OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA
UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

JOÃO CARLOS CURY SAAD
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

Tese apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz",
da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de Concentração:
Irrigação e Drenagem.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Novembro - 1993

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCLQ/USP

A111o Saad, João Carlos Curv
Otimização de sistemas de irrigação localizada
utilizando programação não-linear. Piracicaba.
1993.
114p. ilus.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Irrigação localizada - Sistema - Otimização 2.
Programação não linear I. Escola Superior de Agricultura
Luiz de Queiroz. Piracicaba

CDD 631.7

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA
UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

JOÃO CARLOS CURY SAAD

Aprovado em: 06.12.1993

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Tarlei Arriel Botrel	ESALQ/USP
Prof. Dr. José Antonio Frizzone	ESALQ/USP
Prof. Dr. Edmar José Scaloppi	FCA/UNESP
Prof. Dr. Antonio Evaldo Klar	FCA/UNESP
Prof. Dr. Fasal Hussain Chaudhry	EESC/USP

Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE
Orientador

AGRADEÇO aos meus pais,
NELSON e JANETE,
e aos meus irmãos,
JORGE ANTONIO, LUIZ HENRIQUE,
JOSÉ ROBERTO e MARTA CRISTINA,
pelo estímulo e apoio irrestritos.

DEDICO à minha querida esposa BEATRIZ,
pelo constante incentivo, pelo
incessante apoio e por tudo que
ela representa para mim.

AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO

- a DEUS, por mais esta graça ;
- ao Prof. Dr. José Antonio Frizzone, pela orientação segura, pelo incentivo e pelo privilégio de poder desfrutar de sua tão valiosa amizade ;
- à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP e à Coordenação do curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela acolhida e apoio dispensados ;
- ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela auxílio financeiro ;
- à Duratex S.A., na pessoa do Engº José Antonio Dorini, pelo total apoio e incentivo ;
- ao Prof. Dr. Antonio Evaldo Klar, que me orientou na iniciação científica e, assim, possibilitou-me o primeiro contato com a área de Irrigação e Drenagem, pela amizade e pelo constante incentivo ;
- ao Prof. Dr. Edmar José Scaloppi, pela importância fundamental que sempre teve em minha formação técnico-científica e pela grande amizade que nos une ;

- ao Prof. Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta, Coordenador do curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pelo apoio e pela confiança em mim depositada;

- aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, pela dedicação e amizade ;

- às empresas Carborundum S.A. - Sistemas de Irrigação, Figue S.A. e KSB Bombas Hidráulicas S.A., pelo fornecimento das informações técnicas e econômicas que tornaram possível este trabalho ;

- à bibliotecária Eliana M. G. Sabino pela revisão das referências bibliográficas ;

- aos colegas do curso de pós-graduação em Irrigação e Drenagem e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xix
SUMMARY	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Aspectos gerais	5
2.2. Otimização do dimensionamento	6
2.3. Utilização de técnicas de Pesquisa Operacional na otimização dos sistemas pressurizados de irrigação	9
2.3.1. Utilização da Programação Linear ..	9
2.3.2. Utilização da Programação Não-Linear	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1. Hipóteses do modelo	20
3.2. Formulação matemática do problema de maximização na programação não-linear .	24
3.3. Função-objetivo	25
3.3.1. Receita bruta	25
3.3.2. Custo de produção da laranja	28
3.3.3. Custo do sistema de irrigação	28

3.3.3.1. Relações custo do componente x dimensão característica	30
3.3.3.2. Equações de totalização dos componentes do sistema	32
3.4. Equações de perda de carga	34
3.4.1. Perda de carga nas linhas laterais	37
3.4.1.1. Perda de carga na linha lateral em aclave.....	37
3.4.1.2. Perda de carga na linha lateral em declive.....	38
3.4.2. Perda de carga na linha de derivação	39
3.4.2.1. Perda de carga na linha de derivação em aclave	39
3.4.2.2. Perda de carga na linha de derivação em declive	40
3.4.3. Perda de carga na linha secundária	40
3.4.4. Perda de carga na linha principal	41
3.4.4.1. Perda de carga na linha principal em aclave ..	41
3.4.4.2. Perda de carga na linha principal em declive	42

3.4.5. Balanço de perdas e ganhos de de carga hidráulica nas linhas em aclave e declive	42
3.5. Equações referentes aos critérios hidráulicos de dimensionamento	43
3.5.1. Dimensionamento das linhas laterais e de derivação com base na uniformidade de emissão	43
3.5.2. Dimensionamento das linhas secundária e principal com base na velocidade	46
3.6. Restrições	47
3.6.1. Restrição referente ao turno de irrigação	47
3.6.2. Restrição referente ao tempo diário disponível para irrigação	48
3.6.3. Restrição quanto à vazão disponível	48
3.6.4. Restrição que assegura pelo menos uma unidade operacional em funcionamento na linha secundária	48
3.6.5. Restrição referente à ocupação total da área disponível.	49

3.6.6. Restrição referente à produção relativa	49
3.7. Dados de entrada	49
3.8. Dados de saída	52
3.9. Valores dos dados de entrada utilizados ..	53
3.10. Parâmetros de entrada utilizados na análise de sensibilidade da função objetivo	57
3.11. Solução do modelo	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1. Resultados	61
4.2. Configuração de maior receita líquida anual versus configuração de menor receita líquida anual	63
4.3. Efeito do tamanho e do formato da área na receita líquida anual	65
4.4. Efeito da vazão do microaspersor na receita líquida anual	69
4.5. Efeito da declividade na receita líquida anual	73
4.6. Relação da uniformidade de emissão (UE) com o formato e com a declividade	76

4.7. Relação entre o número de unidades operacionais e o tamanho e o formato da área	79
4.8. Situações em que o modelo não encontrou uma solução ótima	81
4.9. Sugestões para continuidade	82
5. CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APÊNDICE 1	90
APÊNDICE 2	100
APÊNDICE 3	109

LISTA DE SÍMBOLOS

- A = área a ser irrigada, em m^2 ;
- B(X_j) = funções diferenciáveis ;
- C1 = coeficiente da regressão expressa na eq. (14) ;
- C2 = coeficiente da regressão expressa na eq. (15) ;
- C3 = coeficiente da regressão expressa na eq. (15) ;
- C4 = coeficiente da regressão expressa na eq. (16) ;
- C5 = coeficiente da regressão expressa na eq. (16) ;
- C6 = coeficiente da regressão expressa na eq. (18) ;
- C7 = coeficiente da regressão expressa na eq. (18) ;
- CE = custo unitário do emissor, em US\$;
- CEB = custo da estação de bombeamento em função da potência bruta requerida, em US\$;
- CEC = custo da estação de controle em função da vazão atual, em US\$;
- CENE = custo anual com energia elétrica (consumo), em US\$;
- CKWH = custo unitário do kWh consumido, em US\$;
- CP = custo anual de produção por árvore de laranja, em US\$;
- CPC = custo do painel de controle em função do número de unidades operacionais, em US\$;
- CPE = custo do tubo de polietileno (US\$/m), em função do diâmetro (m) ;
- CPROD = custo anual de produção da laranja (sem considerar a irrigação), em US\$/ha ;

- CPVCD = custo da tubulação de PVC utilizada nas linhas de derivação (US\$/m), em função do diâmetro (m) ;
- CPVCP = custo da tubulação de PVC utilizada na linha principal (US\$/m), em função do diâmetro (m) ;
- CPVCS = custo da tubulação de PVC utilizada nas linhas secundárias (US\$/m), em função do diâmetro (m) ;
- CSIST = custo anual com o sistema de irrigação (rede hidráulica, estações de bombeamento e de controle, consumo de energia), em US\$/ha ;
- CVF = coeficiente de variação de fabricação do emissor, em valor decimal ;
- CVR = custo das válvulas e registros em função do número de unidades operacionais, em US\$;
- CXL = preço da caixa de laranja (40,8 kg), em US\$;
- D = diâmetro interno da tubulação, em m ;
- DDA = diâmetro interno da tubulação que compõe a linha de derivação em aclive, em m ;
- DDD = diâmetro interno da tubulação que compõe a linha de derivação em declive, em m ;
- DECX = gradiente de declive na direção x (longitudinal) da área irrigada, em m/m ;
- DECY = gradiente de declive na direção y (transversal) da área irrigada, em m/m ;
- DHUO = variação permissível de carga hidráulica na unidade operacional, em m.c.a. ;

- DI = número de dias com irrigação durante o ciclo anual da laranja ;
- DLA = diâmetro interno da tubulação que compõe a linha lateral em aclave, em m ;
- DLD = diâmetro interno da tubulação que compõe a linha lateral em declive, em m ;
- DPA = diâmetro interno da tubulação que compõe a linha principal em aclave, em m ;
- DPD = diâmetro interno da tubulação que compõe a linha principal em declive, em m ;
- DS = diâmetro interno da tubulação que compõe a linha secundária, em m ;
- EE = espaçamento entre emissores ou grupo de emissores na linha lateral (espaçamento entre árvores na fileira), em m ;
- EL = espaçamento entre linhas laterais ou entre fileiras de árvores, em m ;
- ETa = evapotranspiração real (atual), em m/ciclo ;
- ETMAX = evapotranspiração máxima (potencial), em m/ciclo ;
- ETMD = evapotranspiração máxima diária no período de pico, em mm/dia ;
- f = coeficiente de atrito da Equação de Darcy-Weisbach ;
- F = coeficiente F de Christiansen ;
- Fa = coeficiente Fa ajustado de Scaloppi ;
- FD = coeficiente Fa para a linha de derivação ;

- FL = coeficiente Fa para a linha lateral ;
- FO = função objetivo ou receita líquida anual com a cultura da laranja irrigada, em US\$/ha ;
- FP = coeficiente Fa para a linha principal ;
- FRC = fator de recuperação do capital, em valor decimal ;
- FS = fator Fa para a linha secundária ;
- g = aceleração da gravidade, em m/s^2 ;
- $G^t(X_j)$ = funções diferenciáveis ;
- HDA = perda de carga na linha de derivação em aclave, em m.c.a. ;
- HDD = perda de carga na linha de derivação em declive, em m.c.a. ;
- HEC = perda de carga na estação de controle, em m.c.a. ;
- Hf = perda de carga na tubulação de diâmetro D e comprimento L, sujeita à vazão Q (equação de Darcy-Weisbach), em m.c.a. ;
- HLA = perda de carga na linha lateral em aclave, em m.c.a. ;
- HLD = perda de carga na linha lateral em declive, em m.c.a. ;
- HM = carga hidráulica média ou de serviço do emissor, em m.c.a. ;
- HMAX = carga hidráulica máxima na unidade operacional, em m.c.a. ;

- HMIN = carga hidráulica mínima na unidade operacional, em m.c.a. ;
- HPA = perda de carga na linha principal em aclave, em m.c.a. ;
- HPD = perda de carga na linha principal em declive, em m.c.a. ;
- HS = perda de carga na linha secundária, em m.c.a. ;
- HT = perdas de carga hidráulica no sistema (m.c.a.):
perda de carga na rede hidráulica mais o mais o desnível geométrico ;
- I = número de horas de irrigação por conjunto de unidades operacionais atuando simultaneamente, em um turno de irrigação ;
- k = coeficiente empírico da relação vazão - carga hidráulica do emissor ;
- Ky = fator de efeito sobre o rendimento, que expressa a relação entre a diminuição da produção relativa e o déficit de evapotranspiração relativa ;
- L = comprimento da tubulação, em m ;
- LD = comprimento da linha de derivação, em m ;
- LL = comprimento da linha lateral, em m ;
- LP = comprimento da linha principal, em m ;
- LS = comprimento da linha secundária, em m ;
- LX = comprimento da área irrigada na direção x (longitudinal), em m ;

- LY = comprimento da área irrigada na direção y (transversal), em m ;
- m = expoente da velocidade na fórmula empregada para o cálculo da perda de carga na tubulação ;
- M = valor da relação entre a variação permissível de carga hidráulica na unidade operacional e a diferença entre a carga hidráulica média e a carga hidráulica mínima na mesma ;
- n = número de anos de vida útil do sistema de irrigação ;
- N = número total de derivações na tubulação ;
- NBM = rendimento do conjunto motobomba, em % ;
- NE = número de emissores por árvore ;
- NGE = número de emissores ou grupo de emissores na linha lateral (número de saídas) ;
- NLL = número de saídas na linha de derivação ;
- NLS = número total de linhas secundárias ;
- NPE = número de árvores por hectare ;
- NSP = número de saídas na linha principal ;
- NSS = número de saídas na linha secundária ;
- NUO = número total de unidades operacionais na área irrigada ;
- NUOS = número de unidades operacionais atuando simultaneamente na área irrigada ;
- PMAX = máxima produção de laranja irrigada, (caixa por árvore) ;

- PREAL = produção real de laranja (caixa por árvore) ;
- PREL = produção relativa de laranja, em valor decimal ;
- PW = área ocupada pelo emissor em relação à área efetivamente ocupada pela árvore, em % ;
- Q = vazão na tubulação, em m^3/s ;
- QD = vazão na linha de derivação, em m^3/s ;
- QDISP = vazão disponível na fonte de água, em m^3/s ;
- QE = vazão média ou de operação do emissor, em m^3/s ;
- QL = vazão na linha lateral, em m^3/s ;
- QMIN = vazão correspondente à carga hidráulica mínima na unidade operacional, em m^3/s ;
- QP = vazão na linha principal, em m^3/s ;
- QS = vazão na linha secundária, em m^3/s ;
- QT = vazão atual do sistema de irrigação, em m^3/s ;
- r = taxa de juros anual, em valor decimal ;
- RBRUT = receita bruta anual da laranja irrigada, em US\$/ha ;
- Re = número de Reynolds ;
- Ri = constantes da eq. (2) ;
- rx = razão entre a distância da primeira derivação ao início da tubulação e o espaçamento regular entre derivações ;
- T = número de dias que compõem o turno de irrigação ;
- TD = número de horas por dia disponíveis para irrigação ;
- TE = número total de emissores na área irrigada ;

TLD = extensão total de linhas de derivação na área irrigada, em m ;

TLL = extensão total de linhas laterais na área irrigada, em m ;

TLP = extensão total de linhas principais na área irrigada, em m ;

TLS = extensão total de linhas secundárias na área irrigada, em m ;

TX = número máximo de dias que pode ter o turno de irrigação ;

UE = uniformidade de emissão, em valor decimal ;

Va = volume de água aplicado por árvore, em m³/ciclo;

VPA = velocidade na linha principal em aclive, em m/s;

VPD = velocidade na linha principal em declive, em m/s;

Vr = volume de água requerido por árvore, em m³/ciclo;

VS = velocidade na linha secundária, em m/s ;

x = coeficiente empírico da relação vazão - carga hidráulica do emissor ;

X_j = variáveis de decisão ;

φ = maximizando (o que vai ser maximizado).

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

Autor: JOÃO CARLOS CURY SAAD

Orientador: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e resolver um sistema de equações não-lineares, adaptável ao modelo de programação matemática não-linear, visando determinar a configuração e a operação ótimas de um sistema de irrigação localizada, sob o enfoque da maximização da receita líquida obtida com a cultura irrigada. Utilizando o modelo proposto, foi realizada uma aplicação junto à cultura da laranja desenvolvida na região de Limeira, SP.

O modelo consiste de uma função-objetivo que maximiza a receita líquida da cultura irrigada e que está sujeita a uma série de restrições de natureza operacional, geométrica e hidráulica. Este sistema de equações não-lineares aplica-se a áreas retangulares em nível ou com declividade uniforme.

Os principais dados de entrada requeridos são: função de produção da cultura para o fator água, função de custo das componentes do sistema de irrigação, custo da energia elétrica, custo do produto agrícola e

variáveis de dimensionamento (por exemplo: área total, extensão e declividade do terreno nas direções x e y). Por sua vez, os dados de saída de maior relevância são: receita líquida anual, número total de unidades operacionais, número de unidades atuando simultaneamente, uniformidade de emissão, e comprimento e diâmetro da tubulação em cada linha do sistema de irrigação.

Para solucionar o modelo proposto e realizar a análise de sensibilidade da função-objetivo em relação aos parâmetros estabelecidos, utilizou-se o programa computacional GAMS/MINOS. Os parâmetros de entrada avaliados foram: tamanho (8,294ha e 23,04ha) e formato (relação comprimento - largura igual a 0,25 , 0,44 , 1 , 2,25 e 4) da área, declividade (0, 1, 3 e 5%) e modelo do microaspersor em função de sua vazão (35 l/h, 56 l/h e 87 l/h).

Os resultados obtidos foram consistentes com a conformação definida nas hipóteses básicas do modelo, o que demonstra a eficácia do sistema de equações não-lineares proposto. A receita líquida decresceu tanto em função do aumento da declividade, como em função do uso de microaspersores de maior vazão. O formato mais rentável para a área de 8,294ha foi o quadrangular, enquanto que para a área de 23,04ha a maior rentabilidade correspondeu a valores de relação comprimento - largura entre 0,44 e 1.

OPTIMIZATION OF LOCALIZED IRRIGATION SYSTEMS USING NONLINEAR PROGRAMMING

Author: JOÃO CARLOS CURY SAAD

Adviser: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

SUMMARY

The purpose of this paper was to develop a nonlinear model that provided the optimization of lay-out, design and management of localized irrigation systems, under the condition of crop irrigated profit maximization. To illustrate the capability of the model, a sensitivity analysis of the citrus orchard field net benefit was evaluated under different conditions (inputs).

The localized irrigation design model consists of an objective function that maximizes profit at the farm level, subject to appropriate geometric and hydraulic conditions. The model can be applied in rectangular shape fields, with uniform slope or in level.

The basics inputs required are: the crop-water-production function, the cost function and cost of system components, the energy cost, the price of the products, and design variables (total area, length and slope of the field in the x and y directions, the emitter discharge, number of irrigation hours per day). The mainly outputs are: net benefit, total number of subunits, number

of subunits working simultaneously, emission uniformity, pipe diameter, pipe length, number of emitters in each lateral, number of laterals in a manifold, and irrigation time per set.

The optimization model ran on AT-486 microcomputer using the GAMS-MINOS package and was applied in a citrus orchard field situated in Limeira, Sao Paulo, Brazil, to evaluate the net benefit under different conditions of the total area (82944m^2 and 230400m^2), slope (0, 1, 3 and 5%), emitter discharge ($9.72\text{E}-6\text{ m}^3/\text{s}$, $1.55\text{E}-5\text{ m}^3/\text{s}$ and $2.42\text{E}-5\text{ m}^3/\text{s}$) and shape of the field (field width to length ratio of 0.25 , 0.44 , 1 , 2.25 and 4).

The model's results were consistent with the basic assumptions. This showed the efficacy of the proposed model. The net benefit per unit area decreased as the slope increased and as the emitter discharge increased. The most profitable shape of the field was the square (field width to length ratio equal 1), for the 82944m^2 area. For the 230400m^2 , the field width to length ratio between 0.44 and 1 resulted in the best values.

1. INTRODUÇÃO

A citricultura na região de Limeira, SP, é muito desenvolvida técnica e economicamente. Na busca de uma atividade cada vez mais competitiva, os citricultores frequentemente questionam a viabilidade econômica da adoção da irrigação localizada (microaspersão e gotejamento) em seus pomares.

Como um projetista poderia definir o dimensionamento e a operação ótimos de um sistema de irrigação por microaspersão, de tal forma a maximizar a receita líquida da cultura da laranja irrigada para aquela região? Como obter uma análise de sensibilidade da receita líquida da citricultura irrigada em função do tamanho e formato da área irrigada, da vazão do microaspersor e da declividade nas direções x e y ? Como responder a estas perguntas, que poderiam estar vinculadas a outras culturas para as quais a irrigação localizada é tecnicamente compatível, constitui-se no problema de pesquisa que este trabalho procura resolver.

Os sistemas de irrigação localizada apresentam-se como uma forma conveniente e eficiente de

fornecimento de água às culturas. A possibilidade de aplicação de produtos químicos, a pequena necessidade de mão-de-obra, o fornecimento de água somente na área efetivamente cultivada e o elevado potencial para automação parcial ou total, são alguns dos fatores que contribuem para a expansão do uso destes sistemas. Por outro lado, suas principais limitações são o risco de obstrução parcial ou total dos emissores e o elevado custo inicial.

O aspecto econômico é cada vez mais importante no dimensionamento e operação de projetos de irrigação. Caracteriza-se como dimensionamento o processo de reunião de componentes individuais compatíveis entre si que, ao se unirem, irão produzir um sistema de irrigação aplicável a uma determinada área e situação. A otimização deste dimensionamento consiste em promover este processo de agregação sob o enfoque de minimização do custo total do sistema ou de maximização da receita líquida da atividade agrícola desenvolvida utilizando irrigação, respeitando-se critérios hidráulicos e restrições geométricas e operacionais.

A implantação de um sistema de irrigação localizada, assim como dos demais métodos, envolve a escolha da configuração do equipamento no campo, o dimensionamento de seus componentes (tubulação, emissores, válvulas, etc.), e a definição das condições operacionais (por exemplo: turno de irrigação). Embora seja complexa a

definição de todos estes aspectos, é possível desenvolver modelos de otimização, do tipo não-linear, que realizem tal processo de forma eficiente, ajudando o projetista na escolha da melhor solução. Há no mercado programas computacionais capazes de solucionar tais modelos.

