

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO UTILIZANDO MODELOS
DE PROGRAMAÇÃO LINEAR**

MARIA HELENA ZANGARI BALLARIM GUSMÃO

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp-Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia – Área de Concentração em
Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU-SP

Julho - 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO UTILIZANDO MODELOS
DE PROGRAMAÇÃO LINEAR.**

MARIA HELENA ZANGARI BALLARIM GUSMÃO

Orientador: Prof. Dr. Joao Carlos Cury Saad

Co-Orientador: Dr. Luiz Antonio Targa

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp-Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia – Área de Concentração em
Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU-SP

Julho – 2003

CATALOGAÇÃO NA FONTE: SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO
- SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - BOTUCATU (SP)

Gusmão, Maria Helena Zangari Ballarim, 1951-
G982c Comparação econômica entre critérios de dimensionamento
de sistemas de irrigação por microaspersão utilizando mo-
delos de programação linear / Maria Helena Zangari Balla-
rim Gusmão. -- Botucatu, [s.n.], 2003.
xiv, 91 f. : gráfs., tabs.

Dissertação (mestrado) -- Universidade Estadual Paulis-
ta, Faculdade de Ciências Agronômicas
Orientador: João Carlos Cury Saad
Co-orientador: Luiz Antonio Targa
Inclui bibliografia

1. Programação linear. 2. Irrigação - Dimensionamento.
3. Equipamento agrícola - Custos. 4. Energia elétrica -
Consumo. I. Saad, João Carlos Cury. II. Targa, Luiz An-
tonio. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mês-
quita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências
Agronômicas. IV. Título.

Palavras-chave: Otimização; Programação linear; Microirrigação.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: “COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO
DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO UTILIZANDO
MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR.”.**

ALUNO: MARIA HELENA ZANGARI BALLARIM GUSMÃO

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD



PROF. DR. RAIMUNDO LEITE CRUZ



PROF. DR. JARBAS HONORIO DE MIRANDA

Data da Realização: 02 de setembro de 2003.

Ofereço

Aos meus filhos Mariana e Guilherme

Agradeço

A Deus, pela minha existência e pela existência de todos que colaboraram na concretização desta tarefa.

Ao orientador Prof. Dr. João Carlos Cury Saad e Co-Orientador Prof. Dr. Luiz Antonio Targa pela competência e presteza na orientação, correção e sugestões deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
RESUMO	XII
SUMMARY	XIV
1- INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA.....	01
2- MATERIAL E MÉTODOS.....	07
2.1- Área	07
2.2- Configuração do sistema de irrigação.....	08
2.3- Alternativas de projeto avaliadas.....	09
2.4- Equipamento de Irrigação	12
2.4.1- Emissores utilizados	12
2.4.2- Tubulação	13
2.4.3- Painel de controle	15
2.4.4- Sistema de filtragem	15
2.4.5- Válvulas elétricas	16
2.4.6- Conjunto motobomba	16
2.5- Manejo da irrigação	17
2.6- Critérios de dimensionamento avaliados	17
2.6.1- 10% da variação de vazão	18
2.6.1.1- Microaspersor não autocompensante	20
2.6.1.2- Microaspersor autocompensante	21
2.6.2- Uniformidade de emissão	22
2.6.2.1- Microaspersor não autocompensante	23
2.6.2.2- Microaspersor autocompensante	24
2.7- Definição das dimensões e do número de unidades operacionais	25
2.7.1 - Comprimento da linha lateral	25
2.7.2 - Definição do comprimento da linha de derivação	29

2.8- Modelos de programação linear	32
2.8.1 - Função objetivo	32
2.8.2 - Restrições	35
2.8.2.1- Quanto à ocupação da área	35
2.8.2.2- Quanto à variação de perda de carga hidráulica permissível na unidade operacional	37
2.9- Programa computacional para solução dos modelos de Programação Linear	41
3- RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
3.1- Custo total das alternativas	42
3.2- Alternativa 1: microaspersor não autocompensante; 10% de variação de vazão; considerando o custo de energia elétrica	45
3.3- Alternativa 2: microaspersor não autocompensante; 10% de variação de vazão; não considerando o custo de energia elétrica	47
3.4- Alternativa 3: microaspersor não autocompensante; uniformidade de emissão; considerando o custo de energia elétrica	49
3.5- Alternativa 4: microaspersor não autocompensante; uniformidade de emissão; não considerando o custo de energia elétrica	51
4- CONCLUSÕES.....	57
5- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
6- APÊNDICE	60
6.1- I Modelo de Programação Linear para o critério de 10% de variação de vazão, microaspersor não autocompensante, considerando o custo com energia	61
6.2- II Modelo de Programação Linear para o critério de uniformidade de emissão, microaspersor não autocompensante, considerando o custo com energia	71

- 6.3- III Modelo de Programação Linear para o critério de 10% de variação de vazão, microaspersor autocompensante, considerando o custo com energia 81

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Alternativas de projeto analisadas utilizando modelos de Programação Linear	11
2 Características dos microaspersores	12
3 Especificações dos tubos de polietileno linear	13
4 Especificações dos tubos de PVC de pressão nominal 40 (40 mca), do tipo ponta, bolsa e anel	14
5 Especificações dos tubos de PVC de pressão nominal 80 (80 mca), do tipo ponta, bolsa e anel	14
6 Especificações dos tubos de PVC de pressão nominal 80 (80mca), do tipo ponta, bolsa e anel DEFOFO	14
7 Preço do painel de controle em função do número de unidades operacionais	15
8 Preço do sistema de filtragem em função de sua capacidade	15
9 Especificações e preços das válvulas elétricas	16
10 Especificações e preços das bombas centrífugas	16
11 Preços dos motores elétricos; IP55-380/660V ISOL B TFVE, 60HZ	17
12 Valores de variação de carga hidráulica na unidade operacional em função do critério de dimensionamento e do tipo de microaspersor	25
13 Valores de comprimento da linha lateral em função do critério de dimensionamento e do tipo de microaspersor	28
14 Comprimento e número de linhas laterais permitidas ao longo da dimensão 600m da área irrigada	29
15 Dimensões da unidade operacional para cada alternativa de projeto avaliada	31
16 Custo anual, em reais, das alternativas avaliadas	43
17 Detalhamento dos custos anuais para cada alternativa avaliada	44
18 Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionada para o critério 10% de variação de vazão, utilizando microaspersor não autocompensante e considerando o custo com energia	46

19	Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionada para o critério 10% de variação de vazão, utilizando microaspersor não autocompensante e não considerando o custo com energia	48
20	Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionada com base na uniformidade de emissão, utilizando microaspersor não auto compensante e considerando o custo com energia	50
21	21 Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionada com base na uniformidade de emissão, utilizando microaspersor não auto compensante e nãoconsiderand o o custo com energia	52
22	Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionada para o critério 10% de variação de vazão, utilizando microaspersor autocompensante e considerando o custo com energia	54

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Representação da área a ser irrigada	8
2 Esquema de irrigação na área.....	9
3 Distribuição de carga hidráulica ao longo da linha de derivação para o sistema de irrigação dimensionado segundo o critério 10% de variação de vazão, utilizando microaspersor não auto compensante e considerando o custo com energia	47
4 Distribuição de carga hidráulica ao longo da linha de derivação para o sistema de irrigação dimensionado segundo a uniformidade de emissão, utilizando microaspersor não autocompensante e considerando o custo com energia	51
5 Distribuição de carga hidráulica ao longo da linha de derivação para o microaspersor autocompensante, considerando o custo de energia e o critério de dimensionamento de 10% de variação de vazão	55

RESUMO

Os sistemas de irrigação por microaspersão apresentam como principal limitação o elevado custo inicial, decorrente da rede hidráulica fixa, ocupando toda a área a ser irrigada. Os custos com equipamento (conjunto motobomba, tubulação e acessórios) e com a energia por ele consumida são fatores determinantes do custo total do sistema. 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 é a otimização de sua rede hidráulica e da energia por ele consumida. Porém, a busca de sistemas de irrigação mais econômicos não deve prescindir da garantia de um nível adequado de uniformidade de aplicação de água dentro da unidade operacional, assegurados pelos diversos critérios já estabelecidos de dimensionamento das linhas de derivação e laterais. As muitas combinações possíveis envolvendo diâmetros distintos e diferentes comprimentos, nos diversos trechos da rede hidráulica, associadas aos diversos critérios de dimensionamento existentes, geram um grande número de configurações hidráulicas viáveis do sistema, dentre as quais ocorre a de menor custo. A identificação da alternativa mais econômica é um problema típico de Pesquisa Operacional, sendo o modelo de Programação Linear uma excelente opção, pois pode representar satisfatoriamente o problema e conduz a soluções que são ótimos globais. Os objetivos deste trabalho foram: desenvolver um sistema de equações lineares adaptáveis ao modelo de Programação Linear visando o dimensionamento ótimo de sistemas de irrigação por microaspersão, sob o enfoque da minimização do custo total; e, utilizando o modelo proposto, analisar diferentes critérios de dimensionamento, considerando ou não o custo com a energia elétrica consumida, visando identificar aquele que conduz a sistemas de irrigação por microaspersão de menor custo. Para tanto, tomou-se como exemplo um projeto a ser instalado em pomar de laranja, na região de Limeira, SP. Para solucionar os modelos de Programação Linear foi utilizado o programa computacional GAMS (“General Algebraic Modeling System”), desenvolvido para resolver problemas de grande porte. Com base nos resultados, conclui-se que a minimização dos custos foi obtida quando se utilizou o critério de 10% de variação de venda, associados ao microaspersor não auto compensante e considerando o custo da energia elétrica. As alternativas que utilizaram microaspersores autocompensantes foram às menos econômicas

devido ao elevado custo destes emissores. As alternativas que consideraram o custo com energia elétrica forneceram sempre menor custo total comparativamente com a correspondente que não a considerou e a necessidade de adequar os comprimentos das linhas laterais e de derivação ao formato da área eliminaram o fator de variação dado pela divisão da perda de carga admissível entre as linhas da unidade operacional.

ECONOMIC COMPARISON AMONG DESIGN CRITERIA FOR MICROIRRIGATION SYSTEMS USING LINEAR PROGRAMMING MODELS

Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: MARIA HELENA ZANGARI BALLARIM GUSMÃO

Adviser: JOÃO CARLOS CURY SAAD

Co-Adviser: LUIZ ANTONIO TARGA

SUMMARY

Microirrigation is a convenient and efficient method of supplying water to the root zone of trees. As a permanent irrigation system, the hydraulic network design greatly influences in the initial equipment cost. Therefore, optimization of the system design is key to maximizing profitability and emission uniformity.

Trickle irrigation systems have the high initial cost as the main limitation because the hydraulic network is fixed, occupying all the area to be irrigated. The costs with equipment (pump system and pipeline) and with the energy are the main factors to be considered in the total cost of the system. Larger pipe diameters for a given length and discharge, increase capital costs but, at the same time, decrease the energy requirements. On the other hand, smaller pipe diameters decrease capital costs but increase the energy requirements. So, it is possible to minimize the cost of the trickle irrigation systems optimizing the hydraulic network but it must be done considering a reasonable level of emission uniformity in the operational subunit. There are many possible alternatives involving diameters and different lengths in the hydraulic network sections, for each design criterium adopted. Identification of the most economic alternative is a typical problem of Operational Research, being the Linear Programming an excellent option to be used.

The purposes of this paper are: (1) to develop a linear programming model that provides the optimization of microirrigation design, under the condition of minimization of the total cost ; and (2) using the developed model, compare the total cost of a microirrigation system for a

citrus field located in Limeira, Sao Paulo, Brazil, under different conditions (different design criteria and considering or not the energy cost). Software GAMS (“General Algebraic Modeling System”) was used to solve the Linear Programming models.

The minimization of the costs was gotten when criterion of 10% of discharge variation was used, associates to the microaspersor nao auto compensante and considering the cost of the energy eltric. The alternatives that had used compensating emitters showed higher cost because of the high price of these emitters. The alternatives that had considered the cost with energy showed always the lower cost comparing with the correspondent that not considered the energy cost.

Keywords: optimization, linear programming, microirrigation.

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DE LITERATURA

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, a principal desvantagem é o elevado custo inicial, que se deve, basicamente, ao custo do conjunto de tubos, emissores e acessórios (HOLZAPFEL et al, 1990).

Atualmente, tanto o dimensionamento como a operação de projetos de irrigação devem ser feitos considerando o aspecto econômico. Caracteriza-se como dimensionamento o processo de reunião de componentes individuais compatíveis entre si que, ao se unirem, irão produzir um sistema de irrigação eficiente, 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.

Os objetivos deste trabalho foram:

- desenvolver um sistema de equações lineares adaptáveis ao modelo de Programação Linear visando o dimensionamento ótimo de sistemas de irrigação por microaspersão, sob o enfoque da minimização do custo;

- Utilizando o modelo proposto, analisar diferentes critérios de dimensionamento, considerando ou não o custo com a energia elétrica consumida e, também, o uso ou não de microaspersores autocompensante.
- Critérios para estabelecimento da perda de carga admissível na unidade operacional.

Divisão da perda de carga admissível na unidade operacional entre as linhas laterais e à linha de derivação, visando identificar a alternativa que conduz a sistemas de irrigação por microaspersão de menor custo.

Para tanto, tomar-se-á como exemplo um projeto a ser instalado em pomar de laranja, na região de Limeira, SP.

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 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 e a automação tornam-se mais econômicos.

