} . Porém, com $N_{SUT} = 4$ e $L_X/L_Y = 1,26$, verificou-se que, para atender às variações de pressões na sub-unidade, foi necessária uma maior pressão de serviço, elevando os custos fixos e operacionais, contribuindo para maiores custos totais. No entanto, com $L_X/L_Y = 1,50$, para se obter a uniformidade de aplicação de 90%, foram necessários maiores diâmetros nas laterais, aumentando, assim, o custo da sub-unidade. Mas isso não implicou em maior custo total. Em virtude da seleção de diâmetros das linhas laterais para o sistema com $N_{SUT} = 12$, os custos totais tenderam a ser inferiores com maior L_X/L_Y , onde se obteve a sub-unidade de menor custo, porém a máxima variação nos custos totais foi de 2,1%. Verificou-se, portanto, que para uma mesma área irrigada, pode-se ter diferentes formatos de sistemas para o layout considerado, com um mesmo número de sub-unidades total (N_{SUT}), sem que se presenciem diferenças de custos totais de maior relevância, o que tem importância sob o aspecto prático de projeto.

Com relação ao número de unidades operacionais verificou-se que os custos totais tenderam a reduzir com N_{UO} , assim como os custos fixos, porém, a partir de certo limite máximo, os custos totais tornam-se crescentes em virtude dos custos operacionais. Na Figura 4.8 estão apresentados os custos totais médios em função de N_{UO} , considerando-se todas as configurações de sistemas (N_{SUT}). Verifica-se que o sistema com $N_{UO} = 6$ é o que apresenta menor custo total, ressaltando-se que essa operação só se realizou com $N_{SUT} = 12$. As únicas operações comuns em todas as configurações foram $N_{UO} = 1$ e 2. O que promoveu uma maior elevação no custo em $N_{UO} = 4$ foi a inclusão, no cálculo do custo médio, do custo com $N_{SUT} = 4$ que foi consideravelmente superior a $N_{SUT} = 8$ e 16.

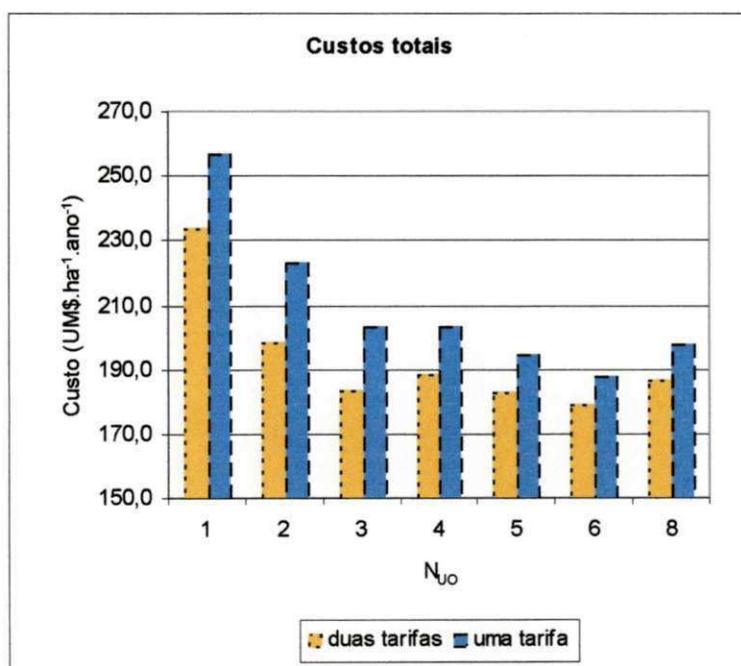


Figura 4.8. Custos totais médios do sistema em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).

Considerando-se os custos totais médios para cada operação (N_{UO}) em todas as configurações, N_{SUT} variando de 4, 8, 12, 16 e 20, foram observadas variações máximas de até 30,7% com duas tarifas diárias. O maior custo total médio foi de UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ 234,1 ($N_{UO} = 1$) e o mínimo de UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ 179,1. Com uma tarifa diária essa variação máxima foi de 36,7%, nas mesmas operações, com o custo máximo de UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ 256,8 ($N_{UO} = 1$) e o mínimo de UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ 187,8. Os custos totais médios com uma tarifa diária apresentaram aumentos com relação a duas tarifas, entre 4,9 e 12,3%, para um mesmo N_{UO} (Figura 4.8). Para a opção de custo médio ótimo ($N_{SUT} = 12$, $N_{UO} = 6$) esse aumento foi de 4,9%, o que em valores absolutos implicaria numa economia de 295,40 UM\$.ano⁻¹ para a área

irrigada média de 33,9552 ha. Pela Figura 4.9 observa-se a variação nos custos totais para cada configuração de sistema, com relação ao tipo de operação realizada.

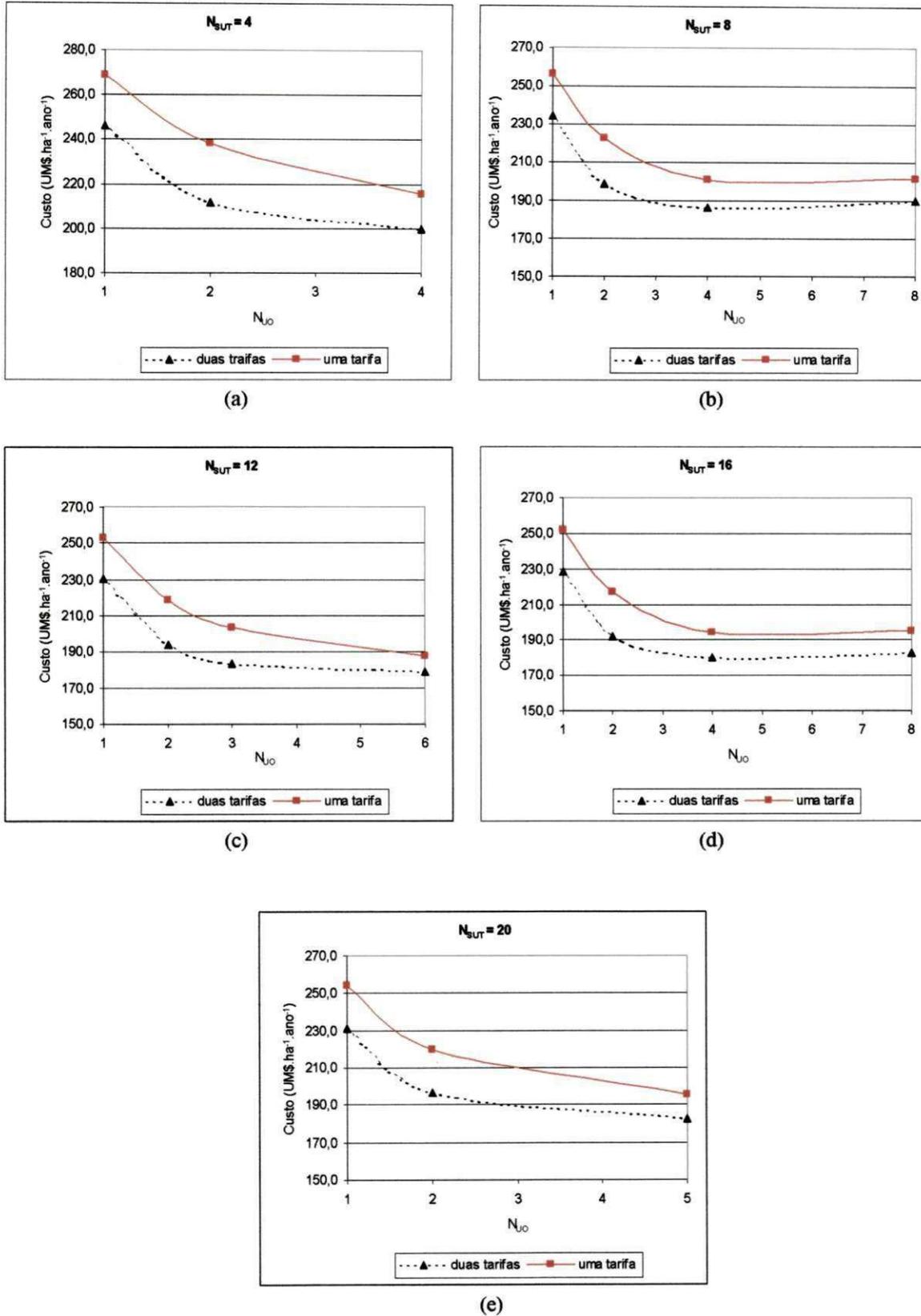


Figura 4.9. Variação dos custos totais médios em função do número de unidades operacionais (N_{UO}) e das tarifas de energia.

Os custos totais médios também tenderam a reduzir com a configuração do sistema (N_{SUT}) até um certo limite máximo. Foram observadas variações máximas de 10,9% para um mesmo N_{VO} (N_{VO} variando de 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 8) com $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20 e duas tarifas diárias. Com uma tarifa presenciou-se uma variação máxima de 11,1%. É importante observar que essas variações máximas foram provocadas principalmente pela configuração com $N_{SUT} = 4$. Eliminando da análise a configuração com $N_{SUT} = 4$, as variações máximas passaram a 3,6 e 3,3% com duas e uma tarifa diárias, respectivamente. Isso demonstra que sistemas com diferentes N_{SUT} e mesma operação (N_{VO}), apresentam pequenas variações de custos, mas que não devem ser desprezadas. Considerando o custo total médio com relação ao N_{SUT} , o menor custo total médio foi obtido com 16 sub-unidades, embora praticamente igual a $N_{SUT} = 12$ (Figura 4.10). Para um mesmo N_{SUT} , os custos totais médios, com uma tarifa, foram superiores em 9,9% aos obtidos com duas tarifas. Na opção de mínimo custo médio ótimo ($N_{SUT} = 16$) esse aumento foi de 9,4%. Vale ressaltar que o número de operações para cada configuração de sistema variou, influenciando no cálculo do custo médio. Enquanto $N_{SUT} = 8$ permitiu 4 operações, $N_{SUT} = 4$ permitiu apenas 3 operações, por exemplo.

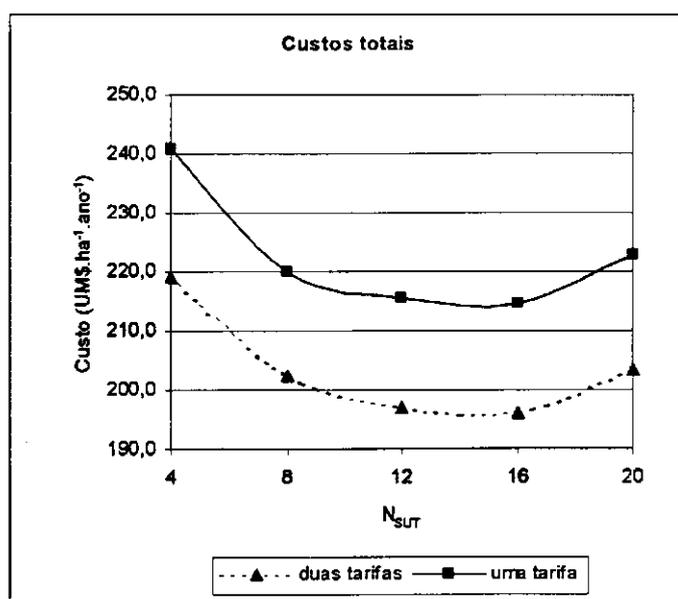


Figura 4.10. Custos totais médios do sistema em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).

Em todas as configurações e operações estudadas, o custo total máximo foi obtido com $N_{VO} = 1$, em função da influência dos elevados custos fixos. Para cada configuração de sistema ($N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20) foram encontradas soluções de custos máximos e mínimos, sendo as mesmas soluções ótimas, ou seja, de menor custo (Tabela 4.6).

Foram observadas as seguintes variações nos custos totais em função do N_{SUT} :

- $N_{SUT} = 4$, entre os custos máximo e mínimo variações de 23,0% com duas tarifas e de 24,7% com uma tarifa. Máxima variação de custos entre a operação com uma ou duas tarifas de 34,5%;

- $N_{SUT} = 8$, com duas tarifas variações entre os custos máximo e mínimo de 26,0%, e de 28,0% com uma tarifa. Máxima variação de custos nas duas situações de 37,7%;

- $N_{SUT} = 12$, com duas tarifas variações entre os custos máximo e mínimo de 28,4%, e de 34,6% com uma tarifa. Máxima variação nas duas situações de 41,1%;

- $N_{SUT} = 16$, com duas tarifas variações entre os custos máximo e mínimo de 26,8%, e de 29,9% com uma tarifa. Máxima variação de custos nas duas situações de 39,9%;

- $N_{SUT} = 20$, com duas tarifas variações entre os custos máximo e mínimo de 26,5%, e de 30,2% com uma tarifa. Máxima variação de custos nas duas situações de 38,9%.

Tabela 4.6. Custos ótimos médios, máximos e mínimos (UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹), em função de N_{SUT} e N_{UO} e das diferentes tarifas de energia.

N_{SUT}	Tarifas diárias	Custos máximos	N_{UO}	Custos mínimos	N_{UO}
4	T ₂	245,90	1	199,90	4
	T ₁	268,90	1	215,70	4
8	T ₂	234,50	1	186,10	4
	T ₁	256,30	1	200,30	4
12	T ₂	230,10	1	179,10	6
	T ₁	252,70	1	187,80	6
16	T ₂	228,60	1	180,20	4
	T ₁	252,10	1	194,10	4
20	T ₂	231,20	1	182,80	5
	T ₁	253,90	1	195,00	5

T₂ - operação com duas tarifas diárias e T₁ - operação com uma tarifa diária

Entre a opção de projeto de máximo custo total médio UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ 268,90 ($N_{SUT} = 4$, $N_{UO} = 1$, uma tarifa diária) e a de menor custo total médio UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ 179,10 ($N_{SUT} = 12$, $N_{UO} = 12$, duas tarifas diária) houve uma variação de 50,1% (Figura 4.11).

Pôde-se observar que a operação, o mais contínua possível do sistema, recomendada por Keller & Bliesner (1990), não necessariamente produzirá o menor custo total do sistema.

Neste estudo, verificou-se que a partir de seis unidades operacionais ($N_{UO} = 6$), os custos operacionais tornaram-se suficientemente elevados, com uma ou duas tarifas diárias, promovendo maiores custos totais. Pôde-se constatar que existe uma proximidade nos custos totais médios para várias opções de projeto. Esse aspecto é importante, pois em algumas

situações os custos fixos são inferiores, o que implica em menor investimento inicial no projeto e maior custo com energia. Em outras situações, os custos operacionais são inferiores elevando os custos fixos. Deve-se perceber, no entanto, que ao longo da vida do projeto, existe uma real possibilidade de reajuste tarifário e mesmo de extinção de descontos, e a opção de projeto com menor custo operacional está sujeita a tornar-se desvantajosa, exigindo uma análise de sensibilidade dos fatores que afetam dos custos do sistema. Considerando-se, portanto, opções de projeto com custos totais praticamente iguais e cujos custos fixos não difiram significativamente, a exemplo entre $N_{SUT} = 12$ ($N_{UO} = 6$) e $N_{SUT} = 16$ ($N_{UO} = 4$) cerca de 0,6% de diferença com duas tarifas, ou entre $N_{SUT} = 16$ ($N_{UO} = 8$) e $N_{SUT} = 20$ ($N_{UO} = 5$) com 0,2% de diferença, pode ser mais viável economicamente optar pelo menor número de unidades operacionais, ou seja, menor tempo de operação e de menor custo operacional, mesmo que isso represente um maior investimento inicial.

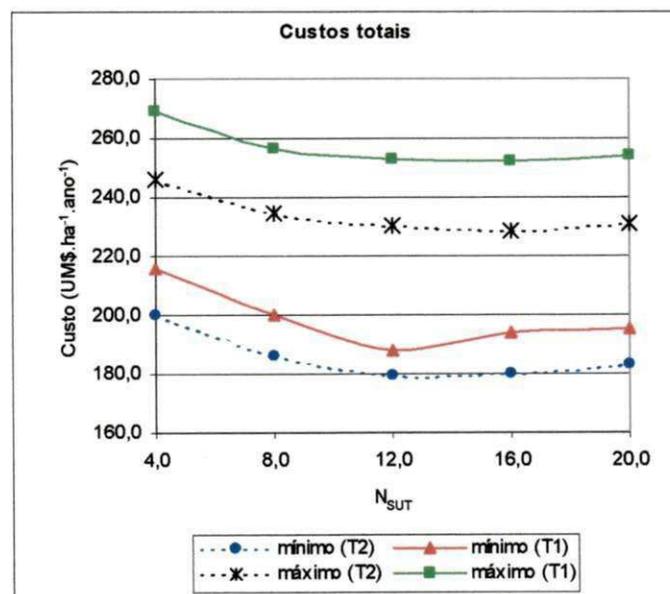


Figura 4.11. Variação dos custos totais médios ótimos nas diferentes tarifas de energia, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).

Na Figura 4.12 pode-se observar que a influência do número de unidades operacionais (N_{UO}) nos custos totais do sistema é consideravelmente superior a do número de sub-unidades total (N_{SUT}). Portanto, em qualquer dimensionamento de sistemas de microirrigação, deve-se analisar minuciosamente quais as possíveis estratégias de operação do sistema (N_{UO}), em função de N_{SUT} , que interfere na determinação de N_{UO} .

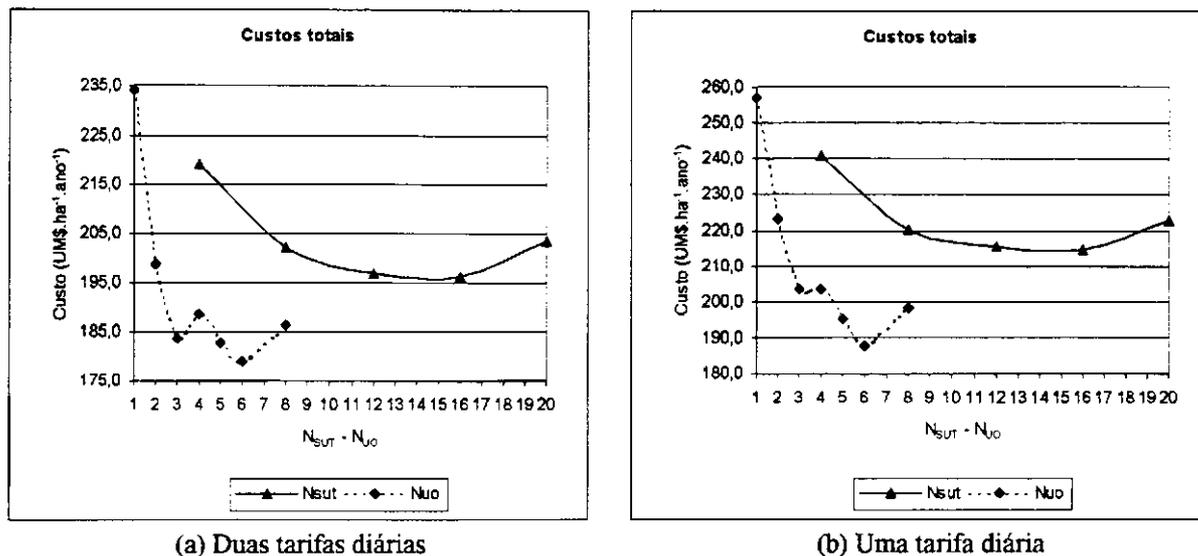


Figura 4.12. Variação dos custos totais médios do sistema em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}) e do número de unidades operacionais (N_{UO}).

Os resultados obtidos evidenciaram, também, que a sub-unidade de menor custo não garante, necessariamente, a obtenção do custo total mínimo do sistema. A sub-unidade de custo mínimo, para uma determinada área irrigada, pode ser obtida com o maior número de sub-unidades (N_{SUT}) possível. Para uma determinada configuração de sistema (N_{SUT}), o custo mínimo da sub-unidade é obtido com a máxima variação de pressão admissível. Porém, essas duas hipóteses podem levar a duas situações desfavoráveis: no primeiro caso o aumento de N_{SUT} pode implicar na elevação dos custos fixos após certo limite e, mesmo que isso não ocorra, o maior N_{SUT} tem que resultar em um número de unidades operacionais (N_{UO}) que não favoreça a elevação excessiva dos custos operacionais. No segundo caso, o aumento da variação de pressão na sub-unidade implica em elevação da pressão de serviço, que pode promover aumentos dos custos fixos e operacionais. Portanto, dimensionar o sistema com base na sub-unidade de custo mínimo pode levar a soluções economicamente menos eficientes. As variáveis N_{SUT} e N_{UO} devem ser analisadas conjuntamente para a obtenção do melhor dimensionamento e operação do sistema.

Nas Figuras 4.13 e 4.14 tem-se o comportamento dos custos dos sistemas para as diferentes configurações e operações analisadas nesse estudo.

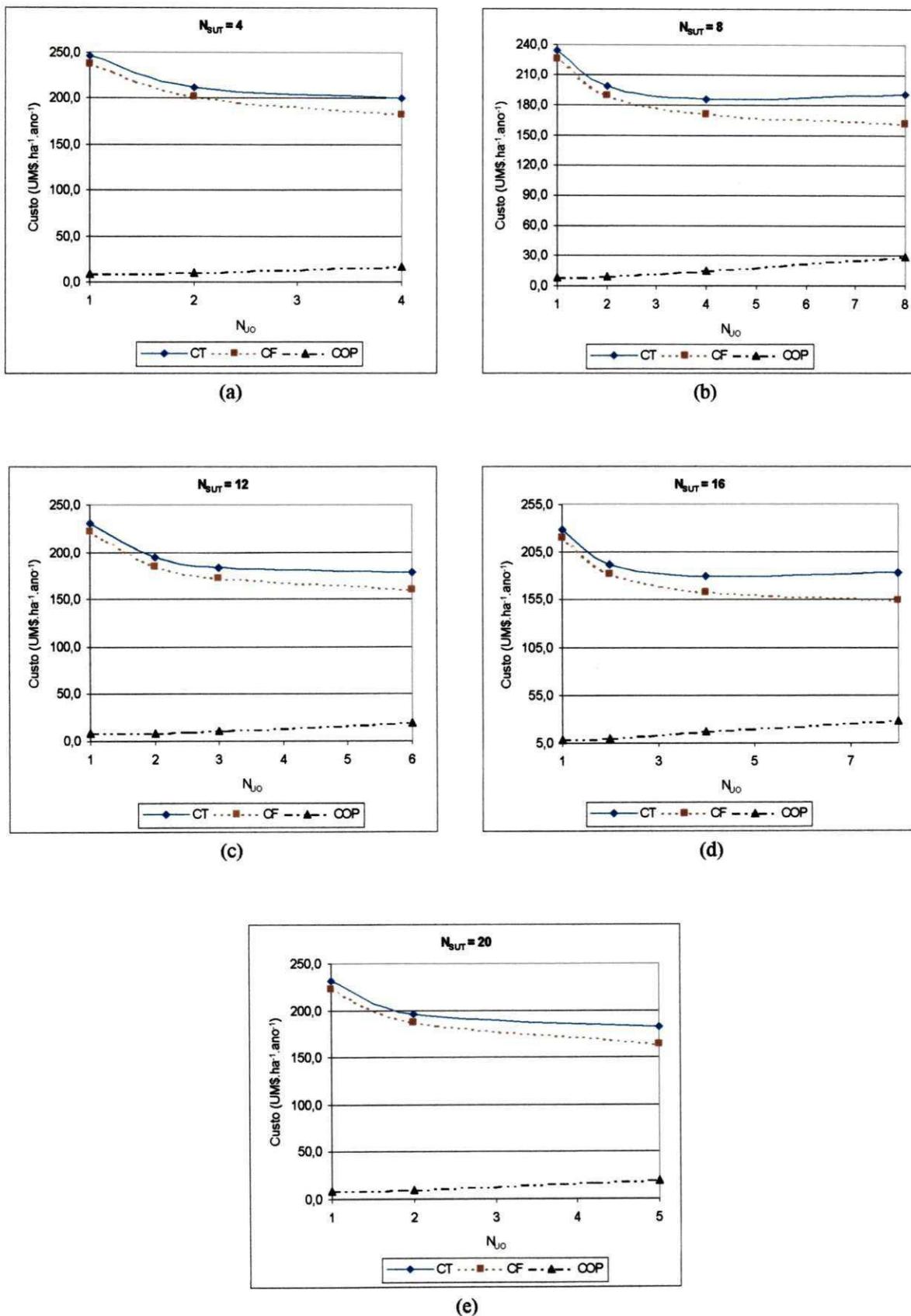


Figura 4.13. Custos médios dos sistemas para diferentes configurações, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), com duas tarifas diárias.

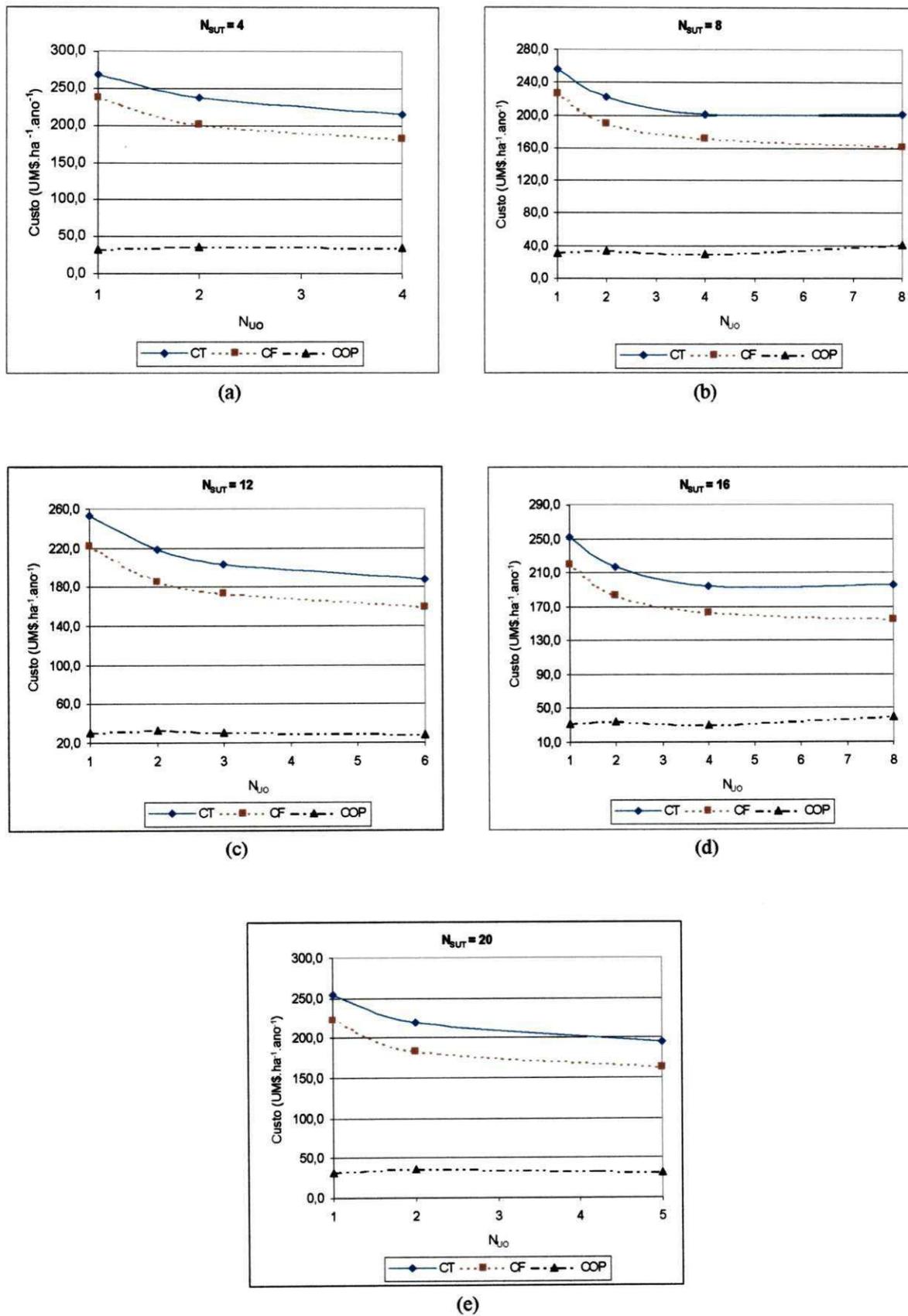


Figura 4.14. Custos médios dos sistemas para diferentes configurações, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), com uma tarifa diária.