As principais variáveis a serem definidas pelos modelos de otimização dos sistemas de irrigação localizada são: diâmetro e comprimento das tubulações, número de emissores ou de grupos de emissores em cada linha lateral, número de linhas laterais ligadas em uma linha de derivação, número total de unidades operacionais, número de unidades operacionais atuando simultaneamente, turno de irrigação e tempo de irrigação por grupo de unidade operacional em funcionamento. A definição destes tópicos é afetada por outras variáveis de projeto, tais como: dimensões e declividade da área, vazão do microaspersor e custos da tubulação, energia e do produto agrícola.

A resolução dos modelos de programação não-linear por meio de programas computacionais específicos, possibilita a análise de sensibilidade da receita líquida de uma determinada cultura irrigada em relação às variáveis envolvidas no projeto, resultando numa série de recomendações que facilitarão o processo de tomada de decisão, o qual é fundamental na fase de elaboração dos projetos de irrigação localizada.

Os objetivos deste trabalho são:

- desenvolver e resolver um sistema de equações não-lineares, adaptável ao modelo de programação matemática não-linear, visando determinar a configuração, o dimensionamento e a operação ótimos de um sistema de irrigação localizada, sob o enfoque da maximização da receita líquida obtida com a cultura irrigada;

- utilizando o modelo proposto, analisar a sensibilidade da função-objetivo em relação às variáveis envolvidas no projeto, tais como: declividade, tamanho e relação largura-comprimento da área em estudo, e microaspersor (em função de sua vazão de operação). Será utilizada como exemplo a irrigação por microaspersão aplicada à cultura da laranja, desenvolvida na região de Limeira, SP.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos gerais

Os sistemas de irrigação localizada caracterizam-se pela aplicação de água a uma parte, apenas, do volume efetivamente ocupado pelo sistema radicular das plantas cultivadas. A configuração típica do sistema é composta pela estação de captação e bombeamento, estação de controle, linha(s) principal(is), secundária(s), de derivação e laterais (as quais contêm os emissores), além dos acessórios (válvulas, registros e reguladores de vazão e pressão).

A irrigação localizada foi inicialmente adotada em culturas altamente produtivas e em pomares, situados em regiões onde a água era escassa e cara. Atualmente, tal sistema é utilizado numa ampla relação de culturas e, também, em áreas onde o recurso água não é fator limitante (HOLZAPFEL et al., 1990).

A expansão do uso da irrigação localizada deve-se, entre outros fatores, às suas vantagens potenciais que, segundo BUCKS et al. (1982), são: maior eficiência no uso da água; possibilidade de obtenção de uma maior

produtividade; pode ser utilizado com água salina ou em solos salinos; maior eficiência na adubação; limita o crescimento de plantas daninhas; pequena necessidade de mão-de-obra; não interfere nas práticas culturais; e menor requerimento de energia em relação a outros sistemas pressurizados de irrigação. As principais limitações, por sua vez, são: possibilidade de obstrução total ou parcial dos emissores (principalmente os gotejadores); o sistema radicular concentra-se no volume de solo úmido, ocasionando, em alguns casos, uma diminuição da estabilidade das plantas; acúmulo de sal na periferia do bulbo molhado; e elevado custo inicial.

Para HOLZAPFEL et al. (1990), a principal desvantagem dos sistemas de irrigação por gotejamento é o seu elevado custo inicial, o qual se deve, basicamente, ao custo do conjunto de tubos, acessórios e emissores.

2.2. Otimização do dimensionamento

Os sistemas fixos de irrigação pressurizada englobam os componentes: equipamento, energia e mão-de-obra (ORON, 1982). Na irrigação localizada, entende-se por equipamento o conjunto composto pela rede de tubulação, emissores e acessórios, além das estações de bombeamento e de controle. Nestes sistemas a rede hidráulica é fixa e está distribuída em toda a área a ser irrigada, o que evidencia a grande participação do componente equipamento

no custo inicial dos mesmos.

Para PLEBAN & AMIR (1981), o custo com equipamento e o custo com energia são determinantes no dimensionamento de redes de distribuição de água, sendo que estes fatores são, de certa forma, antagônicos, uma vez que tubos de diâmetros menores apresentam menor custo, porém, resultam em maior perda de carga e, conseqüentemente, em maior consumo de energia. De maneira oposta, tubos de maior diâmetro fornecem menor perda de carga e menor consumo de energia, todavia, apresentam maior custo. Pode-se, então, deduzir, que uma forma de minimizar o custo dos sistemas fixos de irrigação pressurizada consiste em otimizar sua rede hidráulica e a energia por ela consumida.

O fato da tubulação ser fixa nestes sistemas, possibilita o uso de muitas combinações envolvendo diâmetros distintos e diferentes comprimentos, nos diversos trechos da rede hidráulica. Em decorrência disto, há possibilidade de ocorrência de várias configurações hidráulicas do sistema, dentre as quais ocorre a de menor custo.

BERNARDO (1986) cita três procedimentos para o dimensionamento econômico de tubulações de irrigação: o método das tentativas, o das tentativas simplificado e o de Keller. O Método das Tentativas consiste em se determinar o custo fixo anual por metro de tubulação, para todos os diâmetros possíveis de serem utilizados, e o custo anual

relativo à energia consumida na forma de perda de carga, em cada segmento da rede hidráulica. A combinação de diâmetros que apresentar o menor custo total será a solução econômica. Por sua vez, o método das tentativas simplificado baseia-se na determinação do custo total anual por 100m de tubulação de diversos diâmetros, para cada vazão que ocorrerá nos diferentes segmentos. A solução econômica é encontrada pelo processo de tentativas, à semelhança do procedimento anterior.

KELLER (1965) propôs um método que leva seu nome e que se caracteriza por ser mais rápido, simples e eficiente que os processos por tentativas. O método consiste na confecção de um nomograma que apresenta no eixo das ordenadas a perda de carga, e no eixo das abcissas, a vazão. Traçam-se, então, as retas que relacionam a perda de carga com a vazão, para os diversos diâmetros. Entre as retas referentes a diâmetros sucessivos, insere-se uma linha tracejada que indica a diferença de perda de carga entre os mesmos, nas várias vazões. Uma vez confeccionado o nomograma, pode-se selecionar o diâmetro mais econômico para qualquer vazão.

Os procedimentos de identificação da solução ótima econômica descritos anteriormente, são muito trabalhosos e fornecem poucas informações adicionais (não trazem subsídios para a análise de sensibilidade dos recursos utilizados).

2.3. Utilização de técnicas de Pesquisa Operacional na otimização dos sistemas pressurizados de irrigação

2.3.1. Utilização da Programação Linear

Com a finalidade de se proceder a uma análise mais eficaz, eficiente e completa do problema de otimização de redes hidráulicas de sistemas fixos de irrigação pressurizada, partiu-se para a utilização de técnicas de Pesquisa Operacional.

A Programação Linear é, atualmente, a técnica de Pesquisa Operacional mais utilizada nos problemas de otimização, em decorrência de sua versatilidade e do fato de aplicar fundamentos matemáticos pouco sofisticados, ou seja, a análise e resolução de sistemas de equações lineares (LANZER, 1988).

Inicialmente, a Programação Linear foi adotada na otimização de redes de distribuição de água. KARMELI et al. (1968) sabendo que, em uma configuração definida de distribuição de água, a vazão em cada trecho da rede é conhecida e, também, que a perda de carga e o custo de um determinado tubo são linearmente proporcionais ao seu comprimento, estabeleceram um modelo de programação linear visando à otimização do sistema. Desta forma, as variáveis de decisão do modelo eram os diâmetros selecionados previamente e os comprimentos que eles assumiriam na rede

hidráulica. Este modelo é aplicável a redes de distribuição que apresentam uma única fonte de fornecimento de água.

A extensão do modelo anterior para o caso de sistemas de distribuição com demanda variável com o tempo e a consideração do custo da energia dissipada na forma de perda de carga, foi realizada por CASE & WHITE (1972). Por sua vez, a solução de problemas envolvendo redes de distribuição de água tendo várias fontes de fornecimento de água, utilizando a Programação Linear, foi desenvolvida por GUPTA et al. (1972), com base na analogia à teoria de redes elétricas.

Utilizando o conceito de caminho crítico, BHAVE (1979) desenvolveu um método de seleção de grupos ótimos de diâmetros de tubo, visando, desta forma, diminuir o tamanho dos modelos de Programação Linear utilizados na otimização de redes ramificadas de distribuição de água.

Usando a Programação Linear, PLEBAN & AMIR (1981) desenvolveram um programa computacional iterativo visando otimizar o dimensionamento de redes hidráulicas de sistemas de irrigação pressurizados, de tal forma que a combinação econômica ótima entre os fatores custo do equipamento e custo da energia seja encontrada.

ORON & KARMEI (1981) apresentaram um modelo de Programação Linear visando à otimização da rede hidráulica de sistemas fixos pressurizados (aspersão, microaspersão e gotejamento). A função objetivo era de

minimização do custo dos componentes do sistema, quais sejam, os aspersores ou emissores (na irrigação localizada), toda a rede de tubulação e os acessórios (válvulas e reguladores de pressão). As restrições relacionavam-se com a geometria da área, pressão requerida ao longo do sistema e uniformidade de distribuição da água. O modelo não considerou o custo da energia dissipada na forma de perda de carga. Dentro desta mesma linha, BENAMI & OFEN (1984) apresentaram a Programação Linear como uma técnica de otimização da rede hidráulica de sistemas de irrigação pressurizados, com especial atenção para as linhas principal e secundária.

O uso da Programação Linear na minimização do custo da rede hidráulica de sistemas de irrigação tem alguns aspectos vantajosos, dentre os quais se destacam a facilidade de utilização, a riqueza de informações adicionais (análise de sensibilidade) e o fato de trabalhar com o diâmetro do tubo na forma de variável discreta (diâmetros comercialmente disponíveis). Porém, a exigência de que a configuração do sistema de irrigação no campo esteja previamente definida é uma séria limitação, posto que o processo de otimização fica restrito à escolha da combinação mais econômica envolvendo diâmetro e comprimento do tubo.

O interesse em otimizar a configuração, o dimensionamento e a operação dos sistemas fixos de

irrigação pressurizada, fez com que os pesquisadores buscassem novas técnicas, dentre as quais encontra-se a programação não-linear.

2.3.2. Utilização da Programação Não-Linear

CHIANG (1982) considera a Programação Linear um progresso em relação ao contexto da otimização clássica, uma vez que as restrições podem entrar no problema na forma de desigualdades e, assim, faz-se explicitamente a introdução das condições de não-negatividade no mesmo. Entretanto, a necessidade de confinar a função-objetivo e as restrições ao modelo linear pode, às vezes, ser uma limitação significativa. Desta forma, um progresso adicional seria uma estrutura de otimização que pudesse trabalhar com funções-objetivo e restrições em forma de desigualdades que não sejam lineares, sendo que tal estrutura é encontrada na programação não-linear. O autor afirma, ainda, que a programação não-linear difere da programação linear em pelo menos cinco aspectos, alguns deles relacionados entre si, ou seja: o campo de escolha abrange toda a região possível, não somente o conjunto de seus pontos extremos; o número de restrições que são exatamente satisfeitas (e, também, as condições de não-negatividade) pode ser igual ao número de variáveis de escolha; um deslocamento contínuo em uma direção uniforme pode não conduzir a valores continuamente crescentes (ou

decrecentes) da função-objetivo; a região possível pode não ser um conjunto convexo; um ótimo local pode não ser um ótimo global.

Segundo GIL et al. (1981), os modelos de programação não-linear podem ser resolvidos utilizando os programas computacionais já desenvolvidos e disponíveis no mercado. Com a utilização destes modelos, a otimização dos sistemas de irrigação passou a abranger, também, a escolha da melhor configuração do equipamento na área a ser irrigada, bem como a melhor condição operacional (por exemplo, a definição do número de unidades operacionais operando simultaneamente).

ORON & KARMELI (1979) descreveram os sistemas de distribuição de água por meio de equações não lineares e de variáveis contínuas e discretas. Para solucionar este modelo não-linear, os autores utilizaram a Programação Geométrica Generalizada e a técnica do "Branch and Bound". O modelo foi aplicado no dimensionamento de um sistema de aspersão fixo, tendo como variáveis a serem definidas: os diâmetros de tubo e os comprimentos associados, o número de saídas nas linhas laterais e de derivação (determinam o tamanho e o número de unidades operacionais na área), e a capacidade de bombeamento.

Trabalhando, desta vez, com sistemas fixos de irrigação pressurizada, KARMELI & ORON (1979) utilizaram a Programação Geométrica Generalizada e a técnica do

"Branch and Bound" na minimização da função de custo do projeto, a qual envolve os componentes equipamento, energia e mão-de-obra. As restrições visavam limitar as perdas hidráulicas, assegurar que determinados limites operacionais pré-estabelecidos fossem respeitados e, também, possibilitar a determinação do número de unidades operacionais no campo (a configuração do sistema).

ORON (1982), à semelhança de ORON & KARMELI (1979), sugere que as áreas que serão irrigadas por meio de sistemas fixos de irrigação pressurizada devam ser divididas em unidades operacionais, as quais são compostas pelas linhas auxiliar, de derivação e laterais (contêm os emissores), além dos acessórios, tais como válvulas e tês.

Para GOEHRING (1976) e ORON & WALKER (1981), a divisão do projeto da área a ser irrigada em unidades operacionais traz aspectos vantajosos, tais como: permite irrigar partes da área ao longo do tempo, o que confere maior flexibilidade à irrigação, posto que nem sempre se dispõe de água suficiente para suprir todo o projeto simultaneamente; geralmente se obtém uma maior uniformidade de emissão, uma vez que as diferenças de nível são menores dentro de cada unidade operacional; permite o uso de tubos de menor diâmetro, reduzindo, assim, o custo inicial do sistema; a automação torna-se mais econômica. BUSTOS (1988) destaca, também, a vantagem de possibilitar o aumento do número de emissores por planta durante os

estádios de desenvolvimento, principalmente, de plantas frutíferas. Porém, o maior problema associado à subdivisão da área a ser irrigada em unidades operacionais é a dificuldade em selecionar as dimensões ótimas das mesmas (ORON & KARMELI, 1979).

A largura da unidade operacional (direção das linhas laterais) dos sistemas de irrigação localizada é governada pelo espaçamento e vazão dos emissores, pela economia devido ao uso de linhas laterais de menor diâmetro, pelas variações de pressão permissíveis, pelo comprimento das linhas e número de unidades operacionais operando simultaneamente, além da topografia. De forma similar, o comprimento da unidade operacional (direção da linha de derivação) depende do espaçamento e vazão das linhas laterais, economia devido ao uso de tubos de menor diâmetro, variações de pressão permissíveis, número de linhas laterais e número de unidades operacionais em operação, bem como da topografia da área (KELLER & BLIESNER, 1990).

Para estes autores, ainda, a configuração final dos sistemas de irrigação localizada deve satisfazer a uma série de objetivos de dimensionamento, os quais nem sempre são compatíveis entre si. A configuração ideal deve ter: um número mínimo de unidades operacionais e pontos de controle de vazão ou de pressão; uma configuração conveniente e econômica da linha principal, para atender às

unidades operacionais; a mesma vazão total em cada grupo de unidades operacionais que atuam simultaneamente; configurações da unidade operacional uniformes na forma e no tamanho; linhas laterais de diâmetro único variando de 12mm a, no máximo, 20mm ; linhas de derivação com vários diâmetros, sendo de 100mm o valor máximo; variações de pressão que não excedam o valor permissível estabelecido, a fim de que se tenha a uniformidade de emissão desejada.

ORON & WALKER (1981) utilizaram um modelo de programação não-linear, inteira-mista, o qual foi solucionado pela Programação Geométrica e pela técnica do "Branch and Bound", na minimização do custo de sistemas fixos de irrigação pressurizada. Os autores aplicaram o modelo a um projeto de aspersão em citros e analisaram a sensibilidade da função custo total do projeto em relação às variáveis geometria da área, uso consuntivo, pressão disponível na fonte de água e vazão do aspersor, possibilitando, assim, identificar a configuração ótima do sistema e orientar a respeito de como melhorá-la, para as condições verificadas no estudo. Eles concluíram que: não houve diferença significativa entre a solução ótima contínua e a ótima inteira-mista; o custo do sistema de irrigação por unidade de área acompanha o aumento da área total; o formato de área mais econômico é o quadrangular, posto que o custo mínimo encontra-se na faixa de relação comprimento-largura de 0,4 a 1,25 ; utilizando o formato

mais econômico, verificou-se que o uso consuntivo afeta o custo do sistema de forma crescente e linear; o aumento conjunto da pressão e vazão do aspersor está associado a um significativo acréscimo no custo total; o aumento da pressão na fonte de água é linearmente acompanhado por um acréscimo no custo do sistema; o número de linhas secundárias, paralelas às linhas de plantas, aumenta parabolicamente com a relação comprimento-largura, para todos os tamanhos de área analisados; o número de unidades operacionais ao longo da largura da área diminui hiperbolicamente com a relação comprimento-largura; o número de unidades operacionais atuando simultaneamente aumenta com a diminuição da pressão disponível na fonte de água, mas aumenta não linearmente com os acréscimos no uso consuntivo.

ORON (1982) comparou tamanhos distintos de unidades operacionais de sistemas fixos de irrigação pressurizada, para uma mesma área total, tendo encontrado grandes variações na porcentagem relativa das linhas de derivação, auxiliar, secundária e principal, o que, evidentemente, afeta em menor ou maior escala o custo do sistema. Para uma área de $180L^2$, onde L é a unidade de comprimento, adotou-se quatro configurações de unidades operacionais, tendo-se encontrado variações no comprimento, expresso como porcentagem da extensão total da tubulação (excluindo as linhas laterais), de 47,6 a 62,1% nas linhas

de derivação, de 11,6 a 23,8% nas linhas auxiliares, de 20,1 a 24,1% nas linhas secundárias e de 4,3 a 4,7% nas linhas principais.

Ao longo desta revisão, verifica-se uma evolução no sentido de estender o processo de otimização a todos os aspectos inerentes a um sistema fixo de irrigação pressurizada, ou seja, inicialmente, atendeu-se apenas ao dimensionamento, passando-se, então, à configuração e ao manejo. Porém, em todos os trabalhos até aqui analisados, o objetivo era a minimização da função custo do sistema, o que não garante que a solução encontrada seja aquela que maximiza a receita líquida da cultura irrigada, sendo que o lucro máximo é, verdadeiramente, o objetivo final de uma empresa rural.

ALLEN & BROCKWAY (1984) recomendam a receita líquida como o principal critério a ser observado na configuração, dimensionamento e operação de sistemas de irrigação. Foi nesta linha, que HOLZAPFEL et al.(1990) apresentaram um modelo não-linear de otimização do dimensionamento e operação de sistemas de irrigação por gotejamento. As variáveis de decisão eram: comprimento e diâmetro da tubulação, número de emissores em cada linha lateral, número de linhas laterais ligadas à linha de derivação, número total de unidades operacionais, número de unidades operacionais atuando simultaneamente, tempo de irrigação por grupo e vazão do emissor. O modelo

desenvolvido foi resolvido utilizando o pacote computacional GAMS/MINOS e aplica-se a áreas em nível.

Visando ilustrar a potencialidade do modelo, estes autores fizeram uma aplicação do mesmo no dimensionamento de um pomar de pera. Os resultados indicaram que o custo do sistema e de sua operação foi pequeno quando comparado à receita obtida. Isto se deve, principalmente, ao fato da produtividade marginal da água ser maior que o custo marginal da tubulação e operação. A análise de sensibilidade dos resultados revelou que um aumento de 50% no custo dos tubos reduz o lucro em 0,7%. Por sua vez, diminuindo-se o preço do produto para 1/4 do seu valor inicial ocorre uma redução de 77,6% no lucro e, finalmente, um aumento de 100% no custo da energia reduz o valor da função-objetivo em 1,4%. O modelo mostrou, também, que ao se maximizar lucro, a rede hidráulica obtida não forneceu o custo mínimo e que o diâmetro da linha lateral (16,8mm) foi maior que o menor diâmetro comercialmente disponível (12,7mm).

O diâmetro das linhas laterais obtido a partir de modelos que minimizam custo, é sempre o menor valor disponível no mercado (GOEHRING, 1976 ; ORON, 1982 e BUSTOS, 1988). Portanto, o modelo apresentado por HOLZAPFEL et al. (1990) constatou que os resultados não produzem custo mínimo do sistema quando a receita marginal é maior que o custo marginal.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Hipóteses do modelo

O modelo assume as seguintes hipóteses básicas:

- a área deve ser retangular ;
- o gradiente de declive da área irrigada deve ser uniforme tanto na longitudinal como na transversal. O sentido do gradiente na longitudinal é da esquerda para a direita, enquanto na transversal é de cima para baixo ;
- as estações de bombeamento e de controle devem situar-se na metade do comprimento da área (longitudinal) ;
- as linhas laterais são de polietileno e as demais de PVC ;
- nas tubulações com múltiplas saídas a razão entre a distância do início da tubulação até a primeira derivação e o espaçamento regular entre derivações é igual a 0,5 ;

- deve-se ter, no mínimo, uma unidade operacional atuando em cada linha secundária, durante todo o período efetivo de irrigação ;

- no início das unidades operacionais há reguladores de pressão ou de vazão ;

- o número de unidades operacionais deve ser igual ou múltiplo do número de unidades que estão atuando simultaneamente ;

- a razão entre o número total de unidades operacionais e o número de linhas secundárias deve ser um número par ;

- a razão entre o número de unidades operacionais atuando simultaneamente e o número de linhas secundárias deve ser um número inteiro ;

- a largura e o comprimento da área irrigada devem ser múltiplos do espaçamento entre grupos de emissores na linha lateral e do espaçamento entre linhas laterais;

- a unidade operacional é composta pelo regulador de pressão ou de vazão, linha de derivação, linhas laterais e emissores, tendo como configuração padrão aquela representada na Figura 1 ;

- as conformações assumidas pelo modelo obedecem a lógica observada nas Figuras 2 e 3.