A busca de sistemas de irrigação mais econômicos não deve prescindir da garantia de um nível adequado de uniformidade de aplicação de água dentro da unidade operacional, assegurado pelos diversos critérios já estabelecidos de dimensionamento das linhas laterais e de derivação.

No dimensionamento hidráulico de sistemas de irrigação localizada um dos critérios de projeto mais utilizados é o de não permitir que ocorra uma variação maior que 10% na vazão dos emissores da unidade operacional. Além disto, os diâmetros adequados nas linhas laterais e de

derivação são selecionados distribuindo-se, aproximadamente, metade da perda de carga admissível para cada tipo de canalização (OLITTA, 1988).

Outro critério de dimensionamento amplamente difundido e utilizado nos Estados Unidos e Europa é aquele baseado na uniformidade de emissão, um coeficiente que considera as variações de carga hidráulica dentro da unidade operacional e também a desuniformidade causada pelo processo de fabricação dos emissores. Conforme a condição topográfica da área do projeto e o tipo de emissor tem-se um valor de uniformidade de emissão recomendado, o qual irá corresponder a uma variação de perda de carga admissível na unidade operacional. Este valor é dividido por dois e distribuído entre linha lateral e linha de derivação (KELLER & BLIESNER, 1990).

O dimensionamento hidráulico de um sistema de irrigação localizada pode ser modificado quando se considera a energia consumida na operação do equipamento e seu custo (SAAD et al., 1994). Os autores, utilizando modelos de programação linear, analisaram dois projetos de irrigação por gotejamento em pomar de citros: um dimensionado considerando o custo com energia elétrica e outro desconsiderando. Verificou-se que o dimensionamento foi afetado pelo custo da energia elétrica consumida, para valores de tarifa iguais ou superiores a US\$0,025 kwh^{-1} .

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, resulta 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, apresenta maior custo. Pode-se, então, deduzir, que uma forma de minimizar o custo dos sistemas fixos de irrigação pressurizada é a otimização de sua rede hidráulica e da energia por ela consumida.

Na irrigação por microaspersão a rede hidráulica é fixa e está distribuída em toda a área a ser irrigada, o que evidencia a grande participação do fator equipamento no elevado custo inicial deste sistema. O fato da tubulação ser fixa possibilita o uso de muitas combinações envolvendo diâmetros distintos e diferentes comprimentos, nos diversos trechos da rede hidráulica. Além disto, os critérios de dimensionamento existentes contribuem para aumentar

as alternativas. Em decorrência disto, há possibilidade de se obter várias configurações hidráulicas viáveis do sistema, dentre as quais ocorre a de menor custo.

A identificação da alternativa mais econômica motivou o desenvolvimento de procedimentos e a adoção de diferentes recursos matemáticos.

BERNARDO (1986) cita três procedimentos para o dimensionamento econômico das tubulações para irrigação, ou seja, 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 consiste em se determinar o 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 descrita anteriormente são muito trabalhosos, susceptíveis a erros e fornecem poucas informações adicionais (não trazem subsídios para a análise de sensibilidade dos recursos utilizados).

CHIANG (1982) considera a Programação Linear um progresso em relação ao contexto da otimização clássica, pois as restrições podem entrar no problema na forma de desigualdades e, assim, faz-se explicitamente a introdução das condições de não-negatividade no mesmo.

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

A resolução dos modelos de Programação Linear por meio de programas computacionais específicos disponíveis no mercado, possibilita a análise de sensibilidade do custo total do sistema de irrigação em relação às variáveis envolvidas no projeto, resultando numa série de recomendações que facilitarão o processo de tomada de decisão.

Inicialmente, a Programação Linear foi adotada na otimização de redes de distribuição de água. KARMELI et al (1968) sabendo que, numa 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.

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 pudesse ser encontrada.

ORON & KARMELI (1981) apresentaram um modelo de Programação Linear visando a 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, 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).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área

Para proceder à análise comparativa, utilizou-se uma área cultivada com citros, com dimensões de 400m por 600m (Figura 1), com declividade uniforme de 2,1% na direção do menor comprimento. As linhas de plantio estão em nível, na direção da maior dimensão (600m). O espaçamento considerado foi 7x4m, ou seja, 4m entre árvores na linha de plantio e 7m entre linhas de planta, totalizando 28m² por planta e 357 plantas por hectare.

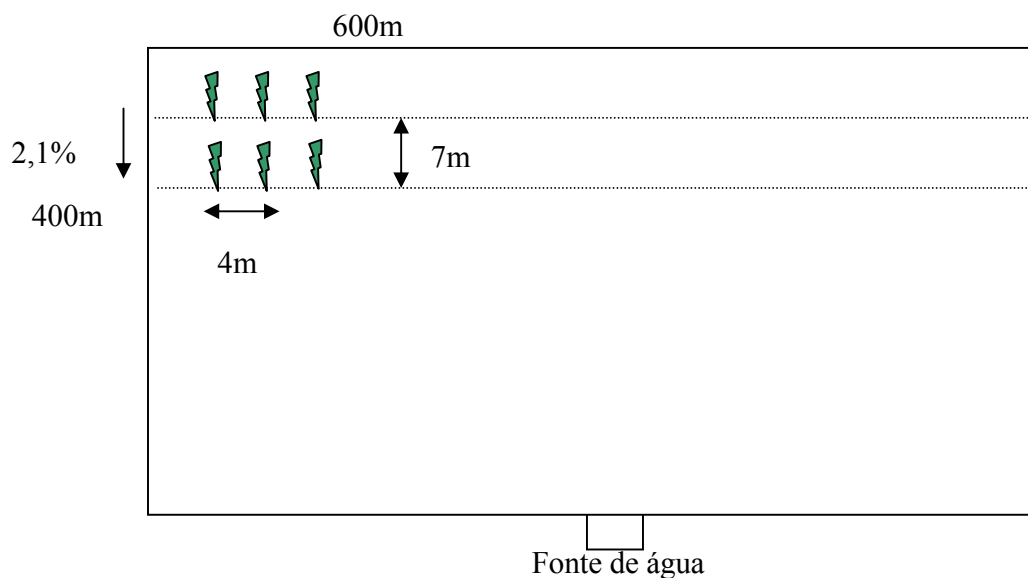


Figura 1: Representação da área a ser irrigada.

A fonte de água está localizada em cota abaixo da área irrigada, aproximadamente na metade de sua maior extensão. No mesmo local se encontra a estação de bombeamento, composta por uma bomba centrífuga e um motor elétrico. Em seguida, tem-se a estação de controle, onde se encontra o sistema de filtragem (filtro de tela, filtro de areia e válvulas para retrolavagem) e outros acessórios.

A área se localiza na região de Limeira, SP, sendo que os coeficientes técnicos e econômicos utilizados nos modelos são pertinentes a tal localidade.

2.2 Configuração do sistema de irrigação

Para todos os critérios de dimensionamento foram assumidas as seguintes premissas, com relação à disposição do sistema de irrigação na área a ser irrigada:

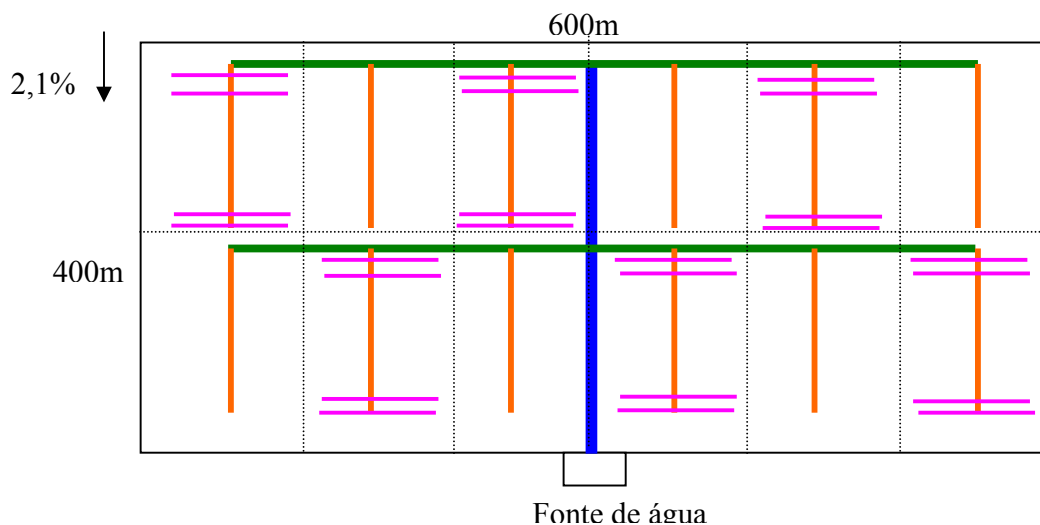


Fig.2 : Esquema de irrigação na área

- a) as linhas laterais seguem as curvas de nível na direção do maior comprimento (600m);
- b) as linhas de derivação estão dispostas na direção da menor dimensão (400m) e estão sempre em declive;
- c) as linhas secundárias seguem a mesma direção das linhas laterais, portanto, estão em nível;
- d) a linha principal segue a direção da linha de derivação e está sempre em aclave.

2.3 Alternativas de projeto avaliadas

Os fatores de variação que determinaram as alternativas de projeto avaliadas neste trabalho foram: uso ou não de microaspersores autocompensante, critérios para estabelecimento da perda de carga admissível na unidade operacional, divisão da perda de carga admissível na unidade operacional entre as linhas laterais e à linha de derivação e quanto à consideração do custo operacional com energia elétrica no custo total anual.

Quanto ao critério para estabelecimento da perda de carga admissível na unidade operacional, duas possibilidades foram analisadas:

- não permitir que ocorra uma variação maior que 10% na vazão dos emissores da unidade operacional;
- identificar o valor recomendado de uniformidade de emissão (UE) para as condições do projeto e calcular a perda de carga admissível correspondente.

A divisão da perda de carga admissível na unidade operacional, entre as linhas laterais e a linha de derivação, resultou em duas possibilidades:

- 50% para as linhas laterais e 50% para a linha de derivação;
- variável dentro do intervalo de 40 a 60% para ambas as linhas, desde que a soma total seja 100%.

Quanto à consideração do custo operacional com energia elétrica no custo total anual:

- considerando;
- não considerando.

Finalmente, quanto ao comportamento da vazão do microaspersor em relação às variações de pressão:

- com mecanismos para compensação de pressão (autocompensante);
- sem mecanismos para compensação de pressão.

Desta forma, 16 alternativas de projeto foram avaliadas economicamente, utilizando modelos de programação linear (Quadro 1).

QUADRO 1: Alternativas de projeto analisadas utilizando modelos de Programação Linear.

ALTERNATIVA	Critério de dimensionamento	Divisão da perda de carga admissível entre linhas laterais e linha de derivação	Presença de mecanismos, no próprio microaspersor, para compensação	Consideração do custo operacional com energia na estimativa do custo total anual
1	10% variação de vazão	50%	SIM	SIM
2	10% variação de vazão	50%	SIM	NÃO
3	10% variação de vazão	50%	NÃO	SIM
4	10% variação de vazão	50%	NÃO	NÃO
5	10% variação de vazão	Variável	SIM	SIM
6	10% variação de vazão	Variável	SIM	NÃO
7	10% variação de vazão	Variável	NÃO	SIM
8	10% variação de vazão	Variável	NÃO	NÃO
9	Baseado na UE	50%	SIM	SIM
10	Baseada na UE	50%	SIM	NÃO
11	Baseada na UE	50%	NÃO	SIM
12	Baseado na UE	50%	NÃO	NÃO
13	Baseado na UE	Variável	SIM	SIM
14	Baseado na UE	Variável	SIM	NÃO
15	Baseado na UE	Variável	NÃO	SIM
16	Baseado na UE	Variável	NÃO	NÃO

2.4 Equipamento de irrigação

Os coeficientes técnicos e os preços dos equipamentos de irrigação foram obtidos junto aos fabricantes e fornecedores.

2.4.1 Emissores utilizados

Dois modelos de microaspersores foram utilizados: um fixo não autocompensante e outro autocompensante. As características destes emissores encontram-se no Quadro 2.

QUADRO 2: Características dos microaspersores.

Características	Microaspersor fixo (não autocompensante)	Microaspersor autocompensante
Fabricante	Carborundum	Carborundum
Bocal	Verde claro	Verde claro
Pressão de operação (mca)	15,5	10,3 a 31
Vazão correspondente à pressão de operação (L h ⁻¹)	43	40
Diâmetro molhado (m)	5,1m (300° x 11 jatos)	5,7m
Coeficiente de variação de fabricação (CVF) - %	2,3	2
Relação vazão - pressão	$q = 9,8918 \cdot h^{0,5326}$ $r^2 = 0,9985$ $q = L / h$ ($h = \text{mca}$)	$q = 32,528 \cdot h^{0,0719}$ $r^2 = 0,8203$ $q = L / h$ ($h = \text{mca}$)
Preço (US\$=1,881- 1999)	0,568	1,276

2.4.2 Tubulação

As linhas laterais são constituídas por tubo de polietileno linear cujas características estão no Quadro 3.

QUADRO 3: Especificações dos tubos de polietileno linear (Fornecedor: Carborundum S.A.).

Diâmetro Nominal (DN) mm	Pressão nominal (PN) Mca	Diâmetro interno (mm)	Preço (US\$ m ⁻¹)
10	40	10	0,112
13	30	13	0,122
16	30	16,1	0,138
16	40	16,1	0,165
20	30	20,6	0,216
20	40	20,6	0,260
26	40	26,95	0,438

As linhas de derivação, secundária e principal são de PVC. Foram avaliadas duas classes de pressão: 40 e 80 (40mca e 80mca, respectivamente). As especificações dos tubos de PVC encontram-se nos Quadros 4, 5 e 6.