4.2.5. Análise hidráulica

Em termos de dimensionamento hidráulico de sistemas de microirrigação o objetivo principal é a obtenção de uniformidades de aplicação d'água (U_E) desejada, ou seja, a redução das variações na descarga dos emissores dentro de uma determinada tolerância, para que se consiga elevados índices de eficiência de aplicação d'água no solo. As duas principais causas das variações nas descargas dos emissores são devidas às variações de pressão e às variações construtivas dos emissores. Esses dois fatores foram considerados em conjunto através da Equação 3.58. Normalmente, o dimensionamento do sistema toma como base o dimensionamento da sub-unidade. Entretanto, além das restrições hidráulicas no dimensionamento da sub-unidade, deve-se realizar uma análise econômica para se obter a melhor concepção de projeto.

As variações de pressão admissíveis na sub-unidade, para obtenção de uma uniformidade de emissão adequada, dependem diretamente das características hidráulicas do emissor e da pressão de serviço adotada. Assim, dependendo do regime de fluxo do emissor, quanto maior a uniformidade de emissão desejada, maior será a pressão de serviço para que sejam permitidas maiores variações de pressão admissíveis na sub-unidade, quando não são utilizados emissores autocompensantes.

No modelo hidráulico aplicado foram apresentados alguns diferenciais no dimensionamento da sub-unidade. Pode-se relacionar como principais: (1) a pressão de serviço do emissor não foi preestabelecida, sendo, portanto, uma variável de decisão que pôde assumir toda a faixa de pressões de operação; (2) do mesmo modo a uniformidade de emissão também foi variável de decisão e (3) não foram impostos limites de perda de carga para as linhas laterais e de derivação, com relação às perdas de carga admissíveis.

Para o dimensionamento do sistema em nível, e com as sub-unidades de mesmo tamanho, o dimensionamento de uma sub-unidade representou o comportamento das demais que compunham o sistema. As variações de pressão e as perdas de carga foram iguais em todas as sub-unidades, atendendo às restrições para o sistema em nível, ou seja, o número de emissores dos primeiros trechos (N_{e1} , N_{e3} , N_{e5} e N_{e7}) e segundos trechos (N_{e2} , N_{e4} , N_{e6} e N_{e8}) das laterais e dos primeiros trechos (N_{S1} e N_{S3}) e segundos trechos (N_{S2} e N_{S4}) das linhas de derivação foram os mesmos. Dessa forma, nas discussões que seguem, o número de emissores nos dois trechos de laterais foram caracterizados por N_{e1} e N_{e2} e o número de saídas nos dois trechos da derivação por N_{S1} e N_{S2} .

4.2.5.1. Sistema com $N_{SUT} = 4$

A configuração de sistema com 4 sub-unidades implicou nos maiores comprimentos de linhas laterais (180 m) e de linhas de derivação (294 m), o que poderia resultar em maiores perdas de carga e conseqüentemente elevadas variações de vazão. Para que fosse possível garantir a uniformidade de emissão mínima de 90% para as diferentes dimensões da área, isto é, diferentes relações L_X/L_Y de 0,98, 1,26 e 1,5, foram necessários diâmetros de tubulações superiores aos comumente empregados nos projetos de sistemas de microirrigação.

Uma vez que o número de emissores nas laterais e o número de saídas na derivação são inteiros foram ajustados os valores obtidos dessas variáveis. No entanto, esse ajuste não implicou em diferenças nos custos totais do sistema e sua influência nas variações de pressão foram desprezíveis.

As perdas de carga admissíveis nas sub-unidades foram totalmente distribuídas nas linhas laterais e de derivação. Isso foi possível devido à redução de diâmetros nessas tubulações. Verificou-se que a maior parcela das perdas de carga ocorreu nas linhas laterais que variaram, em relação às admissíveis, de 63,3 a 92,9%, o que não corresponde aos percentuais definidos por Karmeli & Peri (1972) e Guimarães Junior (1993). Como a quase totalidade da tubulação do sistema é constituída pelas linhas laterais, o maior percentual de perda de carga na sub-unidade é devido à redução de diâmetros nessas linhas, para que se obtenha um menor custo total do sistema. Em termos de comprimentos de tubulações obteve-se, para $L_X/L_Y = 0,98$, por exemplo, 1746 m de tubos em PVC e 55272 m de tubos em polietileno. Essas variações foram mais evidentes com a relação L_X/L_Y do que com o N_{UO} .

Por essa análise, pôde-se constatar que o dimensionamento das sub-unidades não dependeu do N_{UO} , o que pode ser confirmado pelas pressões de serviço e as distribuições de perda de carga apresentadas e que refletem a tubulação selecionada.

Em algumas situações não se utilizaram 100% das perdas admissíveis (Tabela 4.7). Nesses casos, portanto, a uniformidade de emissão foi superior a 90%, valor mínimo admissível para o sistema em nível. Considerando-se que a situação que promoveu a menor variação de pressão utilizou 84,1% ($N_{UO} = 4$ e $L_X/L_Y = 1,5$) das perdas admissíveis, isso implicaria em uma uniformidade de emissão da ordem de 90,8%, o que não teria grandes influências nos custos totais. Para a configuração de sistema com $L_X/L_Y = 1,26$ o modelo encontrou uma pressão de serviço superior à mínima para que as variações de pressões admissíveis aumentassem e fosse possível a obtenção da uniformidade de 90%. Nesse caso, o aumento de pressão não reduziu o custo da sub-unidade em virtude dos comprimentos das

tubulações, o que associado ao aumento de custos de outros equipamentos e do custo operacional resultou em maiores custos totais para $N_{SUT} = 4$ até duas unidades operacionais ($N_{UO} = 2$) para duas tarifas diárias e em todas as operações com uma tarifa.

Para relação $L_X/L_Y = 1,50$ não foi encontrada solução no espaço de busca das soluções, com os diâmetros utilizados anteriormente nas outras relações. Para atender às variações de pressões seria necessária a elevação da pressão de serviço, porém com a maior descarga dos emissores as restrições de velocidades seriam violadas nas laterais. Foi necessário, então, o emprego de diâmetros de laterais superiores para que se encontrasse uma solução viável. Essa alteração de diâmetros possibilitou a obtenção da pressão ótima de serviço igual a 15,0 m. É importante observar que o aumento de diâmetros implicou em maiores custos com tubulações e nas sub-unidades, porém não gerou maior custo total do sistema. A justificativa para tal ocorrência está na menor pressão de serviço, pois o aumento da mesma pode levar não apenas a maiores custos operacionais, mas também à elevação de custos de equipamentos que dependem da vazão do sistema. Uma outra constatação é que, quando também estão sendo considerados os custos operacionais do sistema, uniformidades menores que 90% podem apresentar maiores custos totais dependendo dos diâmetros selecionados para toda rede e principalmente para sub-unidade. Ou seja, dependendo dos diâmetros da sub-unidade, muitas vezes é necessária a elevação da pressão de serviço para se obter uma uniformidade menor que 90%. Quando os diâmetros são aumentados as perdas de carga potencialmente serão reduzidas e a pressão de serviço também, possibilitando maiores uniformidades de aplicação com redução dos custos totais.

Tabela 4.7. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade, para o sistema com $N_{SUT} = 4$ e duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	0,98				1,26				1,5			
	h	h_{adm}	h_{fl}	h_{fD}	h	h_{adm}	h_{fl}	h_{fD}	h	h_{adm}	h_{fl}	h_{fD}
1	15,0	4,93	3,97	1,03	17,9	5,87	5,46	0,42	15,0	4,93	3,91	1,06
2	15,0	4,93	3,75	0,67	18,1	5,96	5,51	0,44	15,0	4,93	3,91	1,06
4	15,0	4,93	4,30	0,56	18,7	6,16	5,72	0,47	15,0	4,93	3,68	0,46

h - pressão de serviço do emissor, m

h_{adm} - perda de carga admissível na sub-unidade, m.

h_{fl} - perda de carga nas linhas laterais, m.

h_{fD} - perda de carga nas linhas de derivação, m.

O modelo de otimização buscou sempre o uso da pressão de serviço mínima em cada situação e o menor tempo de irrigação diário. Para tanto, em todas as operações simuladas a frequência de irrigação ótima foi de 1 dia, reduzindo o volume de água aplicado diário e

conseqüentemente o tempo de irrigação. Na Tabela 4.8 tem-se os tempos de irrigação diários e as potências requeridas do sistema, em função das diferentes operações. O aumento de N_{VO} embora tenha acrescido o tempo de irrigação e os custos operacionais, reduziu consideravelmente a potência necessária ao sistema de bombeamento. Isso devido ao fracionamento da área irrigada em quatro partes, que levou a uma divisão da vazão do sistema e também a uma menor altura manométrica. Pode-se verificar uma redução de 75,5% na potência requerida entre as operações simuladas. As potências requeridas nas opções de projeto de menores custos totais ($N_{VO} = 4$) foram inferiores a $1 \text{ CV} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Tabela 4.8. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{VO} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 4$ e duas tarifas de energia diárias.

N_{VO}	L_X/L_Y			Potência média		Tempo de irrigação (h)		
	0,98	1,26	1,5	(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_r	T_n	T_T
1	71,0	83,6	72,9	75,8	2,23	2,16	0,00	376,7
2	39,1	47,2	40,8	42,4	1,25	4,31	0,00	752,0
4	18,3	22,9	19,0	20,1	0,60	6,00	2,59	1498,3

T_r - tempo de irrigação com a tarifa reduzida.

T_n - tempo de irrigação com a tarifa normal.

T_T - tempo de irrigação total anual.

Nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 estão apresentados os diâmetros de cada trecho de lateral e de derivação com os respectivos números de emissores e de saídas da derivação, em função de N_{VO} e de L_X/L_Y . Os comprimentos de cada trecho de tubulação podem ser obtidos multiplicando-se o respectivo número de emissores e de saídas, pelo espaçamento entre emissores e laterais de 6 m. Ressaltando, que o primeiro emissor na lateral e a primeira lateral na derivação localizam-se na metade desse espaçamento ou 3 m.

Tabela 4.9. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 4$ e $N_{VO} = 1$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	0,98		1,26		1,50	
N_e	N_{e1}	15	N_{e1}	24	N_{e1}	8
	N_{e2}	9	N_{e2}	3	N_{e2}	22
D_L	D_{L1}	0,0212	D_{L1}	0,0212	D_{L1}	0,0272
	D_{L2}	0,0170	D_{L2}	0,0170	D_{L2}	0,0212
N_S	N_{S1}	18	N_{S1}	34	N_{S1}	12
	N_{S2}	31	N_{S2}	9	N_{S2}	28
D_D	D_{D1}	0,2125	D_{D1}	0,2125	D_{D1}	0,2125
	D_{D2}	0,1437	D_{D2}	0,1437	D_{D2}	0,1437

N_e - número de emissores por trecho de linha lateral.

N_S - número de saídas na derivação por trecho da linha de derivação.

D_L e D_D - diâmetros internos da lateral e da derivação, m.

Tabela 4.10. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 4$ e $N_{UO} = 2$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	0,98		1,26		1,50	
N_e	N_{e1}	17	N_{e1}	24	N_{e1}	8
	N_{e2}	7	N_{e2}	3	N_{e2}	22
D_L	D_{L1}	0,0212	D_{L1}	0,0212	D_{L1}	0,0272
	D_{L2}	0,0170	D_{L2}	0,0170	D_{L2}	0,0212
N_S	N_{S1}	26	N_{S1}	32	N_{S1}	12
	N_{S2}	23	N_{S2}	11	N_{S2}	28
D_D	D_{D1}	0,2125	D_{D1}	0,2125	D_{D1}	0,2125
	D_{D2}	0,1437	D_{D2}	0,1437	D_{D2}	0,1437

Tabela 4.11. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 4$ e $N_{UO} = 4$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	0,98		1,26		1,50	
N_e	N_{e1}	13	N_{e1}	22	N_{e1}	9
	N_{e2}	11	N_{e2}	5	N_{e2}	21
D_L	D_{L1}	0,0212	D_{L1}	0,0212	D_{L1}	0,0272
	D_{L2}	0,0170	D_{L2}	0,0170	D_{L2}	0,0212
N_S	N_{S1}	30	N_{S1}	31	N_{S1}	25
	N_{S2}	19	N_{S2}	12	N_{S2}	15
D_D	D_{D1}	0,2125	D_{D1}	0,2125	D_{D1}	0,2125
	D_{D2}	0,1437	D_{D2}	0,1437	D_{D2}	0,1437

O dimensionamento e operação do sistema com apenas uma tarifa de energia elétrica diária apresentou comportamento similar ao de duas tarifas. De modo geral, em termos econômicos hidráulicos todas as análises realizadas anteriormente se verificam com uma tarifa. Nas Tabelas 4.12 e 4.13 apresentam-se resultados que permitem avaliar o dimensionamento e operação do sistema nas situações testadas.

Tabela 4.12. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade para o sistema com $N_{SUT} = 4$ e uma tarifa de energia diária.

L_X/L_Y	0,98				1,26				1,5				
	N_{UO}	h	h_{adm}	h_{FL}	h_{FD}	h	h_{adm}	h_{FL}	h_{FD}	h	h_{adm}	h_{FL}	h_{FD}
1	1	15,0	4,93	3,97	1,03	17,8	5,87	5,46	0,42	15,0	4,93	3,91	1,06
2	2	15,0	4,93	3,75	0,67	18,7	6,14	5,62	0,52	15,0	4,93	3,10	1,79
4	4	15,0	4,93	4,30	0,67	17,8	5,87	5,46	0,42	15,0	5,00	4,16	0,80

Tabela 4.13. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UO} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 4$ e uma tarifa de energia diária.

N_{UO}	L_X/L_Y			Potência média		Tempo de irrigação (h)	
	0,98	1,26	1,5	(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_n	T_T
1	71,0	83,6	72,9	75,8	2,23	2,16	376,7
2	39,1	48,7	40,8	42,9	1,19	4,29	749,4
4	18,3	21,5	20,0	19,9	0,55	8,48	1507,1

4.2.5.2. Sistema com $N_{SUT} = 8$

Com a divisão da área em 8 sub-unidades o tamanho das mesmas foi reduzido, apresentando comprimentos de laterais variando entre 72 m e 114 m e de derivação entre 294 e 186 (Tabela 4.1), ficando sujeitas a menores variações de pressão que o sistema com $N_{SUT} = 4$. Nas 20 situações testadas (Tabelas 4.1 e 4.2) obteve-se a uniformidade de emissão mínima de 90%. Um aspecto relevante é que, com exceção de $N_{UO} = 8$, em todas as situações testadas a pressão de serviço ótima foi a pressão mínima de operação do emissor (15,0 m), que propiciou ao mesmo uma vazão de 53,76 L.h⁻¹. Ou seja, a pressão que promove o custo mínimo para o sistema foi a menor pressão de funcionamento do emissor. Desde que essa pressão gere uma descarga no emissor, tal que o tempo de irrigação necessário para atendimento da demanda hídrica atenda à restrição de limitação de tempo disponível diário para operação. Mesmo que essa menor pressão exija a operação no período de tarifa com maior custo. No entanto, com $N_{UO} = 8$ ocorre um aumento de pressão de serviço para 24,2 m elevando a vazão do emissor para 64,45 L.h⁻¹, de modo que a operação seja possível dentro das 21 horas de irrigação diárias disponíveis. Vale ressaltar, que o N_{UO} máximo foi limitado pela máxima necessidade hídrica diária da cultura. O tempo de irrigação diário determinado pelo consumo médio diário da cultura (118,6 L.dia⁻¹) com $N_{UO} = 8$ foi de 14,72 h, porém com a máxima demanda (169,20 L.dia⁻¹) esse tempo passou a 21 h, o limite máximo de tempo admitido (T_{TD}). Na Tabela 4.14 encontram-se os tempos de irrigação diários em função das diferentes operações. Observe-se que os tempos totais de irrigação foram diretamente proporcionais ao N_{UO} até 4 unidades, uma vez que a pressão de serviço se manteve constante (15,0 m), o que não ocorreu com $N_{UO} = 8$.

As potências médias requeridas foram reduzidas em até 80,1% entre $N_{UO} = 1$ e 8. Mesmo com elevação da pressão de serviço com 8 unidades operacionais a potência reduziu. Na operação que resultou em menor custo total ($N_{UO} = 4$) a potência requerida média foi

inferior à obtida com $N_{SUT} = 4$ para a mesma operação. Isso demonstra que, hidraulicamente, o sistema com $N_{SUT} = 8$ também é mais adequado (Tabela 4.14).

Tabela 4.14. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UO} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 8$ e duas tarifas de energia diárias.

N_{UO}	L_X/L_Y					Potência média		Tempo de irrigação (h)		
	0,98	1,3	1,5	1,73	2,45	(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_r	T_n	T_T
1	70,1	71,8	71,5	70,3	70,0	70,7	2,06	2,21	0,00	384,9
2	38,6	40,0	39,5	39,9	40,2	39,6	1,16	4,41	0,00	769,8
4	16,9	18,1	17,3	19,8	17,1	17,8	0,52	6,00	2,82	1539,6
8	13,7	14,6	14,4	14,0	14,0	14,1	0,41	6,00	8,72	2568,6

As perdas de carga admissíveis na sub-unidade foram distribuídas totalmente nas linhas laterais e linhas de derivação (Tabela 4.15). Com relação à distribuição das perdas de carga em termos de porcentagem da perda admissível verificamos que há uma variação de 56,2 a 71,8% para a linha lateral com N_{UO} de 1 a 4 e uma variação de 55,6 a 67,5% para $N_{UO} = 8$. Não há, portanto, um valor fixo de distribuição de perda de carga na sub-unidade, o que se pôde confirmar foi um aumento percentual de perda de carga com o maior comprimento de lateral. Esses valores aproximaram-se das recomendações de Karmeli & Peri (1972).

A aplicação da pressão mínima de operação do emissor é justificada pelo fato que quanto maior pressão de serviço, maiores serão a vazão do emissor e a conduzida no sistema, maiores as perdas de carga, maior altura manométrica e conseqüentemente maior potência requerida. A elevação da pressão, por sua vez, permite maiores variações de pressão na sub-unidade que pode levar ao uso de menores diâmetros de laterais e de derivação reduzindo os custos fixos. Além disso, como a vazão do emissor é aumentada reduz-se o tempo de irrigação. No entanto, a combinação desses fatores não compensa uma elevação de pressão levando o sistema a trabalhar na mínima pressão admissível.

Verificou-se que a perda de carga na sub-unidade, distribuída entre a linha lateral e a linha de derivação, foi exatamente a perda de carga admissível para todas as pressões de serviço e a uniformidades de emissão otimizados. Isso foi possível em virtude da redução de diâmetros tanto na lateral como na derivação com conseqüências diretas nos custos totais do sistema. Na opção de menor custo total ($N_{UO} = 4$ e $L_X/L_Y = 0,98$) os custos dos trechos de menor diâmetro representaram 62,7 e 43,7% para as linhas laterais e as linhas de derivação.

As características das redes que constituíram as sub-unidades, em função do número de unidades operacionais e da relação L_X/L_Y , podem ser observadas nas Tabelas 4.16, 4.17 e

4.18. Das diferenças ocorridas no dimensionamento da sub-unidade o aspecto mais relevante é que, para $L_X/L_Y = 2,45$, só foi possível a obtenção da uniformidade de emissão de 90%, com o aumento dos diâmetros das linhas laterais.

Tabela 4.15. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade para o sistema com $N_{SUT} = 8$ e duas tarifas de energia diárias.

N_{UO}	1				2			
L_X/L_Y	h	h_{adm}	h_{fL}	h_{fD}	h	h_{adm}	h_{fL}	h_{fD}
0,98	15,0	4,93	2,77	2,32	15,0	4,93	2,77	2,32
1,30	15,0	4,93	2,90	1,99	15,0	4,93	2,90	1,99
1,50	15,0	4,93	3,16	1,74	15,0	4,93	3,16	1,74
1,73	15,0	4,93	3,44	1,47	15,0	4,93	3,44	1,47
2,45	15,0	4,93	3,11	1,74	15,0	4,93	3,11	1,74
N_{UO}	4				8			
L_X/L_Y	h	h_{adm}	h_{fL}	h_{fD}	h	h_{adm}	h_{fL}	h_{fD}
0,98	15,0	4,93	2,77	2,32	24,2	7,97	4,43	3,61
1,30	15,0	4,93	2,90	1,94	24,2	7,97	4,89	3,09
1,50	15,0	4,93	3,16	1,77	24,2	7,97	5,04	2,83
1,73	15,0	4,93	3,54	1,42	24,2	7,97	5,38	2,45
2,45	15,0	4,93	3,11	1,74	24,2	7,97	5,08	2,68

Tabela 4.16. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 8$ e $N_{UO} = 1$ e 2, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	0,98		1,30		1,50		1,73		2,45	
N_e	N_{e1}	4	N_{e1}	8	N_{e1}	10	N_{e1}	13	N_{e1}	6
	N_{e2}	8	N_{e2}	6	N_{e2}	5	N_{e2}	3	N_{e2}	13
D_L	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0212
	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0170
N_S	N_{S1}	23	N_{S1}	23	N_{S1}	24	N_{S1}	26	N_{S1}	11
	N_{S2}	26	N_{S2}	20	N_{S2}	16	N_{S2}	11	N_{S2}	20
D_D	D_{D1}	0,1198								
	D_{D2}	0,0974								

Tabela 4.17. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 8$ e $N_{UO} = 4$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	0,98		1,30		1,50		1,73		2,45	
N_e	N_{e1}	4	N_{e1}	8	N_{e1}	10	N_{e1}	12	N_{e1}	6
	N_{e2}	8	N_{e2}	6	N_{e2}	5	N_{e2}	4	N_{e2}	13
D_L	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0212
	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0170
N_S	N_{S1}	23	N_{S1}	24	N_{S1}	23	N_{S1}	29	N_{S1}	11
	N_{S2}	26	N_{S2}	19	N_{S2}	17	N_{S2}	8	N_{S2}	20
D_D	D_{D1}	0,1198								
	D_{D2}	0,0974								

Tabela 4.18. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 8$ e $N_{UO} = 8$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	0,98		1,30		1,50		1,73		2,45	
N_e	N_{e1}	3	N_{e1}	6	N_{e1}	8	N_{e1}	10	N_{e1}	4
	N_{e2}	9	N_{e2}	8	N_{e2}	7	N_{e2}	6	N_{e2}	15
D_L	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0212
	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0170
N_S	N_{S1}	19	N_{S1}	19	N_{S1}	18	N_{S1}	18	N_{S1}	9
	N_{S2}	30	N_{S2}	24	N_{S2}	22	N_{S2}	19	N_{S2}	22
D_D	D_{D1}	0,1198								
	D_{D2}	0,0974								

Considerando o dimensionamento e operação do sistema com uma tarifa diária de energia não foram presenciadas alterações relevantes nos custos fixos. A manutenção dos custos fixos constituiu-se em um excelente indicador do comportamento hidráulico da rede. Comparando-se as Tabelas 4.19 e 4.14 pode-se confirmar a semelhança entre variáveis do dimensionamento. Podendo-se afirmar, portanto, que as tarifas de energia não influenciam o dimensionamento do sistema.

Tabela 4.19. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UO} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 8$ e uma tarifa de energia diária.

N_{UO}	L_X/L_Y					Potência média		Tempo de irrigação (h)	
	0,98	1,30	1,5	1,73	2,45	(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_n	T_T
1	70,1	71,8	71,5	70,3	70,0	70,7	2,07	2,21	384,9
2	38,6	39,7	39,6	38,8	40,2	39,4	1,15	4,41	769,8
4	17,2	17,3	17,3	17,4	17,1	17,3	0,50	8,82	1539,6
8	13,7	14,5	14,4	14,0	14,0	14,1	0,41	14,72	2568,6

4.2.5.3. Sistema com $N_{SUT} = 12$

Foram analisadas para essa configuração 12 situações, onde também obteve-se a pressão de serviço ótima de operação do emissor de 15,0 m e a uniformidade de emissão mínima de 90%. Não foi possível dimensionar o sistema para operar com 12 unidades operacionais, pois o tempo disponível diário não permitiu. Em todas as situações de operações o tempo disponível com a tarifa de menor custo foi alocado. Nas situações com $N_{UD} = 1$ e 2, os tempos de irrigação foram inferiores às 6 h estabelecidas com a menor tarifa. Com 3 unidades operacionais o período com tarifa de maior custo foi utilizado por 0,62 h (Tabela 4.20). Isso ocorreu porque o modelo procurou atender à demanda hídrica diária da cultura, operando com a menor pressão de serviço possível, ou seja, não considerou viável economicamente a elevação de pressão para que o sistema trabalhasse 100% do tempo dentro da tarifa de menor custo.

À medida que o sistema foi dimensionado para trabalhar com um número maior de unidades operacionais houve uma redução importante da vazão do sistema e isso implicou na necessidade de menores potências requeridas. Associado a esse fato tem-se uma redução de custos operacionais, embora o tempo de operação tenha sido acrescido gradualmente (Tabela 4.20). Uma vez que a pressão de serviço não se elevou, pôde-se obter potências médias, com $N_{UD} = 6$, inferiores ao sistema com $N_{UD} = 8$. A menor potência média requerida de $0,33 \text{ kW}\cdot\text{ha}^{-1}$ (0,45 CV) resultou, nesse caso, na operação de menor custo total.

Tabela 4.20. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UD} e da relação comprimento/largura (L_x/L_y) da área, para $N_{SUT} = 12$ e duas tarifas de energia diárias.