Figura 1 - Representação esquemática de uma unidade operacional

Figura 2 - Exemplo de configuração gerada pelo modelo, com 4 unidades operacionais e 2 linhas secundárias.

- $\oplus$ estações de bombeamento e de controle
- * regulador de pressão ou de vazão
- .....x..... linha lateral com microaspersores
- linha de derivação
- ==== linha secundária

Figura 3 - Exemplo de configuração com quatro unidades operacionais e uma linha secundária.

3.2. Formulação matemática do problema de maximização na programação não-linear

O problema de maximização na programação não-linear apresenta o seguinte formato geral:

$$\text{Maximizar} \quad \phi = B(X_1, X_2, \dots, X_v) \quad (1)$$

$$\text{sujeita a} \quad G^t(X_1, X_2, \dots, X_v) \leq R_t \quad (2)$$

$$\text{com } t = 1, 2, \dots, u$$

$$\text{e} \quad X_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, v) \quad (3)$$

sendo que

ϕ - símbolo geral para o maximizando (o que vai ser maximizado) ;

X_j - variáveis de decisão ;

R_t - constantes ;

$B(X_j)$ - funções diferenciáveis ;

$G^t(X_j)$ - funções diferenciáveis.

Um problema de programação não-linear é composto por uma função-objetivo (eq. 1), um conjunto de "u" restrições (eq. 2) e um conjunto de condições de não-negatividade (eq. 3) para as "v" variáveis de decisão.

O modelo desenvolvido neste trabalho apresenta 67 linhas e 59 colunas, com 216 valores não nulos. O número de variáveis de decisão é igual a 59.

3.3. Função-objetivo

A função-objetivo do modelo consiste na maximização da receita líquida anual (FO), dada por:

$$\text{MAX} \quad \text{FO} = \text{RBRUT} - \text{CSIST} - \text{CPROD} \quad (4)$$

em que,

FO - função objetivo ou receita líquida anual, em US\$/ha;

RBRUT - receita bruta anual, em US\$/ha;

CSIST - custo anual com o sistema de irrigação (rede hidráulica, estações de bombeamento e de controle, consumo de energia, etc.), em US\$/ha;

CPROD - custo anual de produção (sem considerar a irrigação), em US\$/ha.

3.3.1. Receita bruta

A receita bruta anual (RBRUT) é dada por:

$$\text{RBRUT} = \text{CXL} \cdot \text{PMAX} \cdot \text{NPE} \cdot \text{PREL} \quad (5)$$

sendo,

CXL - preço da caixa de laranja, em US\$;

PMAX - máxima produção de laranja irrigada (caixa por árvore) ;

NPE - número de árvores por ha ;

PREL - produção relativa, em valor decimal. É a relação entre a produção real (PREAL) e a produção máxima (PMAX).

A relação entre a diminuição da produção relativa e o déficit de evapotranspiração relativa é dada pelo fator de efeito sobre o rendimento (K_y), obtido empiricamente (DOORENBOS & KASSAM, 1979). Desta forma:

$$1 - (PREAL / P_{MAX}) = K_y \cdot [1 - (ETa / ET_{MAX})] \quad (6)$$

em que,

ETa - evapotranspiração real (atual), em m/ciclo ;

ET_{MAX} - evapotranspiração máxima (potencial), em m/ciclo.

Para estes autores, o valor de K_y para os citros varia de 0,8 a 1,1. Neste estudo utilizou-se K_y igual a 1, logo:

$$(PREAL/P_{MAX}) = (ETa/ET_{MAX}) = PREL \quad (7)$$

Supondo que a área sombreada corresponda à área disponível para cada árvore ($EE \cdot EL$), o volume de água requerido durante o ciclo será dado por:

$$Vr = (ETa \cdot EE \cdot EL) / UE \quad (8)$$

sendo,

Vr - volume de água requerido por árvore durante o ciclo, em m^3 ;

EE - espaçamento entre emissores ou grupo de emissores na linha lateral (espaçamento entre árvores), em m ;

EL - espaçamento entre linhas laterais ou entre fileiras de árvores, em m ;

UE - uniformidade de emissão, em valor decimal.

Por sua vez, o volume de água aplicado por árvore durante o ciclo é dado por:

$$V_a = 3600.(NE . QE . I . DI) / T \quad (9)$$

em que,

V_a - volume de água aplicado por árvore durante o ciclo, em m³ ;

NE - número de emissores por árvore ;

QE - vazão do emissor correspondente à carga hidráulica média (ou de operação) na unidade operacional, em m³/s ;

I - número de horas de irrigação por conjunto de unidades operacionais atuando simultaneamente, em um turno de irrigação ;

DI - número de dias com irrigação durante o ciclo ;

T - número de dias que compõem o turno de irrigação.

Igualando V_r com V_a, tem-se:

$$E_{Ta} = 3600.(UE . NE . QE . I . DI) / (T . EE . EL) \quad (10)$$

A eq. (7) com E_{Ta} expresso pela eq. (10), ao ser substituída na eq. (5), resulta em :

$$RBRUTA = CXL . P_{MAX} . NPE . [3600.(UE . NE . QE . I . DI) / (ET_{MAX} . T . EE . EL)] \quad (11)$$

3.3.2. Custo de produção da laranja

O custo anual de produção da laranja por hectare (CPROD), sem considerar a irrigação, é dado por:

$$CPROD = (20000 \cdot CP + NUO \cdot NGE \cdot NLL) / A \quad (12)$$

sendo,

CP - custo anual de produção da laranja, em US\$/árvore ;

NUO - número total de unidades operacionais na área ;

NGE - número de emissores ou grupos de emissores na linha lateral (número de saídas) ;

NLL - número de saídas na linha de derivação. Corresponde à metade do número de linhas laterais conectadas na linha de derivação ;

A - área a ser irrigada, em m².

3.3.3. Custo do sistema de irrigação

O sistema de irrigação por microaspersão a ser dimensionado, é composto por:

- estação de captação e de bombeamento;
- estação de controle;
- linha principal;
- linha secundária;
- linha de derivação;
- linha lateral;
- microaspersores;
- acessórios.

O custo do sistema de irrigação por hectare (CSIST) é calculado por:

$$\text{CSIST} = \{[(\text{CE} \cdot \text{TE}) + (\text{CPE} \cdot \text{TLL}) + (\text{CPVCD} \cdot \text{TLD}) + (\text{CPVCS} \cdot \text{TLS}) + (\text{CPVCP} \cdot \text{TLP}) + \text{CVR} + \text{CPC} + \text{CEC} + \text{CEB}] \cdot \text{FRC} + \text{CENE}\} \cdot (10000/\text{A})$$

(13)

em que,

CE - custo unitário do emissor, US\$;

TE - número total de emissores ;

CPE - custo do tubo de polietileno (US\$/m), em função do diâmetro (m);

TLL - extensão total de linhas laterais no sistema, em m ;

CPVCD - custo da tubulação de PVC utilizada nas linhas de derivação, em US\$/m, em função do diâmetro (m);

CPVCS - custo da tubulação de PVC da linha secundária (US\$/m), em função do diâmetro (m);

CPVCP - custo da tubulação de PVC da linha principal (US\$/m), em função do diâmetro (m);

TLD - extensão total de linhas de derivação, em m ;

TLS - extensão total de linha secundária, em m ;

TLP - extensão total de linha principal, em m ;

CVR - custo das válvulas e registros (US\$) em função do número total de unidades operacionais ;

CPC - custo do painel de controle (US\$) em função do número de unidades operacionais ;

- CEC - custo da estação de controle (US\$) em função da vazão atual ;
- CEB - custo da estação de bombeamento (US\$) em função da potência bruta requerida (cv) ;
- FRC - fator de recuperação do capital, em valor decimal ;
- CENE - custo da energia elétrica (US\$) em função do consumo (kWh) ;

3.3.3.1. Relações custo do componente x dimensão característica

O custo das válvulas e registros (CVR) é dado por:

$$CVR = C1 \cdot NUO \quad (14)$$

sendo,

C1 - coeficiente da regressão.

O custo do painel de controle (CPC) é dado por:

$$CPC = C2 \cdot (NUO)^{C3} \quad (15)$$

em que,

C2 e C3 - coeficientes da regressão.

O custo da estação de controle (CEC) é dado por:

$$CEC = C4 + (C5 \cdot QT) \quad (16)$$

sendo,

C4 e C5 - coeficientes da regressão ;

QT - vazão atual do sistema de irrigação, em m^3/s .

Dada por:

$$QT = 2 \cdot QE \cdot NE \cdot NGE \cdot NLL \cdot NUOS \quad (17)$$

em que,

NUOS - número de unidades operacionais atuando simultaneamente.

O custo da estação de bombeamento (CEB) é dado por:

$$CEB = C6 \cdot [(2000 \cdot QE \cdot NE \cdot NGE \cdot NLL \cdot NUOS) \cdot (HM + HT) / (75 \cdot NBM)]^{C7} \quad (18)$$

sendo,

C6 e C7 - coeficientes da regressão;

HM - carga hidráulica média do emissor, em m.c.a. ;

HT - perdas de carga hidráulica no sistema (m.c.a.):
perda de carga na rede hidráulica mais o desnível geométrico ;

NBM - rendimento do conjunto motobomba, em % .

O fator de recuperação do capital (FRC) é dado por:

$$FRC = [r \cdot (1 + r)^n] / [(1 + r)^n - 1] \quad (19)$$

em que,

r - taxa de juros anual, em valor decimal ;

n - número de anos de vida útil do sistema de irrigação ;

O custo anual com energia (CENE) é calculado por:

$$CENE = CKWH \cdot (2 \cdot QE \cdot NE \cdot NGE \cdot NLL \cdot NUOS) \cdot 9,80665 \cdot I \cdot DI \cdot NUO \cdot (HM + HT) / (NBM \cdot T \cdot NUOS) \quad (20)$$

sendo,

CKWH - custo do kWh, em US\$.

3.3.3.2. Equações de totalização dos componentes do sistema

O número total de emissores (TE) é dado por:

$$TE = (A \cdot NE) / (EE \cdot EL) \quad (21)$$

A extensão total das linhas laterais (TLL), ou seja, a soma dos comprimentos de todas as laterais existentes no sistema, é dada por:

$$TLL = (A / EL) - [A / (2 \cdot NGE \cdot EL)] \quad (22)$$

A soma dos comprimentos das linhas de derivação (TLD) do sistema de irrigação por microaspersão, é dada por:

$$TLD = [A / (2 \cdot NGE \cdot EE)] - [A / (4 \cdot NGE \cdot EE \cdot NLL)] \quad (23)$$

A soma dos comprimentos de todas as linhas secundárias (TLS) é dada por:

$$TLS = [(0,5 \cdot A) / (NLL \cdot EL)] - [(0,5 \cdot LX \cdot NGE \cdot EE) / (EL \cdot NLL)] \quad (24)$$

em que,

LX - comprimento do campo na direção x, em m.

A extensão total de linha principal (TLP) é calculada por:

$$TLP = LX - (2.NLL.EL) \quad (25)$$

O número de saídas na linha lateral (NGE) é dado por:

$$NGE = (LL/EE) + 0,5 \quad (26)$$

sendo,

LL - comprimento da linha lateral, em m.

O número de saídas na linha de derivação (NLL) é calculado por:

$$NLL = (LD/EL) + 0,5 \quad (27)$$

em que,

LD - comprimento da linha de derivação, em m.

O número total de unidades operacionais (NUO) é dado por:

$$NUO = A / (2.NGE.NLL.EE.EL) \quad (28)$$

O número de linhas secundárias (NLS) existentes na área é calculado por:

$$NLS = TLS / [LY - (NGE.EE)] \quad (29)$$

sendo,

LY - comprimento na direção y, em m.

O número de saídas na linha secundária (NSS) é dado por:

$$NSS = NUO / (2 \cdot NLS) \quad (30)$$

Por sua vez, o número de saídas na linha principal (NSP) é calculado por:

$$NSP = NLS/2 \quad (31)$$

3.4. Equações de perda de carga

A perda de carga hidráulica total no sistema (HT) é calculada por:

$$HT = [(HLA+HDA+HS+HPA+HEC) \cdot 1,05] + [(LL.DECY) + (LD.DECX) + (LS.DECY) + (LP.DECX)] \quad (32)$$

em que,

HLA - perda de carga na linha lateral em aclave, em m.c.a. ;

HDA - perda de carga na linha de derivação em aclave, em m.c.a. ;

HS - perda de carga na linha secundária, em m.c.a. ;

HPA - perda de carga na linha principal em aclave, em m.c.a. ;

DECX - declividade na direção x (longitudinal) da área a ser irrigada, em m/m ;

DECY - declividade na direção y (transversal) da área a ser irrigada, em m/m.

O primeiro termo entre colchetes na eq. (32) representa a perda de carga na rede hidráulica, enquanto o segundo termo indica a perda decorrente do desnível geométrico. O fator 1,05 é utilizado para compensar as perdas localizadas, estimadas em 5% da perda total.

Para estimar a perda de carga na tubulação utilizou-se a fórmula de Darcy-Weisbach (Equação Universal de Perda de Carga), dada por:

$$H_f = (8.f.Q^2.L) / (\pi^2.g.D^5) \quad (33)$$

em que,

H_f - perda de carga, em m.c.a.;

f - coeficiente de atrito ;

Q - vazão, em m³/s ;

L - comprimento da tubulação, em m ;

g - aceleração da gravidade = 9,80665 m/s² ;

D - diâmetro interno da tubulação, em m.

Segundo KELLER & BLIESNER (1990), para tubos plásticos com diâmetro interno inferior a 125mm, pode-se

utilizar a equação de Blasius para estimativa de do fator f :

$$f = 0,316 \cdot Re^{-0,25} \quad (34)$$

para $2000 \leq Re \leq 10^5$

sendo,

Re - número de Reynolds, cujo valor para a água a 20°C é dado por:

$$Re = 1,26 \cdot 10^6 \cdot (Q/D) \quad (35)$$

Substituindo-se as eqs.(34) e (35) na eq.(33), obtém-se:

$$H_f = 0,0007794 \cdot Q^{1,75} \cdot L \cdot D^{-4,75} \quad (36)$$

No caso de tubulações com múltiplas derivações, deve-se multiplicar a eq.(36) por um fator de correção F .

SCALOPPI (1986) desenvolveu um fator F_a de aplicação geral (qualquer distância entre a primeira saída e o ponto de derivação de água), cuja equação é:

$$F_a = [(N \cdot F) + r_x - 1] / (N + r_x - 1) \quad (37)$$

em que,

N - número total de derivações (saídas) ;

F - coeficiente F de Christiansen ;

r_x - razão entre a distância da primeira derivação ao início da tubulação e o espaçamento regular entre derivações ($0 \leq r_x \leq 1$). Para o modelo proposto, r_x é sempre igual a 0,5.

O fator F de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942) é dado por:

$$F = [1/(m+1)] + [1/(2.N)] + [(m-1)^{0,5}/(6.N^2)] \quad (38)$$

sendo,

m - expoente da velocidade na fórmula empregada para o cálculo da perda de carga (neste caso: $m = 1,75$).

3.4.1. Perda de carga nas linhas laterais

O modelo contempla áreas com declividade uniforme nas direções x e y . Desta forma, existirão linhas laterais em aclave e em declive.

3.4.1.1. Perda de carga na linha lateral em aclave (HLA)

A perda de carga na linha lateral em aclave (HLA) é dada por:

$$HLA = 0,0007794.LL.QL^{1,75}.DLA^{-4,75}.FL . 1,03 \quad (39)$$

em que,

DLA - diâmetro interno da tubulação da linha lateral em aclave, em m;

FL - fator Fa para as linhas laterais, decimal.

Utilizando-se as eqs. (37) e (38), para um valor de rx de 0,5, obtém-se que:

$$FL = [(0,72.NGE)+(0,28/NGE)]/[(2.NGE)-1] \quad (40)$$

O valor 1,03 que aparece na eq. (39) corresponde às perdas localizadas decorrentes da inserção do microaspersor na linha lateral.

O comprimento da linha lateral (LL), em m, é calculado por:

$$LL = LY - LS - (0,5.EE) \quad (41)$$

A vazão na linha lateral (QL), em m³/s, é dada por:

$$QL = NGE.QE \quad (42)$$

3.4.1.2. Perda de carga na linha lateral em declive (HLD)

É dada por:

$$HLD = 0,0007794.LL.QL^{1,75}.DLD^{-4,75}.FL . 1,03 \quad (43)$$

sendo,

HLD - perda de carga na linha lateral em declive, em m.c.a.;

DLD - diâmetro da linha lateral em declive, em m.

3.4.2. Perda de carga na linha de derivação

A perda de carga na linha de derivação tem as mesmas características que na linha lateral, ou seja, condição de aclave e declive, e tubulação com múltiplas derivações.

3.4.2.1. Perda de carga na linha de derivação em aclave (HDA)

A perda de carga na linha de derivação em aclave (em m.c.a.), é dada por:

$$HDA = 0,0007794 \cdot LD \cdot QD^{1,75} \cdot DDA^{-4,75} \cdot FD \quad (44)$$

em que,

DDA - diâmetro interno da linha de derivação em aclave, em m ;

FD - fator Fa para a linha de derivação, em valor decimal. Sua equação para rx igual a 0,5 é:

$$FD = [(0,72 \cdot NLL) + (0,28 / NLL)] / [(2 \cdot NLL) - 1] \quad (45)$$

O comprimento da linha de derivação (LD), em m, é dado por:

$$LD = [LX - (2 \cdot LP) - EL] / 2 \quad (46)$$

A vazão na linha de derivação (QD), em m^3/s , é calculada por:

$$QD = 2.NLL.QL \quad (47)$$

3.4.2.2. Perda de carga na linha de derivação em declive (HDD)

Por sua vez, a perda de carga na linha de derivação em declive (mca), é calculada por:

$$HDD = 0,0007794 \cdot LD \cdot QD^{1,75} \cdot DDD^{-4,75} \cdot FD \quad (48)$$

sendo,

DDD - diâmetro da linha de derivação em declive, em m.

3.4.3. Perda de carga na linha secundária (HS)

A perda de carga na linha secundária é estimada por:

$$HS = 0,0007794 \cdot LS \cdot QS^{1,75} \cdot DS^{-4,75} \cdot FS \quad (49)$$

em que,

HS - perda de carga na linha secundária, em m.c.a.;

DS - diâmetro interno da linha secundária, em m ;

FS - fator Fa para a linha secundária, em valor decimal. Para rx igual a 0,5 , FS é dado por :

$$FS = [(0,72.NSS)+(0,28/NSS)]/[(2.NSS)-1] \quad (50)$$

O comprimento da linha secundária (LS), em m, é calculado por:

$$LS = LY - (NGE.EE) \quad (51)$$

A vazão da linha secundária (QS), em m^3/s , é dada por:

$$QS = 2.QE.NE.NUOS.NLL.NGE/NLS \quad (52)$$

3.4.4. Perda de carga na linha principal

A linha principal divide-se em dois trechos: aclave e declive.

3.4.4.1. Perda de carga na linha principal em aclave (HPA)

A perda de carga na linha principal em aclave (HPA) é estimada por:

$$HPA = 0,0007794 \cdot QP^{1,75} \cdot DPA^{-4,75} \cdot LP \cdot FP \quad (53)$$

sendo,

DPA - diâmetro da linha principal em aclave, em m ;

FP - fator Fa para a linha principal, em valor decimal.

Para rx igual a 0,5 , FP é calculado por:

$$FP = [(0,72.NSP)+(0,28/NSP)]/[(2.NSP)-1] \quad (54)$$

O comprimento da linha principal (LP), em m,

é dado por:

$$LP = TLP / 2 \quad (55)$$

A vazão na linha principal (QP), em m^3/s , é calculada por:

$$QP = NUQS.QE.NE.NLL.NGE \quad (56)$$

3.4.4.2. Perda de carga na linha principal em declive (HPD)

A perda de carga total na linha principal em declive (HPD), é dada por:

$$HPD = 0,0007794 \cdot QP^{1,75} \cdot DPD^{-4,75} \cdot LP \cdot FP \quad (57)$$

sendo,

HPD - perda de carga na linha principal em declive, em m.c.a. ;

DPD - diâmetro interno da linha principal em declive, em m.