QUADRO 4: Especificações dos tubos de PVC de pressão nominal 40 (40 mca), do tipo ponta, bolsa e anel (Fornecedor: Tigre S. A.).

Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro interno (m)	Preço (US\$ (barra de 6m ⁻¹))
50	0,0482	4,317
75	0,0724	8,299
100	0,0976	13,259
125	0,120	21,728
150	0,144	30,856

QUADRO 5: Especificações dos tubos de PVC de pressão nominal 80 (80 mca), do tipo ponta, bolsa e anel (Fornecedor: Tigre S. A.)

Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro interno (m)	Preço (US\$ (barra de 6m) ⁻¹)
50	0,0468	6,140
75	0,0704	12,302
100	0,0944	23,578

QUADRO 6: Especificações dos tubos de PVC de pressão nominal 80 (80 mca), do tipo ponta, bolsa e anel DEFOFO (Fornecedor: Tigre S. A.).

Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro interno (m)	Preço (US\$ (barra de 6m) ⁻¹)
100	0,1118	24,280
150	0,1612	48,517
200	0,2104	82,456

2.4.3 Painele de controle

O painel de controle é classificado em função do número válvulas sob seu controle, sendo que se utiliza uma válvula por unidade operacional (Quadro 7).

QUADRO 7: Preço do painel de controle em função do número de unidades operacionais. (Fonte: Carborundum S. A.).

Painel de controle automático	Preço (US\$)
6 válvulas (unidades operacionais)	366,826
8	497,076
12	523,658
14	584,795
18	741,627

2.4.4 Sistema de filtragem

O sistema de filtragem considerado é composto por um filtro de tela, um filtro de areia e válvulas para retrolavagem (Quadro 8).

QUADRO 8: Preço do sistema de filtragem em função de sua capacidade. (Fonte: Carborundum).

Capacidade do sistema de filtragem	Preço (US\$)
50 m ³ /h	4784,689
100	6751,728
150	4625,199
200	2551,834

2.4.5 Válvulas elétricas

Instaladas no início de cada unidade operacional e ligada ao painel de controle. Realizam a função de controle de operação e de regulação de pressão (Quadro 9).

QUADRO 9: Especificações e preços das válvulas elétricas (Fonte: Carborundum).

Válvula		
Diâmetro	Vazão (l s^{-1})	Preço (US\$)
1"	1,2 – 10,8	95,694
1.1/2"	3,6 – 12,0	143,541
2"	6,0 – 42,0	260,500
3"	36,0 – 68,4	366,826

2.4.6 Conjunto motobomba

Para as faixas de vazão (em torno de $60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) e de altura manométrica (entre 50 e 100 mca) em que se encontravam os sistemas de irrigação avaliados, foram suficientes dois modelos de bomba centrífuga e três potências de motores elétricos (Quadros 10 e 11).

QUADRO 10: Especificações e preços das bombas centrífugas (Fornecedor: KSB).

Características	KSB 80-40/2	KSB 80-40/3
Faixa de altura manométrica para vazão em torno de $60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	50 a 82 mca	82 a 112 mca
Preço (US\$)	1625,731	2447,634

QUADRO 11: Preços dos motores elétricos; IP55 –380/660V ISOL B TFVE, 60Hz (Fornecedor: WEG).

Potência do motor	Preço (US\$)
25 CV	363,636
30 CV	520,468
40 CV	695,375

2.5 Manejo da irrigação

Para uma evapotranspiração de referência de 4mm d^{-1} CONFORMESAAD (1990), o volume de água requerido por planta é de 112 L d^{-1} . Portanto, para os microaspersores avaliados e para uma eficiência de aplicação de 90%, tal volume diário é atendido com 3 horas de irrigação. O turno de irrigação é de 3 dias.

O período diário disponível para irrigação foi considerado como sendo de 18 horas e o número de dias de irrigação por ano foi adotado como sendo 120 dias, conforme FAVETTA (1998).

2.6 Critérios de dimensionamento avaliados

Para fornecer os dados de entrada requeridos pelos modelos de otimização foi necessário converter os critérios de dimensionamento em valores de variação de carga hidráulica admissível na unidade operacional, para cada um dos dois tipos de microaspersores avaliados (autocompensante e não autocompensante).

Premissas assumidas pelos modelos:

- a linha lateral apresenta um único diâmetro e está em nível (segue as linhas de plantio, que estão em nível);

- as linhas de derivação estão em declive e podem ser constituídas por trechos com tubos de diferentes diâmetros;
- a perda de carga na linha de derivação (HFD) é maior ou igual ao ganho de carga hidráulica decorrente da condição de declive (Sd).

A última premissa implica em dois tipos de perfis de carga hidráulica ao longo da linha de derivação. Quando a perda de carga for maior que o ganho devido ao declive, o maior valor de carga hidráulica ocorrerá no início da linha de derivação e o menor valor em um ponto entre as extremidades.

Quando houver igualdade entre a perda de carga (HFD) e ganho decorrente do declive (Sd), o maior valor de carga hidráulica ocorre em ambas às extremidades da linha de derivação e o menor valor ocorre em um ponto intermediário.

2.6.1 10% da variação de vazão

Segundo este critério, as linhas laterais e de derivação devem ser dimensionadas de tal forma que não ocorra uma variação maior que 10% na vazão dos emissores da unidade operacional. Inicialmente, assumiu-se que tal variação está igualmente distribuída entre linha lateral e linha de derivação. Desta forma, a variação de vazão admissível na linha lateral em nível pode ser expressa matematicamente por:

$$\frac{q_1 - q_n}{q_1} = 0,05 \quad (1)$$

ou seja,

$$\frac{q_1}{q_n} = 1,05263 \quad (2)$$

em que q_1 = vazão do microaspersor com maior vazão (primeiro emissor da linha lateral) ;

q_n = vazão do microaspersor de menor vazão na linha lateral (o último).

A relação entre a vazão e a pressão de um microaspersor é representada por uma equação potencial do tipo:

$$q = a H^b \quad (3)$$

em que q é a vazão do microaspersor quando sujeito à carga hidráulica H ; a e b são coeficientes empíricos.

Desta forma, combinando as eqs. 2 e 3 tem-se que:

$$\frac{q_l}{q_n} = \left(\frac{a.H_l^b}{a.H_n^b} \right) \quad (4)$$

e, conseqüentemente:

$$\frac{H_l}{H_n} = \left(\frac{q_l}{q_n} \right)^{\frac{1}{b}} = 1,05263^{\left(\frac{1}{b}\right)} \quad (5)$$

A equação que representa a distribuição de carga hidráulica em uma linha lateral, tanto na condição em nível como em aclave, pode ser expressa por:

$$H_m = H_o - 0,75 H_f + 0,5 S_o L \quad (6)$$

em que: H_m = carga hidráulica média na linha lateral, em mca ;

H_o = carga hidráulica no início da linha lateral, em mca;

H_f = perda de carga na linha lateral, em mca;

S_o = desnível geométrico ao longo da linha lateral, em $m\ m^{-1}$;

L = comprimento da linha lateral, em m.

Para simplificar, admitiu-se que a carga hidráulica no primeiro microaspersor é igual à carga hidráulica no início da linha lateral, ou seja, $H_0 = H_1$. Além disto, como as linhas laterais seguem as curvas de nível, tem-se que $S_o = 0$. Pode-se, então, deduzir as seguintes equações:

$$H_m = H_1 - 0,75 H_f \quad (7)$$

$$H_m = H_n + 0,25 H_f \quad (8)$$

Como S_o é igual a 0, tem-se que:

$$H_f = H_1 - H_n \quad (9)$$

A equação 9 fornece a perda de carga na linha lateral correspondente a uma variação de 5% na vazão dos emissores. Para se ter uma variação de 10% na vazão dos emissores na unidade operacional deve-se ter uma variação de carga hidráulica na linha de derivação, entre a saída com maior valor e a saída com menor valor, de grandeza equivalente ao valor encontrado na equação 9.

2.6.1.1 Microaspersor não autocompensante

A relação entre vazão e pressão deste emissor é dada pela equação:

$$q = 9,8918 H^{0,5326} \quad (10)$$

com q em $L h^{-1}$ e H em mca.

Substituindo o coeficiente $b = 0,5326$ na eq. 5 obtém-se que:

$$\frac{H_1}{H_n} = 1,101 \quad (11)$$

Combinando as equações 7, 8, 9 e 11 tem-se que :

$$H_1 = 1,075 H_m \quad (12)$$

$$H_n = 0,975 H_m \quad (13)$$

Portanto,

$$H_f = H_1 - H_n = 0,10 H_m \quad (14)$$

Como a carga hidráulica de operação do microaspersor não autocompensante é de 15,5 mca, a perda de carga na linha lateral será de:

$$H_f = 1,55 \text{ mca}$$

Portanto, a perda de carga deve ser de 1,55 m para que se tenha uma variação de vazão de 5% entre estes microaspersores instalados em uma linha lateral em nível. Para se ter 10% de variação de vazão na unidade operacional, a diferença de carga hidráulica entre a saída com maior valor de pressão na linha de derivação e a saída com menor valor, também deve ser de 1,55 m. Portanto, a diferença de carga hidráulica entre o microaspersor com maior vazão e aquele com menor vazão na unidade operacional, deve ser de, no máximo, 3,1 mca (ou seja, 2 vezes 1,55 mca).

2.6.1.2 Microaspersor autocompensante

A relação entre vazão e pressão deste emissor é dada pela equação:

$$q = 32,528 H^{0,0719} \quad (15)$$

com q em L/h e H em mca.

Substituindo o coeficiente $b = 0,0719$ na eq. 5 obtém-se que:

$$\frac{H_1}{H_n} = 2 \quad (16)$$

Combinando as equações 7, 8, 9 e 16 tem-se que :

$$H_1 = 1,6 H_m \quad (17)$$

$$H_n = 0,8 H_m \quad (18)$$

Portanto,

$$H_f = H_1 - H_n = 0,8 H_m \quad (19)$$

Como a carga hidráulica de operação do microaspersor não autocompensante é de 15,5mca, a perda de carga na linha lateral será de:

$$H_f = 12,4 \text{ mca}$$

Portanto, a perda de carga deve ser de 12,4mca para que se tenha uma variação de vazão de 5% entre estes microaspersores instalados em uma linha lateral em nível. A diferença entre a carga hidráulica entre a saída com maior pressão e a saída com menor pressão na linha de derivação também deve ser de 12,4mca. Desta forma, a diferença de carga hidráulica que corresponde a uma variação de 10% entre o emissor de maior vazão e o emissor de menor vazão na unidade operacional deve ser de 24,8mca .

2.6.2 Uniformidade de emissão

Segundo o critério baseado na uniformidade de emissão, a variação permissível de perda de carga na unidade operacional é de:

$$DHUO = M (H_m - H_n) \quad (20)$$

em que:

$DHUO$ = variação permissível de perda de carga na unidade operacional (mca);

M = fator que depende da topografia do terreno e da ocorrência de diferentes diâmetros em uma mesma linha.

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:

$$UE = \left[1 - \left(1,27 \frac{CVF}{\sqrt{NE}} \right) \right] \frac{Q_{MIN}}{Q_M} \quad (21)$$

em que:

UE = uniformidade de emissão, decimal ;

CVF = coeficiente de variação de fabricação do microaspersor, valor decimal ;

NE = número de microaspersores por planta;

Q_n = vazão correspondente à carga hidráulica mínima na unidade operacional, em $m^3 s^{-1}$;

Q_m = vazão correspondente à carga hidráulica média (ou de operação) na unidade operacional, em $m^3 s^{-1}$.

A conversão da vazão mínima em carga hidráulica mínima e vice-versa é feita por meio da relação vazão - pressão do microaspersor (eq 3).

2.6.2.1 Microaspersor não autocompensante

A declividade de 2,1% da área implica na adoção de um valor de uniformidade de emissão compreendido entre 85 e 90%.

A vazão de operação (média – Q_m) do microaspersor não autocompensante selecionado é de $43 L h^{-1}$. O expoente da carga hidráulica na equação que caracteriza a relação vazão – pressão deste microaspersor é igual a 0,5326 (eq.10). O coeficiente de variação de fabricação é de 2,3% e o número de microaspersores por planta é igual a 1. Desta forma, substituindo-se os valores na eq.21 obtém-se:

$$Q_n = 39,86 L h^{-1} \quad \text{para } UE = 90\%$$

$$Q_n = 37,65 L h^{-1} \quad \text{para } UE = 85\%$$

Substituindo-se estes valores de vazão na eq. 10 obtém-se h_n .

$$UE = 90\% \rightarrow h_n = 13,69 \text{ mca}$$

$$UE = 85\% \rightarrow h_n = 12,3 \text{ mca}$$

Segundo a eq. 20, a variação de carga hidráulica admissível na unidade

operacional será de

$$DHUO = 4,5\text{m para UE} = 90\%$$

$$DHUO = 8 \text{ mca para UE} = 85\%$$

O valor de DHUO deve ser dividido entre a linha lateral e a linha de derivação.