N_{UD}	L_x/L_y			Potência média		Tempo de irrigação (h)		
	0,98	1,26	1,5	(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_r	T_n	T_T
1	72,0	70,8	75,6	72,8	2,14	2,21	0,00	384,6
2	39,1	38,3	39,8	39,1	1,15	4,41	0,00	769,8
3	24,2	23,6	24,9	24,2	0,71	6,00	0,62	1154,8
6	11,1	11,2	11,3	11,1	0,33	6,00	7,24	2309,4

As perdas de carga admissíveis na sub-unidade foram distribuídas totalmente nas linhas laterais e linhas de derivação. O ajuste das variáveis, número de emissores na lateral e número de saídas na derivação, para valores inteiros não implicou em diferenças nos custos totais do sistema e sua influência nas variações de pressão foram desprezíveis. Com relação à distribuição das perdas de carga em termos de porcentagem da perda admissível verificou-se que houve uma variação de 28,0 a 53,1 % para a linha lateral e de 72,0 a 46,9% na linha de

derivação com N_{VO} variando de 1 a 6 (Tabela 4.21). Esses percentuais para as linhas laterais aumentaram com L_X/L_Y . A justificativa para as perdas de carga nas laterais serem inferiores às obtidas para $N_{SUT} = 4$ e 8 está nos diâmetros empregados no dimensionamento associado ao comprimento das laterais. No entanto, a sub-unidade consumiu toda a perda de carga disponível para $h = 15,0$ m (pressão de serviço mínima) e $U_E = 90\%$ (uniformidade mínima), alocando o menor diâmetro de lateral em todo o seu comprimento ($D_{L2} = 0,0132$ m), com exceção da primeira seção, cujo comprimento era de 3 m (Tabelas 4.22 e 4.23). Elevando as perdas nas linhas de derivação distribuindo nos seus dois trechos com $D_{D1} = 0,0974$ m e $D_{D2} = 0,0725$ m. As variações de pressão na sub-unidade poderiam ser maiores do que as obtidas, uma vez que os limites de velocidades nas linhas de derivação permitiam o aumento de perda de carga nas mesmas, ou seja, a utilização de maior número de saídas de laterais no trecho de menor diâmetro, o que reduziria os custos das linhas de derivação (PVC), podendo reduzir os custos fixos do sistema. No entanto, para que isso ocorresse seria necessária a elevação da pressão de serviço o que implicaria em maiores custos operacionais e, poderia também aumentar os custos fixos, tornando esse procedimento pouco eficaz economicamente. Assim, no caso do sistema com $N_{VO} = 6$, que trabalhou a maior parte do tempo no período de maior tarifa seria conveniente elevar a pressão para o sistema inserir sua operação ao máximo na menor tarifa, mas a redução da tarifa também não compensaria a elevação da potência do sistema.

Tabela 4.21. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade para o sistema com $N_{SUT} = 12$ e duas tarifas de energia diárias.

N_{VO}	1				2			
L_X/L_Y	h	h_{adm}	h_{ρ}	$h_{\rho D}$	h	h_{adm}	h_{ρ}	$h_{\rho D}$
0,98	15,0	4,93	1,39	3,59	15,0	4,93	1,39	3,59
1,26	15,0	4,93	1,95	2,98	15,0	4,93	1,95	2,98
1,50	15,1	4,93	2,64	2,48	15,0	4,93	2,63	2,32
N_{VO}	3				6			
L_X/L_Y	h	h_{adm}	h_{ρ}	$h_{\rho D}$	h	h_{adm}	h_{ρ}	$h_{\rho D}$
0,98	15,0	4,93	1,39	3,59	24,2	7,97	1,39	3,59
1,26	15,0	4,93	1,95	2,98	24,2	7,97	1,95	2,98
1,50	15,0	4,93	2,63	2,39	24,2	7,97	2,63	2,32

Em virtude de serem obtidas perdas relativamente baixas nas linhas laterais e o trecho de menor diâmetro dessas linhas terem sido totalmente usados, analisou-se o

dimensionamento do sistema com as linhas laterais de diâmetros imediatamente inferiores, isto é, $D_{L1} = 0,0132$ m e $D_{L2} = 0,00995$ m, mantendo-se os mesmos diâmetros das linhas derivação. Essa análise permitiu a constatação que para essa nova versão do dimensionamento do sistema, haveria uma redução de custos totais inferior em até 1,5% para as relações $L_X/L_Y = 0,98$ e 1,26 e uma elevação de custos totais para $L_X/L_Y = 1,50$ em até 2,2%, com duas tarifas diárias. Considerando a operação com apenas uma tarifa essas diferenças seriam, ainda, menores. Com os novos diâmetros as perdas de carga passariam a ser superiores nas linhas laterais.

Tabela 4.22. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 12$ e $N_{UO} = 1, 2$ e 6, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	0,98		1,26		1,50	
N_e	N_{e1}	1	N_{e1}	1	N_{e1}	1
	N_{e2}	7	N_{e2}	8	N_{e2}	9
D_L	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170
	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132
N_S	N_{S1}	23	N_{S1}	21	N_{S1}	24
	N_{S2}	26	N_{S2}	22	N_{S2}	16
D_D	D_{D1}	0,0974	D_{D1}	0,0974	D_{D1}	0,0974
	D_{D2}	0,0725	D_{D2}	0,0725	D_{D2}	0,0725

Tabela 4.23. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 12$ e $N_{UO} = 3$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	0,98		1,26		1,50	
N_e	N_{e1}	1	N_{e1}	1	N_{e1}	1
	N_{e2}	7	N_{e2}	8	N_{e2}	9
D_L	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170	D_{L1}	0,0170
	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132	D_{L2}	0,0132
N_S	N_{S1}	23	N_{S1}	21	N_{S1}	25
	N_{S2}	26	N_{S2}	22	N_{S2}	15
D_D	D_{D1}	0,0974	D_{D1}	0,0974	D_{D1}	0,0974
	D_{D2}	0,0725	D_{D2}	0,0725	D_{D2}	0,0725

A análise hidráulica do dimensionamento e operação do sistema com apenas uma tarifa diária de energia não difere da análise com duas tarifas diárias. Isso significa que a redução no valor da tarifa no período de 6 horas diárias, não tem efeito na hidráulica do sistema, o que foi também constatado para $N_{SUT} = 4$ e 8. Pôde-se concluir que o dimensionamento do sistema foi governado pelas restrições físicas do modelo, principalmente

as relacionadas à pressão de serviço e às velocidades de fluxo nas tubulações. Comparando-se a Tabela 4.24 com a Tabela 4.20, confirma-se o mesmo comportamento hidráulico do dimensionamento nas operações com uma e duas tarifas.

Tabela 4.24. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h) em função do N_{UO} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área para o sistema com $N_{SUT} = 12$ e uma tarifa de energia diária.

N_{UO}	L_X/L_Y			Potência média		Tempo de irrigação (h)	
	0,98	1,26	1,5	(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_a	T_T
1	69,7	68,4	75,2	71,1	2,09	2,21	384,6
2	38,6	37,5	39,4	38,5	1,13	4,41	769,8
3	23,4	23,1	24,2	23,6	0,69	6,62	1154,8
6	10,9	10,8	11,0	10,9	0,32	13,7	2309,4

4.2.5.4. Sistema com $N_{SUT} = 16$

A pressão de serviço de operação do emissor e a uniformidade de emissão ótimos foram de 15,0 m e 90%, respectivamente. Com exceção da operação com $N_{UO} = 8$, em função da necessidade de elevar a pressão de serviço para 24,0 m e atender ao requerimento hídrico diário da cultura. Foram analisadas 8 situações de projeto (2 configurações com 4 operações). O número máximo de unidades operacionais possíveis foi $N_{UO} = 8$, em virtude do tempo disponível diário de operação. Em todas as situações de operações o tempo disponível com a tarifa de menor custo foi alocado. Apenas nas operações com $N_{UO} = 4$ e $N_{UO} = 8$ foi utilizado o período com tarifa de maior custo (Tabela 4.25). Isso ocorreu porque o modelo procurou atender à demanda hídrica diária da cultura operando com a menor pressão de serviço possível, ou seja, não é viável economicamente a elevação de pressão para que o sistema trabalhe 100% do tempo dentro da tarifa de menor custo.

Tabela 4.25. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UO} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 16$ e duas tarifas de energia diárias.

N_{UO}	L_X/L_Y		Potência média		Tempo de irrigação (h)		
	1,30	1,73	(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_r	T_n	T_T
1	73,3	76,4	74,8	2,17	2,21	0,00	384,8
2	37,2	39,6	38,4	1,12	4,41	0,00	769,8
4	18,3	20,6	19,4	0,56	6,00	2,82	1539,6
8	14,5	13,8	14,2	0,41	6,00	8,72	2568,6

Embora tenha havido uma redução de potência com N_{UO} (Tabela 4.25), os custos operacionais aumentaram devido à necessidade de maiores tempos de operação do sistema. Percebe-se que em termos médios as potências requeridas são semelhantes às obtidas com $N_{SUT} = 8$, mesmo com a rede hidráulica seja diferente. Outra semelhança está na operação que resultou no menor custo total, $N_{UO} = 4$.

As perdas de carga admissíveis, obtidas para h de 15,0 m e U_E de 90%, nas sub-unidades foram distribuídas em quase sua totalidade nas linhas laterais e linhas de derivação, variando de 96,3 a 100% (Tabela 4.26). Entretanto, o ajuste das variáveis de decisão, número de emissores na lateral e número de saídas na derivação, para valores inteiros implicou em perdas de carga superiores às admissíveis e, portanto, a uniformidades de emissão inferiores a 90% (Tabela 4.26). O motivo que levou à violação da restrição de perda de carga e conseqüentemente da uniformidade de emissão é que com os diâmetros de laterais $D_{L1} = 0,0132$ m e $D_{L2} = 0,00995$ m pequenas alterações nos comprimentos dos trechos das laterais resultam em perdas superiores às obtidas inicialmente, ressaltando que os trechos ajustados tiveram comprimentos menores que 6 m. Já nas linhas de derivação, com os diâmetros $D_{D1} = 0,0974$ m e $D_{D2} = 0,0724$ m, esse efeito tem menor influência. Com relação aos custos totais do sistema o efeito desses ajustes é desprezível. Com relação à distribuição das perdas de carga em termos de porcentagem da perda corrigida verificamos que houve uma variação de 37,6 a 55,1% para as linhas laterais e de 47,8 a 62,4% para as linhas de derivação (Tabela 4.26).

Tabela 4.26. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade para o sistema com $N_{SUT} = 16$ e duas tarifas de energia diárias.

N_{UO}	1					2				
L_X/L_Y	h	Δh_{s_c}	h_{f_L}	h_{f_D}	U_{E_c}	h	Δh_{s_c}	h_{f_L}	h_{f_D}	U_{E_c}
1,30	15,0	5,30	2,70	2,60	89,6	15,0	5,17	2,70	2,47	89,8
1,73	15,0	5,00	1,88	3,13	89,9	15,0	4,75	2,56	2,18	90,2
N_{UO}	4					8				
L_X/L_Y	h	Δh_{s_c}	h_{f_L}	h_{f_D}	U_{E_c}	h	Δh_{s_c}	h_{f_L}	h_{f_D}	U_{E_c}
1,30	15,0	5,30	2,70	2,60	89,6	24,2	7,73	3,71	4,02	90,1
1,73	15,0	5,02	2,56	2,46	89,9	24,2	8,06	4,41	3,65	90,0

U_{E_c} - uniformidade de emissão corrigida (%).

Δh_{s_c} - perda de carga na sub-unidade corrigida.

Nas Tabelas 4.27 a 4.30 temos os valores das variáveis otimizadas, número de emissores N_e e número de saídas na derivação N_S , que definiram os comprimentos dos trechos de laterais e da derivação e, conseqüentemente, o custo da sub-unidade. Pôde-se observar que houve pequenas alterações no dimensionamento em função de N_{UO} . De modo geral, os trechos com menores diâmetros apresentaram maior comprimento, buscando a redução dos custos fixos. A vantagem da utilização de vários diâmetros nas laterais e na derivação se reflete principalmente no dimensionamento hidráulico, pois permite um melhor ajuste nas perdas de carga admissíveis. No entanto, embora seja economicamente mais viável como se constatou, o uso de múltiplos diâmetros em laterais com curtos comprimentos não é justificável em função da operacionalidade de montagem das mesmas. Nesse caso, deve-se buscar o melhor ajuste hidráulico possível reduzindo-se os diâmetros da linha de derivação.

Tabela 4.27. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UO} = 1$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	1,30		1,73	
N_e	N_{e1}	2	N_{e1}	6
	N_{e2}	5	N_{e2}	2
D_L	D_{L1}	0,0132	D_{L1}	0,0132
	D_{L2}	0,0995	D_{L2}	0,0995
N_S	N_{S1}	14	N_{S1}	6
	N_{S2}	29	N_{S2}	31
D_D	D_{D1}	0,0974	D_{D1}	0,0974
	D_{D2}	0,0725	D_{D2}	0,0725

Tabela 4.28. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UO} = 2$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	1,30		1,73	
N_e	N_{e1}	2	N_{e1}	4
	N_{e2}	5	N_{e2}	4
D_L	D_{L1}	0,0132	D_{L1}	0,0132
	D_{L2}	0,0995	D_{L2}	0,0995
N_S	N_{S1}	15	N_{S1}	12
	N_{S2}	28	N_{S2}	25
D_D	D_{D1}	0,0974	D_{D1}	0,0974
	D_{D2}	0,0725	D_{D2}	0,0725

Tabela 4.29. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UO} = 4$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	1,30		1,73	
N_e	N_{e1}	2	N_{e1}	4
	N_{e2}	5	N_{e2}	4
D_L	D_{L1}	0,0132	D_{L1}	0,0132
	D_{L2}	0,0995	D_{L2}	0,0995
N_S	N_{S1}	14	N_{S1}	10
	N_{S2}	29	N_{S2}	27
D_D	D_{D1}	0,0974	D_{D1}	0,0974
	D_{D2}	0,0725	D_{D2}	0,0725

Tabela 4.30. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UO} = 8$, com duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	1,30		1,73	
N_e	N_{e1}	2	N_{e1}	3
	N_{e2}	5	N_{e2}	5
D_L	D_{L1}	0,0132	D_{L1}	0,0132
	D_{L2}	0,0995	D_{L2}	0,0995
N_S	N_{S1}	12	N_{S1}	9
	N_{S2}	31	N_{S2}	28
D_D	D_{D1}	0,0974	D_{D1}	0,0974
	D_{D2}	0,0725	D_{D2}	0,0725

Analisando-se o dimensionamento com diâmetros diferentes para os dois trechos das laterais, ou seja, $D_{L1} = 0,017$ m e $D_{L2} = 0,0132$ m, os custos totais médios foram superiores aos obtidos anteriormente entre 1,7 e 2,6%. Os custos fixos apresentaram aumentos entre 1,8 e 3,8%, enquanto os custos operacionais reduziram entre 0,0 e 6,7%, com relação ao dimensionamento apresentado. Podemos afirmar que os custos fixos são os responsáveis pelos aumentos nos custos totais evidenciados. As pressões de serviço e a uniformidade de emissão ótimos, foram os mesmos obtidos para a condição anterior. Nesse caso não houve problemas no ajuste das variáveis que definem os comprimentos dos trechos das linhas laterais e das linhas de derivação. Os tempos de operação que dependem da pressão de serviço, portanto, também não variaram.

Considerando-se o dimensionamento e operação do sistema com apenas uma tarifa diária de energia não foram verificadas alterações importantes no dimensionamento hidráulico da rede e, conseqüentemente, os custos totais do sistema sofreram influência dos custos

operacionais principalmente. A Tabela 4.31 apresenta algumas características do dimensionamento e operação do sistema.

Tabela 4.31. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h), em função do N_{UO} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área, para $N_{SUT} = 16$ e uma tarifa de energia diária.

N_{UO}	L_X/L_Y		Potência média		Tempo de irrigação (h)	
	1,30	1,73	(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_n	T_T
1	72,1	76,4	74,2	2,16	2,21	384,8
2	39,4	39,3	39,4	1,14	4,41	769,8
4	17,8	17,9	17,8	0,52	8,82	1539,6
8	14,3	13,5	13,9	0,40	14,72	2568,6

4.2.5.5. Sistema com $N_{SUT} = 20$

A pressão de serviço ótima do emissor de 15,0 m foi obtida para todas as operações, ou seja, $N_{UO} = 1, 2$ e 5. Assim como a uniformidade de emissão de 90%. O tempo disponível com a tarifa de menor custo foi completamente utilizado em todos os casos, uma vez que o essa configuração de sistema só permitiu o máximo de 5 unidades operacionais. A potência requerida reduziu com o número unidades operacionais a exemplo dos casos analisados anteriormente (Tabela 4.32).

Tabela 4.32. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação médios (h) em função do N_{UO} e da relação comprimento/largura (L_X/L_Y) da área para o sistema com $N_{SUT} = 20$ e duas tarifas de energia diárias.

N_{UO}	L_X/L_Y	Potência média		Tempo de irrigação (h)		
		(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_r	T_n	T_T
1	73,7	73,7	2,15	2,21	0,00	384,9
2	41,2	41,2	1,20	4,41	0,00	769,8
5	14,9	14,9	0,43	6,00	5,03	1924,6

As perdas de carga admissíveis nas sub-unidades não foram distribuídas totalmente nas linhas laterais e linhas de derivação. Para $N_{UO} = 1, 2$ e 5 foram utilizados 81,9, 73,0 e 73,2% das perdas de carga admissíveis obtidas, para h de 15,0 m e U_E de 90% (Tabela 4.33). Entretanto, em todas as operações o modelo poderia aumentar os trechos com menor diâmetro tanto nas laterais como nas linhas de derivação, reduzindo assim, os custos fixos e, conseqüentemente, os custos totais, desde que não implicasse em elevação de perda de carga suficiente para ultrapassar os limites obtidos. Desse modo, o dimensionamento otimizado com

variações de pressões inferiores às obtidas implicou em U_E superiores a 90,0% (Tabela 4.33). Na Tabela 4.34 encontram-se o número de emissores por trecho de lateral e de saídas por trecho da linha de derivação com seus respectivos diâmetros.

Tabela 4.33. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-
unidade para o sistema com $N_{SUT} = 20$ e duas tarifas de energia diárias.

L_X/L_Y	2,06				
N_{UO}	h	h_{adm}	h_{pl}	h_{fd}	U_{Ec}
1	15,0	4,93	2,05	1,99	90,9
2	15,0	4,93	1,62	1,99	91,4
5	15,0	4,93	1,62	1,99	91,4

U_{Ec} - uniformidade de emissão corrigida (%).

Tabela 4.34. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para $N_{SUT} = 20$ e $N_{UO} = 1, 2$ e 5, com duas tarifas de energia diárias.

N_{UO}	1		2 e 5	
N_e	N_{e1}	3	N_{e1}	4
	N_{e2}	4	N_{e2}	3
D_L	D_{L1}	0,0132	D_{L1}	0,0132
	D_{L2}	0,0995	D_{L2}	0,0995
N_S	N_{S1}	5	N_{S1}	5
	N_{S2}	29	N_{S2}	29
D_D	D_{D1}	0,0974	D_{D1}	0,0974
	D_{D2}	0,0725	D_{D2}	0,0725

Em termos de comportamento hidráulico o dimensionamento e operação do sistema com apenas uma tarifa diária de energia apresentou pequenas diferenças com relação ao de duas tarifas diárias. Essa observação tem sido comum em todas as configurações analisadas. Nas Tabelas 4.35 e 4.36 encontram-se resultados que refletem o dimensionamento e operação do sistema com uma tarifa.

Tabela 4.35. Potência média requerida (kW) e tempos de irrigação diários (h) em função do N_{UO} e da relação comprimento/largura da área na operação com uma tarifa de energia.

N_{UO}	L_X/L_Y	Potência média		Tempo de irrigação (h)	
	2,06	(kW)	(kW.ha ⁻¹)	T_n	T_T
1	73,7	73,7	2,15	2,14	384,6
2	41,8	41,8	1,22	4,41	769,8
5	14,9	14,9	0,43	11,03	1924,6

Tabela 4.36. Pressões de serviço (m) ótimas e distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade em função do N_{UO} e de L_X/L_Y .

L_X/L_Y	2,06				
N_{UO}	h	h_{adm}	h_{fl}	h_{fd}	U_{Ec}
1	150,0	4,93	2,00	0,70	92,3
2	150,0	4,93	2,70	2,00	90,2
5	150,0	4,93	1,60	2,00	91,4

U_{Ec} - uniformidade de emissão corrigida (%).

Os sistemas de microirrigação apresentam como uma das suas principais vantagens o seu baixo requerimento energético, uma vez que a pressão necessária para o funcionamento adequado dos emissores é relativamente inferior a de outros sistemas como aspersão e pivô-central. Verificou-se nesse trabalho que as alturas manométricas, para o sistema em nível, variaram entre 30,9 e 43,2 m (Tabela 4.37). Logo, deduz-se que as variações nas potências requeridas pelo sistema foram influenciadas principalmente pelas vazões conduzidas. A altura manométrica só ultrapassou os 40 m com $N_{UO} = 2$ ($N_{SUT} = 4$, $L_X/L_Y = 1,26$) e $N_{UO} = 8$ ($N_{SUT} = 8$ e 16), quando foi necessária a elevação da pressão de serviço. Isso tem importância direta nos custos do sistema, pois acima de 40 m são necessárias tubulações com pressões nominais superiores e, portanto, de maiores custos. No entanto, nos casos observados, apenas alguns trechos da rede exigiram tubulações com maiores pressões nominais.

Tabela 4.37. Alturas manométricas médias (m) para todas as configurações e operações do sistema com duas tarifas diárias de energia.

N_{SUT}	N_{UO}						
	1	2	3	4	5	6	8
4	34,2	38,1	-	35,9	-	-	-
8	32,4	36,3	-	32,6	-	-	43,2
12	33,5	36,0	33,5	-	-	30,9	-
16	34,1	36,8	-	35,4	-	-	43,2
20	33,6	37,7	-	-	34,1	-	-

Através do procedimento utilizado no modelo de otimização, no qual foi feito um pré-dimensionamento da rede de distribuição d'água com a seleção dos diâmetros possíveis comerciais a serem empregados, pôde-se constatar que o sistema com menor custo total é obtido com a menor pressão de serviço do emissor e menor uniformidade de emissão. A menor pressão de serviço, no entanto, não leva à sub-unidade de custo mínimo. O dimensionamento da sub-unidade, assim como do sistema, é totalmente dependente do

número de unidades operacionais, pois é quem define o tempo total diário de irrigação em função das características hidráulicas do emissor e, portanto, a pressão de serviço mínima. Uma vez definida a pressão mínima de serviço do emissor, o custo mínimo da sub-unidade só será obtido se toda a variação de pressão for totalmente requerida nas tubulações. Quando isso não acontece, a pressão na entrada da sub-unidade é inferior, a uniformidade de emissão se eleva e a potência do sistema é reduzida. Mas, essa redução de potência e dos custos operacionais não são suficientes para contrapor o aumento nos custos das sub-unidades, que implicarão em maior custo total do sistema.

Segundo Lima (2000) bons projetos de sistemas de gotejamento requerem potências inferiores a $1,0 \text{ CV.ha}^{-1}$. Considerando que os sistemas de microaspersão necessitam de maiores pressões para o funcionamento dos emissores que gotejamento, nesse estudo verificou-se que, considerando todas as configurações de sistemas com custo mínimo, as potências médias requeridas variaram de $0,33 \text{ kW.ha}^{-1}$ ($0,45 \text{ CV.ha}^{-1}$) a $0,60 \text{ kW.ha}^{-1}$ ($0,82 \text{ CV.ha}^{-1}$), seja operando com uma ou duas tarifas diárias. Na Figura 4.15 pode-se observar que a potência requerida ao sistema tem uma variação do tipo potencial com o número de unidades operacionais.

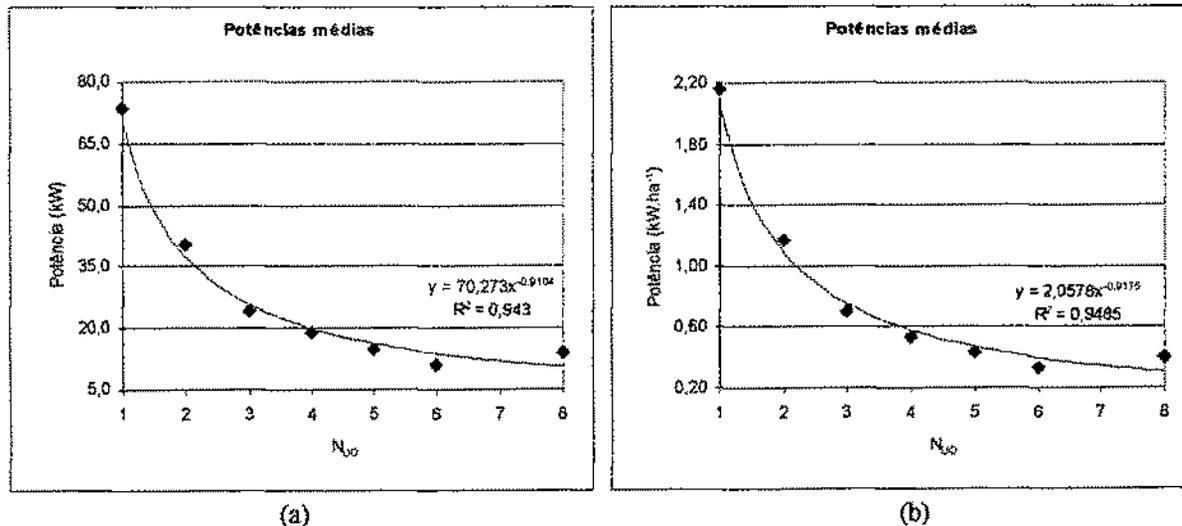


Figura 4.15. Potências médias requeridas, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para todas as configurações (N_{SLT}) e duas tarifas diárias.

No modelo desenvolvido não foram impostos limites separadamente às perdas de cargas nas linhas laterais nem nas linhas de derivação, como usualmente se empregam nos dimensionamentos, deixando-se para o processo de otimização a obtenção dos percentuais de

perdas de carga nas tubulações, com relação à admissível na sub-unidade. Verificou-se uma ampla variação nesses percentuais, não permitindo a indicação de que divisão das perdas seria a mais viável economicamente. Chegou-se, portanto, à constatação que não se deve restringir os limites nas perdas de carga nessas tubulações, mas apenas a perda de carga admissível na sub-unidade para a obtenção da uniformidade de emissão desejada. No entanto, modelos que têm como objetivo a otimização do layout do sistema necessitam dessa imposição, pois a determinação dos comprimentos das tubulações dependerá desses limites.

O dimensionamento ótimo do sistema além de buscar a opção de projeto que resulte no custo total mínimo, onde se associam os custos fixos e operacionais, deve considerar a importância de se buscar soluções viáveis que levem à menor potência requerida ao sistema, o que promove uma maior eficiência energética. Em situações de crise energética, como enfrentada pelo país atualmente, esse aspecto passa a ter uma relevância ainda maior.

O uso do fator de correção G (Anwar, 1999a) representa uma limitação para o modelo de otimização aplicado, no que se refere à exigência da existência do primeiro trecho da linha lateral ou linha de derivação. Com isso, necessariamente, no primeiro trecho de uma linha lateral ou de derivação composta por mais de um diâmetro, terá que ser alocado. Portanto, quando o comprimento mínimo do primeiro trecho for selecionado, o que nesse trabalho significou um emissor na lateral ou a saída de lateral na derivação, pode-se substituí-lo pelo diâmetro do segundo trecho, desde que ainda haja folga de perda de carga. Na prática, teria pouca operacionalidade e efeito econômico, construir tubulações laterais e derivação com o comprimento mínimo no primeiro trecho.

4.2.6. Análise de sensibilidade

4.2.6.1. Análise de sensibilidade ao aumento da tarifa de energia elétrica

Com objetivo de se avaliar o efeito do aumento de custo das tarifas de energia na solução ótima e, conseqüentemente, nas variáveis que definem o dimensionamento e operação do sistema, considerando o balanço hidrico anual em Iguatu, foram selecionadas duas configurações de sistemas: (1) a de menor custo total com doze sub-unidades ($N_{SUT} = 12$) e relação comprimento/largura da área $L_X/L_Y = 1,5$ e (2) sistema com $N_{SUT} = 16$ e relação comprimento/largura da área $L_X/L_Y = 1,3$ com as operações $N_{UD} = 4$ e 8.