3.4.5. Balanço de perdas e ganhos de carga hidráulica nas linhas em aclave e declive

As linhas em aclave perdem carga hidráulica em função do desnível geométrico e da própria perda de carga na tubulação. Por sua vez, as linhas em declive

também perdem carga por atrito na tubulação, porém ganham carga em função da topografia. Desta forma, para que se assegure que a carga hidráulica consumida na linha em aclive seja igual àquela dissipada na linha em declive, são necessárias as seguintes equações:

$$HLA + (LL.DECY) = HLD - (LL.DECY) \quad (58)$$

$$HDA + (LD.DECX) = HDD - (LD.DECX) \quad (59)$$

$$HPA + (LP.DECX) = HPD - (LP.DECX) \quad (60)$$

3.5. Equações referentes aos critérios hidráulicos de dimensionamento

As linhas laterais e de derivação que compõem a unidade operacional serão dimensionadas em função da uniformidade de emissão. Por sua vez, as linhas secundárias e principal serão definidas com base na velocidade.

3.5.1. Dimensionamento das linhas laterais e de derivação com base na uniformidade de emissão

A variação permissível de carga hidráulica na unidade operacional (DHUO) é dada por:

$$DHUO = HMAX - HMIN = M.(HM - HMIN) \quad (61)$$

em que,

DHUO - variação permissível de carga hidráulica na unidade operacional, em m.c.a. ;

HMAX - carga hidráulica máxima na unidade operacional, em m.c.a. ;

HMIN - carga hidráulica mínima na unidade operacional, em m.c.a.

M - valor da relação entre a variação permissível de carga hidráulica na unidade operacional e a diferença entre a carga hidráulica média e a carga hidráulica mínima na mesma. Depende da topografia do terreno e da ocorrência de diferentes diâmetros.

Segundo HERNANDEZ ABREU et al. (1987), para que se tenha uma uniformidade de distribuição de água em níveis satisfatórios, o fator M deve variar de 2 a 4,5.

Para fins de projeto, ESTADOS UNIDOS (1983) e KELLER & BLIESNER (1990) recomendam que se utilize M igual a 2,5 .

O coeficiente de uniformidade de emissão (UE) é calculado por:

$$UE = [1 - (1,27.CVF.NE^{-0,5})].(QMIN/QE) \quad (62)$$

sendo,

UE - uniformidade de emissão, decimal ;

CVF - coeficiente de variação de fabricação do emissor, decimal ;

QMIN - vazão correspondente à carga hidráulica mínima na unidade operacional, em m^3/s ;

A conversão da vazão mínima em carga hidráulica mínima e vice-versa é feita por meio da relação vazão - pressão do microaspersor, que é expressa por:

$$Q_{\text{MIN}} = k \cdot H_{\text{MIN}}^x \quad (63)$$

sendo,

k , x - coeficientes empíricos.

Desta forma, as equações que definem o dimensionamento das linhas laterais e de derivação em função da uniformidade de emissão, são:

$$DHUO = 2,5 \cdot (H_M - H_{\text{MIN}}) \quad (64)$$

$$HLA + (LL \cdot DEC_Y) \geq 0,4 \cdot DHUO \quad (65)$$

$$HLA + (LL \cdot DEC_Y) \leq 0,6 \cdot DHUO \quad (66)$$

$$HDA + (LD \cdot DEC_X) \geq 0,4 \cdot DHUO \quad (67)$$

$$HDA + (LD \cdot DEC_X) \leq 0,6 \cdot DHUO \quad (68)$$

$$DHUO = HLA + HDA + (LL \cdot DEC_Y) + (LD \cdot DEC_X) \quad (69)$$

A eq. (64) fornece a variação permissível de carga hidráulica na unidade operacional. Esta variação será

dividida entre as linhas laterais e de derivação, sendo que cada uma consumirá de 40 a 60% de DHUO (eqs.65 a 68), porém de tal forma que a soma seja igual a 100%, ou seja, igual a DHUO (eq. 69).

3.5.2. Dimensionamento das linhas secundária e principal com base na velocidade

A velocidade na linha secundária, na linha principal em aclave e na linha principal em declive é calculada, respectivamente, por:

$$V_S = 1,27324 \cdot (Q_S/D_S^2) \quad (70)$$

$$V_{PA} = 1,27324 \cdot (Q_P/D_{PA}^2) \quad (71)$$

$$V_{PD} = 1,27324 \cdot (Q_P/D_{PD}^2) \quad (72)$$

em que,

V_S - velocidade na linha secundária, em m/s ;

V_{PA} - velocidade na linha principal em aclave, em m/s ;

V_{PD} - velocidade na linha principal em declive, em m/s.

Segundo LABYE et al. (1988), a velocidade deve estar entre 0,2m/s e 2,0m/s para tubulações com diâmetro de até 0,3m. Desta forma, as equações que definem o dimensionamento das linhas secundária e principal em função da velocidade são:

$$V_S \geq 0,2 \quad (73)$$

$$V_S \leq 2,0 \quad (74)$$

$$VPA \geq 0,2 \quad (75)$$

$$VPA \leq 2,0 \quad (76)$$

$$VPD \geq 0,2 \quad (77)$$

$$VPD \leq 2,0 \quad (78)$$

3.6. Restrições

Além da função objetivo e das equações referentes aos aspectos hidráulicos, o modelo apresenta uma série de restrições referentes à operação do sistema e geometria da área irrigada.

3.6.1. Restrição referente ao turno de irrigação

O turno de irrigação (T), dado em dias, deve ser menor que um determinado valor, denominado turno máximo (TX), dado por:

$$TX = (0,5.PW) / ETMD \quad (79)$$

sendo,

TX - número máximo de dias que pode ter um turno de irrigação ;

PW - área molhada pelo emissor em relação à área efetivamente ocupada pela árvore, em % ;

ETMD - evapotranspiração máxima diária no período de pico, em mm/dia.

Desta forma, a restrição é expressa por:

$$T \leq TX \quad (80)$$

3.6.2. Restrição referente ao tempo diário disponível para irrigação

Em função da tarifa de energia e da possibilidade do irrigante, tem-se um número de horas por dia disponível para irrigação (TD). Desta forma:

$$[(NUO \cdot I) / (NUOS \cdot T)] \leq TD \quad (81)$$

3.6.3. Restrição quanto à vazão disponível

A vazão requerida pelo sistema de irrigação deve ser menor ou igual à vazão disponível na fonte de água. Logo:

$$(2 \cdot QE \cdot NE \cdot NGE \cdot NLL \cdot NUOS) / UE \leq QDISP \quad (82)$$

em que,

QDISP - vazão disponível na fonte de água, em m³/s.

3.6.4. Restrição que assegura pelo menos uma unidade operacional em funcionamento na linha secundária

Uma das hipóteses básicas do modelo consiste em que se tenha toda e qualquer linha secundária sempre em operação. Para assegurar isto, tem-se a seguinte restrição:

$$NUOS \geq NLS \quad (83)$$

3.6.5. Restrição referente à ocupação total da área disponível

A restrição que assegura que o sistema de irrigação por microaspersão irá cobrir toda a área disponível está caracterizada na eq. (28).

3.6.6. Restrição referente à produção relativa

A produção relativa (PREL), definida anteriormente, tem valor máximo igual a 1. Para assegurar que este limite seja respeitado, tem-se a seguinte restrição:

$$(3600.UE.NE.QE.I.DI)/(ETMAX.T.EE.EL) \leq 1 \quad (84)$$

3.7. Dados de entrada

Para que o modelo possa efetuar a otimização do sistema de irrigação por microaspersão faz-se necessário o fornecimento de parâmetros básicos, que caracterizam a cultura a ser irrigada e as condições operacionais do sistema e geométricas da área. A relação destes parâmetros encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de entrada do modelo de Programação Não-linear para dimensionamento de sistemas de irrigação por microaspersão na cultura da laranja

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO
CXL	Preço da caixa (40,8Kg) de laranja, US\$
PMAX	Produção máxima com irrigação, cx/árvore
NPE	Número de árvores por hectare
NE	Número de emissores por árvore
DI	Número de dias de irrigação durante o ciclo
ETMAX	Evapotranspiração máxima para um determinado nível de probabilidade de ocorrência, em m/ciclo
ETMD	Evapotranspiração máxima diária no período de pico, para um determinado nível de probabilidade de ocorrência, em mm/dia
EE	Espaçamento entre emissores ou grupos de emissores na linha lateral, em m
EL	Espaçamento entre linhas laterais, em m
CP	Custo de produção da laranja, em US\$/árvore
CE	Custo unitário do microaspersor, em US\$
HM	Carga hidráulica média ou de operação do microaspersor, em m.c.a.
NBM	Rendimento do conjunto motobomba, em %
CKWH	Custo do kWh de energia elétrica, em US\$
DECX	Declividade da área irrigada na direção x, m/m
DECY	Declividade da área irrigada na direção y, m/m
FRC	Fator de recuperação do capital

Tabela 1 - Dados de entrada do modelo de Programação Não-linear para dimensionamento de sistemas de irrigação por microaspersão na cultura da laranja

CVF	Coeficiente de variação de fabricação do microaspersor, em valor decimal
QDISP	Vazão disponível para irrigação, em m^3/s
HEC	Perda de carga na estação de controle, m.c.a.
QE	Vazão do microaspersor, na condição de carga hidráulica média, em m^3/s
PW	Área molhada pelo microaspersor em relação à área efetivamente ocupada pela árvore, em %
LX	Comprimento do campo na direção x, em m
LY	Comprimento do campo na direção y, em m
A	Área total a ser irrigada, em m^2
TX	Máximo turno de irrigação (dia)
TD	Tempo diário disponível para irrigação, em h
Ky	Fator que expressa o efeito da relação entre a diminuição da produção relativa e o déficit de evapotranspiração relativa, sobre o rendimento
C1	Coeficiente da regressão para cálculo de CVR
C2 e C3	Coeficientes da regressão para cálculo de CPC
C4 e C5	Coeficientes da regressão para cálculo de CEC
C6 e C7	Coeficientes da regressão para cálculo de CEB
x	Expoente da carga hidráulica na relação vazão-carga hidráulica do microaspersor
k	Coeficiente da relação vazão-carga hidráulica do microaspersor, em $m^3/m.c.a.^x$

3.8. Dados de saída

Os dados de saída são as variáveis de decisão que geraram a maximização da receita líquida. Na Tabela 2 estão listadas estas variáveis e seus respectivos limites inferior e superior. A definição destes extremos é de fundamental importância para que se obtenha êxito na busca da solução ótima. Há necessidade, também, de se estabelecer um valor inicial às variáveis do modelo, visando facilitar o processo de otimização.

Tabela 2 - Relação das variáveis de decisão do modelo (dados de saída) e seus respectivos limites inferior e superior

VARIÁVEL	UNIDADE	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
FO	US\$/ha.ano	$-\infty$	$+\infty$
CSIST	US\$/ha.ano	1	$+\infty$
RBRUTA	US\$/ha.ano	1	$+\infty$
CPROD	US\$/ha.ano	1	$+\infty$
CENE	US\$/ano	1	$+\infty$
CEB	US\$	1	$+\infty$
CVR	US\$	1	$+\infty$
CPC	US\$	1	$+\infty$
CEC	US\$	1	$+\infty$
LL	m	4,5.EE	LY/2
LD	m	2,5.EL	LX/2
LS	m	LY/2	LY
LP	m	0	LX/2
TLL	m	9.EE	A/EL
TLD	m	2,5.EL	A/(10.EE)
TLS	m	LY/2	(0,5.A)/3.EL
TLP	m	0	LX-(6.EL)
HLA	m	0,01	10
HLD	m.c.a.	0,01	10
HDA	m.c.a.	0,01	10
HDD	m.c.a.	0,01	10
HS	m.c.a.	0,01	10
HPA	m.c.a.	0,01	10
HPD	m.c.a.	0,01	10

Tabela 2 - Relação das variáveis de decisão do modelo
(dados de saída) e seus respectivos limites
inferior e superior

HT	m.c.a.	10	80
DLA	m	0,010	0,022
DLD	m	0,010	0,022
DDA	m	0,035	0,144
DDD	m	0,035	0,144
DS	m	0,035	0,310
DPA	m	0,035	0,310
DPD	m	0,035	0,310
NUO	-	1	$A/(30.EE.EL)$
NUOS	-	1	$A/(30.EE.EL)$
NGE	-	5	$LY/(2.EE)$
NLL	-	3	$LX/(2.EL)$
NLS	-	1	$A/(60.EE.EL)$
NSS	-	1	$A/(60.EE.EL)$
NSP	-	0	$A/(120.EE.EL)$
QL	m^3/s	5.QE	$(LY.QE)/(2.EE)$
QD	"	30.QE	$(A.QE)/(2.EL.EE)$
QS	"	30.QE	$(A.QE)/(EE.EL)$
QP	"	30.QE	$(A.QE)/(2.EL.EE)$
QT	"	30.QE	$(A.QE)/(EE.EL)$
FL	-	0,36	1
FD	-	0,36	1
FS	-	0,36	1
FP	-	0,36	4
DHUO	m.c.a.	0,01	20
VS	m/s	0,2	2,0
VPA	m/s	0,2	2,0
VPD	m/s	0,2	2,0
TE	-	0	$+\infty$
UE	-	0,7	1
HMIN	m.c.a.	8	15
I	h	1	21
T	dia	1	TX

3.9. Valores dos dados de entrada utilizados

A citricultura desenvolvida na região de Limeira, SP, foi escolhida para aplicação do modelo proposto.

Os dados de entrada utilizados neste trabalho encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de entrada referentes à microaspersão e à citricultura desenvolvida em Limeira, SP

PARAMETRO	UNIDADE	VALOR
CXL	US\$/cx	2,28
PMAX	cx/árvore	6,5
EE	m	4
EL	m	8
NPE	árvore	312
NE	emissor/árvore	1
DI	dia	120
ETMAX	m/ciclo	0,487
ETMD	mm/dia	4,7
CP	US\$/árvore	4,34
CE	US\$/emissor	2,11
HM	m.c.a.	15
NBM	-	0,65
CKWH	US\$/kWh	0,05064
FRC		0,13587
CVF	-	0,05
QDISP	m ³ /s	0,2
HEC	m.c.a.	15
PW	%	50
FX	dia	5,32
TD	h/dia	21

O preço da caixa de laranja (CXL) utilizado corresponde à média de 10 anos, referentes às safras de 80/81 a 90/91, segundo NEVES¹ (1993).

Os dados referentes à cultura da laranja irrigada são reais e foram obtidos junto à Fazenda

---

¹NEVES, E.M. (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, Piracicaba, SP) Comunicação pessoal, 1993.

Amazonas, situada em Leme, SP. A copa é Valência e o porta-enxerto é o limão cravo. O espaçamento entre árvores (EE) é de 4m e entre ruas de árvores (EL) é de 8m, totalizando 312 plantas por hectare (NPE). A produção máxima de caixas de laranja por árvore (PMAX) adotada neste trabalho corresponde ao valor médio gerado pelo pomar em um período de 10 anos (de 1980 a 1989), sob regime de irrigação.

Com base no trabalho de SEQUEIRA SAMPAIO (1990), verifica-se que um solo típico desta região é o Latossolo de textura média (Vermelho-amarelo e Vermelho escuro) distrófico. Adotou-se, então, este solo como exemplo, tendo como características: 100mm de água disponível e 50mm de água facilmente disponível, com profundidade do sistema radicular de 1m. Com estes dados foi possível definir o valor da porcentagem de área molhada (PW). Deste mesmo estudo, obteve-se os valores de ETMAX, ETMD e DI, para o nível de probabilidade de ocorrência de 70%, sendo que o autor trabalhou com dados provenientes da Estação Meteorológica de Cordeirópolis, SP (a mais próxima de Limeira, SP).

O custo de produção por caixa de laranja (CP), para um espaçamento de 8m x 4m, foi obtido junto à Associação dos Citricultores do Estado de São Paulo (ACIESP).

O custo na energia foi obtido junto à CPFL,

enquanto o fator de recuperação do capital (FRC) foi calculado para taxa de juros anual de 6% e vida útil de 10 anos.

Para estabelecer as relações custo-dimensão característica, do tipo custo por metro linear versus diâmetro interno da tubulação, foram levantados os dados técnicos e de custo de todos os componentes do sistema de irrigação, desde a moto-bomba até o microaspersor.

As relações custo-dimensão característica encontram-se na Tabela 4, e foram obtidas utilizando o programa computacional para ajuste de equações em dados experimentais, desenvolvido por ZULLO JUNIOR & ARRUDA (1987).

Tabela 4 - Ajuste das relações custo-dimensionais utilizadas no modelo proposto.

ITEM	COEFICIENTE	DOMÍNIO	R^2
CVR	$C1 = 403,43$	0 a $0,025m^3/s$	1,00
CPC	$C2 = 683,90$ e $C3 = 0,52$	$0 \leq NUO \leq 40$	0,99
CEC	$C4 = 1812,12$ e $C5 = 0,10$	$0 \leq QT \leq 0,042$	0,94
CEB	$C6 = 834,22$ e $C7 = 0,47$	0 a 50 CV	0,99

R^2 = coeficiente de correlação

A relação custo-dimensional para tubos de polietileno utilizados nas linhas laterais é dada por:

$$CPE = [9,03.(DLA+DLD)] - 0,0090 \quad (92)$$

com $R^2 = 0,94$ e válida para diâmetros entre 0,01m e 0,022m

Para tubos de PVC adotados nas linhas de derivação, a relação é:

$$CPVCd = 91,41.(DDA^{1,51} + DDD^{1,51}) \quad (93)$$

com $R^2 = 0,99$ e válida para diâmetros entre 0,035m e 0,144m

Para tubos de PVC utilizados nas linhas secundária e principal, as equações são:

$$CPVCs = 380,45.DS^{1,78} \quad (94)$$

com $R^2 = 0,99$ e válida para diâmetros entre 0,035m e 0,310m

$$CPVCp = 190,23.(DPA^{1,78} + DPD^{1,78}) \quad (95)$$

com $R^2 = 0,99$ e válida para diâmetros entre 0,035m e 0,310m

3.10. Parâmetros de entrada utilizados na análise de sensibilidade da função objetivo

Além dos dados de entrada descritos no item anterior, existem outros cujo efeito no valor da função objetivo é alvo deste trabalho. Estes parâmetros de entrada são: tamanho e formato da área, modelo de microaspersor (vazão) e declividade nas direções x e y.

Os tamanhos de área analisados foram $82944m^2$ e $230400m^2$.

Os formatos avaliados foram aqueles de relação LX/LY igual a: 0,25 , 0,44 , 1 , 2,25 e 4.

Os três microaspersores analisados apresentam, na carga hidráulica média de 15m.c.a., vazões

de $9,72 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (35 l/h), $1,55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (56 l/h) e $2,41 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (87 l/h). As relações vazão - carga hidráulica para estes microaspersores encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação vazão-pressão para os microaspersores

EMISSION	VAZÃO NA CARGA HIDRÁULICA DE OPERAÇÃO (15m.c.a.)	RELAÇÃO VAZÃO - CARGA HIDRÁULICA	R ²
1	$9,72 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 2,42 \cdot 10^{-6} \cdot H^{0,51}$	0,99
2	$1,55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 3,73 \cdot 10^{-6} \cdot H^{0,52}$	0,99
3	$2,41 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 6,53 \cdot 10^{-6} \cdot H^{0,48}$	0,99

Q = vazão do microaspersor, em m^3/s ;

H = carga hidráulica no microaspersor, em m.c.a.

As declividades na direções x e y foram adotadas como sendo idênticas, porém com valores iguais a 0 (em nível), 1% , 3% e 5%.

A combinação destes parâmetros e seus diferentes valores resultou em 120 configurações.

3.11. Solução do modelo

Para solucionar o modelo não-linear de otimização de sistemas de irrigação por microaspersão aplicado ao caso da citricultura em Limeira, SP, utilizou-se o modulo MINOS do "software" GAMS ("General

Algebraic Modeling System"), que permite a resolução de sistemas de equações não-lineares.

Os algoritmos básicos utilizados pelo GAMS/MINOS são: o método de Newton, o método do Gradiente Reduzido e o método de Lagrange. As características e aplicações do programa GAMS são encontradas em BROOKS et al. (1988).

O modulo GAMS/MINOS resolve problemas que apresentam equações não-lineares na função objetivo e nas restrições, porém não admite variáveis inteiras não-lineares.

O modelo proposto apresenta muitas variáveis não-lineares que só tem significado real se forem inteiras, como é o caso do número de unidades operacionais (NUO).

Para adequar as limitações do programa às necessidades do modelo, algumas exigências foram estabelecidas e adotadas como hipóteses básicas do modelo proposto, as quais foram descritas no item número 3.1. Criou-se, ainda, um procedimento para se obter a solução ótima com variáveis inteiras não-lineares, que consiste em:

- selecionar valores iniciais confiáveis para as variáveis de decisão (Tabela 2), caso contrário, o programa GAMS irá adotar o valor 0, que para muitas funções não é recomendado pois a derivada também será 0 ;

- rodar o modelo e anotar os valores das variáveis NUOS e NLS que otimizam a função objetivo. Na

maioria das vezes, estas variáveis apresentam-se como não inteiras;

- a partir das variáveis NUOS e NLS obtidas na primeira solução, identificar os valores inteiros mais próximos (tanto inferior como superior) e compor os pares NUOS - NLS que atendam a exigência descrita nas hipóteses básicas ($\text{NUOS/NLS} = \text{número inteiro}$) ;

- rodar estas combinações (NUOS e NLS pré-estabelecidos) visando obter o valor de NUO (que continua como variável) para cada uma delas. Muito provavelmente, o valor de NUO obtido seja não inteiro. Portanto, deve-se considerar os valores inteiros de NUO mais próximos e compor com os pares NUOS - NLS, as combinações que atendam as hipóteses básicas (NUO igual ou múltiplo de NUOS, NUO/NLS igual a um número par e NUOS/NLS igual a um número inteiro) ;

- rodar as combinações compostas por valores inteiros de NUO, NUOS e NLS. Dentre as combinações que resultem em valores inteiros de NGE e NLL, escolher aquela que fornece o maior valor na função objetivo (maior receita líquida). Ela é a solução ótima local.