2.6.2.2 Microaspersor autocompensante

A vazão de operação (média – Q_m) do microaspersor não autocompensante selecionado é de 40 L h^{-1} . O expoente da carga hidráulica na equação que caracteriza a relação vazão – pressão deste microaspersor é igual a 0,0719 (eq. 15). O coeficiente de variação de fabricação é de 2% e o número de microaspersores por planta é igual a 1. Desta forma, substituindo-se os valores na eq.21 obtém-se:

$$Q_n = 36,94 \text{ L h}^{-1} \quad \text{para UE} = 90\%$$

$$Q_n = 34,89 \text{ L h}^{-1} \quad \text{para UE} = 85\%$$

Substituindo-se estes valores de vazão na eq. 10, obtém-se H_n :

$$\text{UE} = 90\% \rightarrow H_n = 5,9 \text{ mca}$$

$$\text{UE} = 85\% \rightarrow H_n = 2,7 \text{ mca}$$

Segundo a equação 20, a variação de carga hidráulica admissível na unidade operacional será de:

$$DHUO = 24\text{m para UE} = 90\%$$

$$DHUO = 32,1 \text{ mca para UE} = 85\%$$

O Quadro 12 apresenta os valores de variação de carga hidráulica admissíveis na unidade operacional que caracterizam cada um dos critérios de dimensionamento

avaliados, conforme o tipo de microaspersor utilizado.

QUADRO 12: Valores de variação de carga hidráulica na unidade operacional em função do critério de dimensionamento e do tipo de microaspersor.

Critério de dimensionamento	Tipo de microaspersor	Variação de carga hidráulica na unidade operacional
10% de variação de vazão	Não autocompensante	3,1 mca
10% de variação de vazão	Autocompensante	24,8 mca
Uniformidade de emissão	Não autocompensante	4,5 mca (para UE = 90%)
		8,0 mca (para UE = 85%)
Uniformidade de emissão	Autocompensante	24 mca (para UE = 90%)
		32,1 mca (para UE = 85%)

2.7 Definição das dimensões e do número de unidades operacionais.

2.7.1 Comprimento da linha lateral

A linha lateral tem um único diâmetro, definido em função do custo do tubo de polietileno linear (Quadro 2). A classe de pressão 30 (30mca) é suficiente para atender todos os critérios e situações avaliadas. A melhor relação custo x diâmetro interno está associada ao tubo DN16–PN30, que apresenta 16,1mm de diâmetro interno e custo de US\$0,138 por metro. Portanto, a linha lateral de todas as configurações avaliadas é constituída de tubos de polietileno linear de PN30 e DN30. Porém, o comprimento da linha lateral varia em função das alternativas avaliadas. Cada alternativa apresenta um valor de perda de carga admissível na linha lateral, sendo que este valor, associado às características físicas da área, define o respectivo comprimento da tubulação.

Para definir o comprimento da linha lateral em função da perda de carga admissível, utilizou-se a metodologia descrita por SCALOPPI & ALLEN (1993), que consiste em combinar a equação de Darcy – Weisbach para cálculo da perda de carga e o procedi-

mento para cálculo do fator de fricção, desenvolvido por CHURCHILL(1977).

A equação de Darcy-Weisbach é dada por:

$$H_f = \frac{8 f Q^2 L}{\pi^2 \nu D^5} \quad (22)$$

em que:

H_f = perda de carga na tubulação, em mca;

f = fator de atrito;

Q = vazão, em $m^3 s^{-1}$

L = comprimento da tubulação, em m;

ν = viscosidade cinemática da água = $1,01.10^{-6} m^2 s^{-1}$;

D = diâmetro interno do tubo, em m.

O procedimento apresentado por CHURCHILL (1977) para cálculo do fator de atrito f permite estimar analiticamente o valor de f para qualquer regime de fluxo (laminar, turbulento e transição) e é descrito pelas equações:

$$f = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{1,5}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (23)$$

em que:

$$A = \left\{ 2,457 \cdot \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot \left(\frac{e}{D} \right)} \right] \right\}^{16} \quad (24)$$

e

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad (25)$$

em que:

Re = número de Reynolds;

e = dimensão média das imperfeições da parede interna do tubo, em m (para tubos de polietileno e pvc utilizou-se o valor $1,3 \cdot 10^{-5}$ m) .

A vazão da linha lateral pode ser expressa em função de seu comprimento L e da vazão de cada microaspersor:

$$Q = q \left(\frac{L}{S_e} + w \right) \quad (26)$$

em que:

q = vazão de operação do microaspersor;

S_e = espaçamento entre microaspersores na linha lateral;

w = relação entre a distância do início da linha lateral até o primeiro microaspersor e o espaçamento regular entre microaspersores na linha. Neste estudo, o espaçamento entre microaspersores na linha lateral é de 4m, porém o primeiro se encontra a 2m do início da linha. Portanto, $w = 0,5$.

Uma vez conhecido o valor de perda de carga admissível na linha lateral, pode-se calcular o comprimento da linha lateral correspondente utilizando-se as eqs. 22, 23, 24, 25 e 26. O Quadro 13 apresenta o comprimento da linha lateral para cada critério avaliado.

QUADRO 13: Valores de comprimento da linha lateral em função do critério de dimensionamento e do tipo de microaspersor.

Critério de dimensionamento	Tipo de microaspersor	Divisão da perda de carga hidráulica na unidade operacional		Comprimento da linha lateral (m)
		Linha lateral (%)	Linha de derivação (%)	
10% de variação de vazão	Não autocompensante	40	60	52
		50	50	56
		60	40	60
	Autocompensante	40	60	120
		50	50	130
		60	40	138
Uniformidade de Emissão	Não autocompensante	40	60	66
		50	50	72
		60	40	77
	Autocompensante	40	60	118
		50	50	128
		60	40	136

Os valores apresentados no Quadro 12 atendem apenas a perda de carga permitida na linha lateral pelo critério de dimensionamento utilizado, para cada um dos dois tipos de emissores avaliados (autocompensante e não). Porém, deve-se escolher o comprimento da linha lateral em função da geometria da área, a fim de se ter a máxima área irrigada em relação à área total disponível, bem como atender algumas exigências operacionais, relacionados com o número de unidades operacionais, o período de irrigação por dia e o turno de irrigação.

As linhas laterais seguem as curvas de nível (as linhas de plantio) e de-

vem ser dispostas ao longo da dimensão 600m. Além disto, a unidade operacional é composta por uma linha de derivação tendo, de ambos os lados, linhas laterais de mesmo comprimento. Portanto, o número de linhas laterais na dimensão 600m deve ser par (igual a 2 ou múltiplo). O Quadro 14 apresenta as possibilidades de comprimento e número de linhas laterais na direção que apresenta 600m.

QUADRO 14: Comprimento e número de linhas laterais permitidas ao longo da dimensão 600m da área irrigada.

Número de Unidades Operacionais	Número de Linhas Laterais	Comprimento da Linha Lateral (m)
1	2	300
2	4	150
3	6	100
4	8	75
5	10	60
6	12	50

O Quadro 14 poderia continuar quanto ao número de unidades operacionais, porém estes valores apresentados são suficientes para os dados deste trabalho. Para definir o comprimento da linha lateral de cada critério, deve-se considerar, simultaneamente, o comprimento de linha de derivação e aspectos operacionais como turno de irrigação e tempo diário disponível para irrigação.

2.7.2 Definição do comprimento da linha de derivação

Uma vez que cada alternativa de projeto avaliada pode apresentar comprimento de linha lateral distinto e como se pretende comparar os critérios entre si, adotou-se que a vazão total de operação deve ser, aproximadamente, a mesma, independentemente

do critério de dimensionamento adotado. Isto significa que cada vez que se irriga, a área coberta é aproximadamente a mesma para todas as alternativas, ou seja, a soma da vazão (ou da área) das unidades operacionais atuando simultaneamente em cada alternativa avaliada é, aproximadamente, constante.

Outro aspecto que contribui para a definição do comprimento da linha de derivação é o comprimento da área na dimensão em que esta linha é instalada, que neste caso é 400m.

Associando, para cada tipo de microaspersor, os valores de comprimento da linha lateral definidos pelos critérios de dimensionamento com as características geométricas da área e operacionais do sistema de irrigação, obtém-se as dimensões da unidade operacional para cada alternativa avaliada (Quadro 15).

QUADRO 15: Dimensões da unidade operacional para cada alternativa de projeto avaliada.

Critério de dimensionamento	Tipo de microaspersor	Comprimento da linha lateral (m)	Comprimento da linha de derivação (m)	Número de unidades operacionais	Número de unidades operacionais atuando simultaneamente	Área irrigada simultaneamente (ha)
10% de variação de vazão	Não autocompensante	46 (0,9 mca)*	192,5 (1,55mca)* *	12	2	3,8
	autocompensante	98 (6 mca)	192,5 (12,4 mca)	6	1	3,9
Uniformidade de Emissão	Não autocompensante	70 (2,9 mca)	133 (2,9 mca)	12	2	3,9
	autocompensante	98 (6 mca)	192,5 (12 mca)	6	1	3,9

* O valor entre parêntesis representa a perda de carga admissível na linha lateral.

** Perda de carga admissível na linha de derivação para o correspondente critério e tipo de microaspersor.

Comparando o Quadro 13 com o Quadro 15, verifica-se que a diferenciação em termos de divisão da perda de carga entre linha lateral e linha de derivação desapareceu. Tomando como exemplo o critério 10% de variação de vazão, para microaspersor autocompensante, o Quadro 13 fornece os comprimentos de linha lateral 52, 56 e 60m referentes, respectivamente, à divisão de perda de carga entre lateral e derivação de 40 - 60, 50 - 50 e 60% - 40%. Ao se associar estes valores com aqueles do Quadro 14 e com as características operacionais, resultou em um único comprimento de linha lateral de 46m. Portanto, tal diferenciação se dilui quando se tem que considerar os aspectos geométricos da área e operacionais do projeto de irrigação.

As alternativas avaliadas se aproximaram, o tanto quanto possível, da divisão 50% - 50%.

No caso do critério de uniformidade de emissão para microaspersores

não autocompensante, as dimensões das linhas laterais e de derivação apresentadas no Quadro 15 implicam em um valor de UE de 88,2%.

O efeito das características operacionais na definição das dimensões da unidade operacional pode ser exemplificada. O máximo período diário de irrigação é de 18 horas e o tempo de irrigação para se aplicar à lâmina diária requerida é de 3 horas. Portanto, o número de unidades operacionais seria igual a 6 (= 18h/3h) para uma UO operando por vez ; igual a 12 para duas UO atuando simultaneamente, e assim por diante. Desta forma, o número de unidades operacionais deve ser 6 ou múltiplo de 6.

2.8 Modelos de programação linear

Os modelos desenvolvidos assumiram as seguintes premissas básicas:

- a área é regular;
- a declividade é uniforme nas direções x e y;
- a distribuição da rede hidráulica na área é pré-estabelecida.

Para exemplificar a formulação matemática dos modelos utilizou-se a alternativa referente ao critério de 10% de variação de vazão, microaspersor não autocompensante, considerando o custo de energia.

2.8.1 Função objetivo

A função objetivo é de minimização e é composta pela anuidade referente ao custo fixo da tubulação e acessórios, bem como pelo custo anual da energia consumida. Ela pode ser representada por:

$$\text{MIN} \quad Z = (CM + CVV + CPE + CPVC + CB + PC + FI) \text{ FRC} + CE \quad (27)$$

em que,

Z = custo anual do sistema de irrigação, em R\$;

CM = custo dos microaspersores, em R\$;

CVV = custo das válvulas elétricas localizadas no início das unidades operacionais, em R\$;

CPE = custo da tubulação de polietileno que compõe as linhas laterais, em R\$;

CPVC = custo da tubulação de PVC utilizada nas linhas de derivação, secundária e principal, em R\$;

CB = custo do conjunto motobomba, em R\$;

PC = custo do painel de controle, em R\$;

FI = custo do sistema de filtragem, em R\$;

FRC = fator de recuperação do capital, para juros de 6% a.a. e 10 anos de vida útil = 0,13587

$$FRC = r(1+r)^n [(1+r)^n - 1]^{-1} \quad (28)$$

Em que: r = taxa de juros anual

n = número de anos de vida útil do sistema

CE = custo anual com energia elétrica, em R\$.

O custo dos microaspersores é dado por:

$$CM = N \cdot NLL \cdot NE \cdot C_m \quad (29)$$

Em que:

N = número de unidades operacionais;

NLL = número de linhas laterais na unidade operacional;

NE = número de microaspersores por linha lateral;

C_m = custo unitário do microaspersor, em R\$.

O custo das válvulas elétricas é função direta do número de unidades operacionais:

$$CVV = N \cdot VV \quad (30)$$

em que VV = custo unitário da válvula elétrica, em R\$.

O custo da tubulação de polietileno linear que compõe a linha lateral é dado por:

$$CPE = N \cdot NLL \cdot L \cdot CL \quad (31)$$

Em que:

L = comprimento da linha lateral, em m;

CL = preço do m de tubo de polietileno linear, em R\$.

O custo da tubulação de PVC é composto pelo custo da linha de derivação, da linha secundária e da linha principal.

$$CPVC = N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J CD_i \cdot LD_{i,j} + 2 \sum_{g=1}^G \sum_{r=1}^R C.S_g \cdot LS_{g,r} + \sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^U CP_t \cdot LP_{t,u} \quad (32)$$

para $i = 1; j = 1; g = 1; r = 1; t = 1; u = 1$.

em que:

CD_i = preço (em R\$) do metro de tubo de PVC de diâmetro i , utilizado na linha de derivação

$LD_{i,j}$ = comprimento do trecho j da linha de derivação de diâmetro i ;

CS_g = preço (em R\$) do metro de tubo de diâmetro g utilizado na linha secundária;

$LS_{g,r}$ = comprimento do trecho r da linha secundária de diâmetro g ;

CP_t = preço (em R\$) do metro do tubo de PVC de diâmetro t , utilizado na linha principal ;

$LP_{t,u}$ = comprimento do trecho u da linha principal com diâmetro t .