4.2.6.1.a. Sistema com $N_{SVT} = 12$

Aplicando-se um aumento de 100% nas tarifas de energia elétrica para N_{VO} variando de 1 a 6, constatou-se que os custos totais ótimos das operações com duas tarifas sofreram aumentos da ordem de 4,1 a 11,0%. Enquanto, as operações com apenas uma tarifa diária apresentaram aumentos que variaram de 13,0 a 16,2%. Os custos operacionais aumentaram com N_{VO} , para duas tarifas diárias, entre 89,6 e 100,5%. Com uma tarifa esses aumentos variaram entre 97,5 e 108,0%. Os custos fixos apresentaram variação máxima de 0,75%, podendo-se, portanto, considerar que não houve influência do aumento das tarifas no dimensionamento do sistema (Tabela A11). Os custos totais máximos com uma e com duas tarifas foram obtidos, também, para as mesmas operações sem o aumento da energia, ou seja, $N_{VO} = 1$. Mas, o custo ótimo com duas tarifas passou a ser obtido com $N_{VO} = 3$, refletindo que com o aumento da energia é mais viável economicamente o dimensionamento do sistema com menor tempo de operação diário. No entanto, com uma tarifa diária o custo mínimo permaneceu com $N_{VO} = 6$, isso porque uma vez não havendo redução de tarifa ao longo da operação diária, foi mais vantajosa a operação com maior N_{VO} , pois há maior redução nos custos fixos (Figura 4.16). Assim, pôde-se concluir que sistema com $N_{VO} = 1$ apresenta o maior custo total. Enquanto, o sistema de menor custo total, pode variar em função das tarifas de energia não se podendo, portanto, caracterizar uma configuração de sistema como sendo de menor custo total. Ressalta-se, porém, que as opções de projeto que apresentam custos totais ótimos muito próximos estão mais sujeitas às variações das tarifas de energia. É mais provável que os sistemas cujos custos ótimos tenham sido obtidos com o maior N_{VO} passem a apresentar desvantagens econômicas em curto prazo, em função dos aumentos de tarifas ou suspensão de contratos com descontos de tarifas. Deve-se considerar, ainda, que um sistema dimensionado com determinado N_{VO} pode não ser facilmente adaptado a uma nova operação, ou seja, a um novo N_{VO} , além de que essa adaptação que pode não ser viável economicamente.

As variáveis que definem o dimensionamento do sistema não apresentaram alterações, em virtude do aumento da energia, que influenciassessem de maneira efetiva na configuração hidráulica da rede. Na Tabela 4.38 têm-se algumas das variáveis que possibilitam inferir o comportamento hidráulico da rede.

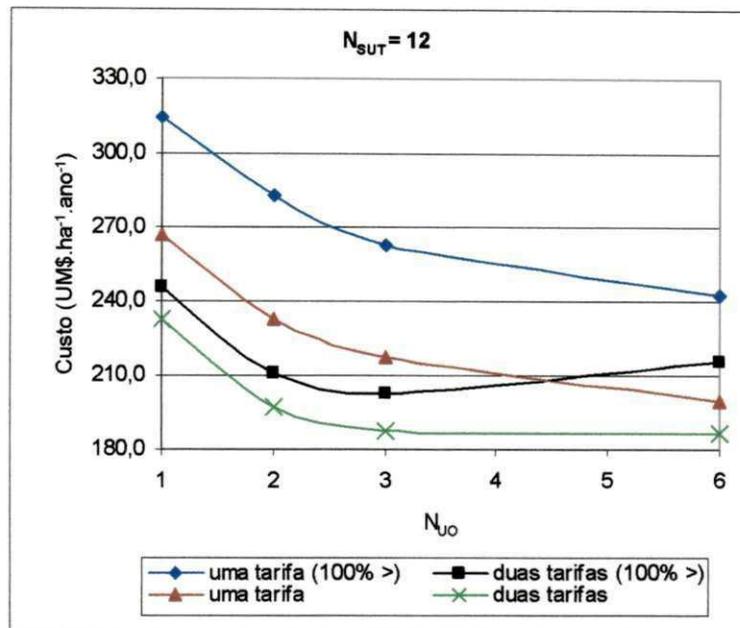


Figura 4.16. Sensibilidade dos custos totais do sistema com doze sub-unidades ao aumento das tarifas de energia, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).

Tabela 4.38. Pressões de serviço (m) ótimas, distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade e potência requerida (kW), em função do N_{UO} para a tarifa sem aumento e com 100% de aumento de custo.

Tarifa	Sem aumento					Com aumento de 100%				
	h	h_{adm}	hf_L	hf_D	P_{OT}	h	h_{adm}	hf_L	hf_D	P_{OT}
1	15,1	4,93	2,64	2,48	75,6	15,0	4,93	2,18	2,56	71,0
2	15,0	4,93	2,63	2,32	39,8	15,0	4,93	2,63	2,32	39,4
3	15,0	4,93	2,63	2,39	24,9	15,0	4,93	2,63	2,39	24,4
6	15,0	4,93	1,39	3,60	11,3	15,0	4,93	2,63	2,32	11,3

4.2.6.1.b. Sistema com $N_{SUT} = 16$

Como os custos totais ótimos obtidos com $N_{UO} = 4$ e 8 apresentaram valores aproximados (Tabela A7), procurou-se avaliar o efeito do aumento da tarifa nessas duas operações.

Pôde-se constatar também que os custos fixos não foram afetados consideravelmente e que hidráulicamente não houve alterações. O aumento dos custos operacionais implicaram em aumentos nos custos totais de 9,1 e 17,9%, com duas e uma tarifa de energia, respectivamente e $N_{UO} = 4$. Com oito unidades operacionais ($N_{UO} = 8$) esses aumentos foram de 15,1 e 19,6%

(Tabela 4.39). Essa análise permitiu observar que a solução de custo mínimo total, para as duas operações e nas diferentes tarifas, foi obtida com $N_{UO} = 4$, isto é, não se alterou com o aumento de custo das tarifas. O efeito nas diferenças de custos foram percebidas mais efetivamente com duas tarifas, que atingiram 7,9% ($N_{UO} = 4$).

Tabela 4.39. Variações nos custos do sistema com $N_{SUT} = 16$ em função do aumento da tarifa de energia.

N_{UO}	Tarifas	Sem aumento			Com aumento de 100%		
		C_F	C_{OP}	C_T	C_F	C_{OP}	C_T
4	T ₂	163,9	15,7	179,6	164,8	31,3	196,1
	T ₁	163,7	30,5	194,1	163,3	65,5	228,8
8	T ₂	154,7	29,1	183,8	156,4	55,2	211,6
	T ₁	154,6	40,8	195,4	156,3	77,5	233,8

T₂ - operação com duas tarifas de energia diárias.

T₁ - operação com uma tarifa de energia diária.

4.2.6.2. Análise de sensibilidade ao tempo de amortização do capital

Foi utilizado nas etapas anteriores do trabalho, para cálculo do custo fixo do sistema, um fator de recuperação do capital para uma vida útil de projeto de 15 anos. Assim, com o objetivo de se verificar se as configurações ótimas de projeto obtidas para esse período são afetadas pelo FRC, foi otimizado o custo total do sistema com uma vida útil de 10 anos com um novo fator, FRCa, mantendo-se os valores originais das tarifas de energia. Para isso, também foram selecionadas as configurações da análise de sensibilidade à energia.

4.2.6.2.a. Sistema com $N_{SUT} = 12$

Com o FRCa os custos totais ótimos das operações com duas tarifas sofreram aumentos da ordem de 28,3% a 30,8%. Enquanto, as operações com apenas uma tarifa diária apresentaram aumentos que variaram de 27,0% a 28,0%. Os custos operacionais apresentaram variação máxima de 2,0% com N_{UO} , para duas tarifas diárias, e máxima de 5,4% para uma tarifa diária. Os custos fixos sofreram aumentos com N_{UO} entre 31,6% e 32,1%, para duas tarifas diárias, e entre 31,3% e 32,2% para uma tarifa diária. Pôde-se, portanto, perceber que o FRCa afetou de modo expressivo os custos fixos dos sistemas, mas seu efeito nos custos operacionais teve pouca relevância (Tabela A12).

Os custos totais máximos e mínimos do sistema para o novo fator FRCa, com uma e com duas tarifas, foram obtidos nas mesmas configurações encontradas com o FRC anterior (Figura 4.17). Os custos totais, máximo e mínimo, com duas tarifas foram, respectivamente, de $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 299,4 ($N_{VO} = 1$) e $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 227,8 ($N_{VO} = 6$). Enquanto com uma tarifa diária foram obtidos o máximo e mínimo de $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 321,2 ($N_{VO} = 1$) e $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 236,7 ($N_{VO} = 6$), respectivamente (Tabela A12).

De modo análogo à análise de sensibilidade às tarifas de energia não se verificaram alterações nas características hidráulicas do sistema. Isso demonstra, que fisicamente, a rede dimensionada com o FRC e com o FRCa encontra-se muito próxima à de custo ótimo global. As variáveis da Tabela 4.40 possibilitam avaliar o comportamento hidráulico da rede.

Tabela 4.40. Pressões de serviço (m) ótimas, distribuição de perdas de carga (m) na sub-unidade e potência requerida (kW) para diferentes fatores de recuperação do capital FRC e FRCa.

Tarifa	FRC (15 anos)					FRCa (10 anos)					
	N_{VO}	h	h_{adm}	hf_L	hf_D	P_{OT}	h	h_{adm}	hf_L	hf_D	P_{OT}
1		15,1	4,93	2,64	2,48	75,6	15,0	4,93	2,18	2,56	74,0
2		15,0	4,93	2,63	2,32	39,8	15,0	4,93	2,63	2,32	40,6
3		15,0	4,93	2,63	2,39	24,9	15,0	4,93	2,63	2,48	25,2
6		15,0	4,93	1,39	3,60	11,3	15,0	4,93	2,63	2,39	11,4

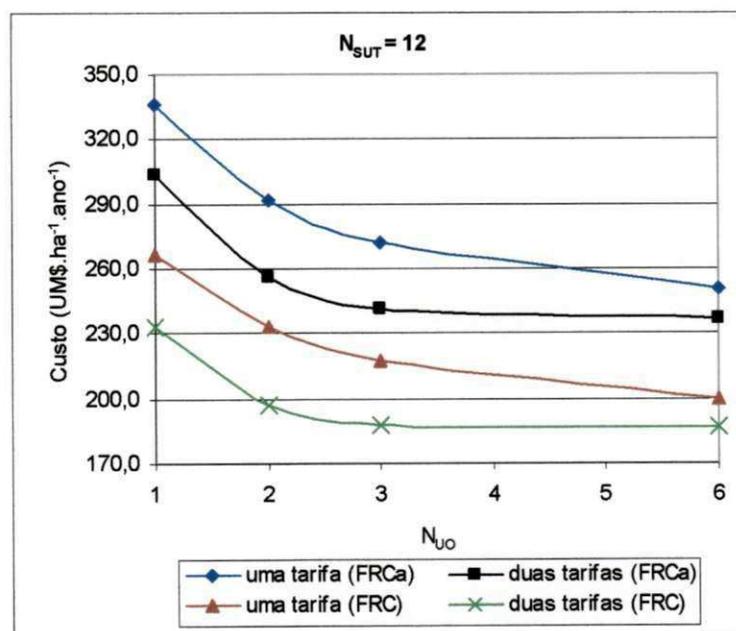


Figura 4.17. Sensibilidade dos custos totais do sistema com doze sub-unidades ao FRC (quinze anos) e ao FRCa (dez anos), em função do número de unidades operacionais (N_{VO}).

4.2.6.2.b. Sistema com $N_{SUT} = 16$

Com a redução do tempo amortização do capital para 10 anos os custos fixos aumentaram consideravelmente nas duas operações ($N_{VO} = 4$ e 8), no entanto os custos operacionais não foram afetados, assim como a hidráulica do sistema. Os custos totais com duas tarifas diárias foram praticamente iguais nas duas operações. Com uma tarifa diária e $N_{VO} = 8$ houve uma redução nos custos totais, porém de importância desprezível (Tabela 4.41).

Desse modo, considerando-se o efeito conjunto dos fatores custo da energia e tempo de amortização de capital, pôde-se caracterizar o dimensionamento do sistema com quatro unidades operacionais mais eficaz.

Tabela 4.41. Variações nos custos do sistema com $N_{SUT} = 16$ em função do fator de recuperação do capital FRC e FRCa.

N_{VO}	Tarifas	FRC (15 anos)			FRCa (10 anos)		
		C_F	C_{OPa}	C_T	C_F	C_{OPa}	C_T
4	T ₂	163,9	15,7	179,6	216,4	15,7	232,2
	T ₁	163,7	30,5	194,1	216,6	29,9	246,5
8	T ₂	154,7	29,1	183,8	203,2	29,7	232,9
	T ₁	154,6	40,8	195,4	205,4	39,3	244,7

Fazendo-se uma comparação das duas configurações, verifica-se que tanto com relação ao aumento de tarifas como à redução do tempo de amortização, o sistema com $N_{SUT} = 12$ apresentou-se como a mais viável economicamente. Verifica-se, portanto, que a análise das diversas opções de projeto é necessária para uma tomada de decisão mais adequada, o que só é possível através da avaliação independente das diversas configurações do sistema com suas possíveis operações. Os modelos de otimização nos quais esses dois fatores são variáveis de decisão a serem otimizadas dificultam a análise do efeito dos mesmos no dimensionamento e operação do sistema.

4.3. Análise do dimensionamento e operação do sistema considerando o balanço hídrico mensal

4.3.1. Demandas hídricas

Na Tabela 4.42 têm-se os requerimentos hídricos diários da cultura (R_{HC}) obtidos através dos balanços hídricos mensais no solo. Na determinação das necessidades hídricas da cultura para cálculo do balanço hídrico no solo foram considerados os coeficientes de cultivo da cultura médio ($K_{C_{med}}$) e máximo ($K_{C_{max}}$), o coeficiente de sombreamento (K_s), a evapotranspiração de referência mensal (ET_o) e a precipitação pluviométrica (P) com 75% de probabilidade de ocorrência.

Tabela 4.42. Requerimentos hídricos diários médios e máximos nas localidades de Iguatu (CE) e de João Pessoa (PB) obtidos a partir do balanço hídrico mensal no solo.

Requerimentos hídricos líquidos em Iguatu (CE), mm.dia ⁻¹ .												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$R_{HC_{med}}$	2,8	1,2	0,1	0,3	2,0	2,4	2,5	2,9	3,3	3,5	3,5	3,3
$R_{HC_{max}}$	3,4	1,4	0,1	0,4	2,4	2,9	3,0	3,5	4,0	4,2	4,2	4,0
Requerimentos hídricos líquidos em João Pessoa (PB), mm.dia ⁻¹ .												
$R_{HC_{med}}$	2,1	1,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,8	2,3	2,5
$R_{HC_{max}}$	2,5	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	2,2	2,8	3,0

$R_{HC_{med}}$ - requerimento hídrico médio da cultura com $K_{C_{med}} = 0,71$ e $K_s = 0,80$.

$R_{HC_{max}}$ - requerimento hídrico máximo da cultura com $K_{C_{max}} = 0,85$ e $K_s = 0,80$.

De acordo com os resultados obtidos na primeira etapa do trabalho, verificou-se que o formato da área, ou seja, a relação L_X/L_Y não promoveu diferenças de custos representativas. Desse modo, nessa etapa analisaram-se os dimensionamentos dos sistemas com apenas um formato de área, o que resultou em menor custo total, para cada configuração de sistema (N_{SUT}), com exceção de $N_{SUT} = 12$. Obteve-se, então, potencialmente 23 possibilidades de projetos (Tabela 4.43). Considerando-se, ainda, que em todas as alternativas de projetos foram aplicadas no dimensionamento, uma e duas tarifas diárias de energia elétrica, 56 situações foram analisadas.

As demandas hídricas anuais médias líquidas, obtidas com o balanço hídrico mensal, para as duas localidades foram de 850 mm e 334 mm para Iguatu e João Pessoa, respectivamente (Tabelas A13 e A14). Podemos constatar que com o balanço hídrico mensal a necessidade hídrica líquida foi superior em 64,7% à obtida com o balanço anual (516,2 mm). Verificou-se, portanto, que com o balanço hídrico anual houve uma subestimativa das

demandas hídricas de projeto, não sendo adequada para o planejamento da irrigação. Usando o mesmo raciocínio pode-se supor que o balanço hídrico mensal também subestimaria as necessidades hídricas comparadas com um balanço em escala diária.

Tabela 4.43. Combinações de número de sub-unidades, relação de forma da área e número de unidades operacionais avaliadas com o balanço hídrico mensal.

N_{SUT}	L_X/L_Y	N_{UO}				
4	0,98	1	2	4	8	-
8	0,98	1	2	4	8	-
12	0,98	1	2	3	6	12
16	1,30	1	2	4	8	16
20	2,06	1	2	5	10	20

No balanço anual trabalhou-se com as evapotranspirações de referências médias (ET_{Omed}) e máximas (ET_{Omax}) para Iguatu, o que resultou em requerimentos da cultura médio (R_{HCmed}) e máxima (R_{HCmax}) de 3,0 mm.dia⁻¹ e 4,2 mm.dia⁻¹, respectivamente. Com o balanço mensal, em Iguatu, o requerimento médio variou com o mês do ano de 0,1 mm.dia⁻¹ (estação chuvosa) a 3,5 mm.dia⁻¹ (estação seca). O requerimento total de irrigação baseou-se nas demandas diárias de cada mês, cuja somatória totalizaria o requerimento mensal e anual de água. O máximo requerimento diário obtido com o balanço mensal também foi de 4,2 mm.dia⁻¹ (Tabela 4.42). Esse resultado tem uma implicação importante, uma vez que define o limite máximo de unidades operacionais diárias (N_{UOmax}) possíveis ao sistema. Desse modo, com o balanço hídrico mensal, o máximo N_{UO} será o mesmo do balanço anual, uma vez que restringe o tempo total de operação diário. Os valores de requerimento médio diário em todos os meses do ano terão efeito nos tempos totais de operação do sistema.

O balanço hídrico mensal em João Pessoa apresentou requerimentos da cultura médios (R_{HCmed}) que variaram de 0,0 mm.dia⁻¹ a 2,5 mm.dia⁻¹ e máximo (R_{HCmax}) de 3,0 mm.dia⁻¹, respectivamente. Assim, verifica-se que a demanda máxima diária de 3,0 mm.dia⁻¹ pode possibilitar um maior número de unidades operacionais, comparando-se com Iguatu. Outro aspecto importante, é que, mesmo em uma região com maior índice de precipitações como a litorânea, comparada com regiões que apresentam baixos índices pluviométricos, podem ocorrer períodos prolongados de maior escassez hídrica que exigirão suplementação com irrigação, dependendo da cultura, e que poderão ter influência direta no dimensionamento do sistema e nos custos totais, embora o volume d'água aplicado anualmente seja significativamente inferior.

4.3.2. Análise dos custos com duas tarifas diárias de energia

Em função do balanço hídrico mensal, o número de variáveis relativas aos tempos de irrigação aumentaram, pois foram consideradas, para cada mês do ano, duas tarifas diárias de energia. Desse modo, o modelo apresentou em função da configuração do sistema as seguintes dimensões: 54 variáveis e 219 restrições, 64 variáveis e 261 restrições, 74 variáveis e 303 restrições, 84 variáveis e 345 restrições, 94 variáveis e 387 restrições, para $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20 , respectivamente.

Na Tabela A15 tem-se os custos otimizados com o balanço hídrico mensal, para as localidades de Iguatu e João Pessoa, e com o balanço hídrico anual em Iguatu, operando com duas tarifas diárias.

Em virtude da máxima evapotranspiração da cultura foram possíveis a operação com no máximo 8 e 12 unidades operacionais para Iguatu e João Pessoa, respectivamente. Os maiores custos totais foram encontrados com apenas uma unidade operacional ($N_{UO} = 1$).

Os custos fixos não apresentaram alterações importantes, para uma mesma operação (N_{UO}), em todas as configurações analisadas, nos diferentes requerimentos hídricos, seja com balanço hídrico anual ou mensal. Considerando-se todas as configurações de sistema (N_{SUT}) a máxima variação entre os custos fixos, para um mesmo N_{UO} , não ultrapassaram 4,5%, sendo superiores entre $N_{SUT} = 4$ e as demais configurações. Isso significa que a demanda anual de irrigação tem influência desprezível nos custos fixos, sendo o dimensionamento baseado principalmente em critérios hidráulicos.

Um maior número de unidades operacionais (N_{UO}) reduziu consideravelmente os custos fixos, comportamento visto na etapa anterior do trabalho (Figura 4.18). As variáveis climáticas interferiram no dimensionamento da rede, apenas quando a máxima demanda hídrica diária da cultura afetou o número máximo de unidades operacionais. Em João Pessoa, onde a demanda hídrica anual foi inferior, verificou-se a influência do requerimento hídrico no dimensionamento apenas no aumento de N_{UO} , sendo possível a operação com $N_{UO} = 10$ e 12 . Com isso, houve uma importante redução nos custos fixos. Em Iguatu, nos dois balanços não houve alteração no número máximo de unidades operacionais.

Em média, o custo fixo máximo nos três requerimentos hídricos foi de $\text{UM}\$.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ 233,4 com $N_{SUT} = 4$ e $N_{UO} = 1$ e o mínimo de $\text{UM}\$.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ 150,4, com $N_{SUT} = 20$ e $N_{UO} = 10$, uma variação de 55,2%. Nas Figuras 4.19 e 4.20 tem-se o efeito do N_{SUT} e do N_{UO} na variação dos custos fixos médios do sistema. O sistema com $N_{SUT} = 12$ possibilitou o máximo número de unidades operacionais ($N_{UO} = 12$), o que poderia levar à máxima redução nos

custos fixos em função da vazão bombeada, no entanto, o dimensionamento com $N_{SUT} = 20$ e $N_{UO} = 10$ resultou em menores custos fixos pela influência do custo da sub-unidade 16,9% inferior, embora com menor número de unidades operacionais.

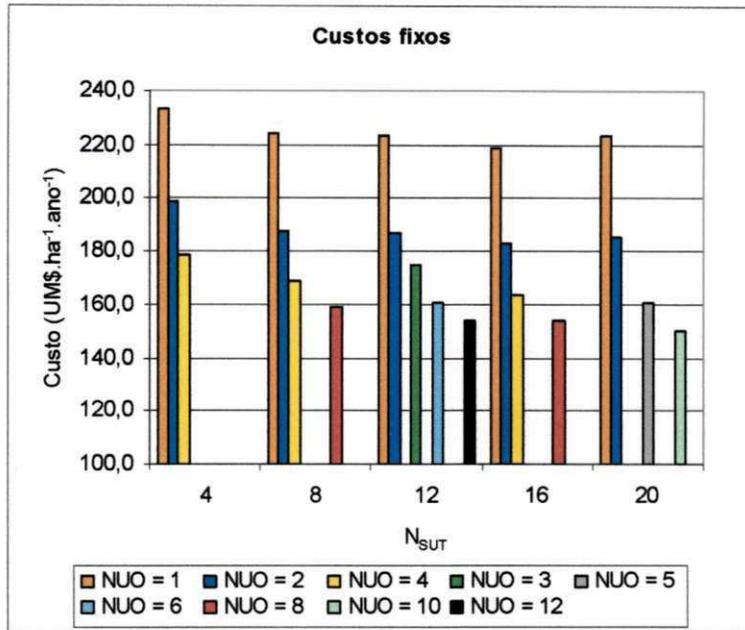


Figura 4.18. Efeito do número de unidades operacionais (N_{UO}) nos custos fixos, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}), para os três balanços hídricos.

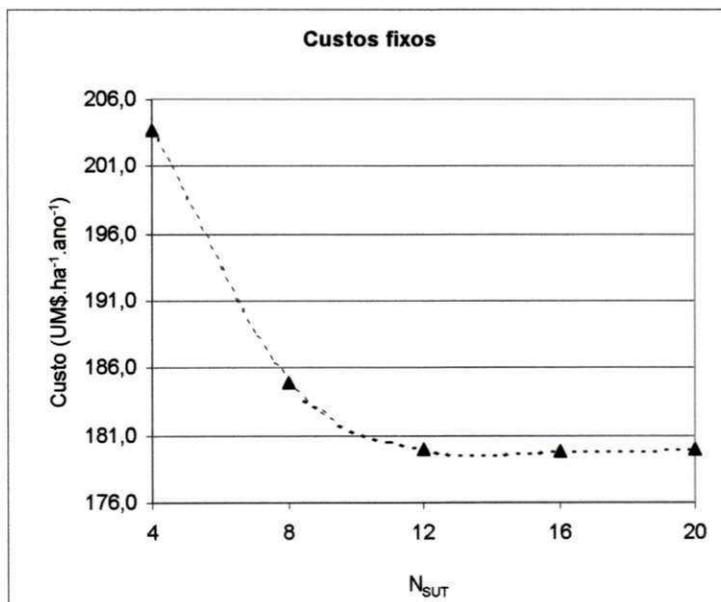


Figura 4.19. Custos fixos médios para todas as operações (N_{UO}) do sistema, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).

Os custos médios das sub-unidades tiveram o mesmo comportamento dos custos fixos nos diferentes balanços hídricos analisados para uma mesma pressão de serviço (h) ótima. Uma vez que a pressão de serviço foi determinada pelo número de unidades operacionais,

pelas variações de pressão e velocidades de fluxo admissíveis, como observado para o balanço hídrico anual, foram verificadas variações na hidráulica da sub-unidade apenas para o dimensionamento em João Pessoa, devidas ao requerimento hídrico diário máximo da cultura, que alterou o número de unidades operacionais e a pressão de serviço. Isto é, em João Pessoa foi possível a operação com $N_{UO} = 8$ sem elevar a pressão de serviço, ao contrário dos demais balanços em Iguatu. Foram possíveis também as operações com $N_{UO} = 10$ e 12 e, com isso, as pressões de serviço foram alteradas, conseqüentemente influenciando no dimensionamento da sub-unidade. Dessa forma, pôde-se observar que o dimensionamento das mesmas é afetado pelas demandas hídricas diárias da cultura, mas não é afetada pela demanda hídrica anual do projeto.

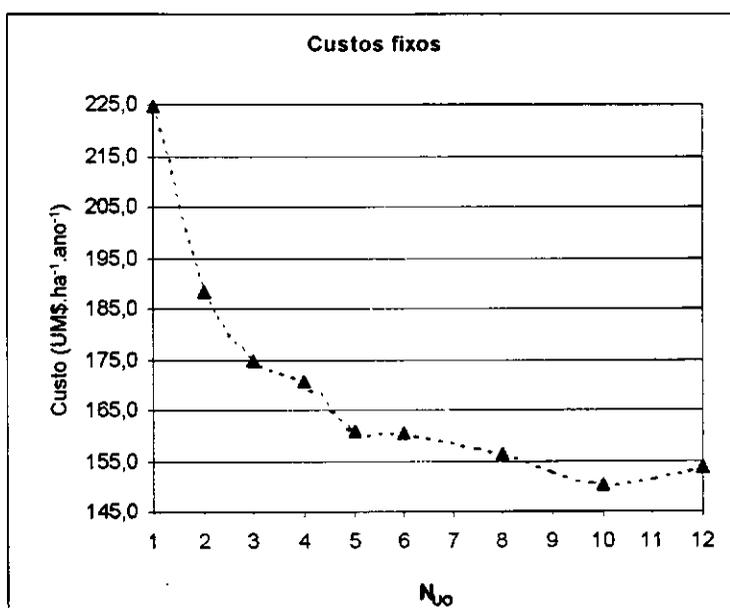


Figura 4.20. Custos fixos médios para todas as configurações de sistemas (N_{SUT}), em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).