As hipóteses básicas e a adoção do procedimento descrito acima permitem que se obtenha uma solução ótima composta por variáveis inteiras não-lineares.

A solução encontrada pelo programa GAMS é um ótimo local, ou seja, pode ou não ser o ótimo global.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A combinação dos diferentes parâmetros de entrada utilizados na análise de sensibilidade, resultou em 120 diferentes situações de projeto. Para ilustrar como o modelo é expresso na linguagem GAMS para ser solucionado pelo "solver" MINOS, encontra-se no Apêndice 1 a descrição de uma destas situações.

O tempo necessário para que o programa GAMS/MINOS resolva o modelo de maximização desenvolvido é de, aproximadamente, 60 segundos.

4.1. Resultados

Os resultados para as 120 combinações estudadas estão no Apêndice 2 - Tabela 1. Constatou-se que os valores das variáveis, obtidos para cada uma das 120 situações, foram consistentes com os limites estabelecidos e com as equações não-lineares que compõem o modelo, o que demonstra a precisão do programa utilizado. Notou-se, também, que as configurações produzidas pelo modelo proposto não diferiram das conformações definidas pelas hipóteses básicas. Isto evidencia a eficácia das equações não-lineares em gerar conformações previstas pelo modelo.

Na maioria das situações, o modelo não adotou linhas principais. Porém, nas configurações 89 e 90 (Apêndice 2 - Tabela 1), ocorreram tais linhas e o sistema de equações não-lineares apresentou resultados consistentes.

A coerência entre os resultados obtidos e as hipóteses do modelo desenvolvido ocorreu, também, em relação aos critérios hidráulicos e operacionais.

A uniformidade de emissão não esteve acima de 90% em nenhuma das soluções apresentadas, indicando que o ótimo em termos de distribuição de água nem sempre resulta em maior receita líquida.

Não foi possível encontrar a solução ótima em 12 casos, ou seja, não se identificou um conjunto de valores que atendesse às restrições do modelo, dentro dos limites estabelecidos para as variáveis.

Os diâmetros das linhas da rede hidráulica, fornecidos como solução ótima pelo modelo, não são necessariamente valores disponíveis no mercado, posto que o programa Gams não trabalha com variáveis não-lineares inteiras (não utiliza variáveis discretas). Os diâmetros das linhas são variáveis contínuas e podem ser interpretados como diâmetros equivalentes. O trecho composto por um diâmetro equivalente pode ser desdobrado em duas partes, constituídas por diâmetros comerciais sucessivos. Esta conversão pode ser realizada de forma

otimizada utilizando-se a Programação Linear.

4.2. Configuração de maior receita líquida anual versus configuração de menor receita líquida anual

A configuração que resultou em maior valor de receita líquida anual (US\$2939/ha) é aquela de 23,04 ha, com 480m x 480m, em nível e com emissor de 35 l/h. Por sua vez, a de menor valor de receita líquida anual (US\$2402/ha) apresenta LX = 144m e LY = 576m (área de 8,294 ha com LX/LY = 0,25), declividade de 5% nas duas direções e vazão do microaspersor de 56 l/h.

Os resultados para estas duas situações encontram-se na Tabela 6. Nota-se que a situação mais rentável apresentou maior receita bruta anual e menor custo anual do sistema em relação à outra configuração.

A declividade contribuiu para a diferença de desempenho das duas situações analisadas. Na configuração de maior receita a declividade é igual a 0 (em nível), o que possibilitou dividir a área de 23,04ha em 4 unidades operacionais com uniformidade de emissão de 82%. Na conformação de menor rentabilidade, o desnível é de 5% e a uniformidade de emissão de 81%, porém a área foi subdividida em 8 unidades, gerando uma maior custo anual do sistema de irrigação. Portanto, a maior receita líquida foi obtida em uma área de forma quadrangular, em nível e com o microaspersor de menor vazão (35 l/h).

Tabela 6 - Comparação entre a configuração de maior e a de menor receita líquida anual.

VARIÁVEIS	CONFIGURAÇÃO	
	MAIS RENTÁVEL	MENOS RENTÁVEL
A (ha)	23,04	8,294
LX (m)	480	144
LY (m)	480	576
QE (l/h)	35	56
DECX (%)	0	5
DECY (%)	0	5
FO (US\$/ha.ano)	2939	2402
CSIST (US\$/ha.ano)	329	483
RBRUTA (US\$/ha.ano)	4624	4241
CPROD (US\$/ha.ano)	1356	1356
NUO	4	8
NUOS	1	1
NLS	1	1
LP (m)	-	-
LL (m)	118	70
LD (m)	236	68
LS (m)	360	504
CENE (US\$/ano)	1284	631
CEB (US\$)	3050	2042
CVR (US\$)	1614	3227
CPC (US\$)	1406	2017
CEC (US\$)	8112	3627
TLL (m)	28320	10080
TLP (m)	-	-
TLD (m)	944	544
TLS (m)	360	504
HT (mca)	28,94	50
HDA (mca)	3,78	0,091
HDD (mca)	3,78	6,89
HLA (mca)	4,53	0,94
HLD (mca)	4,53	7,94
DPA (m)	-	-
DPD (m)	-	-
OLD (m)	0,018	0,014
DDA (m)	0,096	0,104
DDD (m)	0,096	0,042
NGE	30	18
NLL	30	9
NSS	2	4
QL (l/h)	1050	1008
QD (l/h)	63000	18144
HS (mca)	4,26	1,01
QS (l/h)	63000	18144
HPA (mca)	-	-
QP (l/h)	-	-
QT (l/h)	63000	18144
NSP	-	-
HPD (mca)	-	-
DHUO (mca)	8,31	7,93
VPA (m/s)	-	-
VPD (m/s)	-	-
VS (m/s)	1,66	0,64
TE	7200	2592
DS (m)	0,116	0,101
DLA (m)	0,018	0,022
UE	0,82	0,81
HMIN (mca)	11,68	11,83
I (h)	13,67	10,49
T (dia)	3	4

4.3. Efeito do tamanho e formato da área na receita líquida anual

No Apêndice 3 - Figuras de 1 a 12, tem-se a receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para os diferentes microaspersores e declividades utilizados nesta análise de sensibilidade.

Verificou-se que, tanto para a declividade de 1% como para o terreno em nível, a área de 23,04ha resultou em maior receita líquida anual em comparação com a de 8,294ha, para todos os formatos (LX/LY) e microaspersores avaliados. Nas declividades 3% e 5%, não se constatou esta mesma predominância pois, com o aumento do valor de LX/LY, a área de 8,294ha apresentou, na maioria dos casos, maior receita líquida que aquela de 23,04ha. Estas tendências podem ser notadas nas Figuras 4 e 5, onde se tem a vazão do microaspersor de 35 l/h na condição em nível e na situação com declividade de 5%.

A variação do custo anual do sistema de irrigação por microaspersão em função do formato da área, tem relação com as constatações realizadas anteriormente. Nas Figuras 6 e 7 tem-se esta relação para a vazão do microaspersor de 35 l/h, nas condições em nível e de 5% de declividade. Em nível, a área de 8,294 ha apresentou maior custo anual do sistema que a área de 23,04ha, para todos os formatos. Por sua vez, na condição de 5% de declividade, a área de 23,04ha apresentou maior custo anual do sistema,

Figura 4 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade 0.

Figura 5 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade de 5%.

Figura 6 - Custo anual do sistema de irrigação em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade 0.

Figura 7 - Custo anual do sistema de irrigação em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade 5%.

na maioria dos formatos.

No Apêndice 2 - Tabela 1, verifica-se que o custo de produção é fixo para as 120 configurações, enquanto a receita bruta é praticamente constante e de valor máximo. Desta forma, o custo anual do sistema é o principal fator que determina a variação da receita líquida anual nas situações analisadas neste trabalho.

O formato que resultou em maior receita líquida anual para a área de 8,294 ha foi o quadrangular ($LX/LY = 1$), para todos os microaspersores e declividades analisados (Apêndice 3 - Figuras 1 a 12). No caso da área de 23,04ha, o valor de LX/LY que resultou em maior receita líquida anual variou entre 0,44 e 1. Para o microaspersor de vazão igual a 35 l/h, utilizado em declividades de até 3%, o formato quadrangular foi mais rentável. O valor LX/LY igual a 0,44 resultou em maior receita para o microaspersor de 87 l/h combinado com todas as declividades e, também, para os emissores de vazões 35 l/h e 56 l/h associados à declividade de 5%.

Portanto, para áreas de 8,294ha o formato mais rentável é o quadrangular, enquanto que para áreas de 23,04ha este formato prevalece para declividades de até 3%, associadas a microaspersores de vazão inferior ou igual a 56 l/h. Para declividade de 5% ou microaspersor de 87 l/h, o valor LX/LY igual a 0,44 resulta em maior lucro.

4.4. Efeito da vazão do microaspersor na receita líquida anual

Para realizar esta análise considerou-se apenas o formato quadrangular, uma vez que ele resulta, na maioria dos casos, na configuração mais rentável. Nas Figuras 8, 9, 10 e 11 estão os gráficos referentes à receita líquida em função do microaspersor utilizado, para cada uma das declividades analisadas.

Observa-se que, para todas as declividades, a receita líquida diminui com o uso de microaspersores de maior vazão, tanto na área de 8,294ha como na de 23,04ha. Nota-se, ainda, que a área de 8,294ha resultou em maior receita líquida nas declividades 0, 1% e 3%, sendo que no valor 5% prevaleceu a área de 23,04ha, o que está coerente com a descrito no item anterior.

A Figura 12 apresenta o custo anual do sistema de irrigação em função do microaspersor, para a condição em nível. Nota-se que o custo do sistema aumenta com o uso de microaspersores de maior vazão, daí o decréscimo na receita líquida correspondente. Uma vez que o microaspersor de vazão 35 l/h atende às restrições técnicas do modelo (tempo diário disponível para irrigação e máximo turno de irrigação), ele é a solução mais econômica posto que o uso de emissores de maior vazão resultará em maior custo do sistema.

Figura 8 - Receita líquida anual em função da vazão do microaspirador, para LX/LY = 1 e declividade 0.

Figura 9 - Receita líquida anual em função da vazão do microaspirador, para LX/LY = 1 e declividade 1%.

Figura 10 - Receita líquida anual em função da vazão do microaspersor, para $LX/LY = 1$ e declividade 3%.

Figura 11 - Receita líquida anual em função da vazão do microaspersor, para $LX/LY = 1$ e declividade de 5%.

Figura 12 - Custo anual do sistema de irrigação em função da vazão do microaspirador, para declividade 0 e $LX/LY = 1$.

4.5. Efeito da declividade na receita líquida anual

O sentido da declividade na direção x é da esquerda para a direita, enquanto que na direção y é de cima para baixo.

Os valores de declividade utilizados na análise de sensibilidade foram 0, 1, 3 e 5%. Adotou-se, sempre, o mesmo valor para as direções x e y .

Nas Figuras 13, 14 e 15 estão representadas as relações entre a receita líquida anual e a declividade nas duas direções, para os dois tamanhos de área no formato quadrangular e para os três microaspersores em estudo. Verifica-se que a receita líquida anual decresce com o aumento da declividade, nos três microaspersores avaliados. Observa-se, ainda, que até a declividade 3% a área de 23,04ha resulta em maior receita líquida anual, sendo que para valores acima de 3% prevalece a área 8,294ha.

O custo anual do sistema de irrigação é que determina esta inversão de tendência, conforme pode ser observado na Figura 16, para o microaspersor de vazão 35 l/h.

Figura 13 - Receita líquida anual em função da declividade nas duas direções, para a vazão de 35 l/h e LX/LY = 1.

Figura 14 - Receita líquida anual em função da declividade nas duas direções, para a vazão de 56 l/h e LX/LY = 1.

Figura 15 - Receita líquida anual em função da declividade nas duas direções, para a vazão de 87 l/h e LX/LY = 1.

Figura 16 - Custo anual do sistema de irrigação em função da declividade nas duas direções, para a vazão de 35 l/h e LX/LY = 1.

4.6. Relação da uniformidade de emissão (UE) com o formato e com a declividade

A relação entre a uniformidade de emissão e o formato da área, para o microaspersor de vazão igual a 35l/h, na condição em nível e na situação com declividade de 3%, está descrita nas Figuras 17 e 18. Observa-se que para a área de 23,04ha a uniformidade de emissão decresce com o aumento da relação LX/LY. Por sua vez, na área de 8,294ha, a variação da UE com o formato foi muito pequena. Os valores de UE da área de 8,294ha estiveram, na maioria dos valores LX/LY, acima dos correspondentes para a área de 23,04ha.

As Figuras 19 e 20 revelam que a uniformidade de emissão decresce com o aumento da declividade. Isto ocorre porque o aumento da declividade provoca maiores variações na distribuição de carga hidráulica na unidade operacional, que é a base do conceito de uniformidade de emissão. Desta forma, como o tamanho e o formato da área não foram alterados, maiores variações na carga hidráulica da unidade significam menores valores de uniformidade de emissão.

Figura 17 - Uniformidade de emissão em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade 0.

Figura 18 - Uniformidade de emissão em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade de 3%.

Figura 19 - Uniformidade de emissão em função da declividade nas duas direções, para a vazão de 35 l/h e LX/LY igual a 1.

Figura 20 - Uniformidade de emissão em função da declividade nas duas direções, para a vazão de 87 l/h e LX/LY igual a 1.

4.7. Relação entre o número total de unidades operacionais (NUO) e o tamanho e formato da área

A relação entre o número total de unidades operacionais (NUO) e o tamanho e formato da área, para o microaspersor de vazão 35 l/h associado às declividades 0 e 3%, está caracterizada nas Figuras 21 e 22, respectivamente. Observa-se que na condição em nível, NUO permaneceu constante (igual a 4) para a área de 8,294ha, enquanto que para a área de 23,04ha apresentou um pico inicial (em $LX/LY = 0,25$) de 10 unidades operacionais, decrescendo, em seguida, para o valor 4, onde permaneceu. As tendências das curvas são as mesmas apresentadas na relação UE x formato da área (Figura 17). Para a área de 23,04ha, a relação LX/LY igual a 0,25 resultou em um número elevado de unidades operacionais e alto índice de uniformidade de emissão. Porém, esta configuração acarretou elevado custo anual do sistema de irrigação (Figura 6), e menor receita líquida anual (Figura 1) em relação aos demais formatos.

Na declividade de 3% verifica-se a mesma tendência encontrada na situação em nível, porém com número menor de unidades operacionais nas maiores relações LX/LY (acima de 2,25).

Figura 21 - Número total de unidades operacionais (NUO) em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade 0.

Figura 22 - Número total de unidades operacionais (NUO) em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade de 3%.

4.8. Situações em que o modelo não encontrou uma solução ótima

As situações que não geraram solução ótima aparecem em branco no Apêndice 2 - Tabela 1, e correspondem a combinações envolvendo o extremo superior dos parâmetros de entrada avaliados, ou seja, relações LX/LY de valor 2,25 e 4, declividades de 3 e 5% e microaspersores de 56 e 87 l/h. O que se verificou é que estas configurações não convergiam para uma solução ótima, pois não atendiam às restrições do modelo e os limites estabelecidos para as variáveis. Um exemplo disto, é o caso onde a área é de 8,294ha, com LX igual a 576m e LY igual a 144m (LX/LY igual a 4), com declividade de 5% nas duas direções. Esta situação geométrica associada com um microaspersor de 35 l/h, não forneceu solução ótima. Mudando os limites de UE, obteve-se um resultado ótimo para uniformidade de emissão de 52%, o qual está muito abaixo do convencionalmente aceito (acima de 85%).

Estes casos não resolvidos constituem-se num indicador de confiabilidade do modelo e do programa computacional utilizado, uma vez que os critérios e limites estabelecidos foram respeitados a ponto de não se identificar uma solução ótima, por ocasião do não atendimento destas condições.

4.9. Sugestões para continuidade

Para dar continuidade à linha de pesquisa iniciada por este trabalho, faz-se as seguintes sugestões:

- pesquisar ou desenvolver um programa computacional que resolva problemas com variáveis inteiras não-lineares ;
- desenvolver um modelo que compense o efeito da declividade por meio de diferentes comprimentos da linha, mantendo-se constante o diâmetro ;
- tornar mais amigável o processo de simulação utilizando o programa computacional GAMS/MINOS ;
- ampliar a aplicação do modelo a outros sistemas de irrigação pressurizada e outras condições geométricas e operacionais.

5. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos neste trabalho para a região de Limeira, SP, estabeleceram-se as seguintes conclusões:

a) Os resultados obtidos nas 120 situações analisadas demonstraram que o modelo proposto foi eficaz na geração de configurações segundo a conformação estabelecida nas hipóteses básicas ;

b) Das componentes da receita líquida anual, o custo anual do sistema de irrigação foi a que mais variou, em função da análise de sensibilidade realizada ;

c) A configuração que resultou em maior receita líquida anual (US\$2939/ha) apresenta formato quadrangular, área de 23,04ha , terreno em nível e microaspersor de 35 l/h. Por sua vez, a de menor receita líquida (US\$2402/ha) corresponde a uma área de 8,294ha , com formato retangular (LX = 144m e LY=576m), declividade de 5% nas duas direções e microaspersor de vazão igual a 56 l/h ;

d) Para áreas de 8,294ha o formato que resultou em maior receita líquida anual, em todas as combinações envolvendo microaspersor (vazão) e declividade do terreno, foi o quadrangular. Para áreas de 23,04ha o formato quadrangular prevaleceu para declividades de até 3%, associadas a microaspersores de vazão igual ou inferior a 56 l/h. Declividade de 5% ou emissor de 87 l/h de vazão apresentaram maior rentabilidade com LX/LY igual a 0,44 ;

e) A receita líquida anual diminuiu com o uso de microaspersores de maior vazão, sendo que a maior rentabilidade foi obtida com emissores de 35 l/h ;

f) A receita líquida anual decresceu com o aumento da declividade do terreno. Até a declividade de 3% a área de 23,04 ha apresentou maior rentabilidade que a de 8,294 ha. Porém, para a declividade de 5% verificou-se uma inversão nesta predominância, sendo a de 8,294ha a mais rentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G. & BROCKWAY, E. Concepts for energy-efficient irrigation system design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, 110(2):99-106, 1984.
- BENAMI, A. & OFEN, A. *Irrigation engineering*. Haifa, IESP, 1984. 257p.
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 4.ed. Viçosa, UFV/Imprensa Universitária, 1986. 488p.
- BHAVE, P.R. Selecting pipe sizes in network optimization by LP. *Journal of the Hydraulics Division*, New York, 105(7):1019-25, 1978.
- BROOKS, A. ; KENDRICK, D. ; MEERAUS, A. *GAMS: a user's guide*. Redwood City, The Scientific Press, 1988. 289p.
- BUCKS, D.A. ; NAKAYAMA, F.S. ; WARRICK, A.W. Principles, practices, and potentialities of trickle (drip) irrigation. In: HILLEL, D., ed., *Advances in irrigation*. New York, Academic Press, 1982. v.1. p.219-98.

BUSTOS, D. Modelo de optimización para riego por goteo. Chillán, 1988. 63p. (Graduacion - Universidad de Concepcion).

CASE, K.E. & WHITE, J.A. A linear programming formulation of a water supply problem. *Transactions of the American Institute of Industrial Engineers*, 4(2):85-91, 1972.

CHIANG, A.C. *Matemática para economistas*. São Paulo, McGraw-Hill, 1982. 684p.

CHRISTIANSEN, J.E. *Irrigation by sprinklers*. Davis, University of California, 1942. 65p. (Bulletin, 670).

DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*. Roma, FAO, 1979. 212p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. *Trickle irrigation*. Washington, USDA/Soil Conservation Service, s.d. 129p. (National Engineering Handbook. Section 15: Irrigation, 7).

GIL, P.E. ; MURRAY, W. ; WRIGHT, M.H. *Practical optimization*. New York, Academic Press, 1981. 401p.

GOEHRING, L.D. Optimization of trickle irrigation system design. Fort Collins, 1976. 90p. (M.S. - Colorado State University).

- GUPTA, I. ; HASSAN, M.Z. ; COOK, J. Linear programming analysis of a water supply system with multiple supply points. *Transactions of the American Institute of Industrial Engineers*, 4(3):200-4, 1972.
- HERNANDEZ ABREU, J.M. ; RODRIGO LOPEZ, A. ; PEREZ REGALADO, A. ; GONZALEZ HERNANDEZ, J.F. *El riego localizado*. Madrid, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, 1987. 317p.
- HOLZAPFEL, E.A. ; MARINO, M.A.; VALENZUELA, A. Drip irrigation nonlinear optimization model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. New York, 116(4):479-96, 1990.
- KARMELI, D. & ORON, G. Analysis of closed conduit irrigation system and its subdivision. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, 105(2):187-96, 1979.
- KARMELI, D. ; GADISH, Y. ; MEYERS, S. Design of optimal water distribution networks. *Journal of the Pipeline Division*, New York, 94(1):1-10, 1968.
- KELLER, J. Selection of economical pipe sizes for sprinkler irrigation systems. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 8(2):186-90,93. 1965.