O fator 2 no segundo termo representa o fato de sempre existirem duas linhas secundárias, com as mesmas características hidráulicas e dimensionais, dispostas simetricamente em relação à linha principal.

Para calcular o custo de bombeamento fez-se uma regressão linear com os dados dos Quadros 10 e 11, resultando em:

$$CB = 13,976 \cdot MAN + 2890,5 \quad (33)$$

onde: MAN = altura manométrica total, em mca.

A equação 33 é válida para valores de altura manométrica compreendidos entre 50 e 82 mca.

O custo do painel de controle é função de número de unidades operacionais e o sistema de filtragem depende da vazão, sendo que os valores foram apresentados anteriormente (Quadros 7 e 8).

O custo anual de energia elétrica é dado por:

$$CE = \left(\frac{9,80665 \cdot 1,1 Q \cdot MAN \cdot DI \cdot HI}{EF} \right) \cdot E \quad (34)$$

em que:

Q = vazão do sistema de irrigação, em $m^3 s^{-1}$ (dada pela soma das vazões das unidades operacionais atuando simultaneamente);

DI = dias de irrigação durante o ciclo (120 dias);

HI = período diário de irrigação (18 horas);

EF= eficiência assumida do conjunto motobomba (0,616 correspondente a 88% para o motor e 70% para a bomba);

E = tarifa de energia em R\$ $(kWh)^{-1}$. O fator 1,1 representa um coeficiente de segurança.

As variáveis de decisão do modelo são, basicamente, os comprimentos e os diâmetros dos trechos das linhas de derivação (LDi,j), secundária (LSg,r) e principal (LPT,u). Existem muitas outras variáveis que trazem informações úteis para a análise dos resultados, como por exemplo, a carga hidráulica em cada uma das saídas da linha de derivação ou o valor da altura manométrica. Tais variáveis estão descritas detalhadamente nas listagens contidas no APÊNDICE.

2.8.2 Restrições

2.8.2.1 Quanto à ocupação da área.

Deve-se assegurar que o sistema de irrigação por microaspersão irá ocupar toda a área a ser irrigada. Desta forma, o somatório dos diferentes diâmetros a serem empregados em cada uma das linhas que compõem a rede hidráulica deve ser igual ao valor previsto quando se estabeleceu a configuração do equipamento na área. Tomando como

exemplo a linha principal, este tipo de restrição tem a seguinte forma:

Para o trecho u:
$$\sum_{t_1}^T LP_{t,u} = P_u \quad (35)$$

em que:

$LP_{t,u}$ = comprimento do trecho u da linha principal com diâmetro t, (m);

P_u = comprimento do trecho u da linha principal (estabelecido previamente), (m).

As restrições para as linhas secundárias têm a mesma configuração matemática.

A linha de derivação apresenta uma particularidade. Uma vez que se trata de uma tubulação com múltiplas derivações, cada trecho compreendido entre um microaspersor e outro tem um valor diferente de vazão e, conseqüentemente, diferentes valores de perda de carga para um mesmo diâmetro de tubo. Isto faz com que a linha de derivação seja tratada como sendo a soma de pequenos trechos com diferentes vazões, progressivamente menores, e com comprimento igual ao espaçamento regular entre as linhas laterais (neste estudo, 7m).

Desta forma, para a linha de derivação a restrição de ocupação da área é dada pelo seguinte conjunto de equações:

Para o primeiro trecho (j=1):
$$\sum_i^I LD_{(1,i)} = 3,5 \quad (36)$$

Para os demais trechos, de j =2 até j = J:
$$\sum_i^I LD_{(j,i)} = 7 \quad \text{para } j=2,\dots,J \quad (37)$$

Sendo:

j = trecho da linha de derivação, equivalente à distância entre um microaspersor e outro, numerado de forma crescente do início para o final da linha. Neste trabalho, o primeiro trecho tem 3,5m, equivalente a metade do espaçamento usual entre linhas laterais (linhas de árvores), que é de 7m;

i = índice para o diâmetro nominal do tubo.

O modelo apresenta, ainda, algumas restrições do tipo:

$$LD_{1,50} = 0 \quad (38)$$

A restrição dada pela eq.38 significa que não será atribuído o diâmetro DN50 ao trecho1 da linha de derivação, pois tal diâmetro acarreta velocidade acima de 2 ms^{-1} (valor adotado como limite superior neste trabalho. O limite inferior é de $0,2 \text{ m s}^{-1}$).

2.8.2.2 Quanto à variação de perda de carga hidráulica permissível na unidade operacional.

Para se inserir os critérios hidráulicos no modelo há necessidade de um conjunto de equações.

A carga hidráulica no início da unidade operacional (HUO), situada justamente na entrada da válvula elétrica, é dada por:

$$HUO = 0,75 \cdot HFL + hm + Hv + [0,63 \cdot 1,05 \cdot \sum_i^I \sum_j^J (JD_{i,j} \cdot LD_{i,j})] - 0,5 \cdot D \cdot dz \quad (39)$$

Em que:

HFL = perda de carga na linha lateral, em mca;

hm = carga hidráulica (mca) correspondente à vazão de operação do microaspersor;

Hv = perda de carga na válvula elétrica, em mca;

$JD_{i,j}$ = perda de carga unitária (mca m^{-1}) do tubo de diâmetro i no trecho j da linha de derivação ; D = comprimento da linha de derivação, em m ;

dz = gradiente de declive na direção da linha de derivação, em m m^{-1} (neste trabalho:

$dz = 0,021 \text{ m m}^{-1}$).

A carga hidráulica correspondente à pressão de operação do microaspersor é de 15,5mca. O dimensionamento faz com que esta seja a carga hidráulica média da linha lateral localizada na saída em que se tem a pressão média na linha de derivação.

Os dois primeiros termos da eq. 39 calculam a carga hidráulica que se deve ter na entrada da linha lateral para que hm seja a pressão média da linha. A base deste cálculo é a eq. 6, com a particularidade de a linha lateral estar em nível.

Quando se tem um único diâmetro na linha com múltiplas derivações (lateral e derivação), o coeficiente que multiplica a perda de carga total na equação que calcula a carga hidráulica média é igual a 0,75 (eq.6). Quando se tem dois diâmetros, como é o caso da linha de derivação a ser otimizada pelo modelo, KELLER & BLIESNER (1990) recomendam a substituição do valor 0,75 pelo valor 0,63 na referida eq.5. Por esta razão, tem-se o coeficiente 0,63 na eq. 39.

O fator 1,05 visa compensar as perdas de carga localizadas existentes na linha de derivação.

A carga hidráulica no início da linha de derivação (HDo), logo após a válvula elétrica, é dada por:

$$HDo = HUO - H_v \quad (40)$$

A carga hidráulica na primeira saída da linha de derivação é calculada por:

$$HD1 = HDo - 1,05 \sum_i^I [(JD_{1,i} \cdot LD_{1,i})] + 3,5 \cdot dz \quad (41)$$

Em que: HD1 = carga hidráulica na primeira saída da linha de derivação, em mca.

A eq. 41 diz que a carga hidráulica na primeira saída é igual à carga hidráulica no início da linha, menos a perda de carga e mais o ganho de energia devido ao declive, ambos no trecho de comprimento 3,5m.

Para a segunda saída até a última, a carga hidráulica será calculada de forma análoga à eq. 41, porém com o valor 7 no último termo, que é a distância regular entre as linhas laterais (saídas).

$$\text{Para } j = 2, \dots, J: \quad HDj = HD_{(j-1)} - 1,05 \cdot \sum_i^I [(JD_{i,j} \cdot LD_{i,j})] + 7 \cdot dz \quad (42)$$

Uma das premissas dos modelos é que a perda de carga na linha de derivação (HFD) é maior ou igual ao ganho de carga hidráulica decorrente da condição de declive (Sd). Isto condiciona o perfil de carga hidráulica na linha de derivação a um dos dois formatos citados anteriormente. A restrição correspondente é:

$$HFD \geq D dz \quad (43)$$

em que HFD a perda de carga total na linha de derivação, em mca, a qual é dada por:

$$HFD = 1,05 \sum_j^J \sum_i^I [(JD_{i,j} \quad LD_{i,j})] \quad (44)$$

A eq. 43 permite dois perfis de pressão ao longo da linha de derivação. Em ambos os casos, a maior carga hidráulica está no início da linha de derivação. Para assegurar tal condição e para atender o critério de dimensionamento desta alternativa, tem-se o seguinte conjunto de restrições:

$$\text{Para qualquer trecho } j \text{ da linha de derivação:} \quad HDo - HDj \geq 0 \quad (45)$$

$$\text{Para qualquer trecho } j \text{ da linha de derivação:} \quad HDo - HDj \leq VL \quad (46)$$

em que VL = perda de carga admissível na linha lateral conforme o critério de dimensionamento utilizado (neste caso em que se adota 10% de variação de vazão para o microaspersor não autocompensante, o valor é igual a 1,55 mca).

A carga hidráulica média na linha de derivação é a média das cargas hidráulicas nas saídas existentes:

$$HMED = \frac{(\sum_j^J HD_j)}{(\frac{NLL}{2})} \quad (47)$$

Este valor HMED deve ser igual à carga hidráulica no início da linha lateral cuja carga hidráulica média é hm (pressão que corresponde à vazão de operação do microaspersor; 15,5 mca).

$$HMED = Hm + 0,75 \quad HFL \quad (48)$$

A altura manométrica total é dada pela condição operacional mais crítica em termos de carga hidráulica, ou seja, aquela que acarreta maior valor de pressão. Para este modelo é dada por:

$$MAN = DUO + \sum_g (JS_{2,g} LS_{2,g}) + \sum_t \sum_u (JP_{t,u} LP_{t,u}) + He + Hs - \sum_u (LP_u dz) \quad (49)$$

Em que:

$JS_{2,g}$ = perda de carga unitária para o tubo de diâmetro g , no trecho 2 da linha secundária;

$JP_{t,u}$ = perda de carga unitária para o diâmetro t , no trecho u da linha principal;

He = perda de carga na estação de controle (12 mca);

Hs = altura geométrica de sucção (3 mca).

Para atender à faixa de domínio da equação que estima o custo de bombeamento, a altura manométrica (MAN) deve estar entre 50 e 82 mca. Portanto:

$$MAN \geq 50 \quad (50)$$

$$MAN \leq 82 \quad (51)$$

A carga hidráulica na saída da estação de controle (Ho), ou seja, no início da linha principal é dada por:

$$Ho = MAN - He - Hs \quad (52)$$

Neste modelo, toda a tubulação de PVC pertence à classe de pressão 40 mca, logo:

$$Ho \leq 40 \quad (53)$$

A carga hidráulica ($H1$) na transição entre o trecho 1 e o trecho 2 da linha principal é calculada por:

$$H1 = Ho - P_1 dz - 1,05 \left(\sum_t (JP_{1,t} LP_{1,t}) \right) \quad (54)$$

A carga hidráulica ($H2$) na transição entre a linha principal 2 e a linha secundária 2 é dada por:

$$H2 = H1 - P_2 dz - 1,05 \left(\sum_t (JP_{2,t} LP_{2,t}) \right) \quad (55)$$

Sendo que P_1 e P_2 são os comprimentos dos trechos 1 e 2 da linha principal, respectivamente.

Finalmente, tem-se as restrições que definem as linhas secundárias.

São elas:

$$1,05 \sum_g^G (JS_{1,g} LS_{1,g}) \leq H_1 - HUO \quad (56)$$

$$1,05 \sum_g^G (JS_{2,g} LS_{2,g}) \leq H_2 - HUO \quad (57)$$

Em todas as alternativas analisadas, somente foram considerados os tubos que apresentavam, em um dado trecho da rede hidráulica, velocidade da água compreendida entre $0,2 \text{ m s}^{-1}$ e 2 m s^{-1} . Segundo LABYE et al. (1988), esta é a faixa de operação para tubulações com diâmetro de até 0,3m.

2.9 Programa computacional para solução dos modelos de Programação Linear

Para solucionar os modelos de programação linear de otimização de sistemas de irrigação por microaspersão foi utilizado o programa computacional GAMS ("General Algebraic Modeling System"), desenvolvido para resolver problemas de grande porte. Tal "software" apresenta uma linguagem básica que permite acessar uma série de subprogramas específicos para solucionar problemas de programação: linear, inteira, inteira-mista, não-linear e outras. Neste caso, em que se tem problemas de programação linear, o "solver" utilizado foi o BDMLP. As características e aplicações deste programa computacional podem ser encontradas em BROOKS et al. (1988).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Custo total das alternativas

Inicialmente, eram 16 as alternativas a serem analisadas. Durante o processo de definição das dimensões da unidade operacional, verificou-se que as diferentes formas de divisão da perda de carga admissível entre linha lateral e linha de derivação (50%-50%, 40%-60% e 60%-40%) inicialmente geravam comprimentos distintos para a linha lateral. Porém, quando estes comprimentos eram ajustados para um adequado aproveitamento da área disponível, eles convergiam para um valor único, eliminando o efeito deste fator. Desta forma, as 16 alternativas iniciais se reduziram para 8, decorrentes de dois critérios de dimensionamento associados a dois tipos de microaspersores, considerando ou não o custo da energia elétrica. O Quadro 16 apresenta as 8 alternativas avaliadas e o custo atualizado dos sistemas de irrigação, obtidos após a resolução dos modelos de Programação Linear. Tais modelos estão descritos no Apêndice.