As demandas hídricas anuais obtidas nos diferentes balanços foram crescentes para João Pessoa, Iguatu anual e mensal, implicando em tempos de irrigação também crescentes (Tabelas 4.44 a 4.51). Desse modo, os custos operacionais (Eq. 3.24) foram superiores com o balanço hídrico mensal em Iguatu e mínimos em João Pessoa. O maior N_{UO} também gerou maiores custos operacionais. Para N_{UO} variando de 1 e 4 em Iguatu e de 1 a 8 em João Pessoa, os aumentos nos tempos de irrigação foram diretamente proporcionais uma vez que as pressões de serviço se mantiveram constantes.

O modelo alocou, ao máximo, a tarifa de menor custo (Tr) em todas as operações. Isto é, nos tempos de irrigação diários médios dos doze meses do ano, o tempo disponível com a menor tarifa foi otimamente utilizado (Tabelas 4.44 a 4.51).

Tabela 4.44. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal e anual em Iguatu, com $N_{SUT} = 4$.

N_{VO}	1		2		4	
T_{TID}	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
Jan	2,04	0,00	4,08	0,00	6,00	2,16
Fev	0,93	0,00	1,86	0,00	3,72	0,00
Mar	0,07	0,00	0,15	0,00	0,30	0,00
Abr	0,22	0,00	0,44	0,00	0,89	0,00
Mai	1,51	0,00	3,02	0,00	6,00	0,05
Jun	1,76	0,00	3,52	0,00	6,00	1,04
Jul	1,87	0,00	3,74	0,00	6,00	1,50
Ago	2,18	0,00	4,37	0,00	6,00	2,74
Set	2,48	0,00	4,96	0,00	6,00	3,92
Out	2,64	0,00	5,28	0,00	6,00	4,56
Nov	2,58	0,00	5,16	0,00	6,00	4,32
Dez	2,47	0,00	4,94	0,00	6,00	3,89
T_T	633,90		1267,90		2535,70	
B. H. anual	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
	2,21	0,00	4,41	0,00	6,00	2,82
T_T	384,9		769,8		1539,6	

B. H. anual - balanço hídrico anual.

 T_r - tempo de irrigação no período de menor tarifa de energia, h. T_n - tempo de irrigação no período de maior tarifa de energia, h. T_{TID} - tempo total de irrigação diário, h. T_T - tempo total anual de irrigação, h.Tabela 4.45. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal em João Pessoa, com $N_{SUT} = 4$.

N_{VO}	1		2		4	
T_{TID}	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
Jan	1,58	0,00	3,17	0,00	6,00	0,34
Fev	1,33	0,00	2,66	0,00	5,31	0,00
Mar	0,07	0,00	0,15	0,00	0,30	0,00
Abr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mai	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jun	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jul	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ago	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Set	0,32	0,00	0,64	0,00	1,29	0,00
Out	1,34	0,00	2,69	0,00	5,38	0,00
Nov	1,69	0,00	3,37	0,00	6,00	0,74
Dez	1,87	0,00	3,74	0,00	6,00	1,49
T_T	248,50		497,00		994,01	

Tabela 4.46. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal e anual em Iguatu, com $N_{SUT} = 8$ e 16.

N_{UO}	1		2		4		8	
T_{TID}	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
Jan	2,04	0,00	4,08	0,00	6,00	2,16	6,00	7,52
Fev	0,93	0,00	1,86	0,00	3,72	0,00	6,00	0,16
Mar	0,07	0,00	0,15	0,00	0,30	0,00	0,49	0,00
Abr	0,22	0,00	0,45	0,00	0,89	0,00	1,48	0,00
Mai	1,51	0,00	2,93	0,00	5,86	0,00	6,00	3,70
Jun	1,76	0,00	3,52	0,00	6,00	1,04	6,00	5,67
Jul	1,87	0,00	3,74	0,00	6,00	1,50	6,00	6,41
Ago	2,18	0,00	4,37	0,00	6,00	2,74	6,00	8,48
Set	2,48	0,00	4,96	0,00	6,00	3,92	6,00	10,44
Out	2,64	0,00	5,28	0,00	6,00	4,56	6,00	11,50
Nov	2,58	0,00	5,16	0,00	6,00	4,32	6,00	11,10
Dez	2,47	0,00	4,94	0,00	6,00	3,89	6,00	10,39
T_T	632,42		1264,80		2529,70		4192,00	
B. H. anual	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
	2,21	0,00	4,41	0,00	6,00	2,82	6,00	8,72
T_T	384,9		769,8		1539,6		2568,6	

Tabela 4.47. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal em João Pessoa, com $N_{SUT} = 8$ e 16.

N_{UO}	1		2		4		8	
T_{TID}	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
Jan	1,58	0,00	3,17	0,00	6,00	0,00	6,00	6,67
Fev	1,33	0,00	2,66	0,00	5,30	0,00	6,00	4,63
Mar	0,07	0,00	0,15	0,00	0,30	0,00	0,60	0,00
Abr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mai	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jun	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jul	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ago	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Set	0,32	0,00	0,64	0,00	1,29	0,00	2,58	0,00
Out	1,34	0,00	2,69	0,00	5,38	0,00	6,00	4,75
Nov	1,69	0,00	3,37	0,00	6,00	0,74	6,00	7,49
Dez	1,87	0,00	3,74	0,00	6,00	1,49	6,00	8,98
T_T	248,50		497,00		994,01		1988,00	

Tabela 4.48. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal e anual em Iguatu, com $N_{SUT} = 12$.

N_{UO}	1		2		3		6	
T_{TID}	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
Jan	2,04	0,00	4,08	0,00	6,00	0,12	6,00	6,24
Fev	0,93	0,00	1,86	0,00	2,79	0,00	5,58	0,00
Mar	0,07	0,00	0,15	0,00	0,22	0,00	0,45	0,00
Abr	0,22	0,00	0,45	0,00	0,67	0,00	1,34	0,00
Mai	1,51	0,00	2,93	0,00	4,39	0,00	6,00	2,78
Jun	1,76	0,00	3,52	0,00	5,28	0,00	6,00	4,56
Jul	1,87	0,00	3,74	0,00	5,62	0,00	6,00	5,23
Ago	2,18	0,00	4,37	0,00	6,00	0,55	6,00	7,10
Set	2,48	0,00	4,96	0,00	6,00	1,44	6,00	8,88
Out	2,64	0,00	5,28	0,00	6,00	1,92	6,00	9,84
Nov	2,58	0,00	5,16	0,00	6,00	1,74	6,00	9,48
Dez	2,47	0,00	4,94	0,00	6,00	1,42	6,00	8,83
T_T	632,42		1264,80		1897,2		3794,50	
B. H. anual	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
	2,21	0,00	4,41	0,00	6,00	0,62	6,00	7,24
T_T	384,9		769,8		1154,8		2309,4	

Tabela 4.49. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal em João Pessoa, com $N_{SUT} = 12$.

N_{UO}	1		2		3		6		12	
T_{TID}	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
Jan	1,58	0,00	3,17	0,00	4,75	0,00	6,00	3,50	6,00	8,90
Fev	1,33	0,00	2,66	0,00	3,98	0,00	6,00	1,97	6,00	6,50
Mar	0,07	0,00	0,15	0,00	0,22	0,00	0,45	0,00	0,70	0,00
Abr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mai	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jun	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jul	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ago	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Set	0,32	0,00	0,64	0,00	0,97	0,00	1,93	0,00	3,03	0,00
Out	1,34	0,00	2,69	0,00	4,03	0,00	6,00	2,06	6,00	6,64
Nov	1,69	0,00	3,37	0,00	5,06	0,00	6,00	4,12	6,00	9,87
Dez	1,87	0,00	3,74	0,00	5,62	0,00	6,00	5,23	6,00	11,61
T_T	248,50		497,00		745,51		1491,00		2338,00	

Tabela 4.50. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal e anual em Iguatu, com $N_{SUT} = 20$.

N_{VO}	1		2		5	
T_{TID}	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
Jan	2,04	0,00	4,08	0,00	6,00	4,20
Fev	0,93	0,00	1,86	0,00	4,65	0,00
Mar	0,07	0,00	0,15	0,00	0,37	0,00
Abr	0,22	0,00	0,45	0,00	1,12	0,00
Mai	1,51	0,00	2,93	0,00	6,00	1,32
Jun	1,76	0,00	3,52	0,00	6,00	2,80
Jul	1,87	0,00	3,74	0,00	6,00	3,36
Ago	2,18	0,00	4,37	0,00	6,00	4,92
Set	2,48	0,00	4,96	0,00	6,00	6,40
Out	2,64	0,00	5,28	0,00	6,00	7,20
Nov	2,58	0,00	5,16	0,00	6,00	6,90
Dez	2,47	0,00	4,94	0,00	6,00	6,36
T_T	632,42		1264,80		3162,10	
B. H. anual	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
	2,21	0,00	4,41	0,00	6,00	2,82
T_T	384,9		769,8		1924,6	

Tabela 4.51. Tempos de irrigação diários médios (h) para a operação do sistema com o balanço hídrico mensal em João Pessoa, com $N_{SUT} = 20$.

N_{VO}	1		2		5		10	
T_{TID}	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n	T_r	T_n
Jan	1,58	0,00	3,17	0,00	6,00	1,92	6,00	6,72
Fev	1,33	0,00	2,66	0,00	6,00	0,64	6,00	4,67
Mar	0,07	0,00	0,15	0,00	0,37	0,00	0,60	0,00
Abr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mai	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jun	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jul	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ago	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Set	0,32	0,00	0,64	0,00	1,61	0,00	2,56	0,00
Out	1,34	0,00	2,69	0,00	6,00	0,72	6,00	4,79
Nov	1,69	0,00	3,37	0,00	6,00	2,43	6,00	7,54
Dez	1,87	0,00	3,74	0,00	6,00	3,36	6,00	9,03
T_T	248,50		497,00		1242,50		1995,10	

Como os custos fixos foram praticamente invariáveis com os balanços hídricos, os custos operacionais tiveram maior relevância na obtenção dos custos totais mínimos. Os custos operacionais representaram entre 5,6 e 22,8% dos custos totais com o balanço hídrico mensal em Iguatu, considerando todas configurações (N_{SUT}) e operações (N_{UO}) (Tabela A15).

Comparando-se os custos operacionais em Iguatu, verificou-se que o balanço hídrico mensal resultou em aumentos que variaram entre 55,6 e 79,1% com relação ao balanço anual. Já com relação a João Pessoa o balanço hídrico mensal em Iguatu promoveu aumentos entre 131,1 e 235,7% (Tabela A15).

Uma vez que os custos fixos tiveram variações irrelevantes para um mesmo N_{UO} , o mesmo não ocorreu com relação aos custos operacionais, que são dependentes dos tempos de irrigação e da potência requerida. A manutenção dos custos fixos não necessariamente garante que a potência do sistema não sofreu alterações, mas pode ser um importante indicador.

Desse modo, pôde-se constatar que as variações nos custos totais do sistema para uma determinada operação foram devidas, principalmente, às variações nos custos operacionais em função dos tempos de irrigação. Assim, os custos operacionais e, portanto, os custos totais foram superiores com o balanço hídrico mensal em Iguatu e inferiores com o balanço hídrico mensal em João Pessoa.

Comparando-se os custos totais em Iguatu, determinados com base no balanço hídrico anual e mensal, verificaram-se aumentos entre 2,1 e 9,2%. Quanto maior N_{UO} , maiores os aumentos nos custos operacionais e conseqüentemente nos custos totais. Esse resultado reflete a importância de se estimar, o mais adequadamente possível, as demandas hídricas na elaboração do projeto de irrigação. Observa-se que, sendo a precipitação média com 75% de probabilidade de ocorrência a mais recomendada para projetos de irrigação (Bernardo, 1989), a utilização desse dado com base na média anual pode comprometer a análise econômica do projeto. Porém, para regiões com as características climáticas como Iguatu não existem diferenças em termos de dimensionamento hidráulico do sistema com o balanço hídrico anual ou mensal. A determinação do número de sub-unidades (N_{SUT}) e de unidades operacionais (N_{UO}) são de importância principal na elaboração adequada do projeto de microirrigação.

Para a localidade de Iguatu as configurações e operações de sistemas que resultaram nos custos ótimos mínimos não diferiram nos balanços hídricos anual e mensal, isto é $N_{SUT} = 16$ e $N_{UO} = 4$, com $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 179,7 e 189,0, respectivamente. Verificando-se um aumento entre os dois balanços de 5,2% (Tabela A15). Entre os custos mínimos e máximos, obtidos em Iguatu, foram presenciados aumentos de 34,1% e 31,3% para os balanços anual e mensal, respectivamente (Figura 4.21).

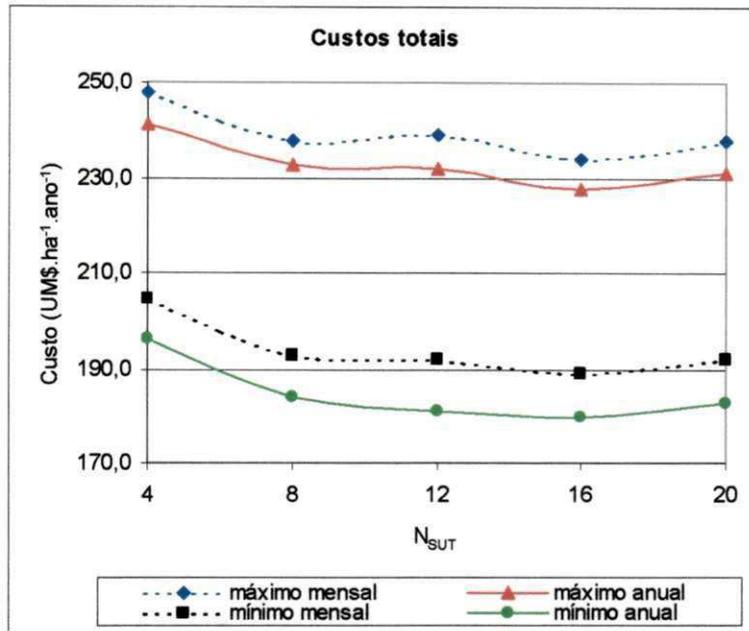


Figura 4.21. Custos totais ótimos máximos e mínimos para os balanços hídricos anual e mensal em Iguatu, em função do número de sub-unidades total (N_{SUT}).

Verificou-se, anteriormente, que em João Pessoa (região litorânea), em virtude das menores demandas evapotranspirométricas, as necessidades hídricas diárias e anuais da cultura foram inferiores, Tabela 4.42. O requerimento máximo diário da cultura foi 40,0% superior em Iguatu, com isso, em João Pessoa pôde-se ter até 12 unidades operacionais, em função da frequência de irrigação ótima de um dia, das características hidráulicas do emissor e da eficiência de aplicação de 90% (Eq. 4.25 a 4.27). Desse modo, os custos fixos puderam ser reduzidos com um maior N_{UO} . Entretanto, os custos totais mínimos reduziram até $N_{UO} = 8$, porque acima deste limite os custos operacionais se elevaram desfavoravelmente. Assim, os custos totais máximos foram obtidos em todas as configurações (N_{SUT}) com $N_{UO} = 1$, enquanto os custos mínimos foram encontrados com $N_{UO} = 4, 8, 6, 8$ e 5 para $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20 , respectivamente. Desse modo, entre o custo total máximo $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 238,7 ($N_{SUT} = 4$ e $N_{UO} = 1$) e o mínimo $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 164,8 ($N_{SUT} = 16$ e $N_{UO} = 8$) houve uma variação de 44,8% em João Pessoa. É importante ressaltar que em Iguatu, nos dois balanços anual e mensal, para $N_{SUT} = 8$ e 16 as operações que resultaram em menor custo total foram $N_{UO} = 4$. Isso retrata a influência da demanda hídrica anual que afeta o tempo total de irrigação e seu efeito nos custos operacionais.

Entre os custos totais mínimos ótimos, obtidos com os balanços hídricos mensais em Iguatu e João Pessoa, em todas as configurações, verificou-se uma variação máxima nos custos de 14,7% .

Pôde-se constatar que, com exceção de $N_{SUT} = 4$, as variações entre os custos mínimos obtidas das diversas configurações foram de apenas 3,2%. Logo, acrescentar no modelo de programação não linear, como variáveis de decisão a serem otimizadas, N_{SUT} e N_{UO} , pode resultar em soluções não confiáveis uma vez que esses modelos não garantem a obtenção de ótimos globais. Portanto, dada a importância dessas duas variáveis é aconselhável tratá-las como informações de entrada do modelo.

Os menores custos totais para os balanços hídricos mensal e anual Iguatu e mensal em João Pessoa foram, respectivamente, $\text{UM}\$.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ 189,0, 179,9 e 164,8. Nas Figuras 4.22 a 4.26 tem-se o comportamento dos custos totais e operacionais para todas as configurações e operações analisadas.

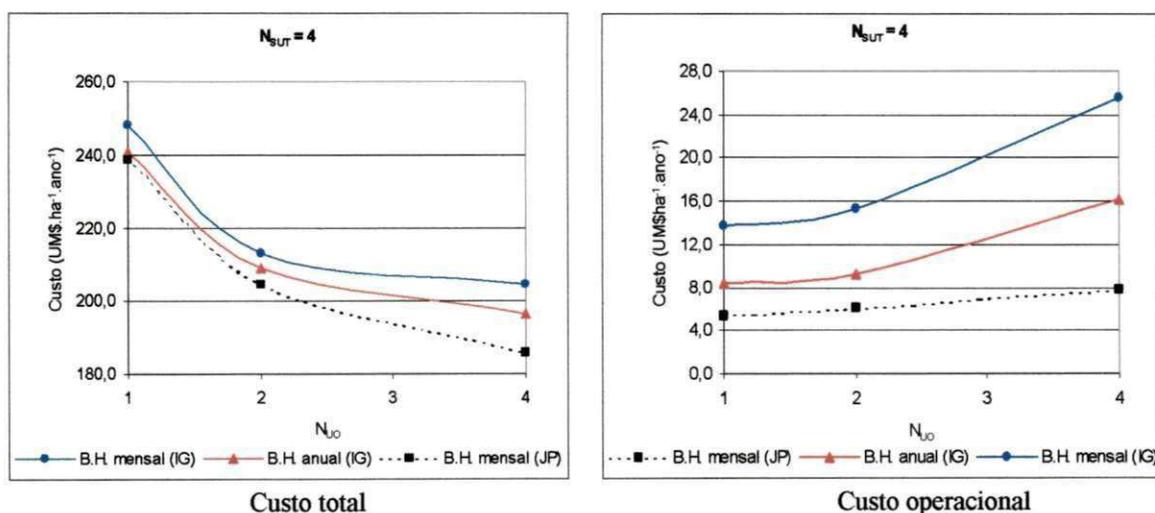


Figura 4.22. Custos totais e operacionais do sistema com quatro sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.

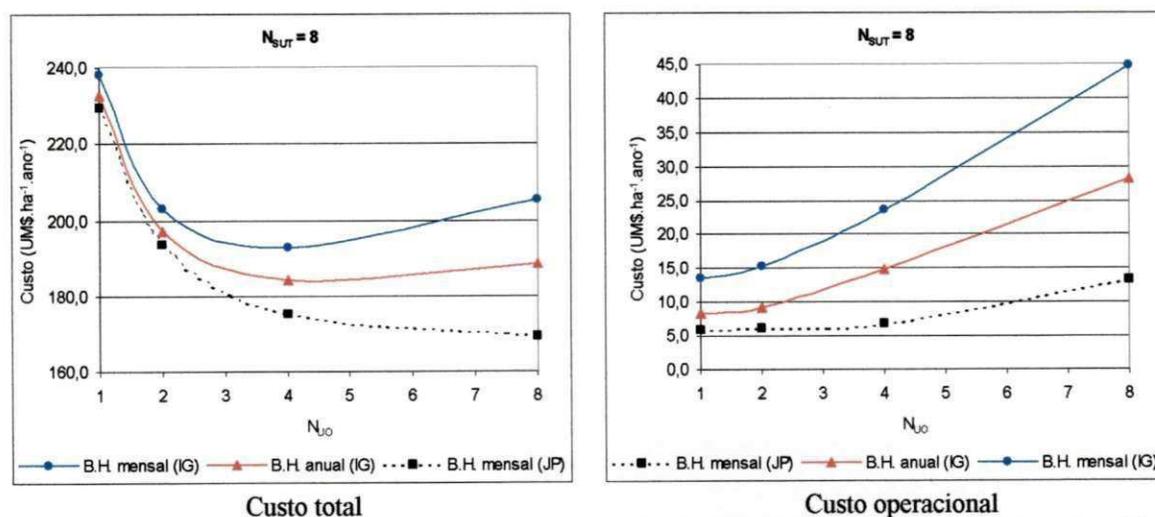


Figura 4.23. Custos totais e operacionais do sistema com oito sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.

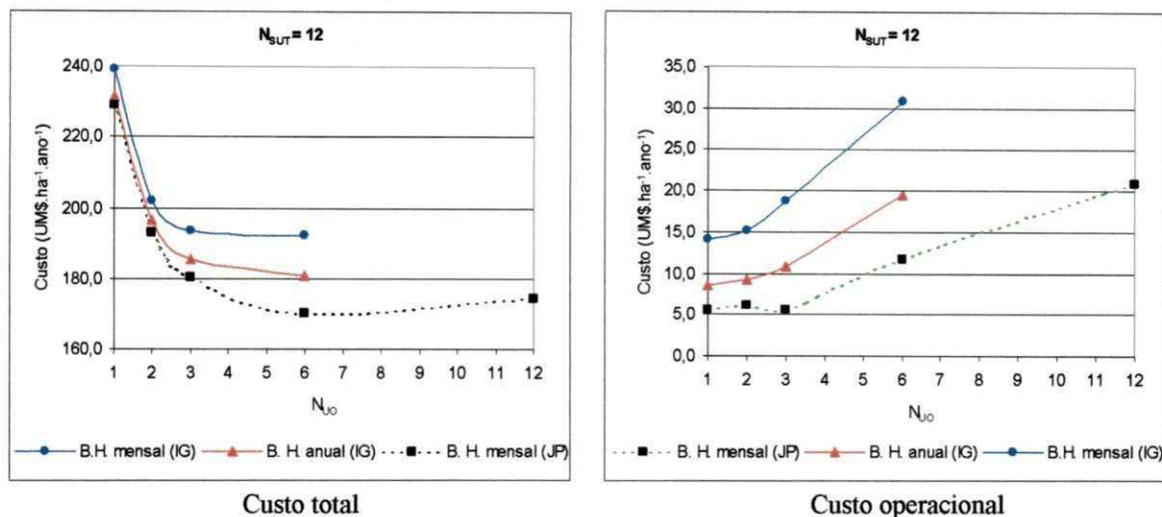


Figura 4.24. Custos totais e operacionais do sistema com doze sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.

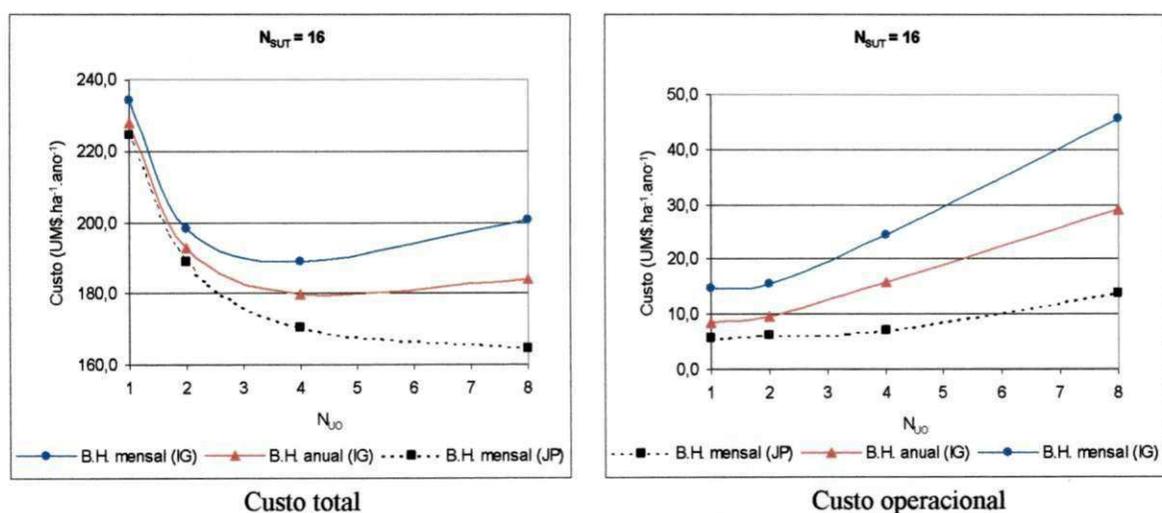


Figura 4.25. Custos totais e operacionais do sistema com dezesseis sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.

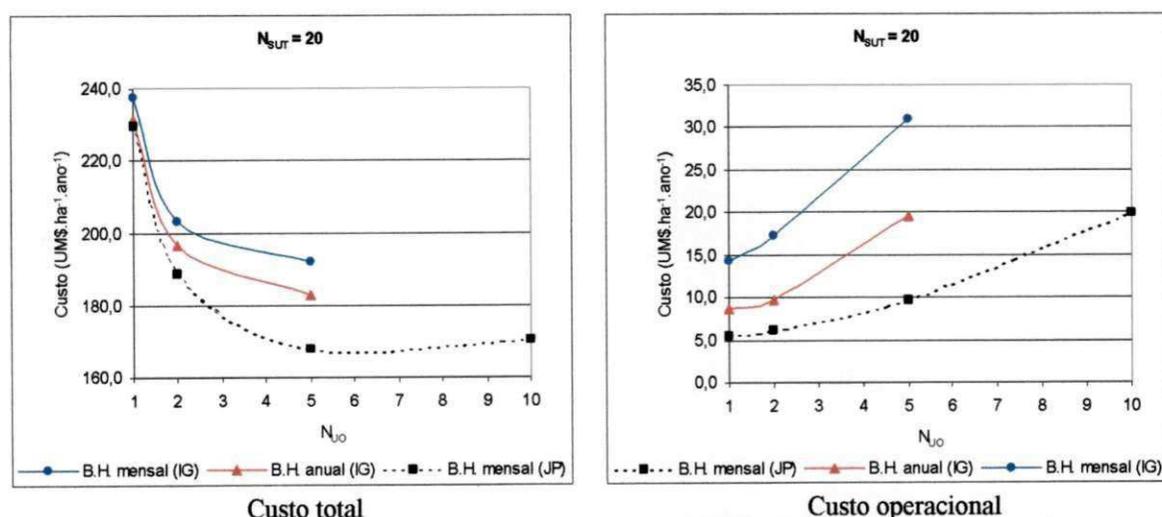


Figura 4.26. Custos totais e operacionais do sistema com vinte sub-unidades, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}), para as diferentes demandas hídricas anuais e duas tarifas diárias.