KELLER, J. & BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York, AVI Book, 1990. 652p.

LABIE, Y. ; OLSON, M.A. ; GALAND, A. ; TSIOURTIS, N. **Design and optimization of irrigation distribution networks.** Rome, FAO, 1988. 247p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 44).

LANZER, E.A. **Programação linear; conceitos e aplicações.** 2.ed. Rio de Janeiro, IPEA/INPES, 1988. 270p.

ORON, G. Technical and economic considerations in the design of closed conduit irrigation systems: a case study. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, 5(1):15-27, 1982.

ORON, G. & KARMELI, D. Procedure for the economical evaluation of water networks' parameters. **Water Resources Bulletin**, Urbana, 15(4):1050-60, 1979.

ORON, G. & KARMELI, D. Solid set irrigation system design using linear programming. **Water Resources Bulletin**, Urbana, 17(4):565-70, 1981.

ORON, G. & WALKER, W.R. Optimal design and operation of permanent irrigation systems. **Water resources Research**, Washington, 17(1):11-7, 1981.

PLEBAN, S. & AMIR, I. An interactive computerized aid for the design of branching irrigating networks. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 24(2):358-61, 1981.

SCALOPPI, E.J. Coeficiente para cálculo da perda de carga de pressão em tubulações com múltiplas derivações. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., Brasília, 1986. *Anais*. Brasília, ABID, 1986. v.3, p.1037-48.

SEQUEIRA SAMPAIO, E.L. Probabilidade de atendimento natural das necessidades hídricas dos citros no Estado de São Paulo. Piracicaba, 1990. 147p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

APENDICE 1

```

*-----
*  OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA,
*      UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR
*
*      TESE DE DOUTORADO      JOAO CARLOS CURY SAAD
*-----
*  PARAMETROS
*-----

SCALAR  CXL      preco cx laranja em US$ /2.28/
        PMAX     produção maxima cx por árvore /6.5/
        NPE      número de árvores por ha /312/
        NE       número de emissores por árvore /1/
        DI       número dias irrigados no ciclo /120/
        ETMAX    ET máxima no nível desejado em m por
                ciclo /0.487/
        ETMD     ET máxima diária no período pico mm
                por dia /4.7/
        EE       espaçamento entre grupos de emissores
                em m /4/
        EL       espaçamento entre linhas laterais /8/
        CP       custo produção por árvore /4.34/
        CE       custo microaspersor em US$ /2.11/
        HM       pressão serviço em mca /15/
        NBM      rendimento motobomba /.650/
        CKWH     custo unitário do kWh em US$ /0.05064/
        DECX     declividade na direção x /0/
        DECY     declividade na direção y /0/
        FRC      fator de recuperação do capital /.13587/
        CVF      coeficiente variação fabricação /0.05/
        QDISP    vazão disponível em m3/s
        HEC      perda carga na estação controle /15/
        QE       vazão emissor em m3/s /9.72222E-6/
        PW       porcentagem area molhada /50/
        LX       comprimento do campo na direção x
                em m /480/
        LY       comprimento do campo na direção y
                em m /480/
        A        área total em m2 /230400/
        TX       máximo turno de irrigação, em dia /5.32/
        TD       tempo disponível para irrigação por dia
                /21/ ;
*-----

```

```
*-----
* Variáveis
*-----
```

VARIABLES

```
FO      função objetivo (receita líquida anual)
CSIS    parcial de CSIST
CSIS1   parcial CSIST
CSIST   custo sistema irrigação
RBRUTA  receita bruta
CPROD   custo de produção (sem irrigação)
FL      f Christiansen para a linha lateral
FD      f Christiansen para a linha derivação
FS      f de Christiansen linha secundaria
FP      f Christiansen linha principal
LP      comprimento linha principal (m)
LL      comprimento da linha lateral (m)
LD      comprimento da linha de derivacao (m)
LS      comprimento da linha secundaria (m)
CENE    custo da energia (US$/ano)
CEB     custo estação de bombeamento (US$)
CVR     custo válvula e registros (US$)
CPC     custo painel de controle (US$)
CEC     custo estação controle (US$)
TLL     comprimento total de linha lateral
TLP     comprimento total de linha principal
TLD     comprimento total de linha de derivacao
TLS     comprimento total de linha secundaria
HT      perda carga total (mca)
HDA     perda carga na linha derivação em
        aclave (mca)
HDD     perda carga na linha de derivação em
        declive (mca)
HLA     perda carga linha lateral em aclave
HLD     perda de carga linha lateral em declive
DPA     diametro da linha principal em aclave
DPD     diametro da linha principal em declive
DLD     diametro da linha lateral em declive
DDA     diametro da linha de derivacao em aclave
DDD     diametro da linha de derivação em
        declive (m)
NGE     numero de grupos de emissores na linha
        lateral
NLL     numero de saídas na linha de
        derivacao
NSS     numero saídas na linha secundaria
QL      vazão da linha lateral (l/h)
QD      vazão da linha derivacao (l/h)
HS      perda de carga na linha secundaria(l/h)
QS      vazão na linha secundaria (l/h)
HPA     perda de carga na linha principal em
        aclave (mca)
QP      vazão na linha principal (l/h)
```

QT vazão total na saída da bomba (l/h)
 NSP numero de saídas na linha principal
 HPD perda de carga na linha principal em
       declive (mca)
 DHUO perda de carga total na unidade
       operacional (mca)
 NUO número total de unidades operacionais
 NUOS número de unidades operacionais atuando
       simultaneamente
 NLS número de linhas secundárias
 VPA velocidade na linha principal em aclave
 VPD velocidade na linha principal em declive
 VS velocidade na linha secundária (m/s)
 TE total de emissores
 DS diâmetro da linha secundária (m)
 DLA diâmetro da linha lateral em aclave (m)
 UE uniformidade de emissão
 HMIN carga hidráulica mínima (mca)
 I tempo de irrigação por bloco operacional
 T turno de irrigação (dia) ;

FREE VARIABLES FO;

POSITIVE VARIABLES RBRUTA, CSIS, CSIS1, CSIST, CPROD,
 FL, FD, FS, FP, CENE, CEB, CVR, CPC, CEC, TLL, TLP, TLD,
 TLS, HT, HDD, HLA, HLD, NUO, NUOS, NLS, I, T, NGE, NSS,
 HS, QS, HPA, QP, NSP, HPD, DHUO, VPA, VPD, VS, TE, QL, QD,
 DPA, DPD, HDA, DLD, DDD, DLA, DDA, LL, LD, LS, LP, NLL,
 DS, QT, UE, HMIN;

*-----
 * LIMITES INFERIOR E SUPERIOR ; VALOR INICIAL
 *-----

CSIS.LO = 1 ;
 CSIS1.LO = 1;
 CSIST.LO = 1;
 DLA.LO = .008; DLA.UP = .022;
 DLA.L = .016;
 DLD.LO = .008; DLD.UP = .022;
 DLD.L = .016;
 DDA.LO = .035;
 DDA.L = .050; DDA.UP = .170;
 DDD.LO = .035; DDD.UP = .170;
 DDD.L = .050;
 DS.LO = .035; DS.UP = .31;
 DS.L = .050;
 DPA.LO = .035; DPA.UP = .31;
 DPA.L = .050;
 DPD.LO = .035; DPD.UP = .31;
 DPD.L = .050;


```

CPROD.LO = 1;
CENE.LO = 1 ;
CEB.LO = 1;
CVR.LO = 1;
CPC.LO = 1;
QL.LO = 175 ; QL.UP = 2100;
QL.L = 600;
QD.LO = 1050 ; QD.UP = 126000;
QD.L = 12000;
QS.LO = 1050; QS.UP = 252000;
QS.L = 10000;
QP.LO = 1050; QP.UP = 126000;
QP.L = 10000;
QT.LO = 1050; QT.UP = 252000;
QT.L = 10000;
CEC.LO = 1;
LL.LO = 18;
LL.L = 40; LL.UP = 240;
LD.LO = 20;
LD.L = 40; LD.UP = 240;
LS.LO = 240;
LS.L = 300; LS.UP = 480;
LP.UP = 240;
TLL.LO = 36 ; TLL.UP = 29000;
TLL.L = 10000;
TLD.LO = 20; TLD.UP = 6000;
TLD.L = 200;
TLS.LO = 240; TLS.UP = 4800;
TLS.L = 200;
TLP.UP = 432;
HT.LO = 10 ; HT.UP = 80;
HT.L = 20;
FL.LO = .36; FL.UP = 1;
FL.L = .4;
FD.LO = .36 ; FD.UP = 1;
FD.L = .4;
HDA.LO = .01; HDA.UP = 30;
HDD.LO = .01; HDD.UP = 30;
HLA.LO = .01; HLA.UP = 20;
HLD.LO = .01; HLD.UP = 20;
HS.LO = .01; HS.UP = 20;
HPA.UP = 20;
HPD.UP = 20;
FS.LO = .36 ; FS.UP = 1;
NGE.LO = 5; NGE.UP = 60;
NGE.L = 30;
NLL.LO = 3; NLL.UP = 30;
NLL.L = 15;
NSS.LO = 1; NSS.UP = 120;
NSS.L = 1;
FP.LO = .36 ; FP.UP = 4 ;
NSP.LO = .5 ; NSP.UP = 60;
DHUO.LO = .1 ; DHUO.UP = 20;

```

```

UE.LO = .6 ; UE.UP = 1;
UE.L = .9 ;
HMIN.LO = 6; HMIN.UP = 15;
HMIN.L = 14;
I.LO = 1; I.UP = 21;
I.L = 12;
T.LO = 1; T.UP = 8;
T.L = 2;

```

```

*-----
* EQUACOES
*-----
EQUATIONS

```

EFO	eq. da função objetivo
ERBRUTA	eq. da receita bruta
ECSIS	eq CSIS
ECSIS1	eq CSIS1
ECSIST	eq. custo do sistema de microaspersão
ECVR	eq. do custo de valvulas e registros
ECPC	eq. custo do painel de controle
ECEC	eq. custo da estação de controle
EQT	eq vazão total
ECEB	eq. custo da estação de bombeamento
ECENE	eq. custo da energia elétrica
ETE	eq. total microaspersores
ETLL	eq. comprimento total de linhas laterais
ELL	eq. cálculo de LL
ETLD	eq. comprimento total linhas de derivação
ELD	eq. cálculo de LD
ETLS	eq. comprimento total linha secundaria
ELS	eq. cálculo de LS
ETLP	eq. total de linha principal
ELP	eq. cálculo de LP
EHT	eq. cálculo da perda carga total
ENGE	eq. cálculo de NGE
ENLL	eq. cálculo de NLL
EHLA	eq. cálculo de HLA
EFL	eq. cálculo de FL
EHLD	eq. cálculo de HLD
EHDA	eq. cálculo de HDA
EFD	eq. cálculo de FD
EHDD	eq. cálculo de HDD
EHS	eq. cálculo de HS
EFS	eq. cálculo de FS
EHPA	eq. cálculo de HPA
EFP	eq. cálculo de FP
ENSP	eq. cálculo de NSP
EHPD	eq. cálculo de HPD
ECPROD	eq. do custo de produção
ERLAT	restrição referente à linha lateral
ERDER	restrição referente à linha derivação

ERPRI	restrição referente à linha principal
EDHUO	eq. cálculo de DHUO
EVPA	eq. cálculo de VPA
EVPD	eq. cálculo de VPD
EVS	eq. cálculo de VS
RT	restrição relativa ao turno de irrigação
RTDISP	restrição referente ao tempo disponível
EUE	eq. cálculo UE
RPRES	restrição quanto à variação pressão
RPRES1	1º restrição pressão na linha lateral
RPRES2	2º restrição pressão na linha lateral
RPRES3	1º restrição da pressão na l. derivação
RPRES4	2º restrição da pressão na l. derivação
RVPA1	restrição relativa a VPA min
RVPA2	restrição relativa a VPA max
RVPD1	restrição relativa a VPD min
RVPD2	restrição relativa a VPD max
RVS1	restrição relativa a VS min
RVS2	restrição relativa a VS max
RQDISP	restrição quanto à vazão disponível
RAREA	restrição quanto à área total
RREC	restrição - produção relativa
EQD	eq. cálculo de QD
EQS	eq. cálculo de QS
EQP	eq. de cálculo de QP
ENSS	eq. cálculo de NSS
ENLS	eq. cálculo de NLS
RNUOS	restrição relativa ao NUOS
EQL	eq. cálculo de QL ;

*-----

RNUOS..	NUOS =G= NLS ;
ENGE..	NGE =E= (LL/EE)+0.5 ;
ENLL..	NLL =E= (LD/EL)+0.5 ;
RAREA..	2*NGE*NLL =E= A/(EE*EL*NUO) ;
ETE..	TE =E= (A*NE)/(EE*EL) ;
ETLL..	TLL =E= ((A/EL) - (A/(2*EL*NGE))) ;
ETLD..	TLD =E= (A/(2*NGE*EE))-(A/(4*NGE*EE*NLL)) ;
ETLS..	TS E= ((0.5*A)/(NLL*EL)) - ((.5*LX*NGE*EE)/(EL*NLL)) ;
ETLP..	TLP =E= LX - (2*NLL*EL) ;
ELL..	LL =E= LY-LS-(0.5*EE) ;
ELD..	LD =E= (LX-(2*LP)-EL)/2 ;

```

ELS..    LS  =E= LY-(NGE*EE) ;
ELP..    LP  =E=  TLP/2 ;
EQL..    QL  =E=  NGE*QE*3600000 ;
EQD..    QD  =E=  2*NLL*QL ;
ENLS..   NLS  =E=  TLS/(LY-(NGE*EE)) ;
EQS..    QS  =E=  7200000*QE*NE*NUOS*NLL*NGE/NLS ;
EQP..    QP  =E=  3600000*NUOS*QE*NE*NLL*NGE ;
EHLA..   HLA  =E=  2.698E-15*LL*(QL**1.75)*FL/(DLA**4.75)
EFL..    FL  =E=  ((0.72*NGE)+(0.28/NGE))/((2*NGE)-1) ;
EHLA..   HLD  =E=  2.698E-15*LL*(QL**1.75)*FL/(DLD**4.75)
EHDA..   HDA  =E=  2.620E-15*LD*(QD**1.75)*56234.1325*FD/
              ((10*DDA)**4.75)
EFD..    FD  =E=  ((0.72*NLL)+(0.28/NLL))/((2*NLL)-1) ;
EHDD..   HDD  =E=  2.620E-15*LD*(QD**1.75)*FD/(DDD**4.75)
ENSS..   NSS  =E=  NUO/(2*NLS) ;
EFS..    FS  =E=  ((0.72*NSS)+(0.28/NSS))/((2*NSS)-1) ;
EHS..    HS  =E=  2.620E-15*LS*(QS**1.75)*FS/(DS**4.75);
ENSP..   NSP  =E=  (NLS/2) ;
EFP..    FP  =E=  ((0.72*NSP)+(0.28/NSP))/((2*NSP)-1) ;
EHPA..   HPA  =E=  2.620E-15*LP*FP*(QP**1.75)*
              (DPA**(-4.75))
EHPD..   HPD  =E=  2.620E-15* LP * FP *(QP**1.75)*
              (DPD**(-4.75));
ERLAT..   HLA + (LL*DECY) =E= HLD - (LL*DECY) ;
ERDER..   HDA + (LD*DECX) =E= HDD - (LD*DECX) ;
ERPRI..   HPA + (LP*DECX) =E= HPD - (LP*DECX) ;
EDHUO..   DHUO =E=  HLA+HDA+(LL*DECY)+(LD*DECX) ;

```

```

EHT..      HT  =E= (((HLA+HDA+HS+HPA+HEC)*1.05)+
                  (LL*DECY)+(LD*DECX)+(LS*DECY)+
                  (LP*DECX)) ;

EVPA..      VPA  =E= 3.537E-7*(QP/(DPA**2)) ;
EVPD..      VPD  =E= 3.537E-7*(QP/(DPD**2)) ;
EVS..      VS   =E= 3.537E-7*(QS/(DS**2)) ;
RT..        T    =L= TX ;
RTDISP..    (NUO*T)/(NUOS*F)  =L= TD ;
EUE..      UE   =E=(1-(1.27*CVF/(NE**.5))) *
              (8.70*(HMIN**.51))/(3600000*QE) ;
RPRES..    DHUO  =E= 2.5*(HM-HMIN) ;
RPRES1..    HLA+(LL*DECY)  =G= 0.4*DHUO ;
RPRES2..    HLA+(LL*DECY)  =L= 0.6*DHUO ;
RPRES3..    HDA+(LD*DECX)  =G= 0.4*DHUO ;
RPRES4..    HDA+(LD*DECX)  =L= 0.6*DHUO ;
RVPA1..      VPA  =G= .2 ;
RVPA2..      VPA  =L= 2.0 ;
RVPD1..      VPD  =G= .2 ;
RVPD2..      VPD  =L= 2. ;
RVS1..      VS   =G= .2 ;
RVS2..      VS   =L= 2. ;
RQDISP..    (2*QE*NE*NGE*NLL*NUOS)/UE  =L= QDISP ;
RREC..      (3600*UE*NE*QE*I*DI)/(ETMAX*T*EE*EL)  =L= 1 ;
ECPROD..    CPROD  =E= 2*CP*NGE*NLL*NUO*10000/A ;
ERBRUTA..   RBRUTA =E= CXL*PMAX*NPE*
              ((3600*UE*NE*QE*I*DI)/(ETMAX*T*EE*EL)) ;
ECENE..      CENE  =E= CKWH*(2*QE*NE*NGE*NLL*NUOS)*
              9.80665*I*DI*NUO*(HM+HT)/(NBM*NUOS*T);

```

```

ECEB..    CEB =E=  834.22*((13.33*
                (2*QE*NE*NGE*NLL*NUOS)*(HM+HT)/NBM)**.47);

EQT..     QT  =E=  7200000*NUOS*NE*QE*NLL*NGE ;

ECEC..    CEC  =E=  1812.11 + (.10*QT);

ECPC..    CPC  =E=  683.90*(NUO**.52) ;

ECVR..    CVR  =E=  403.43 * NUO ;

ECSIST..  CSIST =E= ((CSIS1*FRC)+CENE)*(10000/A);

ECSIS1..  CSIS1 =E= CSIS+CVR+CPC+CEC+CEB ;

ECSIS.    .CSIS =E= ((CE*TE) +
                    (((9.03*(DLA+DLD))- .0090)*TLL)      +
                    (91.41*((DDA**1.51)+(DDD**1.51))*TLD)+
                    (380.45*(DS**1.78)*TLS)+
                    (190.23*((DPA**1.78)+(DPD**1.78))*TLP));

EFO..     FO   =E=  RBRUTA - CSIST - CPROD ;

*-----
MODEL TESE /ALL/ ;

SOLVE TESE MAXIMIZING FO USING NLP ;

SOLVE TESE MAXIMIZING FO USING NLP ;
*-----

```

.....

APENDICE 2

,

Tabela 1 - Resultados das 120 configurações analisadas.