QUADRO 16: Custo anual, em dólar (1,881- 1999), das alternativas avaliadas.

Critério de dimensionamento	Tipo de microaspersor	Quanto à consideração do custo de energia no dimensionamento	Custo anual (em US\$ (ha) ⁻¹)
10% de variação de vazão	Não	NÃO	215,997 (+2,2%)
	Autocompensante	SIM	212,026 (+0,3%)
		NÃO	240,383 (+13,7%)
	Autocompensante	SIM	235,359 (+11,3%)
Uniformidade de Emissão	Não	NÃO	215,864 (+2,1%)
	autocompensante	SIM	211,430 (0)
		NÃO	240,383 (+13,7%)
	Autocompensante	SIM	235,359 (+11,3%)

Inicialmente pode-se constatar que os melhores resultados estão associados ao microaspersor não autocompensante, quando se considerou o custo da energia, não havendo diferenciação entre o critério uniformidade de emissão e o critério 10% de variação de vazão.

As alternativas que consideraram o custo da energia resultaram, sempre, em menores valores de custo anual quando comparadas aos seus correspondentes que não levaram em consideração o custo de tal fator. Isto indica que o custo da energia elétrica é suficientemente importante para interferir no dimensionamento da rede hidráulica, ainda que a economia seja pequena.

No caso de microaspersores autocompensante, não houve diferenciação entre os critérios de dimensionamento. Um maior detalhamento dos custos que compõem o valor anual total, para cada alternativa avaliada, pode ser encontrado no Quadro 17.

QUADRO 17: Detalhamento dos custos anuais para cada alternativa avaliada

Critério de dimensionamento	Microaspe- rsor (autocompen- sante ou não)	Quanto à conside- ração do custo de energia	Custo total anual (U\$/ano)	Custo microas- persores (U\$/ano)	Custo da tubulação polietileno (U\$/ano)	Custo da tubulação de PVC (U\$/ano)			Custo sistema bombea- mento (U\$/ano)	Custo do painel de controle (U\$/ano)	Custo das válvulas elétricas (U\$/ano)	Custo do sistema de filtragem (U\$/ano)	Custo com energia elétrica (U\$/ano)
						Linha de derivação	Linha se- cundária	Linha principal					
10%	NÃO	NÃO	215,997	27,554	25,710	16,385	9,607	6,879	11,701	3,153	18,809	28,793	67,406
10%	NÃO	SIM	212,026	27,554	25,710	16,385	11,653	7,209	11,483	3,153	18,809	28,793	61,276
10%	AUTO	NÃO	240,383	61,940	26,295	11,738	10,223	7,895	11,584	2,121	9,022	27,640	71,925
10%	AUTO	SIM	235,359	61,940	26,295	11,940	13,477	10,404	11,186	2,121	9,022	27,640	61,334
EU	NÃO	NÃO	215,864	27,554	26,082	10,904	11,744	7,767	11,606	3,094	18,480	28,288	70,346
EU	NÃO	SIM	211,430	27,554	26,082	10,904	15,024	7,767	11,340	3,094	18,480	28,288	62,897
EU	AUTO	NÃO	240,383	61,940	26,295	11,738	10,223	7,895	11,584	2,121	9,022	27,640	71,925
EU	AUTO	SIM	235,359	61,940	26,295	11,940	13,477	10,404	11,186	2,121	9,022	27,640	61,334

Analisando o Quadro 17, verifica-se que, em todas as situações, a alternativa que não levou em consideração o custo de energia apresentou um menor custo com tubulação de PVC, comparativamente com a alternativa correspondente que considera tal fator em seus custos. Para isto, optou-se por tubos de menor diâmetro e menor custo. Porém, isto acarretou um maior valor de altura manométrica total e, conseqüentemente, um maior custo com energia. A redução de custo decorrente da opção por diâmetros menores de tubo não foi maior que o incremento de custo associado com o maior consumo de energia elétrica. Por esta razão, as alternativas que consideraram o custo da energia elétrica apresentaram menor custo total anual.

As alternativas com microaspersores autocompensante sempre foram mais caras que as correspondentes com microaspersores não autocompensante. A razão disto está no elevado custo dos emissores autocompensante, que chega a ser mais de 2 vezes o custo da microaspersor não autocompensante.

3.2 Alternativa 1: microaspersor não autocompensante; 10% variação de vazão; considerando o custo da energia elétrica.

Esta alternativa foi a mais econômica juntamente com a correspondente com o critério baseado na uniformidade de emissão.

O número de unidades operacionais atuando simultaneamente é igual a 2, sendo uma da linha secundária 1 e outra da linha secundária 2.

O Quadro 18 traz as principais características dimensionais obtidas pela resolução do modelo de programação linear.

QUADRO 18: Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionada para o critério 10% de variação de vazão, utilizando microaspersor não autocompensante e considerando o custo com energia.

Característica	Valor
Número de unidades operacionais (UO)	12
Número de UO operando simultaneamente	2
Linha lateral (polietileno linear)	46m e diâmetro interno de 16,1mm
Linha de derivação	133,6m DN75 / PN40 58,9m DN50 / PN40
Linhas secundárias	84,1m DN100 / PN40 + 165,9m
Trecho 1	DN75/PN40
Trecho 2	250m DN100 / PN40
Linha Principal	159,6m DN125/PN40 + 36,4m
Trecho 1	DN150/PN40
Trecho 2	196m DN100/PN40
Altura manométrica total	50 mca
Carga hidráulica na entrada da linha de derivação (HUO)	18,90 mca
Carga hidráulica no início da linha de derivação – Hdo	16,90 mca
Perda de carga na linha de derivação (HFD)	4,35 mca
Carga hidráulica média na linha derivação (HMED)	16,17 mca

A distribuição de carga hidráulica ao longo da linha de derivação é apresentada na Figura 3.

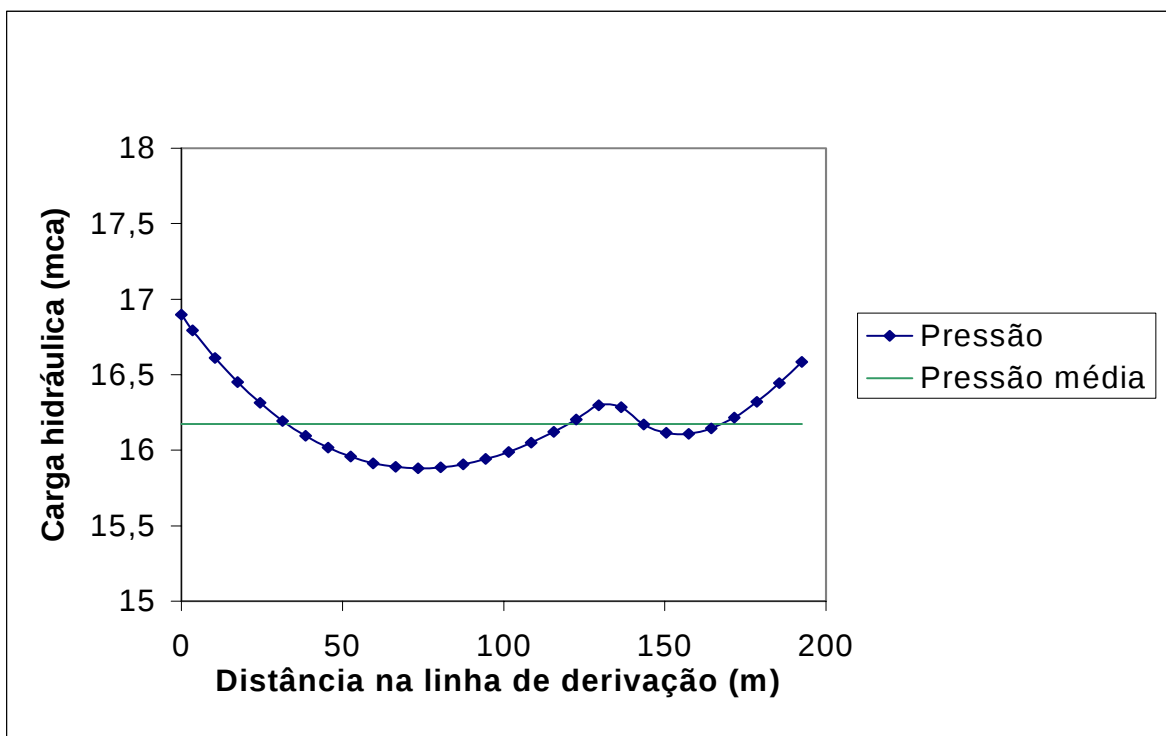


Figura 3: Distribuição da carga hidráulica ao longo da linha de derivação para o sistema de irrigação dimensionado segundo o critério 10% de variação de vazão, utilizando microaspersor não autocompensante e considerando o custo com energia.

Pela Figura 3 verifica-se que a máxima carga hidráulica ocorreu na entrada da linha de derivação, como era de se esperar, uma vez que a perda de carga foi maior que o ganho de carga hidráulica decorrente do declive. O ponto de inflexão representa a mudança de diâmetro na linha de derivação, passando de DN75 para DN50.

3.3 Alternativa 2: microaspersor não autocompensante; 10% variação de vazão; não considerando o custo da energia elétrica.

Esta alternativa apresentou um custo de 2% a mais que a alternativa anterior (a mais econômica). A configuração do sistema de irrigação na área é a mesma apresentada na Figura 3, porém com outros valores de comprimento e diâmetro das tubulações, conforme pode ser observado no Quadro 19.

QUADRO 19: Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionada para o critério 10% de variação de vazão, utilizando microaspersor não autocompensante e não considerando o custo com energia.

Característica	Valor
Número de unidades operacionais (UO)	12
Número de UO operando simultaneamente	2
Linha lateral (polietileno linear)	46m e diâmetro interno de 16,1mm
Linha de derivação	133,6m DN75 / PN40 58,9m DN50 / PN40
Linhas secundárias	
Trecho 1	250m DN75/PN40
Trecho 2	129m DN100 / PN40 + 121m DN75/PN40
Linha Principal	
Trecho 1	196m DN125/PN40
Trecho 2	196m DN100/PN40
Altura manométrica total	55 mca
Carga hidráulica na entrada da linha de derivação (HUO)	18,90 mca
Carga hidráulica no início da linha de derivação – Hdo	16,90 mca
Perda de carga na linha de derivação (HFD)	4,35 mca
Carga hidráulica média na linha derivação (HMED)	16,17 mca

Comparando os Quadros 18 e 19, verifica-se que quando não se considerou o custo da energia elétrica o modelo utilizou menores diâmetros em trechos da linha secundária e principal, gerando maior valor de altura manométrica total (55mca contra 50mca quando se considerou o custo da energia elétrica consumida).

3.4 Alternativa 3: microaspersor não autocompensante; uniformidade de emissão; considerando o custo da energia elétrica.

Esta alternativa foi a mais econômica juntamente com a correspondente com o critério baseado em 10% de variação de vazão.

O número de unidades operacionais atuando simultaneamente é igual a dois.

O Quadro 20 traz as principais características dimensionais obtidas pela resolução do modelo de programação linear.

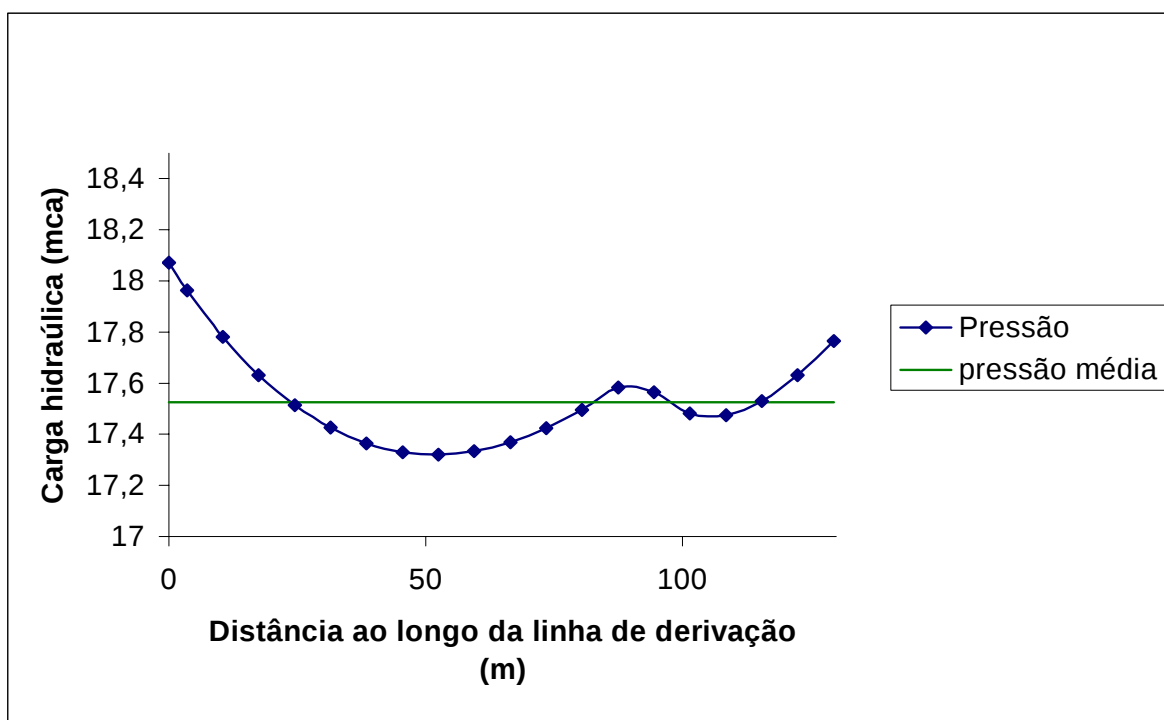
Verifica-se que o diâmetro aumenta ao se passar do trecho 1 para o trecho da linha principal. Isto ocorre devido à mudança na classe de pressão da tubulação utilizado, passando-se de PN80 para PN40.