4.3.2.1. Análise hidráulica

Hidraulicamente não houve diferenças relevantes no dimensionamento da rede entre os balanços anual e mensal em Iguatu e João Pessoa quando a mesma pressão de serviço foi otimizada. Além dos custos fixos terem refletido esse comportamento, encontram-se na Tabela 4.52 alguns indicadores que permitem essa interpretação sobre a hidráulica da rede de irrigação.

Tabela 4.52. Pressão de serviço (m), uniformidade de emissão (%), variação de pressão na sub-unidade (m) e potência requerida (kW), para os sistemas dimensionados com base nos balanços hídricos, mensal e anual, em função de N_{SUT} e N_{UO} com duas tarifas diárias.

N_{SUT}	B. H.	IG mensal				JP mensal				IG anual			
		N_{UO}	h	U_E	Δh_{s_c}	P_{OT}	h	U_E	Δh_{s_c}	P_{OT}	h	U_E	Δh_{s_c}
4	1	15,0	90,0	4,90	70,8	15,0	90,0	4,98	70,9	15,0	90,0	5,00	71,0
	2	15,0	90,0	4,98	39,5	15,0	90,0	4,68	39,3	15,0	90,0	4,42	39,1
	4	15,0	90,0	4,95	18,3	15,2	90,0	5,01	20,9	15,0	90,0	4,86	19,3
8	1	15,0	90,0	5,10	70,1	15,0	90,0	5,10	77,2	15,0	90,0	5,10	70,1
	2	15,0	90,0	5,10	39,4	15,0	90,0	5,10	39,5	15,0	90,0	5,10	38,6
	4	15,0	90,0	5,10	17,0	15,0	90,0	5,10	18,3	15,0	90,0	5,10	16,9
	8	24,7	90,0	8,10	14,0	15,0	91,0	5,10	9,4	24,2	90,0	8,00	13,7
12	1	15,0	90,0	4,98	72,5	15,0	90,0	4,98	72,8	15,0	90,0	4,98	72,0
	2	15,0	90,0	4,98	38,9	15,0	90,0	4,93	40,3	15,0	90,0	4,98	39,1
	3	15,0	90,0	4,98	24,4	15,0	90,0	4,93	24,3	15,0	90,0	4,98	24,2
	6	15,0	90,0	4,98	11,2	15,0	90,0	4,93	13,3	15,0	90,0	4,98	11,1
	12	-	-	-	-	28,6	90,0	9,39	11,5	-	-	-	-
16	1	15,0	90,0	5,10	77,3	15,0	90,0	5,30	77,7	15,0	90,0	5,30	73,3
	2	15,0	90,0	5,30	40,7	15,0	90,0	5,20	41,1	15,0	90,0	5,20	37,2
	4	15,0	90,0	5,20	18,0	15,0	90,0	5,30	19,7	15,0	90,0	5,30	18,3
	8	24,7	90,0	8,50	14,6	15,0	90,0	5,20	9,8	24,2	90,0	7,70	14,5
20	1	15,0	90,0	4,60	74,7	15,0	90,0	3,50	73,0	15,0	90,0	4,00	73,7
	2	15,0	90,0	4,60	45,0	15,0	90,0	5,30	41,3	15,0	90,0	3,60	41,2
	5	15,0	90,0	4,90	15,1	15,0	90,0	5,30	16,2	15,0	90,0	3,60	14,9
	10	-	-	-	-	26,8	90,0	9,20	14,0	-	-	-	-

B. H. - balanço hídrico.

IG mensal - resultados com o balanço hídrico mensal em Iguatu.

JP mensal - resultados com o balanço hídrico mensal em João Pessoa.

IG anual - resultados com o balanço hídrico anual em Iguatu.

Em todas as configurações (N_{SUT}) o modelo buscou sempre a pressão de serviço mínima do emissor de 15,0 m e a uniformidade mínima de 90%. Entretanto, quando foi

aplicado um número maior que oito unidades operacionais foi necessária a elevação da pressão de serviço para o atendimento do limite de tempo de operação disponível diário, com $N_{UO} = 10$ e 12, para o caso do balanço hídrico em João Pessoa, por exemplo. Essa informação revela que o dimensionamento e operação que resultam em menores custos totais para o sistema, requer o uso das menores pressões de serviço e uniformidades de emissão admissíveis. Os únicos fatores que podem elevar a pressão de serviço são, portanto, os diâmetros disponibilizados para o dimensionamento da sub-unidade e o número de unidades operacionais. Observou-se também que o modelo não elevou a pressão de serviço para que aumentasse a operação do sistema dentro do período de menor tarifa. Isto significa, que não compensaria a redução dos custos com energia trabalhando-se totalmente dentro horário com tarifa reduzida, sendo necessário para isso a elevação de pressão que implicaria em aumentos nos custos fixos.

4.3.3. Análise dos custos com uma tarifa diária de energia

Na primeira parte do trabalho, foi analisado o dimensionamento e a operação do sistema, considerando-se o balanço hídrico anual, onde se verificou que a aplicação de uma ou duas tarifas diárias de energia não alterou os custos fixos do sistema, mas afetou principalmente os custos operacionais. Constatou-se, portanto, que o dimensionamento hidráulico da rede não sofreu alterações consideráveis para os cenários com uma ou duas tarifas de energia. Com relação ao balanço hídrico mensal em Iguatu e em João Pessoa esse mesmo comportamento foi evidenciado.

Os custos fixos com uma tarifa, praticamente, não variaram comparados aos obtidos no dimensionamento com duas tarifas diárias (Tabela A17). Na Figura 4.27 tem-se o comportamento dos custos fixos para $N_{SUT} = 12$ e que pode caracterizar o comportamento das demais configurações de sistemas analisadas. Os custos operacionais, no entanto, aumentaram consideravelmente comparados aos de duas tarifas (Figura 4.28). Os custos totais tenderam a diminuir com o aumento de N_{UO} (Figura 4.29). Porém, nas situações com $N_{SUT} = 12$ ($N_{UO} = 12$), $N_{SUT} = 16$ ($N_{UO} = 8$) e $N_{SUT} = 20$ ($N_{UO} = 10$) os custos totais aumentaram, com exceção de $N_{SUT} = 16$ e $N_{UO} = 8$ em João Pessoa. Os custos mínimos não diferiram das combinações de N_{SUT} e N_{UO} obtidas para a operação com duas tarifas diárias. Entretanto, os custos mínimos totais com uma tarifa, para os balanços mensal e anual em Iguatu, não foram obtidos com $N_{SUT} = 16$ ($N_{UO} = 4$), mas com $N_{SUT} = 12$ ($N_{UO} = 6$). Para os balanços hídricos, mensal e anual em Iguatu, verificaram-se diferenças de custos totais de até 9,6%, evidenciando a

subestimativa do requerimento hídrico pelo balanço anual. Comparando-se, para o balanço mensal em Iguatu, entre a configuração de maior custo total $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 284,3 ($N_{SUT} = 4$, $N_{UO} = 1$) e a de menor custo total $\text{UM}\$.ha^{-1}.ano^{-1}$ 207,8 ($N_{SUT} = 12$, $N_{UO} = 6$), verificou-se uma variação de 36,8%. Os custos operacionais nas opções de projeto de menor custo total para os balanços hídricos, mensal e anual em Iguatu e mensal em João Pessoa, representaram sobre o custo total do sistema, respectivamente, 22,5% ($N_{SUT} = 12$, $N_{UO} = 6$), 15,1% ($N_{SUT} = 12$, $N_{UO} = 6$) e 11,6% ($N_{SUT} = 16$, $N_{UO} = 8$).

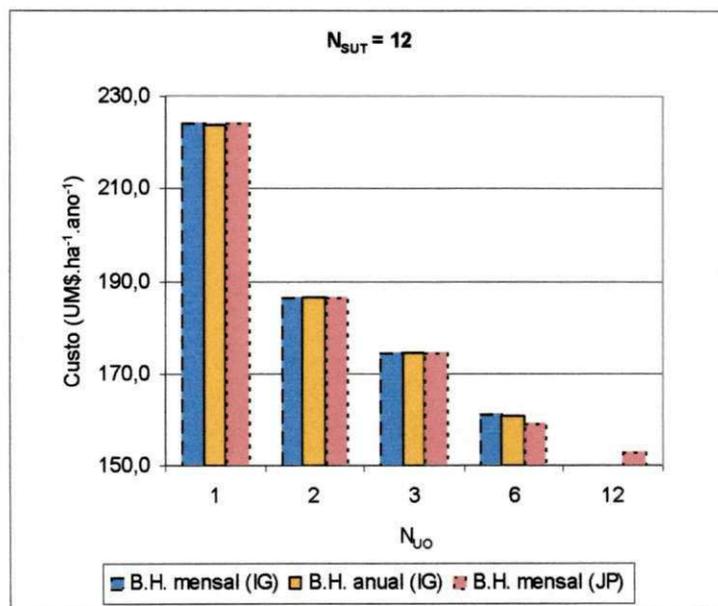


Figura 4.27. Custos fixos para $N_{SUT} = 12$, considerando os balanços hídricos em Iguatu (IG) e João Pessoa (JP), em função do número de unidades operacionais (N_{UO}) com uma tarifa diária.

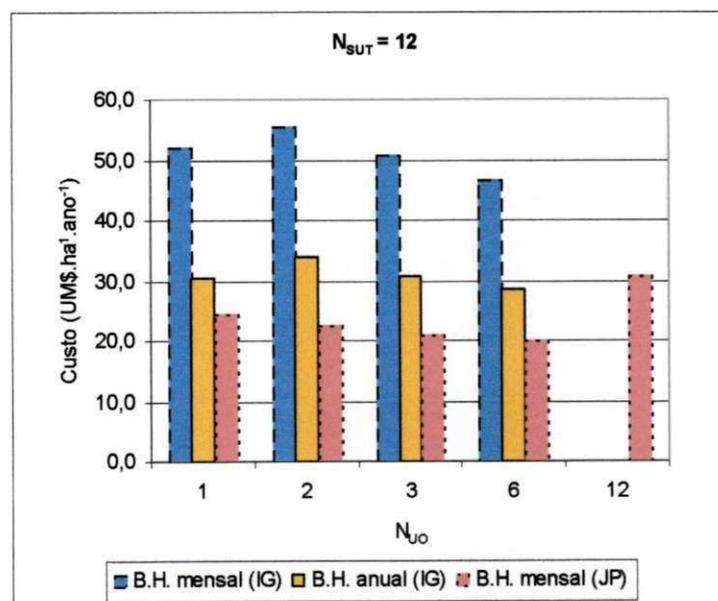


Figura 4.28. Custos operacionais para $N_{SUT} = 12$, considerando os balanços hídricos em Iguatu (IG) e João Pessoa (JP), em função do número de unidades operacionais (N_{UO}) com uma tarifa diária.

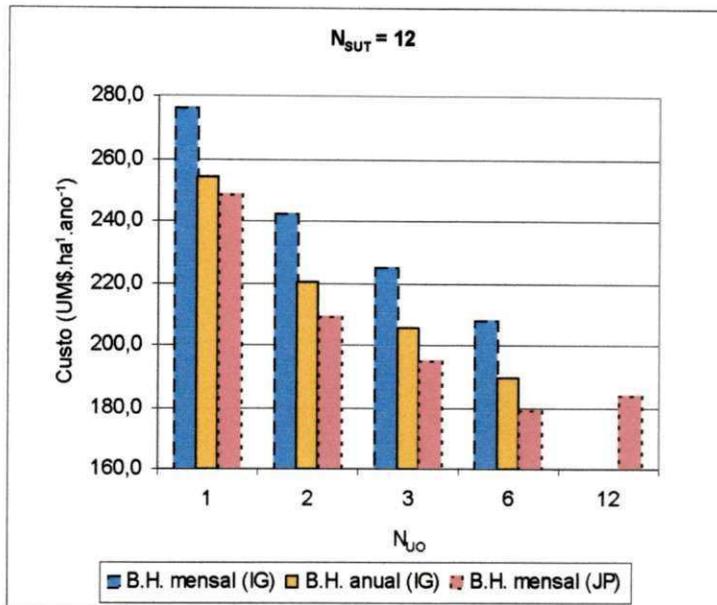


Figura 4.29. Custos totais para $N_{SUT} = 12$, considerando os balanços hídricos em Iguatu (IG) e João Pessoa (JP), em função do número de unidades operacionais (N_{UO}) com uma tarifa diária.

Comparando-se os custos totais ótimos mínimos com o balanço hídrico mensal em Iguatu, para uma e duas tarifas diárias de energia, encontraram-se aumentos de 13,0, 12,7, 8,2, 12,9 e 9,9% para $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20 , respectivamente. Enquanto os custos operacionais aumentaram 107,4, 104,6, 51,4, 102,4 e 61,3%, respectivamente.

O menor custo total com duas tarifas e balanço hídrico mensal em Iguatu foi obtido para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UO} = 4$ (UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹189,0), enquanto que para uma tarifa foi obtido menor custo com $N_{SUT} = 12$ e $N_{UO} = 6$ (UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹207,8) (Tabela A17).

Com uma tarifa diária, em João Pessoa, verificaram-se aumentos nos custos totais ótimos de 8,0, 4,3, 5,3, 4,3 e 6,9% para $N_{SUT} = 4, 8, 12, 16$ e 20 , respectivamente. Já os custos operacionais aumentaram 166,2, 58,2, 68,6, 45,2 e 110,2%, respectivamente. Constatou-se, portanto, que quando o requerimento hídrico anual diminui, as diferenças de custos do sistema, operando com uma ou com duas tarifas, tendem também a reduzir. Assim, a operação com duas tarifas diárias seria mais importante e mais justificável em regiões de elevados déficits hídricos, como a localidade de Iguatu.

Os custos mínimos em João Pessoa com uma e duas tarifas foram obtidos para $N_{SUT} = 16$ e $N_{UO} = 8$, respectivamente UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ 171,9 e UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ 164,8. Na Figura 4.30 visualiza-se o efeito das tarifas de energia nos custos totais do sistema com $N_{SUT} = 12$. Da mesma forma que em outras análises não se verificaram diferenças no dimensionamento hidráulico do sistema de irrigação com uma e duas tarifas diárias.

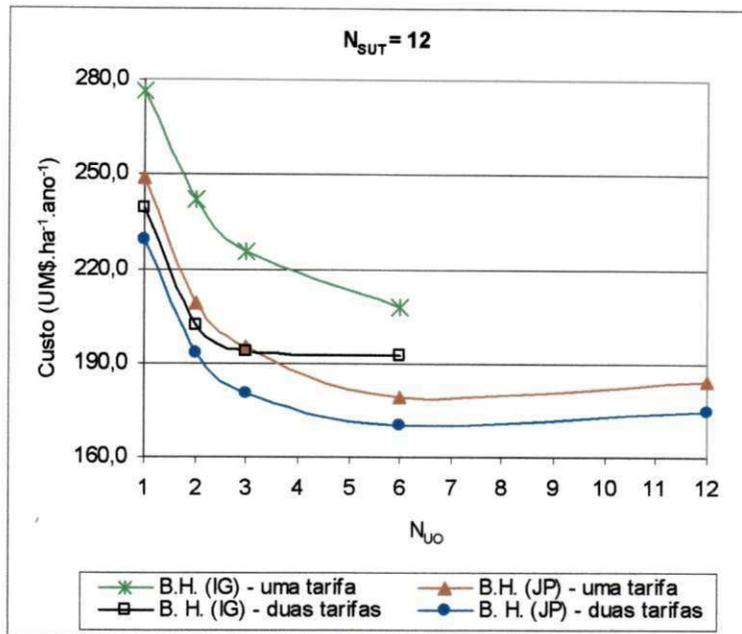


Figura 4.30. Custos totais do sistema para $N_{SUT} = 12$, considerando o balanço hídrico mensal em Iguatu (IG) e João Pessoa (JP), com uma e duas tarifas diárias de energia, em função do número de unidades operacionais (N_{UO}).

A principal implicação no dimensionamento e operação do sistema, considerando-se o balanço hídrico em João Pessoa, é a constatação de que em regiões com elevados índices de precipitação, como a litorânea, associada a sua evapotranspiração de referência, as necessidades hídricas da cultura são inferiores, em todos os meses do ano, às necessidades hídricas de regiões semi-áridas, o que pode permitir um maior número de unidades operacionais. Quanto maior o número de unidades operacionais, menores os custos fixos do sistema, que são os principais responsáveis pelos custos totais. Considerando-se que a demanda hídrica anual é inferior a de uma região semi-árida, os custos operacionais, que dependem do requerimento hídrico bruto anual, poderão não se elevar com um maior número de unidades operacionais ou maior tempo de irrigação diário, ao nível de tornar os custos totais desfavoráveis comparativamente. Nessas regiões, a prática de estresse hídrico, quando bem programada, pode reduzir o tempo de irrigação total anual e promover o uso de um maior número de unidades operacionais, otimizando os custos do sistema.

A determinação do máximo requerimento hídrico da cultura (Eq. 3.5), considerando apenas a máxima evapotranspiração da cultura (ETc_{max}), ou seja, sem considerar o balanço hídrico, levaria a um número máximo de unidades operacionais de oito ($N_{UO} = 8$) e não doze ($N_{UO} = 12$), como obtido com o balanço mensal. No entanto, isso não seria problema, no caso em estudo, uma vez que a solução de menor custo total foi obtida com ($N_{SUT} = 16$, $N_{UO} = 8$). Porém, evidencia que, dependendo da configuração do sistema, a determinação do consumo

da planta, através do balanço hídrico mensal, pode resultar em dimensionamento mais econômico.

4.4. Aplicação do modelo para áreas com desníveis

Os sistemas de irrigação pressurizados projetados para áreas com desníveis apresentam, normalmente, maiores custos de investimento e de operação. Nessas áreas o principal problema hidráulico está relacionado à obtenção de uniformidade de distribuição d'água desejada, que tem implicações diretas na eficiência de irrigação. A topografia dessas áreas provoca maiores variações de pressão e, portanto, maiores variações na vazão dos emissores, quando os mesmos não são autocompensantes, principalmente. As soluções hidráulicas mais aplicáveis para solução do problema hidráulico das variações de pressões nas sub-unidades são: o uso de diferentes diâmetros nas tubulações ascendentes e descendentes de mesmo comprimento como meio de dissipação de energia e equilíbrio de pressões; o uso de tubulações ascendentes e descendentes com o mesmo diâmetro, mas com comprimentos diferentes; e o uso de emissores autocompensantes.

Em áreas com certos graus de desníveis a obtenção de uniformidades de aplicação d'água de 90%, recomendável em sistemas de microirrigação, é praticamente inviável economicamente. Assim, para áreas com declives uniformes, superiores a 2%, um dos critérios adotados é o dimensionamento da sub-unidade com uma uniformidade de aplicação mínima de 85% (Keller & Bliesner, 1990).

Para verificação da aplicabilidade do modelo desenvolvido nesse estudo em áreas com desníveis uniformes, tomou-se como estudo de caso o sistema com oito sub-unidades ($N_{SUT} = 8$), uma vez que foi a opção de projeto com maior número de relações comprimento/largura da área (L_X/L_Y), e a operação do sistema com quatro unidades operacionais ($N_{UO} = 4$), que apresentou custo mínimo, considerando-se o balanço hídrico anual. Foi aplicado o mesmo desnível de 3% nas direções de L_X e L_Y da área. Com desnível nas duas direções todas as sub-unidades tiveram linhas laterais ascendentes e descendentes com linhas de derivação ascendentes ou descendentes.

A situação hidráulica desejada para sub-unidades em áreas com desníveis seria um perfeito equilíbrio nas variações de pressões nas linhas laterais e de derivação, ou seja, que as variações de pressões nas tubulações ascendentes e descendentes apresentassem igual magnitude. Entretanto, mesmo obtendo-se esse equilíbrio, as áreas ascendentes trabalhariam

com pressões diferentes das áreas descendentes e, haveria assim, variação na uniformidade de aplicação global.

Na aplicação desse modelo as tubulações ascendentes e descendentes tiveram o mesmo comprimento e o dimensionamento buscou a redução de diâmetros, promovendo o equilíbrio de pressões, atendendo às restrições de velocidade e de variações de pressões admissíveis para que fosse obtida a uniformidade de aplicação mínima desejada de 85%, com custo total mínimo.

Em função das diferentes relações L_X/L_Y foram obtidos diferentes desníveis totais nas sub-unidades, isto é, para as linhas laterais e de derivação (Tabela 4.53).

Tabela 4.53. Diferenças de níveis nas sub-unidades em função da relação L_X/L_Y da área, com $N_{SUT} = 8$.

L_X/L_Y	0,98		1,30		1,50		1,73		2,45	
$\Delta_{Tubulação}$ (m)	Δ_L	Δ_D								
	2,16	8,82	2,52	7,74	2,70	7,20	2,88	6,66	3,42	5,58
Δ_{Sub} (m)	10,98		10,26		9,90		9,54		9,00	

Δ_L - desnível na linha lateral.

Δ_D - desnível na linha de derivação.

Δ_{Sub} - desnível total na sub-unidade.

Os custos fixos e operacionais aumentaram com relação ao sistema em nível e, conseqüentemente, os custos totais. Em média os custos fixos aumentaram cerca de 1,6% e os operacionais 36,8%, para duas tarifas diárias. Com isso, o custo total aumentou cerca de 4,5%. Com uma tarifa diária os aumentos médios nos custos fixos e operacionais foram de 1,8 e 75,9%, respectivamente. O que elevou o custo total em 12,9%. Os custos totais mínimo e máximo para duas tarifas diárias foram, respectivamente, de 192,6 UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ ($L_X/L_Y = 1,5$) e 199,2 UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ ($L_X/L_Y = 2,45$), uma variação de 3,4%. Enquanto, com uma tarifa diária foram obtidos custos totais, mínimo e máximo, de 224,9 UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ ($L_X/L_Y = 1,3$) e 228,6 UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹ ($L_X/L_Y = 1,73$), respectivamente (Tabela A19).

Para que fosse obtida a uniformidade de aplicação de 85% foi necessária uma pressão média de operação na sub-unidade de 25,2 m, permitindo maiores variações de pressão e o dimensionamento das áreas ascendentes. Nas sub-unidades ascendentes praticamente toda variação de pressão admissível foi utilizada (Tabela 4.54). Porém, nas sub-unidades descendentes ocorreram variações de pressões inferiores às admissíveis, implicando em maiores uniformidades de aplicação, superiores a 85%, elevando o custo do sistema. Isso se verificou devido aos diâmetros adotados nas linhas laterais e de derivação. Como a energia

nos trechos descendentes não foi dissipada adequadamente, poder-se-ia reduzir ainda mais os diâmetros das tubulações e os custos totais do sistema. Ressaltando-se, que os diâmetros comerciais nem sempre permitirão o equilíbrio desejado para esse tipo de situação em estudo, onde os comprimentos das tubulações ascendentes e descendentes são iguais. Os custos operacionais não seriam afetados uma vez que o sistema foi dimensionado para situação mais desfavorável hidráulicamente, ou seja, as sub-unidades nos pontos mais elevados da área.

Tabela 4.54. Características hidráulicas do dimensionamento do sistema em desnível com $N_{SUT} = 8$.

L_X/L_Y	h	h_{adm}	h_{aa}	h_{ad}	h_{da}	h_{dd}	P_{OT}^*	P_{OT}^{**}	T_T
0,98	26,0	16,50	16,50	16,04	5,32	1,00	37,2	1,10	1250,4
1,30	26,2	16,62	16,68	16,60	9,68	4,64	39,4	1,14	1247,0
1,50	26,4	16,75	16,85	16,44	12,34	6,94	40,1	1,16	1243,3
1,73	26,8	16,97	16,94	17,64	15,08	9,32	40,6	1,19	1237,2
2,45	20,8	13,15	13,17	9,86	7,40	0,56	32,2	0,95	1362,1

h - pressão de serviço do emissor, m.

h_{adm} - variação de pressão admissível na sub-unidade, m.

h_{aa} - variação de pressão na sub-unidade com linha de derivação e linhas laterais ascendentes, m.

h_{ad} - variação de pressão na sub-unidade com linha de derivação ascendente e linhas laterais descendentes, m.

h_{da} - variação de pressão na sub-unidade com linha de derivação descendente e linhas laterais ascendentes, m.

h_{dd} - variação de pressão na sub-unidade com linha de derivação e linhas laterais descendentes, m.

P_{OT}^* - potência requerida, kW.

P_{OT}^{**} - potência requerida, kW.ha⁻¹.

T_T - Tempo total de irrigação anual, h.

Verificou-se que o desnível na lateral aumentou com L_X/L_Y , o que provocou elevação da pressão ótima e da potência consumida. Porém, não houve variações significativas nas pressões ótimas, com exceção de $L_X/L_Y = 2,45$. Nesse caso, o maior desnível das laterais exigiu o aumento do diâmetro das linhas laterais para que fosse obtida solução. Com isso, a pressão ótima reduziu (20,8 m) uma vez que as perdas de carga nas laterais também reduziram e, portanto, as variações de pressão na sub-unidade.

Nas sub-unidades com linhas de derivação ascendentes o modelo ajustou adequadamente as variações de pressões nas linhas laterais ascendentes e descendentes. Mas, nas linhas de derivação descendentes as variações de pressões poderiam ser superiores às obtidas. Para correção desse problema tanto as linhas de derivação como as linhas laterais deveriam ter menores diâmetros. Como o modelo permite a identificação dos diâmetros das tubulações nas quatro situações de variações de pressões analisadas, pode-se ajustar novos

diâmetros com seus respectivos custos. Na Tabela 4.55 tem-se a caracterização das redes nas sub-unidades ascendentes e descendentes.

Tabela 4.55. Número de emissores e de saídas em cada trecho de tubulação lateral e de derivação para as sub-unidades ascendentes e descendentes.

L_X/L_Y	N_{e1}	N_{e2}	N_{e3}	N_{e4}	N_{e5}	N_{e6}	N_{e7}	N_{e8}	N_{s1}	N_{s2}	N_{s3}	N_{s4}
0,98	8	4	1	11	1	11	1	11	29	20	7	42
	$D_{L1} = 0,017$ m				$D_{L2} = 0,0132$ m				$D_{D1} = 0,1198$ m $D_{D2} = 0,0974$ m			
1,30	10	4	2	12	1	13	1	13	26	17	7	36
	$D_{L1} = 0,017$ m				$D_{L2} = 0,0132$ m				$D_{D1} = 0,1198$ m $D_{D2} = 0,0974$ m			
1,50	11	4	3	12	1	14	1	14	24	16	6	34
	$D_{L1} = 0,017$ m				$D_{L2} = 0,0132$ m				$D_{D1} = 0,1198$ m $D_{D2} = 0,0974$ m			
1,73	13	3	3	13	1	15	1	15	22	15	6	31
	$D_{L1} = 0,017$ m				$D_{L2} = 0,0132$ m				$D_{D1} = 0,1198$ m $D_{D2} = 0,0974$ m			
2,45	13	6	1	18	1	18	1	18	18	13	2	29
	$D_{L1} = 0,0212$ m				$D_{L2} = 0,017$ m				$D_{D1} = 0,1198$ m $D_{D2} = 0,0974$ m			

N_e - número de emissores por trecho de lateral (os índices de 1 a 4 para derivação ascendente e de 5 a 8 para derivação descendente; sendo 1, 2, 5 e 6 laterais ascendentes; 3, 4, 7 e 8 laterais descendentes).