VARIÁVEL	CONFIGURAÇÃO														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A (ha)	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294
LX (m)	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	144	144	144
LY (m)	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	576	576	576
QE (l/h)	35	35	35	35	56	56	56	56	87	87	87	87	35	35	35
DECX (%)	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3
DECY (%)	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3
FO(US\$/ha.ano)	2902	2897	2884	2866	2867	2863	2849	2829	2825	2821	2805	2788	2878	2870	2848
CSIST(US\$/ha.ano)	366	370	384	401	400	405	419	438	442	447	463	480	390	397	420
RBRUT-US\$/ha.ano	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624
CPROD-US\$/ha.ano	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356
NUO	4	4	4	4	6	6	6	6	8	8	8	8	4	4	4
NUOS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NLS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LP (m)															
LL (m)	70	70	70	70	46	46	46	46	34	34	34	34	142	142	142
LD (m)	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	68	68	68
LS (m)	216	216	216	216	240	240	240	240	252	252	252	252	432	432	432
CENE (US\$/ano)	420	452	549	688	442	474	560	727	460	492	554	738	450	504	696
CEB (US\$)	1827	1883	2017	2162	1906	1963	2092	2262	2088	2149	2263	2465	1891	1985	2220
CVR (US\$)	1613	1613	1613	1613	2420	2420	2420	2420	3227	3227	3227	3227	1614	1614	1614
CPC (US\$)	1406	1406	1406	1406	1736	1736	1736	1736	2016	2016	2016	2016	1406	1406	1406
CEC (US\$)	4080	4080	4080	4080	4231	4231	4231	4231	4631	4631	4631	4631	4080	4080	4080
TLL (m)	10080	10080	10080	10080	9936	9936	9936	9936	9792	9792	9792	9792	10224	10224	10224
TLP (m)															
TLD (m)	560	560	560	560	840	840	840	840	1120	1120	1120	1120	272	272	272
TLS (m)	216	216	216	216	240	240	240	240	252	252	252	252	432	432	432
HT (mca)	26,07	28,74	35,66	43,71	27,12	29,84	36,32	45,6	28,84	31,62	37,07	47,46	29,16	33,97	47,13
HDA (mca)	3,18	2,31	1,6	1,33	4,29	3,28	1,6	1,56	5,29	4,08	1,6	2,06	2,59	2,13	2,66
HDD (mca)	3,18	5,11	10	15,33	4,29	6,08	10	15,56	5,29	6,88	10	16,06	2,59	3,49	6,74
HIA (mca)	3,53	2,89	2,12	2,05	3,19	2,72	2,49	3,41	3,52	3,31	2,85	4,34	3,89	2,8	2,79
HLD (mca)	3,53	4,29	6,32	9,05	3,19	3,64	5,25	8,01	3,52	3,99	4,89	7,74	3,89	5,64	11,31
DPA (m)															
DPD (m)															
DLD (m)	0,014	0,013	0,012	0,011	0,013	0,013	0,012	0,011	0,013	0,013	0,012	0,011	0,021	0,019	0,016
DDA (m)	0,062	0,066	0,071	0,074	0,059	0,063	0,073	0,073	0,06	0,063	0,077	0,073	0,056	0,058	0,055
DDD (m)	0,062	0,056	0,048	0,044	0,059	0,055	0,05	0,045	0,06	0,057	0,053	0,048	0,056	0,052	0,046
NGE	18	18	18	18	12	12	12	12	9	9	9	9	36	36	36
NLL	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	9	9	9
NSS	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	2	2	2
QL (l/h)	630	630	630	630	672	672	672	672	783	783	783	783	1260	1260	1260
QD (l/h)	22680	22680	22680	22680	24192	24192	24192	24192	28188	28188	28188	28188	22680	22680	22680
HS (mca)	3,12	3,12	3,07	2,96	3,35	3,36	3,33	3,18	3,66	3,67	3,68	3,51	6,29	6,31	6,1
QS (l/h)	22680	22680	22680	22680	24192	24192	24192	24192	28188	28188	28188	28188	22680	22680	22680
HPA (mca)															
QP (l/h)															
QT (l/h)	22680	22680	22680	22680	24192	24192	24192	24192	28188	28188	28188	28188	22680	22680	22680
NSP															
HPD (mca)															
DHUO (mca)	6,71	7,29	10,02	13,89	7,48	7,86	9,67	14,26	8,81	9,13	9,67	15,1	6,47	7,03	11,74
VPA (m/s)															
VPD (m/s)															
VS (m/s)	1,38	1,38	1,37	1,35	1,49	1,49	1,48	1,46	1,64	1,64	1,28	1,61	1,39	1,39	1,37
TE	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592
DS (m)	0,076	0,076	0,077	0,077	0,076	0,076	0,076	0,077	0,078	0,078	0,078	0,079	0,076	0,076	0,077
DLA (m)	0,014	0,015	0,016	0,016	0,013	0,014	0,014	0,013	0,013	0,013	0,014	0,013	0,021	0,022	0,022
UE	0,84	0,83	0,79	0,73	0,82	0,81	0,79	0,72	0,82	0,81	0,8	0,72	0,84	0,83	0,77
HMIN (mca)	12,32	12,08	10,99	9,44	12,01	11,86	11,13	9,29	11,48	11,35	11,13	8,96	12,41	12,19	10,3
I (h)	20,73	8,48	13,86	21	15,1	6,11	8,31	17,1	3,2	5,38	9,87	10,95	5,58	4,45	12,76
T (dia)	4,68	1,9	2,95	4,14	5,32	2,14	2,81	5,27	1,75	2,93	5,32	5,32	1,27	1	2,63

Tabela 1 - Resultados das 120 configurações analisadas.																
VARIÁVEL	CONFIGURAÇÃO															
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
A (ha)	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	
LX (m)	144	144	144	144	144	144	144	144	144	192	192	192	192	192	192	
LY (m)	576	576	576	576	576	576	576	576	576	432	432	432	432	432	432	
QE (l/h)	35	56	56	56	56	87	87	87	87	35	35	35	35	56	56	
DECX (%)	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	
DECY (%)	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	
FO(US\$/ha.ano)	2708	2850	2829	2637	2402	2816	2808	2788	2707	2892	2886	2870	2850	2862	2856	
CSIST(US\$/ha.ano)	447	417	428	448	483	451	460	480	532	375	381	397	418	406	412	
ABRUT-US\$/ha.ano	4511	4624	4614	4441	4241	4624	4624	4624	4595	4624	4624	4624	4624	4624	4624	
CPROD-US\$/ha.ano	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	
NUO	4	8	8	8	8	12	12	12	12	4	4	4	4	6	6	
NUOS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
NLS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
LP (m)																
LL (m)	142	78	70	70	70	46	46	46	46	186	186	186	186	70	70	
LD (m)	88	68	68	68	68	68	68	68	68	92	92	92	92	92	92	
LS (m)	432	504	504	504	504	528	528	528	528	324	324	324	324	360	360	
CENE (US\$/ano)	908	390	440	563	631	442	495	601	653	432	472	593	741	448	490	
CEB (US\$)	2426	1628	1724	1935	2042	1728	1822	1996	2076	1856	1929	2099	2263	1930	2008	
CVR (US\$)	1614	3227	3227	3227	3227	4841	4841	4841	4849	1614	1614	1614	1614	2421	2421	
CPC (US\$)	1406	2016	2016	2016	2016	2490	2490	2490	2490	1406	1406	1406	1406	1736	1736	
CEC (US\$)	4080	3627	3627	3627	3627	3691	3691	3691	3691	4080	4080	4080	4080	4231	4231	
TLL (m)	10224	10080	10080	10080	10080	9936	9936	9936	9936	10176	10176	10176	10176	10080	10080	
TLP (m)																
TLD (m)	272	544	544	544	544	816	816	816	816	368	368	368	368	552	552	
TLS (m)	432	504	504	504	504	528	528	528	528	324	324	324	324	360	360	
HT (mca)	60	25,15	30,35	42,99	50	28,98	34,26	44,8	50	27,4	31,04	40,11	49,69	28,22	32,05	
HDA (mca)	3,19	1,03	0,42	0,11	0,09	2,87	2,25	1,25	0,133	2,56	1,82	1,17	0,98	2,85	2,18	
HDD (mca)	10	1,03	1,78	4,19	6,89	2,87	3,61	5,33	7	2,56	3,66	6,69	10,18	2,85	4,02	
HIA (mca)	2,79	1,55	0,94	0,94	0,94	3,24	2,71	1,43	0,67	3,84	3,05	2,47	1,96	3,95	3,28	
HLD (mca)	16,99	1,55	2,34	5,14	7,94	3,24	3,88	4,19	5,27	3,84	5,17	8,83	12,56	3,95	4,68	
DPA (m)																
DPD (m)																
DLD (m)	0,015	0,02	0,018	0,015	0,014	0,016	0,015	0,015	0,014	0,017	0,016	0,015	0,014	0,016	0,016	
DDA (m)	0,063	0,062	0,075	0,1	0,104	0,051	0,054	0,061	0,097	0,059	0,064	0,07	0,073	0,059	0,063	
DDD (m)	0,042	0,062	0,056	0,046	0,042	0,051	0,048	0,045	0,042	0,059	0,055	0,048	0,044	0,059	0,055	
NGE	36	18	18	18	18	12	12	12	12	27	27	27	27	18	18	
NLL	9	9	9	9	9	9	9	9	9	12	12	12	12	12	12	
NSS	2	4	4	4	4	6	6	6	6	2	2	2	2	3	3	
OL (l/h)	1260	1008	1008	1008	1008	1044	1044	1044	1044	945	945	945	945	1008	1008	
OD (l/h)	22680	18144	18144	18144	18144	18792	18792	18792	18792	22680	22680	22680	22680	24192	24192	
HS (mca)	5,6	6,37	6,43	6,54	1,01	6,5	6,55	6,65	1,24	4,71	4,72	4,85	4,53	5,07	5,1	
OS (l/h)	22680	18144	18144	18144	18144	18792	18792	18792	18792	22680	22680	22680	22680	24192	24192	
HPA (mca)																
QP (l/h)																
QT (l/h)	22680	18144	18144	18144	18144	18792	18792	18792	18792	22680	22680	22680	22680	24192	24192	
NSP																
HPD (mca)																
DHUO (mca)	16,48	2,59	2,74	5,19	7,93	6,1	6,1	6,1	6,5	6,39	6,85	9,58	12,84	6,8	7,08	
VPA (m/s)																
VPD (m/s)																
VS (m/s)	1,32	1,38	1,38	1,38	0,64	1,43	1,44	1,45	0,71	1,38	1,39	1,38	1,36	1,5	1,5	
TE	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	
DS (m)	0,078	0,068	0,068	0,068	0,101	0,068	0,068	0,068	0,096	0,076	0,076	0,076	0,077	0,076	0,076	
DIA (m)	0,022	0,02	0,022	0,022	0,022	0,016	0,016	0,019	0,022	0,017	0,018	0,019	0,02	0,016	0,017	
UE	0,69	0,88	0,88	0,85	0,81	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84	0,8	0,75	0,83	0,82	
HMIN (mca)	8,41	13,97	13,9	12,92	11,83	12,56	12,56	12,56	12,4	12,44	12,26	11,17	9,87	12,28	12,17	
I (h)	8,18	5,33	7,99	2,62	10,49	2,84	5,87	1,75	1,75	21	4,44	4,66	21	7,12	7,99	
T (dia)	1,56	2,03	3,04	1	4	1,62	3,36	1	1	4,77	1	1	4,23	2,54	2,83	

Tabela 1 - Resultados das 120 configurações analisadas.

VARIÁVEL	CONFIGURAÇÃO														
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
A (ha)	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294
LX (m)	192	192	192	192	192	192	192	576	576	576	576	576	576	576	576
LY (m)	432	432	432	432	432	432	144	144	144	144	144	144	144	144	144
QE (l/h)	56	56	87	87	87	87	35	35	35	35	56	56	56	56	87
DECX (%)	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0
DECY (%)	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0
FO(US\$/ha.ano)	2840	2820	2821	2814	2795	2723	2891	2669	2834		2838	2833	2792		2785
CSIST(US\$/ha.ano)	428	448	447	453	473	544	377	398	434		430	434	476		482
IRBRUT-US\$/ha.ano)	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4623	4624		4624	4624	4624		4624
CPROD-US\$/ha.ano)	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356		1356	1356	1356		1356
NUO	6	6	12	12	12	12	4	4	2		4	4	4		6
NUOS	1	1	1	1	1	2	1	1	1		1	1	1		1
NLS	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1		1
LP (m)															
LL (m)	70	70	34	34	34	34	34	34	70		34	34	34		22
LD (m)	92	92	92	92	92	92	284	284	284		284	284	284		284
LS (m)	360	360	396	396	396	396	108	108	72		108	108	108		120
CENE (US\$/ano)	604	726	425	464	543	684	401	395	619		470	509	628		476
CEB (US\$)	2180	2338	1696	1768	1904	2876	1789	1790	2790		2327	2387	2531		2393
CVR (US\$)	2420	2421	4841	4841	4841	4841	1614	1614	807		1614	1614	1614		2420
CPC (US\$)	1736	1736	2490	2490	2490	2490	1406	1406	981		1406	1406	1406		1736
CEC (US\$)	4231	4231	3691	3691	3691	5571	4080	4080	6348		5441	5441	5441		5571
TLL (m)	10060	10060	9792	9792	9792	9792	9792	9792	10060		9792	9792	9792		9504
TLP (m)															
TLD (m)	552	552	1104	1104	1104	1104	1136	1136	568		1136	1136	1136		1704
TLS (m)	360	360	396	396	396	396	108	108	72		108	108	108		120
HT (mca)	41,04	50	27,26	31,19	35,04	58	24,25	24,3	35,52		27,91	30,3	36,38		28,97
HDA (mca)	1,67	0,8	3,55	2,72	0,9	0,8	3,93	0,58	0,99		5,86	3,87	0,59		6,37
HDD (mca)	7,19	10	3,55	4,56	6,42	10	3,93	6,26	18,03		5,86	9,55	17,63		6,37
HLA (mca)	2,44	1,99	2,55	2,12	1,42	1,9	2,62	1,94	4,24		3,9	4,13	5,05		4,25
HLD (mca)	6,64	8,99	2,55	2,8	3,46	5,3	2,62	2,62	8,44		3,9	4,81	7,1		4,25
DPA (m)															
DPD (m)															
DLD (m)	0,015	0,014	0,014	0,014	0,013	0,012	0,01	0,01	0,012		0,011	0,01	0,01		0,01
DDA (m)	0,066	0,078	0,052	0,055	0,069	0,071	0,068	0,102	0,118		0,075	0,081	0,121		0,074
DDD (m)	0,049	0,046	0,052	0,049	0,046	0,042	0,068	0,062	0,064		0,075	0,067	0,059		0,074
NGE	18	18	9	9	9	9	9	9	18		9	9	9		6
NLL	12	12	12	12	12	12	36	36	36		36	36	36		36
NSS	3	3	6	6	6	6	2	2	1		2	2	2		3
QL (l/h)	1008	1008	783	783	783	783	315	315	630		504	504	504		522
QD (l/h)	24192	24192	18792	18792	18792	18792	22680	22680	45360		36288	36288	36288		37584
HS (mca)	5,06	4,97	4,86	4,89	4,95	5,06	1,56	1,57	1,42		1,82	1,8	1,73		1,97
QS (l/h)	24192	24192	18792	18792	18792	18792	22680	22680	45360		36288	36288	36288		37584
HPA (mca)															
QP (l/h)															
QT (l/h)	24192	24192	18792	18792	18792	37584	22680	22680	45360		36288	36288	36288		37584
NSP															
HPD (mca)															
DHUO (mca)	8,97	10,9	6,1	6,1	6,1	9	6,54	5,7	15,85		9,76	11,18	15,18		10,62
VPA (m/s)															
VPD (m/s)															
VS (m/s)	1,49	1,48	1,43	1,44	1,44	1,75	1,38	1,38	1,57		1,67	1,66	1,63		1,79
TE	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592		2592	2592	2592		2592
DS (m)	0,076	0,076	0,068	0,068	0,068	0,087	0,076	0,076	0,101		0,088	0,088	0,089		0,086
DLA (m)	0,018	0,019	0,014	0,015	0,016	0,015	0,01	0,011	0,013		0,011	0,011	0,01		0,01
UE	0,8	0,77	0,85	0,85	0,85	0,81	0,84	0,85	0,7		0,78	0,76	0,7		0,79
HMIN (mca)	11,41	10,64	12,56	12,56	12,56	11,4	12,38	12,72	8,66		11,1	10,53	8,93		10,75
I (h)	6,7	16,09	3,37	3,3	9,31	1,83	21	7,43	19,07		15,68	16,18	17,63		6,72
T (dia)	2,3	5,32	1,93	1,89	5,32	1	4,75	1,71	3,6		5,3	5,32	5,32		3,56

Tabela 1 - Resultados das 120 configurações analisadas.																
VARIÁVEL	CONFIGURAÇÃO															
	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
A (ha)	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294	8,294
LX (m)	576	576	576	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432
LY (m)	144	144	144	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192
QE (l/h)	87	87	87	35	35	35	35	56	56	56	56	87	87	87	87	87
DECX (%)	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	5
DECY (%)	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	5
FO(US\$/ha.ano)	2777	2747		2901	2897	2861	2795	2658	2655	2634	2711	2809	2803	2773	2753	
CSIST(US\$/ha.ano)	490	520		367	371	407	472	409	413	433	499	460	465	494	515	
RBRUT-US\$/ha.ano	4624	4624		4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4566	4624	4624	4624	4624	
CPRD-US\$/ha.ano	1356	1356		1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	
NUO	6	6		4	4	4	4	6	6	6	6	8	8	8	8	
NUOS	1	1		1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	
NLS	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
LP (m)																
LL (m)	22	22		46	46	46	46	30	30	30	30	22	22	22	22	
LD (m)	284	284		212	212	212	212	212	212	212	212	212	212	212	212	
LS (m)	120	120		144	144	144	144	160	160	160	160	168	168	168	168	
CENE (US\$/ano)	477	654		424	456	533	820	457	490	597	764	481	487	567	823	
CEB (US\$)	2405	2622		1824	1871	1972	3038	1913	1963	2088	2235	2100	2122	2238	2454	
CVR (US\$)	2421	2421		1614	1614	1614	1614	2421	2421	2421	2421	3227	3227	3227	3227	
CPC (US\$)	1736	1736		1406	1406	1406	1406	1736	1736	1736	1736	2017	2017	2017	2017	
CEC (US\$)	5571	5571		4080	4080	4080	6348	4231	4231	4231	4231	4631	4631	4631	4631	
TLL (m)	9504	9504		9936	9936	9936	9936	9720	9720	9720	9720	9504	9504	9504	9504	
TLP (m)																
TLD (m)	1704	1704		848	848	848	848	1272	1272	1272	1272	1696	1696	1696	1696	
TLS (m)	120	120		144	144	144	144	160	160	160	160	168	168	168	168	
HT (mca)	29,46	36,39		25,87	28,19	33,3	45,54	27,43	29,8	36,11	44,07	29,42	30,42	35,83	46,85	
HDA (mca)	3,2	1,5		4,55	3	0,21	1,23	5,35	3,75	1,46	0,14	6,37	3,92	1	1,4	
HDD (mca)	8,88	18,54		4,55	7,25	12,93	22,43	5,35	7,99	14,18	21,34	6,37	8,16	13,72	22,6	
HLA (mca)	3,81	6,02		3,03	2,96	3	5,59	3,57	3,61	4,31	5,66	4,25	3,81	4,25	6,9	
HLD (mca)	4,25	7,34		3,03	3,88	5,76	10,19	3,57	4,21	6,11	8,66	4,25	4,25	5,57	9,1	
DPA (m)																
DPD (m)																
OLD (m)	0,01	0,009		0,011	0,011	0,01	0,009	0,01	0,01	0,009	0,009	0,01	0,01	0,009	0,009	
DDA (m)	0,086	0,101		0,062	0,068	0,119	0,082	0,062	0,066	0,081	0,133	0,063	0,07	0,093	0,086	
DDD (m)	0,069	0,059		0,062	0,056	0,05	0,045	0,062	0,057	0,05	0,046	0,063	0,06	0,053	0,048	
NGE	6	6		12	12	12	12	8	8	8	8	6	6	6	6	
NLL	36	36		27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	
NSS	3	3		2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	
QL (l/h)	522	522		420	420	420	420	448	448	448	448	522	522	522	522	
QD (l/h)	37584	37584		22680	22680	22680	22680	24192	24192	24192	24192	28188	28188	28188	28188	
HS (mca)	1,99	1,87		2,06	2,05	2,02	2,42	2,2	2,19	2,14	2,02	2,4	2,42	2,39	2,18	
QS (l/h)	37584	37584		22680	22680	22680	22680	24192	24192	24192	24192	28188	28188	28188	28188	
HPA (mca)																
QP (l/h)																
QT (l/h)	37584	37584		22680	22680	22680	22680	24192	24192	24192	24192	28188	28188	28188	28188	
NSP																
HPD (mca)																
DHUC (mca)	10,07	16,7		7,58	8,54	10,95	19,71	8,92	9,78	13,04	17,9	10,62	10,07	12,27	20	
VPA (m/s)																
VPD (m/s)																
VS (m/s)	1,8	1,75		1,38	1,37	1,36	1,77	1,48	1,48	1,46	1,43	1,63	1,63	1,62	1,56	
TE	2592	2592		2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	2592	
DS (m)	0,086	0,087		0,076	0,076	0,077	0,095	0,076	0,076	0,077	0,077	0,078	0,078	0,078	0,08	
DLA (m)	0,01	0,009		0,011	0,012	0,011	0,01	0,01	0,01	0,01	0,009	0,01	0,01	0,01	0,009	
UE	0,8	0,7		0,83	0,81	0,78	0,63	0,8	0,78	0,73	0,65	0,79	0,8	0,77	0,64	
HMIN (mca)	10,97	8,32		11,97	11,58	10,62	7,11	11,43	11,09	9,79	7,84	10,75	10,97	10,09	7	
I (h)	1,87	3,48		14,42	21	4,78	9,73	15,5	8,54	12,43	18,47	10,03	6,82	10,2	4,91	
T (dia)	1	1,63		3,21	4,6	1	1,66	5,32	2,89	3,93	5,26	5,32	3,65	5,25	2,12	

Tabela 1 - Resultados das 120 configurações analisadas.