QUADRO 20: Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionado com base na uniformidade de emissão, utilizando microaspersor não autocompensante e considerando o custo com energia.

Característica	Valor
Número de unidades operacionais (UO)	12
Número de UO operando simultaneamente	2
Linha lateral (polietileno linear)	70m e diâmetro interno de 16,1mm
Linha de derivação (129,5m)	(91,4m DN75 / PN40) + (38,1m DN50 / PN40)
Linhas secundárias	
Trecho 1 (225m)	(29,9m DN100/PN40) + (195,1m
Trecho 2 (225m)	DN75/PN40)
Trecho 3 (225m)	(152,3m DN100/PN40) + (72,7m DN75 / PN40)
	225m DN100/PN40
Linha Principal	
Trecho 1 (133m)	133m DN100/PN80
Trecho 2 (133m)	133m DN125/PN40
Trecho 3 (133m)	133m DN100/PN40
Altura manométrica total	51,32 mca
Carga hidráulica na entrada da linha de derivação (HUO)	20,07 mca
Carga hidráulica no início da linha de derivação – Hdo	18,07 mca
Perda de carga na linha de derivação (HFD)	3,03 mca
Carga hidráulica média na linha derivação (HMED)	17,52 mca

A distribuição de carga hidráulica ao longo da linha de derivação é apresentada na Figura 4.

Figura 4: Distribuição da carga hidráulica ao longo da linha de derivação para o sistema de



irrigação dimensionado segundo a uniformidade de emissão, utilizando microaspersor não autocompensante e considerando o custo com energia.

3.5 Alternativa 4: microaspersor não autocompensante; uniformidade de emissão; não considerando o custo da energia elétrica.

Esta alternativa apresentou um custo 2,1% a mais que a anterior (a mais econômica). A configuração do sistema de irrigação na área é a mesma, porém com outros valores de comprimento e diâmetro das tubulações, conforme pode ser observado no Quadro 21.

QUADRO 21: Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionada com base na uniformidade de emissão, utilizando microaspersor não autocompensante e não considerando o custo com energia.

Característica	Valor
Número de unidades operacionais (UO)	12
Número de UO operando simultaneamente	2
Linha lateral (polietileno linear)	70m e diâmetro interno de 16,1mm
Linha de derivação (129,5m)	(91,4m DN75 / PN40) + (38,1m DN50 / PN40)
Linhas secundárias	
Trecho 1 (225m)	225m DN75/PN40
Trecho 2 (225m)	225m DN75 / PN40
Trecho 3 (225m)	(72,7m DN100/PN40) + (152,3m DN75/PN40)
Linha Principal	
Trecho 1 (133m)	133m DN100/PN80
Trecho 2 (133m)	133m DN125/PN40
Trecho 3 (133m)	133m DN100/PN40
Altura manométrica total	57,40 mca
Carga hidráulica na entrada da linha de derivação (HUO)	20,07 mca
Carga hidráulica no início da linha de derivação – Hdo	18,07 mca
Perda de carga na linha de derivação (HFD)	3,03 mca
Carga hidráulica média na linha derivação (HMED)	17,52 mca

Comparando os Quadros 20 e 21, verifica-se, novamente, que quando não se considerou o custo da energia elétrica o modelo utilizou menores diâmetros em trechos da linha secundária e principal, gerando maior valor de altura manométrica total (57,40 mca contra 51,32mca quando se considerou o custo da energia elétrica consumida).

3.6 Alternativa 5: microaspersor autocompensante ; 10% variação de vazão ; considerando o custo da energia elétrica

Quando se utilizou microaspersor autocompensante, as alternativas que tratavam de diferentes critérios de dimensionamento não diferiram entre si. Os diferentes critérios de dimensionamento implicavam em diferentes valores de perda de carga admissível na linha de derivação (12mca e 12,4 mca, para os critérios UE e 10% de variação de vazão, respectivamente). Porém, durante o processo de otimização, a solução ótima em ambas as alternativas definiu a perda de carga na linha de derivação como sendo menor que 12 mca, anulando o fator de diferenciação.

Desta forma, os resultados apresentados neste item referem-se ao critério de 10% de variação de vazão, bem como àquele baseado na uniformidade de emissão.

Esta alternativa apresentou um custo de 11,3% maior que a mais econômica. O número total unidades operacionais é igual a 6 e opera-se uma de cada vez. As demais características dimensionais encontram-se no Quadro 22.

QUADRO 22: Principais características dimensionais da rede hidráulica do sistema de irrigação dimensionado para o critério 10% de variação de vazão, utilizando microaspersor autocompensante e considerando o custo com energia.

Característica	Valor
Número de unidades operacionais (UO)	6
Número de UO operando simultaneamente	1
Linha lateral (polietileno linear)	98m e diâmetro interno de 16,1mm
Linha de derivação	(94,5m DN100 / PN40) + (98m DN75 / PN40)
Linhas secundárias	
Trecho 1	200m DN100/PN40
Trecho 2	200m DN125/PN40
Linha Principal	
Trecho 1	196m DN100/PN80
Trecho 2	196m DN150/PN40
Altura manométrica total	53,80 mca
Carga hidráulica na entrada da linha de derivação (HUO)	22,57 mca
Carga hidráulica no início da linha de derivação – Hdo	20,57 mca
Perda de carga na linha de derivação (HFD)	4,11 mca
Carga hidráulica média na linha derivação (HMED)	20,08 mca

Quando se utilizou microaspersores autocompensantes a solução ótima foi obtida com a divisão da área em 6 unidades operacionais, uma atuando de cada vez. Foi avaliada a configuração com 12 UO, duas atuando simultaneamente, porém implicava em maior custo anual.

Enquanto nas alternativas envolvendo microaspersores não

autocompensantes a vazão do sistema de irrigação era dividida entre as duas unidades operacionais que atuavam simultaneamente, no caso de microaspersores autocompensantes o mesmo valor aproximado de descarga refere-se a uma única unidade operacional, gerando a necessidade de se utilizar diâmetros maiores na linha de derivação (DN100 e DN75). Porém isto não é a causa do maior custo desta alternativa que utiliza microaspersor autocompensante. Voltando ao Quadro 17 e subtraindo do custo total anual o custo dos emissores, para a alternativa UE, microaspersor autocompensante, considerando energia (US\$173,419 ano⁻¹) e para a alternativa UE, microaspersor não autocompensante, com energia (US\$183,876 ano⁻¹), verifica-se que esta última apresenta maior valor (dos demais custos, excluindo o custo com emissores). O que altera este cenário é justamente o custo dos emissores, pois ao se utilizar microaspersores autocompensantes (US\$61,940 ano⁻¹) tem-se um custo 125% maior do que quando se utiliza microaspersor não autocompensante (US\$27,554 ano⁻¹).

A distribuição de carga hidráulica ao longo da linha de derivação é apresentada na Figura 5.

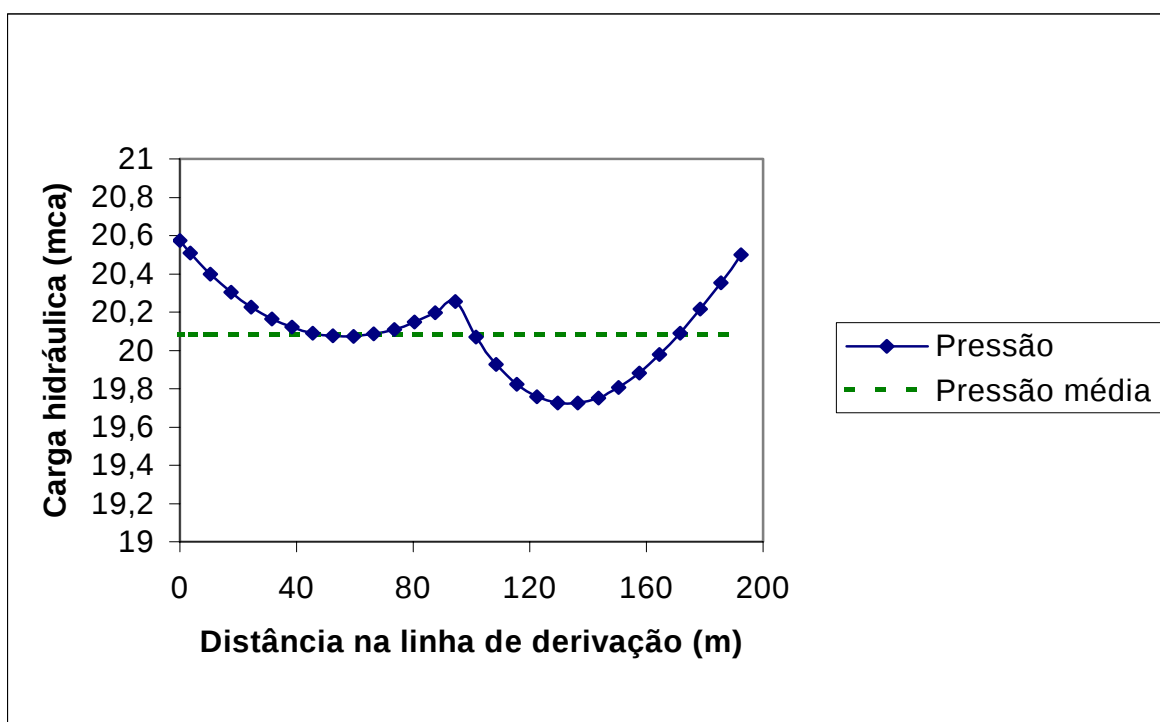


Figura 5: Perfil de distribuição da carga hidráulica ao longo da linha de derivação para o microaspersor autocompensante, considerando o custo da energia e o critério de dimensionamento de 10% de variação de vazão.

Novamente, verifica-se que a máxima carga hidráulica ocorreu no início da linha de derivação. Neste caso, o ponto de inflexão indica a mudança do diâmetro nominal 100 para o diâmetro 75.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) o menor custo foi obtido quando se utilizou tanto o critério de 10% de variação de vazão como aquele baseado na uniformidade de emissão, associados ao microaspersor não autocompensante e considerando o custo da energia elétrica ;
- b) as alternativas que utilizaram microaspersores autocompensantes foram às menos econômicas devido ao elevado custo destes emissores;
- c) as alternativas que consideraram o custo com energia elétrica forneceram sempre menor custo total comparativamente com a correspondente que não considerou ;
- d) a necessidade de adequar os comprimentos das linhas laterais e de derivação ao formato da área eliminou o fator de variação dado pela divisão da perda de carga admissível entre as linhas da unidade operacional.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENAMI, A. & OFEN, A. *Irrigation engineering*. Haifa, IESP, 1984. 257p.
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*. 4.ed. Viçosa, UFV/Imprensa Universitária, 1986. 488p.
- BROOKS, A. ; KENDRICK, D. ; MEERAUS, A. *GAMS: a user's guide*. Redwood City, The Scientific Press, 1988. 289p.
- CHIANG, A.C. *Matemática para economistas*. São Paulo, McGraw-Hill, 1982. 684p.
- CHURCHILL, S.W. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. *Chemical Engineering*, 84(24):91-2.1977.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. *Trickle irrigation*. Washington, USDA/Soil Conservation Service, 1983. 129p. (National Engineering Handbook. Section 15: Irrigation, 7).
- FAVETTA, G. M. A escolha do equipamento de irrigação mais apropriado para os citros. *Laranja*, Cordeirópolis, IAC, 19(3). 1998.
- GOEHRING, L.D. *Optimization of trickle irrigation system design*. Fort Collins, 1976. 90p. (M.S. - Colorado State University).
- 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. ; 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.

OLITTA, A. F. L. *Projeto de irrigação localizada*. In: Curso de Elaboração de Projetos de Irrigação. Brasília: ABEAS, 1988. 53p.

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.

SAAD, J.C.C.; TOMAZELA, C.; PERES, J.G.; PERES, F.C.; FRIZZONE, J.A. Otimização de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando programação Linear. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 29(5):797-805. 1994.

SCALOPPI, E.J. & ALLEN, R.G. Hydraulics of center-pivot laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(3):554-67, 1993.

APÊNDICE

Os modelos de Programação Linear, escritos em linguagem GAMS, de três das alternativas avaliadas são apresentados a seguir. São eles:

I – Modelo de Programação Linear para o critério de 10% de variação de vazão, microaspersor não autocompensante, considerando o custo com energia.

II- Modelo de Programação Linear para o critério uniformidade de emissão, microaspersor não autocompensante, considerando o custo com energia.

III – Modelo de Programação Linear para o critério de 10% de variação de vazão, microaspersor autocompensante, considerando o custo com energia.

Para se obter a formulação correspondente para a condição em que não se considera o custo com energia, basta atribuir ao parâmetro E (tarifa de energia) o valor 0.