N_s - número de saídas na derivação (os índices 1 e 2 para derivação ascendente, 3 e 4 para derivação descendente).

4.5. Dimensionamento do sistema de irrigação sem considerar o custo de energia

O modelo foi aplicado no dimensionamento do sistema nas operações (N_{UO}) que levaram ao menor custo total e menor relação L_X/L_Y , obtidas na primeira etapa com balanço hídrico anual. Desse modo, foram dimensionados os sistemas com $N_{SUT} = 4$ ($L_X/L_Y = 0,98$ e $N_{UO} = 4$), $N_{SUT} = 8$ ($L_X/L_Y = 0,98$ e $N_{UO} = 4$), $N_{SUT} = 12$ ($L_X/L_Y = 0,98$ e $N_{UO} = 6$), $N_{SUT} = 16$ ($L_X/L_Y = 1,3$ e $N_{UO} = 4$) e $N_{SUT} = 20$ ($L_X/L_Y = 2,06$ e $N_{UO} = 5$). Comparando-se os custos ótimos dos sistemas, obtidos sem o custo energético, com os custos fixos, anteriormente determinados, constatou-se que os mesmos são praticamente iguais, havendo uma redução máxima de 3,1% na condição de $N_{SUT} = 20$ ($N_{UO} = 5$) (Tabela 4.56). Alguns componentes do sistema que dependem das condições de fluxo na rede sofreram alterações importantes, tais como as tubulações em PVC e polietileno, que reduziram seus custos, e o sistema de bombeamento que elevou seu custo. A redução dos custos com as tubulações levou a maiores alturas manométricas e conseqüentemente ao aumento da potência requerida, o que promoveu o aumento do custo do sistema de bombeamento. As pressões de operação do emissor e as

uniformidades de emissão foram as mesmas obtidas considerando a energia, isto é, 15,0 m e 90,0%. Esses dois fatores associados à combinação de custos opostos foram os principais responsáveis pela manutenção dos custos fixos próximos aos do sistema dimensionado considerando o custo operacional. É importante observar que, embora os custos fixos não tenham resultado em diferenças de maior relevância, o dimensionamento sem considerar o custo energético é ineficiente, pois gerou potências requeridas superiores em até 40,1%, o que implicará em maiores custos energéticos e totais. Uma outra constatação é que o custo mínimo, sem considerar a energia consumida, seria obtido com um maior número de unidades operacionais (N_{UO}), já que reduz os custos fixos. Porém foi verificado, anteriormente, que isso não ocorre quando são levados a efeito os custos operacionais.

Tabela 4.56. Comparação entre os dimensionamentos do sistema, com e sem o custo operacional.

N_{sut}	N_{UO}	Com o custo operacional						Sem o custo operacional					
		h (m)	P_{OT} (kW)	C_{PVC} (UMS)	C_{PE} (UMS)	C_{SB} (UMS)	C_F (*)	h (m)	P_{OT} (kW)	C_{PVC} (UMS)	C_{PE} (UMS)	C_{SB} (UMS)	C_F (*)
4	4	15,0	18,3	10149,0	18628,0	1718,1	178,6	15,0	20,0	10191,0	18479,0	1846,6	178,7
8	4	15,0	17,2	11242,0	13399,0	1623,8	169,2	15,0	24,1	9622,3	13399,0	2175,2	165,9
12	6	15,0	10,9	10937,0	12101,0	1098,3	160,9	15,0	12,1	10364,0	12101,0	1198,1	160,1
16	4	15,0	17,8	11752,0	9645,8	1674,2	163,7	15,0	24,0	10689,0	9645,8	2166,4	162,0
20	5	15,0	14,9	10746,0	10458,0	1439,2	162,7	15,0	16,9	9673,7	9533,6	1601,9	157,8

custo em UMS.ha⁻¹.ano⁻¹.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pelas aplicações do modelo de otimização desenvolvido para o dimensionamento e operação de sistemas de microirrigação, pôde-se apresentar como conclusões principais deste trabalho, para o caso de sistemas do tipo microaspersão, que:

- Para uma mesma área irrigada várias relações comprimento/largura são viáveis sem que haja diferenças relevantes entre os custos totais do sistema. O formato quadrado da área tendeu a produzir o menor custo total do sistema;
- Os custos fixos são os principais representantes dos custos totais do sistema.
- A influência dos componentes do sistema nos custos fixos depende do número de sub-unidades e do número de unidades operacionais, tendo-se como principais: os emissores; a tubulação em polietileno; o sistema de tratamento d'água, a tubulação em PVC e o sistema de bombeamento.
- O custo total do sistema tende a diminuir com o aumento do número de sub-unidades em virtude da redução dos custos das mesmas. Porém, a sub-unidade de custo mínimo não garante a obtenção do custo mínimo total do sistema.
- O número de unidades operacionais teve maior efeito no custo total que o número de sub-unidades;
- O custo da sub-unidade depende do número de unidades operacionais do sistema, mas principalmente do seu tamanho e sua configuração;

- A sub-unidade de custo mínimo é aquela que utiliza toda a perda de carga disponível para uma determinada pressão de serviço;
- Os limites de perda de carga, normalmente preestabelecidos como proporções das perdas admissíveis na sub-unidade, para as linhas laterais e de derivação não garantem o dimensionamento ótimo do sistema.
- O custo total do sistema diminui com o aumento do número de unidades operacionais até o limite em que os custos operacionais não contribuam o suficiente para superar a redução dos custos fixos;
- Emissores não-autocompensantes permitem maior flexibilidade no dimensionamento e operação do sistema e, quanto menores as pressões de serviço dos mesmos e sua sensibilidade às variações de pressões, menores serão os custos operacionais;
- O modelo buscou sempre a obtenção da pressão mínima de operação, para o atendimento simultâneo da uniformidade de emissão e o do número de unidades operacionais ou tempo de irrigação diário;
- Quando são considerados os custos operacionais do sistema, uniformidades de emissão inferiores a 90% podem resultar em maiores custos totais em função da elevação da pressão de serviço, que afeta tanto os custos fixos como os operacionais;
- O dimensionamento e a operação de sistemas de microirrigação com base nas tarifas diferenciadas de energia são mais viáveis economicamente;
- O dimensionamento da rede hidráulica do sistema não sofreu alterações quando realizado com uma ou duas tarifas de energia diárias;
- Não é viável economicamente a elevação da pressão de serviço para que o sistema trabalhe 100% do tempo na tarifa de menor custo;
- O balanço hídrico anual subestima a demanda hídrica necessária à irrigação, com relação ao balanço hídrico mensal em regiões semi-áridas. Isso promove variações nos custos operacionais, porém os custos fixos têm variações desprezíveis. Logo, o dimensionamento do sistema não é afetado;

- Em regiões mais úmidas o número de unidades operacionais pode ser acrescido em virtude da menor necessidade hídrica diária da cultura, propiciando menores custos fixos do sistema e menores custos totais, dependendo da demanda total anual.
- Para um mesmo número de unidades operacionais não há diferenças relevantes no dimensionamento dos sistemas de microirrigação em regiões semi-áridas e úmidas;
- O dimensionamento do sistema sem considerar os custos com energia leva a projetos ineficientes sob os aspectos energético e econômico;
- O modelo desenvolvido pode ser empregado em áreas niveladas ou com desníveis uniformes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFARO, J. F.; MARIN V., J. *On-farm water and energy use for irrigation in Latin America*. www.unesco.org/uy/phi/libros/efficient_water/walfaro.html. 2002. 42p.

ALLEN, R. G., BROCKWAY, C. E. Concepts for energy-efficient irrigation system design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 110, n. 2, p. 99-106. 1984.

ALZAMORA, F. M., TÁRREGA, F. S. Dimensionado económico de tuberías de presión. In: *Curso de ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua*. Madrid. 1987. 56p.

ALVES, R. Quanto custa a água, um bem maior e finito? *Irrigação & Tecnologia Moderna – ITEM*. Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. ABID. n. 48. p. 42. 2000.

ANWAR, A. A. Factor G for pipelines with equally spaced multiple outlets and outflow. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. v. 125. n. 1. p. 34-38. 1999a.

ANWAR, A. A. Adjusted factor G_a for pipelines with multiple outlets and outflow. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. v. 125. n. 6. p. 355-359. 1999b.

ANWAR, A. A. Inlet pressure for horizontal tapered laterals. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. v. 126. n. 1. p. 57-63. 2000.

ASAE. *American Society of Agricultural Engineers*. St. Joseph, Michigan. 659p. 1988.

BACK, A. J. *Determinação da precipitação efetiva para irrigação suplementar pelo balanço hídrico horário: Um caso-estudo em Urussanga, SC*. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 1997. 132p. Tese (Doutorado).

BNB - Banco do Nordeste do Brasil. *Irrigação, o grande negócio do Nordeste. Assessoria de Comunicação Social – ASCOM*. p. 8. 2002.

BARBOSA, P. S. F., COSTA, A. A. SANTOS JR., J. B. S. Um algoritmo de programação linear para análise de redes hidráulicas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 4, n. 4. p. 75- 84. 1999.

BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 5. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989. 586p.

BERNARDO, S. HILL, R. W. Um modelo para determinação de irrigação suplementar. *Revista Ceres*, v. 25, n. 140. p. 245-262. 1978.

BOGGS, P. T., TOLLE, J. W. Sequential quadratic programming for large-scale nonlinear optimization. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. v. 124. p. 123-137. 2000.

BOMAN, B. J. PARSONS, M. L. Considerations for component selection in microsprinkler systems. In: *Microirrigation for a changing world. Conserving resources preserving the environment. Proceedings of the fifth international microirrigation congress*. ASAE. Orlando, Florida, p. 701-707. 1995.

BRALTS, V. F.; SEGERLIND, L. J. Finite element analysis of drip irrigation submain units. *Transactions of the ASAE*, v. 28, n. 3, p. 809-814. 1985.

BRALTS, V. F.; KELLY, S. F.; SHAYYA, W. H.; SEGERLIND, L. J. Finite element analysis of microirrigation hydraulics using a virtual emitter system. *Transactions of the ASAE*, v. 36, n. 3, p. 717-725. 1993.

BRITO, R. A. L. Avaliação de um perímetro irrigado – Proposta para um modelo conceitual. In: *Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 7*. Brasília. Anais. *Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem*. ABID. p. 749-777. 1986.

CARVALHO, J. A.; BRAGA JÚNIOR, R. A.; REIS, J. B. R. S. Análises de custos na escolha do tipo de motor para acionamento de bombas em áreas irrigadas. *Ciência Agrotécnica*, v. 24, n.2, p. 434-440. 2000.

CASTRO, R. *Distribuição probabilística de frequências de precipitação na região de Botucatu - SP*. Botucatu. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrônomicas. 1994. 101p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).

CIRILO, J. A. Programação não linear aplicada a recursos hídricos. In: *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Organizador: Rubem Laina Porto. Editora da Universidade. UFRGS. ABRH. Porto Alegre. p. 305-359. 1997.

CHRISTIANSEN, J. E. Irrigation by sprinkling. *Agricultural Experiment Station*. University of California. Bulletin n. 670. 1942.124p.

CRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. *Irrigação & Tecnologia Moderna – ITEM*. Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. ABID. n. 49, p. 8-13. 2001.

DANDY, G. C., HASSANLI, A. M. Optimum design and operation of multiple subunit drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 122, n. 5, p. 265-275. 1996.

DOOREMBOS, J., PRUITT, W. O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Roma: FAO. 144p. 1977. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DORFMAN, R. *Planning of irrigation system under condition of scarce data*. Haifa: Technion Israel Institute of Technology. 1985. 114p. Thesis.

EMBRAPA. *Manga*. www.cnpmf.embrapa.br/manga.html. 2002. 11p.

ENGLISH, M. J., HORNER, G. L., ORLOB, G. T., ERPENBECK, J., MOEHLMAN, M., CUENCA, R.H., DUDEK, D. J. A regional assessment of the economic and environmental benefits of an irrigation scheduling service. *EPA Report 600/2-80-063*. 1980. 114p.

ENGLISH, M. J., NUSS, G. S. Design for deficit irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, v. 108, n. IR2, p. 91-106. 1982.

FAO. *La conservación de las tierras en América Latina*. www.fao.org/ag/esp/revistas/spot4.htm. 1998.

FERNÁNDEZ, J. B. *Diseño hidráulico en instalaciones de riego a presión (Aspersión y goteo)*. XI CONIRD (Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem). Campinas. SP. 1996. 111p.

FORMIGA, K. T. M. *Metodologia de otimização de redes malhadas através da programação não linear*. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande. 1999. 158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental).

FREIRE, G.; PONTES, A. Racionamento de energia ameaça as exportações de frutas do Nordeste. *Gazeta do Nordeste: Gazeta Mercantil*, n. 780, p. 1. 2001.

FUJIWARA, O., DEY, D. Method for optimal design of branched networks on flat terrain. *Journal of Environmental Engineering*, v. 114, n. 6, p. 1464-1475. 1988.

GEORGE, B. A., REDDY, B. R. S., RAGHUWANSHI, N. S., WALLENDER, W. W. Decision support system for estimating reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 128, n. 1, p. 1-10. 2002.

GESSLER, J. Pipe network optimization by enumeration. *Proc. Computer Applications for Water Resources*, ASCE. New York. p. 572-581. 1985.

GILLESPIE, V. A. PHILLIPS, A. L. WU, I. P. Drip irrigation design equations. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, v. 105, n. 3, p. 247-257. 1979.

GOHRING, T. R., WALLENDER, W. W. Economics of sprinkler irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, v. 30, n. 4, p. 1083-1089. 1987.

GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Co. Reading Massachusetts, USA. 1989.

GOMES, H. P. *Engenharia de irrigação: hidráulica de sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento*. 3 ed. Campina Grande. Universidade Federal da Paraíba. 1999. 412p.

GRANADOS, A. *Infraestructuras de regadíos – Redes colectivas de riego a presión*. Servicio de Publicación de la E.T.S.I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid. 1990.

GUIMARÃES Jr. J. A. *Dimensionamento econômico de uma parcela de irrigação por gotejamento*. Campina Grande (PB). Universidade Federal da Paraíba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 1993. 158p.

GUIMARÃES Jr. J. A. *Projeto otimizado de sistemas de irrigação localizada: nova concepção*. São Carlos (SP). Escola de Engenharia de São Carlos. Tese (Doutorado). 1998. 177p.

GUPTA, Linear programming analysis of a water supply system. *Transactions of the ASCE*, v. 1, n. 1, p. 56-61. 1969.

HAGAN, R. M., STEWART, J. I. Water deficits – Irrigation design and programming. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, v. 98, n. 2, p. 215-237. 1972.

HATHOOT, H. M.; AL-AMOUD, A. I. Analysis and design of trickle irrigation laterals. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, v. 119, n. 5, p. 756-767. 1993.

HILL, R. W., KELLER, J. Irrigation system selection for maximum crop profit. *Transactions of the ASAE*, v. 23, n. 2, p. 366-372. 1980.

HOLZAPFEL, E. A., MARIÑO, M. A., VALENZUELA, A. Drip irrigation nonlinear optimization model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 116, n. 4, p. 479-496. 1990.

HOWELL, T. A., HILER, E. A. Design trickle irrigation laterals for uniformity. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE. 1974. v. 100, n. 4, p. 443-454.

KANG, Y., NISHIYAMA, S. Analysis and design of microirrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 122, n. 2, p. 75-82. 1996a.

KANG, Y., NISHIYAMA, S. Design of microirrigation submain units. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 122, n. 2, p. 83-89. 1996b.

KAO, C. Performance of several nonlinear programming software packages on microcomputers. *Computers and Operations Research*, v. 25, n. 10, p. 807-816. 1998.

KARMELI, D. GADISH, Y. MEYERS, S. Design of optimal water distribution network. *Journal of Pipeline Division*, ASCE. v. 94, n. 3, p. 1-10. 1968.

KARMELI, D. ORON, G. Analysis of closed conduit irrigation systems and distribution and its subdivision. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, v. 105, n. 2, p. 187-196. 1979.

KARMELI, D., PERI, G. Trickle irrigation design principles. Haifa: The Technion Students Publishing House, 1972.

KELLER, J., BLIESNER, R. D. *Sprinkle and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990. 652p.

KELLER, J., KARMELI, D. Trickle irrigation design. *Rainbird Sprinkler Manufacturing Corporation*, Glendora, California, 1975. 133p.

KOIDE, S. Equações simplificadas para a utilização da fórmula universal de perda de carga em tubulações. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 3, n. 3. p. 92-96. 1998.

KOUMANOV, K. S.; HOPMANS, J. W.; SCHWANKL, L. J. Application efficiency of microsprinkler irrigation of almond trees. *Agricultural water management*. n. 34, p. 247-263. 1997.

LAINNA, A. E. Introdução. In: *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. Organizador: Rubem Laina Porto. Editora da Universidade. UFRGS. ABRH. Porto Alegre. p. 15-41. 1997.

LI, J. Modeling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system. *Agricultural water management*. Elsevier Science. v. 38, p. 135-146. 1998.

LIMA, L. Uso racional de sistemas irrigados face aos novos desafios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, foz do Iguaçu. *Anais*. Palestra (resumo). 2001.

LIMA, L.; SILVA, E. Irrigação por gotejamento em café. *Irrigação & Tecnologia Moderna – ITEM*. Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. ABID. n. 48. p. 50-55. 2000.

LONGO, A. J., SAMPAIO, S. C. Precipitação provável na região oeste do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, Salvador. *Anais*. v. 1, p. 1242-1245. 2002.

LUCENA, K. F. M. Análise comparativa entre fatores de correção de perda de carga para tubulações com múltiplas saídas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, Salvador. *Anais*. v. 1, p. 824-827. 2002.

MANTOVANI, E. C. A irrigação do cafeeiro. *Irrigação & Tecnologia Moderna – ITEM*. Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. ABID. n. 48. p. 45-49. 2000.

MAROUELLI, W. A. *Análise de distribuição das probabilidades de chuva visando ao manejo da irrigação suplementar*. Viçosa: Universidade Federal. 1983. 127p. Dissertação (Mestrado).

MATEUS, G. R., LUNA, H. P. L. *Programação não linear*. Escola de Computação. Belo Horizonte, 1986.

MATOS, J. A. *Aplicação da programação não linear no dimensionamento de sistemas de irrigação localizada*. Botucatu (SP). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrônomicas. 2000. 89p. Tese (Doutorado em Agronomia).

- McKINNEY, D. C., LIN, M. D. Genetic Algorithm solution of groundwater management models. *Journal of Water Resources Researches*, ASCE, v. 30, n. 6, p. 1897-1906. 1994.
- MELO, J. F. Custos de irrigação por aspersão em Minas Gerais. Viçosa (MG): Universidade Federal. 1993. 147p. Dissertação (Mestrado).
- MOGHAZI, H. El-Din. M. Estimating Hazen-Williams coefficient for polyethylene pipes. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, v. 124, n. 2, p. 197-199. 1998.
- MOTA, F. S. *Meteorologia agrícola*. Ed. Nobel, 7ª ed, São Paulo. 1989, 376p.
- NEUFVILLE, R., SCHAAKE, J., STAFFORD, J. H. Systems analysis of water distribution networks. *Journal Sanitary Engineering Division*, ASCE, v. 97, n. 6, p. 825. 1971.
- OBREZA, T. A., PITTS, D. J. Deficit irrigation of microirrigated tomatoes and citrus on high water table soils. In: Microirrigation for a changing world. Conserving resources preserving the environment. *Proceedings of the fifth international microirrigation congress*. ASAE. Orlando, Florida, p. 275-280. 1995.
- OREN, T. I. Quality assurance in modeling and simulation. In: *Simulation and model base methodologies: An integrated view*, OTAN – ASI Series, n. 10, Spring-Verlag, Berlin, 1984.
- ORON, G. Technical and economical considerations in the design of close conduit irrigation systems: A case of study. *Agricultural Water Management*, v. 5, n. 1, p. 15-27. 1982.
- ORON, G., KARMELI, D. Procedure for the economical evaluation of water networks parameters. *Water Resources Bulletin*, v. 15, n. 4, p. 1-12. 1979.
- ORON, G., WALKER, W. Optimal design and operation of permanent irrigation systems. *Water Resources Research*, v. 17, n. 1, p. 11-17. 1981.
- PANDEY, A. K.; CHAUHAN, H. S.; SINGH, K. K.; SHUKLA, K. N. Distribution characteristics of microsprinklers. In: Microirrigation for a changing world. Conserving resources preserving the environment. *Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress*. ASAE. Orlando, Florida, p. 857-862. 1995.
- PEROLD, R. Economic pipe sizing in pumped irrigation system. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE v. 100, n. 4, p. 425-441. 1974.
- PITTS, D. J., FERGUSON, J. A., WRIGTH, R. E. Trickle irrigation lateral line design by computer analysis. *Transactions of the ASAE*. St. Joseph, v. 26, n. 5, p. 1320-4. 1986.
- PLANELLS, P., TARJUELO, J. M., ORTEGA, J. F., CASANOVA, M. I. Design of water distribution networks for on-demand irrigation. *Irrigation Science*, v. 20, p. 189-201. 2001.
- PLEBAN, S., SHACHAM, D., LOFTIS, J. Minimizing capital cost of multi-outlet pipelines. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 110, n. 2, p. 165-178. 1984.
- PORTO, R. L. L., AZEVEDO, L. G. T. Sistemas de suporte a decisões aplicados a problemas de recursos hídricos. In: *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*.

Organizador: Rubem Laina Porto. Editora da Universidade. UFRGS. ABRH. Porto Alegre. p. 43-95. 1997.

PROGRAMA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO – PRONI - Tempo de irrigar: manual do irrigante. São Paulo: Mater, Fundação Victor Civita. 1987. 160p.

RAMOS, M. M. *Modelagem da demanda de água para planejamento de irrigação suplementar*. São Carlos: Escola de Engenharia/USP. 1986. 170p. Tese (Doutorado).

RAWLINS, S. L. RAATS. Prospects for high frequency irrigation. *Science*, v. 188. p. 604-610. 1975.

REIS, L. F. R., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F. H. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE. v. 123. n. 6. p. 317-326. 1997.

RODRIGO, J., BONNET, F. Computer modeling and simulation of microirrigation subunits. In: *Microirrigation for a changing world. Conserving resources preserving the environment. Proceedings of the fifth international microirrigation congress*. ASAE. Orlando, Florida, p. 67-73. 1995.

RODRIGUEZ-TORAL, M. A. MORTON, W., MITCHELL, D. R. The use of new SQP methods for the optimization of utility systems. *Computers and Chemical Engineering*. v. 25, p. 287-300. 2001.

SAAD, J. C. C. *Estudo da distribuição de frequência da evapotranspiração e da precipitação pluvial para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação*. Piracicaba, 1990. 124p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz.

SAAD, J. C. C. *Otimização de sistemas de irrigação localizada utilizando programação não linear*. Piracicaba, 1993. 115p. Tese (Doutor em Agronomia: Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz.

SAAD, J. C. C., FRIZZONE, J. A. Design and management optimization of trickle irrigation systems using non-linear programming. *Journal of Agricultural Engineering Research*. Silsoe Research Institute, Silsoe, UK, v. 64, p. 109 – 118. 1996.

SAAD, J. C. C. MARIÑO, M. A. Modelos de programação linear e não linear para otimização do dimensionamento de sistemas de irrigação localizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, Salvador. *Anais*. v. 1, p. 978-981. 2002.

SAAD, J. C. C., TOMAZELA, C., PERES, G. J., PERES, F.C., FRIZZONE, J. A. Otimização da rede hidráulica de um sistema de irrigação por gotejamento usando programação linear. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 29, n. 5, p. 797-805, 1994.

SAMANI, A. Z., HARGREAVES, G. H. A crop water evaluation manual for Brazil. The International Center. *Department of Agricultural and Irrigation Engineering*. Utah State University. Logan. 1985. 87p.

SAMMIS, T. W., WU, I. P. Effect of drip irrigation design and management on crop yield. *Transactions of the ASAE*, v. 28, n. 3, p. 832-838. 1985.

SANTOS, C. W. F., GOMES, U., TOZETTO, L. J. Situação da cultura da banana no Vale do São Francisco. *Irrigação & Tecnologia Moderna – ITEM*. Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. ABID. n. 49, p. 61-63. 2001.

SARDO, V. I., GERMANÀ, C. High-frequency microirrigation for environmental control and increased water application efficiency. In: Microirrigation for a changing world. Conserving resources preserving the environment. *Proceedings of the fifth international microirrigation congress*. ASAE. Orlando, Florida, p. 806-811. 1995.

SCALOPPI, E. J. Adjusted F factor for multiple-outlet pipes. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. v. 114, n. 1. p. 169-174. 1988.

SCALOPPI, E. J.; ALLEN, R. G. Hydraulics of irrigation laterals: Comparative analysis. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. v. 119, n. 1. p. 91-115. 1993.

SEGINER, I. A note on the economic significance of uniform water application. *Irrigation Science*. v. 1, p. 19-25. 1978.

SHETE, D. T., RAUT, D. B., MODI, P. M. Economic analysis of microirrigation systems considering field shape parameters: Microirrigation for a changing world. Conserving resources preserving the environment. *Proceedings of the fifth international microirrigation congress*. ASAE. Orlando, Florida, p. 944-948. 1995.

SILVA, J. L. M. *A eficiência dos colonos na agricultura irrigada no Vale do São Francisco: uma análise comparativa dos modelos de fronteira paramétrica e não paramétrica*. Tese (Doutorado), PIMES, UFPE, Recife – PE. 1999.

SILVA, R. C. A. *Otimização de redes ramificadas através do método da programação linear*. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande. 1997. 158p. Dissertação (Mestrado).

SILVA, W. L. C., OLIVEIRA, C. A. S., MAROUELLI, W. A. Subsídios para dimensionamento de sistemas de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8, Florianópolis. *Anais*. Florianópolis: ABID, v. 1, p. 535-553. 1988.

SIMPSON, A. R., DANDY, G. C., MURPHY, L. J. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 4, p. 423-443. 1994.

SMAJSTRLA, A. G., BOGGESE, W. G., BOMAN, B. J., CLARK, G. A., HAMAN, D. Z., KNOX, G. W., LOCASCIO, T. A., OBREZA, T. A., PARSONS, L. R., RHOADS, F. M., YEAGER, T., ZAZUETA, F. S. Status and growth of microirrigation in Florida. In: Microirrigation for a changing world. Conserving resources preserving the environment. *Proceedings of the fifth international microirrigation congress*. ASAE. Orlando, Florida, p. 325-330. 1995.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). Trickle irrigation. *Water Resources Publications*. National Engineering Handbook. Section 15 – 7. 1984. 129p.

SOLOMON, K. H. Global uniformity of trickle irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, v. 24, n. 1, p. 77-78. 1985.

SOUZA, G. H. F. *Indicadores de desempenho para avaliação de perímetros irrigados: o caso do Distrito de Irrigação Senador Nilo Coelho*. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande. 1999. 61p. Dissertação (Mestrado).

SU, D., TIAN, Y., GAO, Q., CHANG, L. Microirrigation submain unit with pressure reducing pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 128, n. 1, p. 43-48. 2002.

TEIXEIRA, A. H. C. Uso de estações meteorológicas automáticas no manejo de irrigação de fruteiras. *Irrigação & Tecnologia Moderna – ITEM*. ABID. n. 51, p. 22-26. 2001.

THORNTWAITE, C. W., MATHER, J. R. The water balance. *Laboratory of climatology*, Centerton, New Jersey. 1955.