VARIÁVEL	CONFIGURAÇÃO														
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
A (ha)	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04
LX (m)	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	240	240
LY (m)	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	960	960
QE (l/h)	35	35	35	35	56	56	56	56	87	87	87	87	87	35	35
DECX (%)	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3
DECY (%)	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3
FO(US\$/ha.ano)	2939	2931	2905	2797	2914	2906	2879	2782	2889	2881	2854	2717	2921	2901	2818
CSIST(US\$/ha.ano)	329	336	363	470	353	361	388	485	378	386	414	551	347	366	450
RBRUT-US\$/ha.ano)	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624
CPROD-US\$/ha.ano)	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356
NUO	4	4	4	12	6	6	6	10	10	10	10	12	10	10	12
NUOS	1	1	1	4	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	3
NLS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LP (m)															
LL (m)	118	118	118	38	78	78	78	46	46	46	46	38	94	94	78
LD (m)	236	236	236	236	236	236	236	236	236	236	236	236	116	116	116
LS (m)	380	360	360	440	400	400	400	432	432	432	432	440	864	864	880
CENE (US\$/ano)	1284	1447	2003	2954	1356	1517	2119	2985	1418	1583	2167	2772	1176	1409	1845
CEB (US\$)	3050	3196	3546	4570	3182	3334	3711	4467	3138	3286	3647	4971	2737	2980	3666
CVR (US\$)	1614	1614	1614	4841	2421	2421	2421	4034	4034	4034	4034	4841	4034	4034	4841
CPC (US\$)	1406	1406	1406	2490	1736	1736	1736	2264	2265	2265	2265	2490	2265	2265	2490
CEC (US\$)	8112	8112	8112	10212	8532	8532	8532	9876	8076	8076	8076	12252	6852	6852	8112
TLL (m)	28320	28320	28320	27360	28080	28080	28080	27600	27600	27600	37600	27360	28200	28200	28080
TLP (m)															
TLD (m)	944	944	944	2832	1416	1416	1416	2360	2360	2360	2360	2832	1160	1160	1392
TLS (m)	360	360	360	440	400	400	400	432	432	432	432	440	864	864	880
HT (mca)	28,94	33,54	45,56	62,92	30,14	34,79	47,54	62,32	31,95	36,8	49,67	60	28,62	37,28	50
HDA (mca)	3,78	2,5	1,7	0,2	5,06	3,53	1,93	0,2	6,51	4,54	2,53	0,2	1,33	0,31	0,25
HDD (mca)	3,78	7,22	15,86	23,8	5,06	8,25	16,09	23,8	6,51	9,26	16,7	23,8	1,33	2,63	7,21
HLA (mca)	4,53	3,42	2,31	6,1	4,08	3,26	3,66	5,7	4,34	4,14	5,03	6,1	2	0,91	0,55
HLD (mca)	4,53	5,78	9,39	9,9	4,08	4,82	8,34	10,3	4,34	5,06	7,79	9,9	2	2,79	5,23
DPA (m)															
DPD (m)															
DLD (m)	0,018	0,017	0,015	0,008	0,017	0,017	0,015	0,011	0,015	0,014	0,013	0,011	0,019	0,017	0,014
DDA (m)	0,096	0,105	0,114	0,12	0,093	0,1	0,114	0,152	0,086	0,093	0,105	0,167	0,074	0,1	0,099
DDD (m)	0,096	0,084	0,071	0,044	0,093	0,084	0,073	0,056	0,086	0,08	0,07	0,061	0,074	0,064	0,049
NGE	30	30	30	10	20	20	20	12	12	12	12	10	24	24	20
NLL	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	15	15	15
NSS	2	2	2	6	3	3	3	5	5	5	5	6	5	5	6
QL (l/h)	1050	1050	1050	360	1120	1120	1120	672	1044	1044	1044	870	840	840	700
QD (l/h)	63000	63000	63000	21000	67200	67200	67200	40320	62640	62640	62640	52200	25200	25200	21000
HS (mca)	4,26	4,22	3,99	4,62	4,57	4,55	4,29	4,45	4,58	4,57	4,34	1,84	8,93	9,05	1,13
QS (l/h)	63000	63000	63000	84000	67200	67200	67200	80640	62640	62640	62640	104400	50400	50400	63000
HPA (mca)															
QP (l/h)															
QT (l/h)	63000	63000	63000	84000	67200	67200	67200	80640	62640	62640	62640	104400	50400	50400	63000
NSP															
HPD (mca)															
DHUO (mca)	8,31	9,46	14,63	20	9,14	9,93	15,01	20	10,85	11,5	16,02	20	3,33	3,33	6,62
VPA (m/s)															
VPD (m/s)															
VS (m/s)	1,66	1,65	1,62	1,99	1,79	1,79	1,74	1,92	1,82	1,81	1,78	1,43	1,7	1,7	0,76
TE	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200
DS (m)	0,116	0,116	0,117	0,122	0,115	0,115	0,117	0,122	0,11	0,111	0,112	0,161	0,103	0,102	0,171
DLA (m)	0,018	0,019	0,021	0,009	0,017	0,018	0,018	0,012	0,015	0,015	0,014	0,012	0,019	0,022	0,022
UE	0,82	0,8	0,72	0,63	0,79	0,78	0,7	0,62	0,79	0,78	0,71	0,64	0,88	0,88	0,84
HMIN (mca)	11,68	11,22	9,15	7	11,34	11,03	9	7	10,66	10,4	8,59	7	13,67	13,67	12,35
I (h)	13,69	21	21	18,3	15,6	15,22	17,55	13,4	6,42	1,92	11,15	9,64	21	13,71	21
T (dia)	3	4,52	4,07	3,1	5,32	5,13	5,32	3,57	3,39	1	5,31	4,16	5	3,27	4,75

Tabela 1 - Resultados das 120 configurações analisadas.

VARIÁVEL	CONFIGURAÇÃO														
	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
A (ha)	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04
LX (m)	240	240	240	240	240	240	240	240	240	960	960	960	960	960	960
LY (m)	960	960	960	960	960	960	960	960	960	240	240	240	240	240	240
QE (l/h)	35	56	56	56	56	87	87	87	87	35	35	35	35	56	56
DECX (%)	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1
DECY (%)	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1
FO(US\$/ha.ano)	2826	2889	2865	2842	2804	2889	2874	2819	2781	2929	2919			2887	2881
CSIST(US\$/ha.ano)	442	379	403	425	463	379	393	449	486	338	348			380	386
RBRUT-US\$/ha.ano	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624	4624			4624	4624
CPROD-US\$/ha.ano	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356			1356	1356
NUO	12	16	16	12	12	12	12	20	20	4	4			12	12
NUOS	3	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1			2	2
NLS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			2	2
LP (m)														240	240
LL (m)	78	58	58	78	78	78	78	46	46	58	58			38	38
LD (m)	116	116	116	116	116	116	116	116	116	476	476			236	236
LS (m)	960	900	900	880	880	880	880	912	912	180	180			200	200
CENE (US\$/ano)	3049	1159	1402	2345	3134	1300	1545	2324	2927	1332	1571			1424	1571
CEB (US\$)	4422	2718	2972	4098	4571	2869	3111	3991	4370	3048	3198			3256	3362
CVR (US\$)	4841	6455	6455	4841	4841	4841	4841	8069	8069	1614	1614			4841	4841
CPC (US\$)	2490	2892	2892	2490	2490	2490	2490	3247	3247	1406	1406			2490	2490
CEC (US\$)	8112	6852	6852	8532	8532	7032	7032	8076	8076	8112	8112			8532	8532
TLL (m)	28080	27840	27840	28080	28080	28080	28080	27600	27600	27840	27840			27360	27360
TLP (m)														480	480
TLD (m)	1392	1856	1856	1392	1392	1392	1392	2320	2320	1904	1904			2832	2832
TLS (m)	880	900	900	880	880	880	880	912	912	180	180			400	400
HT (mca)	81,89	27,98	36,98	62,24	82,43	31,56	40,34	63,34	60	28,88	33,61			32,33	36,34
HDA (mca)	1,1	1,34	0,274	1,66	1,31	2,78	1,43	2,42	1,36	6,26	3,37			5,53	3,72
HDD (mca)	12,7	1,34	2,59	8,62	12,91	2,78	3,76	9,38	12,96	6,26	12,89			5,53	8,44
HLA (mca)	1,47	1,25	0,572	2,24	1,65	3,32	2,73	2,55	2,47	4,17	4,84			3,69	3,67
HLD (mca)	9,27	1,25	1,73	6,92	9,45	3,32	4,29	5,32	7,07	4,17	6			3,69	4,43
DPA (m)														0,095	0,102
DPD (m)														0,095	0,082
DLD (m)	0,012	0,019	0,017	0,015	0,014	0,021	0,02	0,014	0,013	0,012	0,011			0,012	0,011
DDA (m)	0,072	0,074	0,103	0,079	0,083	0,083	0,095	0,071	0,08	0,1	0,114			0,071	0,077
DDD (m)	0,043	0,074	0,064	0,056	0,051	0,083	0,078	0,053	0,05	0,1	0,086			0,071	0,065
NGE	20	15	15	20	20	20	20	12	12	15	15			10	10
NLL	15	15	15	15	15	15	15	15	15	60	60			30	30
NSS	6	8	8	6	6	6	6	10	10	2	2			3	3
QL (l/h)	700	840	840	1120	1120	1740	1740	1044	1044	525	525			560	560
QD (l/h)	21000	25200	25200	33600	33600	52200	52200	31320	31320	63000	63000			33600	33600
HS (mca)	9,27	9,07	9,15	9,69	9,41	8,96	9,03	9,67	6,22	2,08	2			2,72	2,7
QS (l/h)	63000	50400	50400	67200	67200	52200	52200	62640	62640	63000	63000			33600	33600
HPA (mca)														3,86	2,72
QP (l/h)														33600	33600
QT (l/h)	63000	50400	50400	67200	67200	52200	52200	62640	62640	63000	63000			67200	67200
NSP														1	1
HPD (mca)														3,86	7,52
DHUO (mca)	12,28	2,59	2,59	9,72	12,65	6,1	6,1	9,83	11,93	10,43	13,55			9,22	10,12
VPA (m/s)														1,33	1,15
VPD (m/s)														1,33	1,76
VS (m/s)	1,84	1,74	1,75	1,91	1,89	1,73	1,74	1,91	1,59	1,64	1,62			1,61	1,6
TE	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200			7200	7200
DS (m)	0,11	0,101	0,101	0,112	0,112	0,103	0,103	0,108	0,118	0,116	0,117			0,086	0,086
DLA (m)	0,018	0,019	0,022	0,019	0,021	0,021	0,022	0,017	0,017	0,012	0,012			0,012	0,012
UE	0,76	0,88	0,88	0,78	0,74	0,85	0,85	0,8	0,77	0,78	0,74			0,79	0,78
HMIN (mca)	10,09	13,97	13,97	11,11	9,94	12,56	12,56	11,07	10,22	10,83	9,58			11,31	10,95
I (h)	21	2,63	13,97	15,73	16,67	9,31	9,18	3,63	10,28	21	21			2,93	15,85
T (dia)	4,28	1	5,32	5,32	5,32	5,32	5,25	1,95	5,32	4,44	4,17			1	5,32

Tabela 1 - Resultados das 120 configurações analisadas.															
VARIÁVEL	CONFIGURAÇÃO														
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
A (ha)	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04
LX (m)	960	960	960	960	960	960	320	320	320	320	320	320	320	320	320
LY (m)	240	240	240	240	240	240	720	720	720	720	720	720	720	720	720
QE (l/h)	56	56	87	87	87	87	35	35	35	35	56	56	56	56	87
DECX (%)	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0
DECY (%)	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0
FO(US\$/ha.ano)			2841	2834			2925	2914	2865	2830	2906	2896	2863	2824	2895
CSIST(US\$/ha.ano)			425	433			342	353	402	438	362	372	404	443	373
RBRUT-US\$/ha.ano			4624	4624			4624	4624	4624	4624	4623	4624	4624	4624	4624
CPROD-US\$/ha.ano			1356	1356			1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356	1356
NUO			20	20			4	4	6	6	6	6	6	12	12
NUOS			2	2			1	1	2	2	1	1	1	2	1
NLS			2	2			1	1	1	1	1	1	1	1	1
LP (m)			240	240											
LL (m)			22	22			178	178	118	118	118	118	118	58	58
LD (m)			236	236			156	156	156	156	156	156	156	156	156
LS (m)			216	216			540	540	600	600	600	600	600	660	660
CENE (US\$/ano)			1465	1533			1363	1694	1983	2865	1388	1595	2212	1934	1234
CEB (US\$)			3192	3276			3130	3378	4197	4740	3239	3442	3879	4316	2799
CVR (US\$)			8069	8067			1614	1614	2421	2421	2421	2421	2421	4841	4841
CPC (US\$)			3247	3247			1406	1406	1736	1736	1736	1736	1736	2490	2490
CEC (US\$)			8076	8076			8112	8112	10212	10212	8532	8532	8532	8532	7032
TLL (m)			26400	26400			28480	28480	28320	28320	28320	28320	28320	27840	27840
TLP (m)			480	480											
TLD (m)			4720	4720			624	624	936	936	936	936	936	1872	1872
TLS (m)			432	432			540	540	600	600	600	600	600	660	660
HT (mca)			33,7	36,46			31,46	39,62	50	69,22	31,84	38,29	53,7	71,26	29,2
HDA (mca)			6,37	3,68			3,43	3,06	0,64	0,87	3,38	2,35	0,64	1,3	3,46
HDD (mca)			6,37	8,4			3,43	6,18	10	16,47	3,38	5,47	10	16,9	3,46
HLA (mca)			4,25	3,81			5,15	5,15	1,83	1,28	5,02	3,87	3,84	3,17	2,64
HLD (mca)			4,25	4,25			5,15	8,71	8,91	13,08	5,02	6,23	10,92	8,97	2,64
DPA (m)			0,093	0,099											
DPD (m)			0,093	0,08											
DLD (m)			0,01	0,01			0,022	0,02	0,015	0,014	0,021	0,02	0,018	0,012	0,019
DDA (m)			0,067	0,075			0,09	0,093	0,111	0,104	0,093	0,1	0,132	0,098	0,084
DDD (m)			0,067	0,063			0,09	0,08	0,062	0,056	0,093	0,084	0,074	0,051	0,084
NGE			6	6			45	45	30	30	30	30	30	15	15
NLL			30	30			20	20	20	20	20	20	20	20	20
NSS			5	5			2	2	3	3	3	3	3	6	6
QL (l/h)			522	522			1575	1575	1050	1050	1680	1680	1680	840	1305
QD (l/h)			31320	31320			63000	63000	42000	42000	67200	67200	67200	33600	52200
HS (mca)			2,74	2,76			6,39	6,21	5,18	7,16	6,92	6,92	6,7	6,77	6,7
QS (l/h)			31320	31320			63000	63000	84000	84000	67200	67200	67200	67200	52200
HPA (mca)			3,75	2,67											
QP (l/h)			31320	31320											
QT (l/h)			62640	62640			63000	63000	84000	84000	67200	67200	67200	67200	52200
NSP			1	1											
HPD (mca)			3,75	7,47											
DHUO (mca)			10,6	10,07			8,58	11,54	10,69	15,85	8,4	8,96	12,7	15,17	6,1
VPA (m/s)			1,29	1,12											
VPD (m/s)			1,29	1,72											
VS (m/s)			1,63	1,64			1,66	1,64	1,69	1,93	1,8	1,8	1,77	1,86	1,73
TE			7200	7200			7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200
DS (m)			0,082	0,082			0,116	0,117	0,133	0,124	0,115	0,115	0,116	0,113	0,103
DLA (m)			0,01	0,01			0,022	0,022	0,022	0,023	0,021	0,022	0,022	0,015	0,019
UE			0,79	0,8			0,81	0,77	0,78	0,7	0,8	0,8	0,74	0,7	0,85
HMIN (mca)			10,75	10,97			11,57	10,38	10,73	8,66	11,64	11,41	9,92	8,93	12,56
I (h)			3,16	3,85			13,83	11,98	20,14	21	14,14	2,92	16,68	17,62	9,31
T (dia)			1,68	2,06			3,02	2,48	4,24	3,96	4,9	1	5,32	5,32	5,32

Tabela 1 - Resultados das 120 configurações analisadas.

VARIÁVEL	CONFIGURAÇÃO														
	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
A (ha)	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04	23,04
LX (m)	320	320	320	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720
LY (m)	720	720	720	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320
QE (l/h)	87	87	87	35	35	35	35	56	56	56	56	87	87	87	87
DECX (%)	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5
DECY (%)	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5	0	1	3	5
FO(US\$/ha.ano)	2883	2854	2821	2938	2932	2849		2886	2878	2837		2865	2850	2805	
CSIST(US\$/ha.ano)	384	413	447	329	336	418		382	389	431		403	417	462	
RBRUT-US\$/ha.ano)	4624	4624	4624	4624	4624	4624		4624	4624	4624		4624	4623	4624	
CPROD-US\$/ha.ano)	1356	1356	1356	1356	1356	1356		1356	1356	1356		1356	1356	1356	
NUO	12	10	10	4	4	2		4	4	4		10	10	8	
NUOS	1	1	1	1	1	1		1	1	1		1	1	1	
NLS	1	1	1	1	1	1		1	1	1		1	1	1	
LP (m)															
LL (m)	58	70	70	78	78	158		78	78	78		30	30	38	
LD (m)	156	156	156	356	356	356		356	356	356		356	356	356	
LS (m)	660	648	648	240	240	160		240	240	240		288	288	280	
CENE (US\$/ano)	1416	2154	2871	1288	1438	2220		1383	1558	2370		1510	1444	2316	
CEB (US\$)	2987	3779	4173	3032	3151	4830		3848	4005	4452		3163	3168	3991	
CVR (US\$)	4841	4034	4034	1614	1614	807		1614	1614	1614		4034	4034	3227	
CPC (US\$)	2490	2265	2265	1406	1406	981		1406	1406	1406		2264	2265	2017	
CEC (US\$)	7032	8076	8076	8112	8112	14412		11892	11892	11892		8076	8076	9642	
TLL (m)	27840	28000	28000	28080	28080	28440		28080	28080	28080		27000	27000	27360	
TLP (m)															
TLD (m)	1872	1560	1560	1424	1424	712		1424	1424	1424		3560	3560	2848	
TLS (m)	660	648	648	240	240	160		240	240	240		288	288	280	
HT (mca)	35,73	54,75	71,11	28,39	32,11	43,44		30,04	34,04	46,41		32,78	32,92	47,66	
HDA (mca)	2,1	2,55	1,69	5,54	2,88	1,36		6,19	3,66	1,32		7,95	2,88	1,32	
HDD (mca)	5,22	11,91	17,28	5,54	10	22,72		6,19	10,78	22,68		7,95	10	22,68	
HLA (mca)	1,86	2,72	2,82	3,69	3,51	3,29		4,13	4,04	5,66		5,3	3,99	6,86	
HLD (mca)	3,02	6,92	9,82	3,69	5,07	12,77		4,13	5,6	10,34		5,3	4,59	9,14	
DPA (m)															
DPD (m)															
OLD (m)	0,018	0,017	0,016	0,015	0,014	0,017		0,017	0,016	0,014		0,011	0,012	0,011	
DDA (m)	0,094	0,096	0,105	0,097	0,111	0,168		0,113	0,126	0,156		0,09	0,111	0,142	
DDD (m)	0,077	0,069	0,064	0,097	0,086	0,093		0,113	0,1	0,086		0,09	0,085	0,078	
NGE	15	18	18	20	20	40		20	20	20		8	8	10	
NLL	20	20	20	45	45	45		45	45	45		45	45	45	
NSS	6	5	5	2	2	1		2	2	2		5	5	4	
QL (l/h)	1305	1566	1566	700	700	1400		1120	1120	1120		696	696	870	
QD (l/h)	52200	62640	62640	63000	63000	126000		100800	100800	100800		62640	62640	78300	
HS (mca)	6,75	6,89	6,6	2,81	2,77	2,47		3,3	3,3	2,96		2,97	3,06	2,96	
QS (l/h)	52200	62640	62640	63000	63000	126000		100800	100800	100800		62640	62640	78300	
HPA (mca)															
QP (l/h)															
QT (l/h)	52200	62640	62640	63000	63000	126000		100800	100800	100800		62640	62640	78300	
NSP															
HPD (mca)															
DHUO (mca)	6,1	12,06	15,81	9,23	10,73	20,06		10,32	12,04	20		13,25	10,73	20	
VPA (m/s)															
VPD (m/s)															
VS (m/s)	1,73	1,82	1,78	1,65	1,64	1,85		2	2	1,91		1,79	1,82	1,88	
TE	7200	7200	7200	7200	7200	7200		7200	7200	7200		7200	7200	7200	
DS (m)	0,103	0,11	0,111	0,116	0,116	0,155		0,134	0,134	0,137		0,111	0,11	0,122	
DLA (m)	0,02	0,021	0,021	0,015	0,015	0,023		0,017	0,017	0,016		0,011	0,012	0,012	
UE	0,85	0,77	0,71	0,8	0,78	0,63		0,78	0,75	0,62		0,75	0,79	0,64	
HMIN (mca)	12,56	10,18	8,68	11,31	10,71	6,98		10,87	10,18	7		9,7	10,71	7	
I (h)	1,99	1,94	11,12	21	18,3	21		3	16,46	11,63		5,7	9,47	2,32	
T (dia)	1,14	1	5,32	4,54	3,85	3,55		1	5,32	3,1		2,88	5,01	1	

APENDICE 3

Figura 1 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade 0.

Figura 2 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade 1% nas duas direções.

Figura 3 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade de 3% nas duas direções.

Figura 4 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 35 l/h e declividade 5% nas duas direções.

Figura 5 - Receita líquida anual em função do tamanho e formato da área, para a vazão 56 l/h e declividade 0.

Figura 6 - Receita líquida anual em função do tamanho e formato da área, para a vazão de 56 l/h e declividade de 1% nas duas direções.

Figura 7 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 56 l/h e declividade de 3% nas duas direções.

Figura 8 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 56 l/h e declividade de 5% nas duas direções.

Figura 9 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 87 l/h e declividade 0.

Figura 10 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 87 l/h e declividade 1% nas duas direções.

Figura 11 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 87 l/h e declividade 3% nas duas direções.

Figura 12 - Receita líquida anual em função do tamanho e do formato da área, para a vazão de 87 l/h e declividade 5% nas duas direções.