TSUTIYA, M. T. *Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água*. 1ª. ed. São Paulo. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES. 2001. 185p.

VALIANTZAS, J. D. Analytical approach for direct drip lateral hydraulic calculation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 124, n. 6, p. 300-305. 1998.

VALIANTZAS, J. D. Continuous outflow variation along irrigation laterals: Effect of the number of outlets. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 128, n. 1, p. 34-42. 2002.

VALLESQUINO, P., LUQUE-ESCAMILLA, P. L. New algorithm for hydraulic calculation in irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 127, n. 4, p. 254-260. 2001.

VENTSEL, E. S. *Investigation de operaciones: problemas, principios e metodologia*. Russia: Mir Moscú. 1983.

VIANA, T. V. A., MOREIRA, L. G., ANDRADE JUNIOR, A. S., COSTA, S. C. Valores recomendáveis de precipitação, no período chuvoso, para uso em projetos de irrigação no município de Russas, CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, Salvador. *Anais*. v. 1, p. 1195-1198. 2002.

VILAS, A. T. Maior participação no mercado externo, uma meta nacional. *Irrigação & Tecnologia Moderna – ITEM*. Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. ABID. n. 49, p. 36-39. 2001.

XIN, J. N., ZAZUETA, F. S., SMAJSTRLA, A. G., WHEATON, T. A. Real-time expert system for citrus microirrigation management. In: Microirrigation for a changing world. Conserving resources preserving the environment. *Proceedings of the fifth international microirrigation congress*. ASAE. Orlando, Florida, p. 787-791. 1995.

WALSKI, T. M. The wrong paradigm – Why water distribution optimization doesn't work. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 4, p. 203 - 205. 2001.

WU, I. P. A simple optimal microirrigation scheduling. In: Microirrigation for a changing world. Conserving resources preserving the environment. *Proceedings of the fifth international microirrigation congress*. ASAE. Orlando, Florida, p. 781-786. 1995.

WU, I. P.; GITLIN, H. M. Energy gradient for drip irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, ASCE. v. 101, n. 4, p. 323-326. 1975.

WU, I. P., YUE, R. Drip lateral design using gradient line approach. *Transactions of the ASAE*, v. 36, n. 2, p. 389-394. 1993.

ANEXOS

Tabela A1. Custos do sistema com $N_{SUR} = 4$, para diferentes relações L_x/L_y da área irrigada, em função de N_{UO} .

N_{UO}	Tarifa	L_x/L_y 0,98			L_x/L_y 1,26			L_x/L_y 1,50			Custos médios		
		CF	COP	CT	CF	COP	CT	CF	COP	CT	CF	COP	CT
1	T_2	232,6	8,4	241,0	242,6	9,4	252,0	236,2	8,4	244,6	237,1	8,7	245,9
	T_1	232,0	31,1	263,1	242,0	34,7	276,7	235,6	31,3	266,9	236,5	32,4	268,9
2	T_2	199,6	9,2	208,8	204,9	10,5	215,4	201,1	9,5	210,6	201,9	9,7	211,6
	T_1	199,0	34,2	233,2	204,1	39,8	243,9	201,5	35,0	236,5	201,5	36,3	237,9
4	T_2	180,0	16,1	196,2	184,1	17,3	201,4	185,7	16,4	202,1	183,3	16,6	199,9
	T_1	178,6	32,1	210,7	184,4	35,7	220,1	181,8	34,5	216,3	181,6	34,1	215,7

L_x/L_y - relação entre o comprimento e a largura da área irrigada.

AI - área irrigada, m^2 .

T_2 - custos para operação com duas tarifas de energia diárias.

T_1 - custos para operação com um tarifa de energia diária.

CF - custos fixos do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

COP - custos operacionais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

CT - custos totais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

ha = 10000 m^2

N_{SUR} - número de sub-unidades total.

N_{UO} - número de unidades operacionais.

Tabela A2. Custo das sub-unidades ($UM\$.ha^{-1}$) para o sistema com $N_{SUR} = 4$, em função do N_{UO} .

N_{UO}	Custos com duas tarifas				médio	Custos com uma tarifa			
	L_x/L_y			médio		L_x/L_y			médio
	0,98	1,26	1,5			0,98	1,26	1,5	
1	754,7	797,6	799,3	783,9	754,7	797,6	799,3	783,9	
2	779,0	793,7	799,3	790,7	779,0	785,8	809,3	791,4	
4	769,1	783,9	830,3	794,4	761,4	797,6	800,6	786,5	
médio	767,6	791,7	809,6	789,7	765,0	793,7	803,1	787,3	

Tabela A3. Custos do sistema com $N_{SUT} = 8$, para diferentes relações L_x/L_y da área irrigada, em função de N_{UO} .

N_{UO}	Tarifa	L_x/L_y 0,98			L_x/L_y 1,3			L_x/L_y 1,50			L_x/L_y 1,73			L_x/L_y 2,45			Custos médios		
		AI 338688			AI 346752			AI 345600			AI 340992			AI 339264					
		CF	COP	CT	CF	COP	CT	CF	COP	CT	CF	COP	CT	CF	COP	CT	CF	COP	CT
1	T_2	224,4	8,3	232,7	224,3	8,3	232,6	225,1	8,3	233,4	227,4	8,3	235,7	229,9	8,3	238,2	228,2	8,3	234,5
	T_1	223,8	30,7	254,5	223,7	30,7	254,4	224,5	30,7	255,2	226,8	30,6	257,4	228,3	30,6	259,9	225,6	30,6	256,3
2	T_2	187,8	9,1	196,9	187,9	9,2	197,1	188,6	9,2	197,7	190,4	9,4	199,8	182,4	9,5	201,9	189,4	9,3	199,7
	T_1	187,2	33,8	221,0	187,3	34,0	221,3	187,7	34,0	221,8	190,0	33,7	223,7	191,9	33,9	225,8	188,8	33,9	222,7
4	T_2	169,2	14,9	184,0	169,1	15,6	184,8	169,9	15,0	184,9	170,7	17,3	189,0	174,0	15,0	189,0	170,8	15,6	186,1
	T_1	169,2	30,1	199,3	168,8	29,6	198,4	169,5	29,7	199,2	171,3	30,3	201,6	173,3	29,9	203,2	170,4	29,9	200,3
8	T_2	160,4	28,1	188,5	158,9	29,2	185,1	159,6	29,0	185,6	161,2	28,5	188,7	165,5	28,8	194,3	161,1	28,7	189,6
	T_1	159,7	40,0	199,8	158,4	41,3	199,7	159,1	41,2	200,3	160,6	40,6	201,1	164,8	41,0	205,8	160,5	40,8	201,3

L_x/L_y - relação entre o comprimento e a largura da área irrigada.

AI - área irrigada, m^2 .

T_2 - custos para operação com duas tarifas de energia diárias.

T_1 - custos para operação com uma tarifa de energia diária.

CF - custos fixos do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

COP - custos operacionais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

CT - custos totais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

ha = 10000 m^2

Tabela A4. Custo das sub-unidades ($UM\$.ha^{-1}$) para o sistema com $N_{SUT} = 8$, em função do N_{UO} .

N_{UO}	Custos com duas tarifas						médio	Custos com uma tarifa						médio
	L_x/L_y							L_x/L_y						
	0,98	1,3	1,5	1,73	2,45			0,98	1,3	1,5	1,73	2,45		
1	622,7	629,4	634,2	649,0	659,2		638,9	622,7	629,4	634,2	649,0	659,2		638,9
2	622,7	629,4	634,2	649,0	659,2		638,9	622,7	629,4	630,8	649,0	659,2		638,2
4	622,7	631,0	632,5	645,8	659,2		638,2	631,2	629,4	634,2	649,0	659,2		640,6
8	604,8	603,7	606,4	610,5	644,8		614,0	604,8	602,0	606,4	610,5	643,1		613,4
médio	618,2	623,4	626,8	638,6	655,6		632,5	620,4	622,6	626,4	639,4	655,2		632,8

Tabela A5. Custos do sistema com $N_{SUT} = 12$, para diferentes relações L_x/L_y da área irrigada, em função de N_{UO} .

N_{UO}	Tarifa	L_x/L_y 0,98			L_x/L_y 1,26			L_x/L_y 1,50			Custos médios					
		AI	CF	COP	CT	AI	CF	COP	CT	AI	CF	COP	CT			
1	T_2	338688	223,2	8,5	231,7	334368	221,3	8,5	229,8	345600	220,1	8,7	228,8	221,5	8,6	230,1
	T_1		223,7	30,5	254,3		222,0	30,3	252,4		219,3	32,3	251,8	221,7	31,0	252,7
2	T_2		187,0	9,2	196,2		184,9	9,2	194,1		183,7	9,2	193,0	185,2	9,2	194,4
	T_1		186,5	33,8	220,4		184,7	33,2	218,0		183,4	33,8	217,2	184,9	33,6	218,5
3	T_2		174,8	10,8	185,6		172,8	10,6	183,4		171,2	10,8	182,1	173,0	10,7	183,7
	T_1		174,6	30,8	205,3		172,6	30,7	203,3		171,1	29,9	201,0	172,8	30,4	203,2
6	T_2		161,4	19,4	180,8		158,9	19,9	178,8		158,2	19,4	177,6	159,5	19,6	179,1
	T_1		160,9	28,6	189,5		158,9	28,7	187,6		158,1	28,3	186,4	159,3	28,5	187,8

L_x/L_y - relação entre o comprimento e a largura da área irrigada.

AI - área irrigada, m^2 .

T_2 - custos para operação com duas tarifas de energia diárias.

T_1 - custos para operação com um tarifa de energia diária.

CF - custos fixos do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

COP - custos operacionais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

CT - custos totais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

ha = 10000 m^2

Tabela A6. Custo das sub-unidades ($UM\$.ha^{-1}$) para o sistema com $N_{SUT} = 12$, em função do N_{UO} .

N_{UO}	Custos com duas tarifas				Custos com uma tarifa			
	L_x/L_y			médio	L_x/L_y			médio
0,98	1,26	1,5	0,98		1,26	1,5		
1	589,0	566,2	555,3	570,2	589,0	566,2	555,3	570,2
2	589,0	566,2	559,2	571,5	589,0	566,2	559,2	571,5
3	589,0	566,2	557,2	570,8	589,0	566,2	557,2	570,8
6	589,0	566,2	559,2	571,5	589,0	566,2	559,2	571,5
médio	589,0	566,2	557,7	571,0	589,0	566,2	557,7	571,0

Tabela A7. Custos do sistema com $N_{SUR} = 16$, para diferentes relações L_X/L_Y da área irrigada, em função de N_{UO} .

N_{UO}	Tarifa	L_X/L_Y 1,30			L_X/L_Y 1,73			Custos médios		
		AI	346752		AI	340992		CF	COP	CT
		CF	COP	CT	CF	COP	CT	CF	COP	CT
1	T ₂	219,2	8,5	227,7	220,6	9,0	229,5	219,9	8,7	228,6
	T ₁	220,2	30,8	251,0	220,0	33,2	253,2	220,1	32,0	252,1
2	T ₂	183,1	9,5	192,6	182,5	9,3	191,7	182,8	9,4	192,2
	T ₁	183,7	33,7	217,4	182,2	34,2	216,4	183,0	33,9	216,9
4	T ₂	163,9	15,7	179,7	162,7	18,0	180,7	163,3	16,9	180,2
	T ₁	163,7	30,5	194,1	163,0	31,1	194,1	163,3	30,8	194,1
8	T ₂	154,7	29,1	183,8	154,5	28,1	182,6	154,6	28,6	183,2
	T ₁	154,6	40,8	195,4	155,0	39,1	194,1	154,8	40,0	194,8

L_X/L_Y - relação entre o comprimento e a largura da área irrigada.

AI - área irrigada, m².

T₂ - custos para operação com duas tarifas de energia diárias.

T₁ - custos para operação com um tarifa de energia diária.

CF - custos fixos do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

COP - custos operacionais do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

CT - custos totais do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

ha = 10000 m²

Tabela A8. Custo das sub-unidades (UM\$.ha⁻¹) para o sistema com $N_{SUR} = 16$, em função do N_{UO} .

N_{UO}	Custos com duas tarifas			Custos com uma tarifa		
	L_X/L_Y	L_X/L_Y	médio	L_X/L_Y	L_X/L_Y	médio
	1,3	1,73		1,3	1,73	
1	526,5	526,3	526,4	540,0	526,3	533,2
2	529,1	518,4	523,8	540,0	518,4	529,2
4	526,5	513,2	519,9	526,5	515,8	521,2
8	521,4	498,8	510,1	518,8	505,3	512,1
médio	525,9	514,2	520,0	531,3	516,5	523,9

Tabela A9. Custos do sistema com $N_{SUR} = 20$, para diferentes relações L_x/L_y da área irrigada, em função de N_{uo} .

N_{uo}	Tarifa	L_x/L_y		2,06
		CF	COP	CT
				342720
1	T ₂	222,6	8,6	231,2
	T ₁	222,0	31,9	253,9
2	T ₂	186,7	9,6	196,4
	T ₁	183,4	36,1	219,5
5	T ₂	163,3	19,5	182,8
	T ₁	162,7	32,3	195,0

L_x/L_y - relação entre o comprimento e a largura da área irrigada.

AI - área irrigada, m².

T₂ - custos para operação com duas tarifas de energia diárias.

T₁ - custos para operação com um tarifa de energia diária.

CF - custos fixos do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

COP - custos operacionais do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

CT - custos totais do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

Tabela A10. Custo das sub-unidades para o sistema com $N_{SUR} = 20$, em função do N_{uo} .

N_{uo}	Custos com duas tarifas	Custos com uma tarifa
	L_x/L_y	L_x/L_y
	2,06	2,06
1	519,3	519,3
2	532,8	505,8
5	532,8	532,8
médio	528,3	519,3

Tabela A11. Custos do sistema (UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹) com doze sub-unidades (N_{SUT} = 12), L_x/L_y = 1,5 e tarifas de energia elevadas em 100%, em função de N_{uo}.

N _{uo}	Tarifa	CF	COP	CT
1	T ₂	221,8	16,5	238,2
	T ₁	220,5	63,8	264,2
2	T ₂	184,0	18,3	202,2
	T ₁	183,4	67,5	250,9
3	T ₂	171,5	21,2	192,8
	T ₁	171,3	62,2	233,5
6	T ₂	158,2	38,9	197,1
	T ₁	157,5	57,7	215,2

L_x/L_y - relação entre o comprimento e a largura da área irrigada.

T₂ - custos para operação com duas tarifas de energia diárias.

T₁ - custos para operação com um tarifa de energia diária.

CF - custos fixos do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

COP - custos operacionais do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

CT - custos totais do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

Tabela A12. Custos do sistema (UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹) com doze sub-unidades (N_{SUT} = 12), L_x/L_y = 1,5 e fator de recuperação do capital (FRCa) para dez anos, em função de N_{uo}.

N _{uo}	Tarifa	CF	CO	CT
1	T ₁	290,8	8,6	299,4
	T ₂	289,8	31,3	321,2
2	T ₁	242,2	9,4	251,6
	T ₂	242,0	33,8	275,8
3	T ₁	225,7	10,9	236,7
	T ₂	225,8	31,5	257,3
6	T ₁	208,2	19,8	227,8
	T ₂	207,7	29,0	236,7

Tabela A13. Balanço hídrico mensal no solo para a cidade de Iguatu (CE), com base em dados de precipitação e evapotranspiração de referência por Samani & Hargreaves (1985).

Mês	P	ET _o	R _{H_Cmed}	P- R _{H_Cmed}	Nacum.	Arm.	Var. Arm.	R _{H_Creal}	DEF	EXC
J	14	175	99,4	-85,4	-	0	0	14	85,4	0
F	50	149	84,6	-34,6	-	0	0	50	34,6	0
M	84	154	87,5	-3,5	-	0	0	84	3,5	0
A	68	135	76,7	-8,7	-	0	0	68	8,7	0
M	13	130	73,8	-60,8	-	0	0	13	60,8	0
J	0	125	71,0	-71,0	-	0	0	0	71,0	0
J	0	138	78,4	-78,4	-	0	0	0	78,4	0
A	0	160	90,9	-90,9	-	0	0	0	90,9	0
S	0	176	100,0	-100,0	-	0	0	0	100,0	0
O	0	193	109,6	-109,6	-	0	0	0	109,6	0
N	0	183	103,9	-103,9	-	0	0	0	103,9	0
D	0	182	103,4	-103,4	-	0	0	0	103,4	0
Totais	229	1900	1079,2	-850,2			0	229	850,2	0

Número de anos observados = 56 anos.

Precipitação média anual = 767 mm.

Precipitação média anual com 75% de probabilidade de ocorrência = 563 mm.

Coefficiente da cultura médio, K_c = 0,71 (cultura da manga).

Coefficiente de sombreamento, K_s = 0,80.

Capacidade de armazenamento do solo = 100 mm.

R_{H_Cmed} - requerimento hídrico médio da cultura (Eq. 3.3)

Tabela A14. Balanço hídrico mensal no solo para a cidade de João Pessoa (PB), com base em dados de precipitação e evapotranspiração de referência por Samani & Hargreaves (1985).

Mês	P	ET _o	R _{HCmed}	P- R _{HCmed}	Nacum.	Arm.	Var. Arm.	R _{HCreat}	DEF	EXC
J	31	174	98,8	-67,8	-378,6	2,3	-2,2	33,2	65,6	0,0
F	39	158	89,7	-50,7	-429,3	1,4	-0,9	39,9	49,8	0,0
M	96	175	99,4	-3,4	-432,7	1,3	0,0	96,0	3,4	0,0
A	138	155	88,0	50,0	-66,8	51,3	50,0	88,0	0,0	0,0
M	182	140	79,5	102,5	0,0	100,0	48,7	79,5	0,0	53,8
J	177	124	70,4	106,6	0,0	100,0	0,0	70,4	0,0	106,6
J	149	130	73,8	75,2	0,0	100,0	0,0	73,8	0,0	75,2
A	86	144	81,8	4,2	0,0	100,0	0,0	81,8	0,0	4,2
S	31	154	87,5	-56,5	-56,5	56,9	-43,1	74,1	13,3	0,0
O	6	168	95,4	-89,4	-145,9	23,2	-33,6	39,6	55,8	0,0
N	10	161	91,4	-81,4	-227,3	10,3	-13,0	23,0	68,5	0,0
D	12	168	95,4	-83,4	-310,8	4,5	-5,8	17,8	77,6	0,0
Totais	957	1851	1051,4	-94,4			0,0	717,3	334,1	239,7

Número de anos observados = 54 anos.

Precipitação média anual = 1717 mm.

Precipitação média anual com 75% de probabilidade de ocorrência = 1410 mm.

Coefficiente da cultura médio, K_c = 0,71 (cultura da manga).

Coefficiente de sombreamento, K_s = 0,80.

Capacidade de armazenamento do solo ≈ 100 mm.

R_{HCmed} - requerimento hídrico médio da cultura (Eq. 3.3)

Tabela A15. Custos do sistema em função de N_{sur} e N_{uo} para os balanços hídricos mensal e anual, com duas tarifas de energia diárias.

AI	N_{sur}	N_{uo}	B. H. mensal (IG)			B. H. mensal (JP)			B. H. anual (IG)		
			CF	COP	CT	CF	COP	CT	CF	COP	CT
33,8688	4	1	234,3	13,8	248,1	233,3	5,4	238,7	232,6	8,4	241,0
		2	197,9	15,4	213,2	198,5	6,0	204,5	199,6	9,2	208,8
		4	178,9	25,5	204,4	178,0	7,7	185,8	180,0	16,1	196,2
33,8688	8	1	224,4	13,6	238,0	223,4	5,9	229,3	224,4	8,3	232,7
		2	187,6	15,3	202,9	187,6	6,0	193,6	187,8	9,1	196,9
		4	169,1	23,7	192,7	168,4	6,8	175,2	169,2	14,9	184,0
		8	160,5	44,8	205,3	156,0	13,4	169,3	160,4	28,1	188,5
33,8688	12	1	225,0	14,1	239,1	223,3	5,6	228,9	223,2	8,5	231,7
		2	187,0	15,1	202,1	186,8	6,2	193,0	187,0	9,2	196,2
		3	174,7	18,7	193,4	174,8	5,6	180,3	174,8	10,8	185,6
		6	161,1	30,9	192,1	158,4	11,8	170,1	161,4	19,4	180,6
		12				153,7	20,8	174,6			
34,6752	16	1	219,4	14,7	234,1	218,7	5,8	224,5	219,2	8,5	227,7
		2	182,7	15,4	198,1	182,7	6,1	188,8	183,1	9,5	192,6
		4	164,3	24,5	189,0	163,3	7,1	170,4	163,9	15,7	179,7
		8	154,9	45,8	200,7	151,1	13,7	164,8	154,7	29,1	183,8
34,2720	20	1	223,4	14,3	237,7	224,1	5,5	229,6	222,6	8,6	231,2
		2	185,9	17,3	203,1	182,5	6,2	188,7	186,7	9,6	196,4
		5	160,9	31,0	191,9	158,0	9,8	167,8	163,3	19,5	182,8
		10				150,4	19,8	170,3			

AI - área irrigada, ha.

B. H. mensal (IG) - balanço hídrico mensal em Iguatu.

B. H. mensal (JP) - balanço hídrico mensal em João Pessoa.

B. H. anual (IG) - balanço hídrico anual em Iguatu.

CF - custos fixos do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

COP - custos operacionais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

CT - custos totais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

ha = 10000 m²

Tabela A16. Custo da sub-unidade (UM\$.ha⁻¹) em função de N_{SUR} e N_{UO}, considerando o balanço hídrico mensal em Iguatu.

N _{SUR}	Tarifas	N _{UO}						
		1	2	3	4	5	6	8
4	T ₂	771,4	761,4	-	758,1	-	-	-
	T ₁	767,0	759,5	-	756,8	-	-	-
8	T ₂	622,7	622,7	-	622,7	-	-	604,8
	T ₁	622,7	622,7	-	622,7	-	-	604,8
12	T ₂	601,7	589,0	589,0	-	-	589,0	-
	T ₁	601,7	589,0	589,0	-	-	589,0	-
16	T ₂	532,3	526,5	-	529,1	-	-	515,6
	T ₁	526,5	529,1	-	526,5	-	-	518,8
20	T ₂	525,0	525,0	-	-	511,9	-	-
	T ₁	525,0	525,0	-	-	508,6	-	-

T₂ - custos para operação com duas tarifas de energia diárias.

T₁ - custos para operação com um tarifa de energia diária.

Tabela A17. Custos do sistema em função de N_{SUT} e N_{UO} para os balanços hídricos mensal e anual, com uma tarifa de energia diária.

AI	N_{SUT}	N_{UO}	B. H. mensal (IG)			B. H. mensal (JP)			B. H. anual (IG)		
			CF	COP	CT	CF	COP	CT	CF	COP	CT
33,8688	4	1	233,2	51,1	284,3	232,7	20,0	252,7	232,0	31,1	263,1
		2	197,1	56,9	254,0	197,1	22,3	219,4	199,0	34,2	233,2
		4	178,1	52,9	231,0	180,2	20,5	200,7	178,6	32,1	210,7
33,8688	8	1	223,8	50,4	274,2	224,6	19,9	244,4	223,8	30,7	254,5
		2	187,2	55,6	242,7	187,0	22,3	209,3	187,2	33,8	221,0
		4	168,5	48,5	217,1	168,4	19,3	187,7	169,2	30,1	199,3
		8	159,9	66,6	226,5	155,4	21,2	176,6	159,7	40,0	199,8
33,8688	12	1	224,4	52,1	276,5	224,3	24,4	248,7	223,7	30,5	254,3
		2	186,6	55,6	242,2	186,5	22,5	209,0	186,5	33,8	220,4
		3	174,4	50,9	225,3	174,3	20,8	195,1	174,6	30,8	205,3
		6	161,0	46,8	207,8	159,3	19,9	179,2	160,9	28,6	189,5
		12				153,1	30,8	183,9			
34,6752	16	1	219,1	51,1	270,2	218,6	21,1	239,7	220,2	30,8	251,0
		2	182,6	56,4	239,0	182,4	22,7	205,1	183,7	33,7	217,4
		4	163,8	49,6	213,4	163,4	20,5	184,0	163,7	30,5	194,1
		8	156,0	64,9	220,9	152,0	19,9	171,9	154,6	40,8	195,4
34,2720	20	1	222,8	53,1	275,9	223,5	20,4	243,9	222,0	31,9	253,9
		2	185,2	65,5	250,8	186,3	23,0	209,3	183,4	36,1	219,5
		5	160,9	50,0	210,9	158,8	20,6	179,4	162,7	32,3	195,0
		10				150,8	29,4	180,2			

AI - área irrigada, ha.

B. H. mensal (IG) - balanço hídrico mensal em Iguatu.

B. H. mensal (JP) - balanço hídrico mensal em João Pessoa.

B. H. anual (IG) - balanço hídrico anual em Iguatu.

CF - custos fixos do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

COP - custos operacionais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

CT - custos totais do sistema, $UM\$.ha^{-1}.ano^{-1}$.

ha = 10000 m²

Tabela A18. Custo da sub-unidade (UM\$.ha⁻¹) em função de N_{SUT} e N_{UO}, considerando o balanço hídrico mensal em João Pessoa.

N _{SUT}	Tarifas	N _{UO}								
		1	2	3	4	5	6	8	10	12
4	T ₂	761,4	768,2	-	757,7	-	-	-	-	-
	T ₁	761,4	759,5	-	777,1	-	-	-	-	-
8	T ₂	622,7	622,7	-	622,7	-	-	622,7	-	-
	T ₁	632,1	622,7	-	622,7	-	-	622,7	-	-
12	T ₂	589,0	589,7	589,7	-	-	589,7	-	-	576,7
	T ₁	594,0	589,7	589,7	-	-	589,7	-	-	576,7
16	T ₂	526,5	529,1	-	526,5	-	-	529,1	-	-
	T ₁	526,5	529,1	-	529,1	-	-	540,0	-	-
20	T ₂	535,6	492,7	-	-	492,7	-	-	479,2	-
	T ₁	535,6	535,6	-	-	492,7	-	-	479,2	-

T₂ - custos para operação com duas tarifas de energia diárias.

T₁ - custos para operação com um tarifa de energia diária.

Tabela A19. Custos do sistema (UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹) com oito sub-unidades (N_{sub} = 8), quatro unidades operacionais (N_{oo}) = 4 e desnível de 3%.

L _x /L _y	AI	Tarifas	CF	CO	CT
0,98	338688	T ₂	174,5	20,5	195,1
		T ₁	174,6	51,3	225,8
1,3	346752	T ₂	171,8	21,1	192,9
		T ₁	171,7	53,2	224,9
1,5	345600	T ₂	171,1	21,4	192,6
		T ₁	171,1	54,2	225,4
1,73	340992	T ₂	171,2	21,6	192,9
		T ₁	172,8	55,8	228,6
2,45	339264	T ₂	177,4	21,8	199,2
		T ₁	177,3	48,7	226,0

L_x/L_y - relação entre o comprimento e a largura da área irrigada.

T₂ - custos para operação com duas tarifas de energia diárias.

T₁ - custos para operação com um tarifa de energia diária.

CF - custos fixos do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

CO - custos operacionais do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

CT - custos totais do sistema, UM\$.ha⁻¹.ano⁻¹.

AI - área irrigada, m².

ha = 10000 m²