Para se converter o modelo III na versão que representa o critério uniformidade de emissão basta substituir o valor do parâmetro VL (limite de perda de carga na linha de derivação). Porém, não há necessidade, pois não houve diferenciação entre os critérios de dimensionamento quando se utilizou microaspersor autocompensante.

Modelo de Programação Linear para o critério de 10% de variação de vazão, microaspersor não autocompensante, considerando o custo com energia.

*MODELO DE PROGRAMACAO LINEAR - Dimensionamento baseado no critério de 10% DE VARIACAO DE VAZAO ;

* Microaspersor NAO AUTOCOMPENSANTE ; considerando o custo com ENERGIA;

SETS

I diametro nominal tubo pvc PN40 para linhas de derivacao /50, 75, 100, 125/

G diametro nominal tubo pvc PN40 /75, 100, 125, 150/

J trechos da linha de derivacao /1 * 28/

B(J) trechos da linha de derivacao com 7m de comprimento /2 * 28/

R trechos de linha secundaria /1, 2/

U trechos da linha principal /1, 2/ ;

SCALARS

N numero de unidades operacionais /12/

NLL numero de linhas laterais na unidade operacional /56/

NE numero de emissores por linha lateral /12/

Cm custo unitario do microaspersor em reais /1.068/

CL preco em reais por m de tubo de PE de 16mm da linha lateral /0.26/

L comprimento da linha lateral em m /46/

D comprimento da linha de derivacao em m /192.5/

S comprimento da linha secundaria em m /250/

dz gradiente de declive em m por m /0.021/

HFL perda de carga na linha lateral em mca /0.90/

He perda de carga na estacao de controle em mca /12/

Hu altura geometrica de succao em mca /3/

Hv	perda de carga na valvula reguladora de pressao em mca /2/
hm	carga hidraulica de operacao do microaspersor em mca /15.5/
E	custo da energia eletrica em reais por Kwh /0.08572/
DI	dias de irrigacao no ciclo /120/
HI	horas de irrigacao por dia /18/
EF	rendimento do conjunto motor 88% e bomba 70% /0.616/
FRC	fator de recuperacao do capital com juros 6% aa e 10 anos vida util /.13587/
VL	perda de carga permitida na linha de derivacao em mca /1.55/
VV	custo unitario valvula eletrica do inicio na unidade operacional em reais /490/
PC	custo em reais do painel de controle para 12 valvulas /985/
FI	custo do sist de filtragem composto filtros de areia e tela mais valvula retrolavagem /9000/
Q	vazao na saida da bomba em m3 por s /1.6053E-2/ ;

PARAMETERS

P(U) comprimento em m da linha principal /1 196
2 196 /

CD(I) preco em reais por m do tubo de pvc PN40 /50 1.35
75 2.60
100 4.16
125 6.81 /

CS2(G) preco em reais por m do tubo de pvc PN40 /75 2.60
100 4.16
125 6.81
150 9.67 /

CS1(G) preco em reais por m do tubo de pvc PN40 /75 2.60
100 4.16

125 6.81
150 9.67 /

CP(G) preço em reais por m do tubo de pvc PN40 /75 2.60

100 4.16
125 6.81
150 9.67 /

JSP(G) perda de carga em m por 100m secund e principal com vazao Q

/75 4.792
100 1.114
125 0.409
150 0.170/

JP1(G) perda de carga em m por 100m na linha principal 1 com 2Q

/75 17.433
100 3.984
125 1.448
150 0.596 / ;

TABLE JD(J,I) perda de carga em m por 100m no trecho J da linha de derivação com diâmetro I

	50	75	100	125
1	35.824	4.792	1.114	0.409
2	33.453	4.481	1.043	0.383
3	31.161	4.179	0.973	0.358

4	28.947	3.888	0.906	0.333
5	26.813	3.607	0.842	0.310
6	24.757	3.336	0.779	0.287
7	22.780	3.074	0.719	0.265
8	20.882	2.823	0.661	0.243
9	19.064	2.582	0.605	0.223
10	17.325	2.350	0.551	0.203
11	15.666	2.129	0.500	0.184
12	14.087	1.919	0.451	0.167
13	12.588	1.718	0.404	0.149
14	11.170	1.528	0.360	0.133
15	9.832	1.348	0.318	0.118
16	8.575	1.179	0.278	0.103
17	7.400	1.020	0.241	0.089
18	6.307	0.871	0.206	0.077
19	5.297	0.734	0.174	0.065
20	4.369	0.607	0.144	0.054
21	3.525	0.492	0.117	0.044
22	2.767	0.387	0.092	0.034
23	2.094	0.294	0.070	0.026
24	1.508	0.213	0.051	0.019
25	1.011	0.144	0.035	0.013
26	0.606	0.087	0.021	0.008
27	0.296	0.043	0.010	0.004
28	0.089	0.013	0.003	0.001

;

VARIABLES

LD(J,I) comprimento em m da tubulacao de diametro i no trecho j da linha de derivacao

LS1(G) comprimento em m da linha secundaria 1 com diametro G
 LS2(G) comprimento em m da linha secundaria 2 com diametro G
 LP1(G) comprimento em m da linha principal 1 com diametro G
 LP2(G) comprimento em m da linha principal 2 com diametro G
 CE custo em reais com consumo de energia
 MAN altura manometrica total por bloco operacional em mca
 HMED carga hidraulica media na linha de derivacao em mca
 HD(J) carga hidraulica nas saidas da linha de derivacao em mca
 HUO carga hidraulica minima na entrada da UO antes da valvula em mca
 Ho carga hidraulica na saida da estacao de controle em mca
 H1 carga hidraulica na transicao entre os trechos 1 e 2 da linha principal em mca
 H2 carga hidraulica na transicao entre a linha principal 2 a linha secundaria 2 em mca
 CB custo em reais do conjunto motobomba para man entre 50 e 82 mca
 HFD perda carga na linha de derivacao em mca
 HDo carga hidraulica na entrada linha de derivacao em mca
 Z custo total do sistema de irrigacao em reais ;

POSITIVE VARIABLES HDo, HD, HFD, HMED, LD(J,I), LS1(G), LS2(G), LP1(G), LP2(G),

MAN, Ho, H1, H2, HUO, CE, CB;

EQUATIONS

FO funcao objetivo
 TRED1 comprimento do trecho 1 da linha de derivacao
 TRED(J) trechos de 2 a 28 da linha de derivacao
 SEC1 comprimento da linha secundaria 1
 SEC2 comprimento da linha secundaria 2
 PRI1 comprimento da linha principal 1
 PRI2 comprimento da linha principal 2
 EHD1 carga hidraulica na primeira saida da l de derivacao

- EHD(J) carga hidraulica nas demais saidas l derivacao
- EFLD(J) criterio de perda de carga na linha de derivacao
- EFLD1(J)
- EHM carga hidraulica media na l derivacao
- EHUO calculo de HUO
- EHDo calculo da carga hidraulica no inicio da l deriv
- EHFD perda de carga na l derivacao
- EHFD1 restricao que assegura perda de carga igual ou maior que ganho de energia com declive
- EMAN altura manometrica total
- PN40 respeito a classe de pressao 40mca
- ECE calculo do custo com energia eletrica
- EHo carga hidraulica na saida da estacao de controle
- EH1 eq para calculo de H1
- EH2 eq para calculo de H2
- ECB eq para custo do sist de bombeamento
- ECB1 eq 1 para custo de bombeamento
- ECB2 eq 2 para custo de bombeamento
- E1 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E2 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E3 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E4 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E5 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E6 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E7 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E8 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E9 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E10 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E11 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
- E12 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada

E13 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E14 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E15 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E16 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E17 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E18 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E19 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E20 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E21 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E22 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E23 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E24 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E25 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E26 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E27 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E28 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E29 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 E30 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
 EHM1
 ELS1 dimensionamento da linha secundaria 1
 ELS2 dimensionamento da linha secundaria 2 ;

FO..
$$Z = E = ((N * NLL * NE * Cm) + N * NLL * L * CL + N * VV + N * SUM((I, J), CD(I) * LD(J, I)) + 2 * (SUM((G), CS2(G) * LS2(G)) + SUM((G), CS1(G) * LS1(G))) + SUM((G), CP(G) * LP2(G)) + SUM((G), CP(G) * LP1(G)) + CB + PC + FI) * FRC + CE ;$$
 TRED1..
$$SUM((I), LD('I', I)) = E = 3.5 ;$$
 TRED(B(J))..
$$SUM((I), LD(J, I)) = E = 7 ;$$

E1.. LD('1','50') =E= 0 ;
 E2.. LD('2','50') =E= 0 ;
 E3.. LD('3','50') =E= 0 ;
 E4.. LD('4','50') =E= 0 ;
 E5.. LD('5','50') =E= 0 ;
 E6.. LD('6','50') =E= 0 ;
 E7.. LD('7','50') =E= 0 ;
 E8.. LD('8','50') =E= 0 ;
 E9.. LD('9','50') =E= 0 ;
 E10.. LD('10','50') =E= 0 ;
 E11.. LD('11','50') =E= 0 ;
 E12.. LD('12','50') =E= 0 ;
 E13.. LD('13','50') =E= 0 ;
 E14.. LD('14','50') =E= 0 ;
 E15.. LD('15','50') =E= 0 ;
 E16.. LD('27','75') =E= 0 ;
 E17.. LD('28','75') =E= 0 ;
 E18.. LD('25','100') =E= 0 ;
 E19.. LD('26','100') =E= 0 ;
 E20.. LD('27','100') =E= 0 ;
 E21.. LD('28','100') =E= 0 ;
 E22.. LD('22','125') =E= 0 ;
 E23.. LD('23','125') =E= 0 ;
 E24.. LD('24','125') =E= 0 ;
 E25.. LD('25','125') =E= 0 ;
 E26.. LD('26','125') =E= 0 ;
 E27.. LD('27','125') =E= 0 ;
 E28.. LD('28','125') =E= 0 ;
 E29.. LP1('75') =E= 0 ;
 E30.. LP1('100') =E= 0 ;

$$\text{EHDo}.. \quad \text{HDo} = \text{E} = \text{HUO} - \text{Hv} ;$$

$$\text{EHD1}.. \quad \text{HD('1')} = \text{E} = \text{HDo} - 1.05 * \text{SUM}((\text{I}), (\text{JD('1',I)}/100) * \text{LD('1',I)}) + 3.5 * \text{dz} ;$$

$$\text{EHD(B(J))}.. \quad \text{HD(J)} = \text{E} = (\text{HD(J-1)} - \text{SUM}((\text{I}), (\text{JD(J,I)}/100) * \text{LD(J,I)}) * 1.05 + 7 * \text{dz}) ;$$

$$\text{EFLD(J)}.. \quad \text{HDo} - \text{HD(J)} = \text{L} = \text{VL} ;$$

$$\text{EFLD1(J)}.. \quad \text{HDo} - \text{HD(J)} = \text{G} = 0 ;$$

$$\text{EHM}.. \quad \text{HMED} = \text{E} = \text{SUM}(\text{J}, \text{HD(J)}) / (\text{NLL}/2) ;$$

$$\text{EHM1}.. \quad \text{HMED} = \text{E} = 16.175 ;$$

$$\text{EHFD}.. \quad \text{HFD} = \text{E} = 1.05 * (\text{SUM}((\text{J}, \text{I}), (\text{JD(J,I)}/100) * \text{LD(J,I)})) ;$$

$$\text{EHFD1}.. \quad \text{HFD} = \text{G} = \text{D} * \text{dz} ;$$

$$\text{SEC1}.. \quad \text{SUM}((\text{G}), \text{LS1(G)}) = \text{E} = \text{S} ;$$

$$\text{SEC2}.. \quad \text{SUM}((\text{G}), \text{LS2(G)}) = \text{E} = \text{S} ;$$

$$\text{PRI1}.. \quad \text{SUM}((\text{G}), \text{LP1(G)}) = \text{E} = \text{P('1')} ;$$

$$\text{PRI2}.. \quad \text{SUM}((\text{G}), \text{LP2(G)}) = \text{E} = \text{P('2')} ;$$

$$\text{EHUO}.. \quad \text{HUO} = \text{E} = (0.75 * \text{HFL}) + \text{hm} + \text{Hv} +$$

$$(\text{SUM}((J,I),(\text{JD}(J,I)/100)*\text{LD}(J,I))*0.63*1.05 \\ - 0.5*D*dz ;$$

$$\text{EMAN}.. \quad (0.75*HFL) + hm + H_v + ((0.63*\text{SUM}((J,I),(\text{JD}(J,I)/100)*\text{LD}(J,I)) + \\ \text{SUM}((G),(\text{JSP}(G)/100)*\text{LS2}(G)) + \text{SUM}((G),(\text{JSP}(G)/100)*\text{LP2}(G)) + \\ \text{SUM}((G),(\text{JP1}(G)/100)*\text{LP1}(G))) * 1.05) + (\text{SUM}((U),P(U)*dz)) - (0.5*D*dz) \\ + He + Hu = E = \text{MAN} ;$$

$$\text{ECB}.. \quad \text{CB} = E = (13.976 * \text{MAN}) + 2890.5 ;$$

$$\text{ECB1}.. \quad \text{MAN} = L = 82 ;$$

$$\text{ECB2}.. \quad \text{MAN} = G = 50 ;$$

$$\text{PN40}.. \quad H_o = L = 40 ;$$

$$\text{ECE}.. \quad \text{CE} = E = ((9.80665 * 1.1 * Q * \text{MAN} * \text{DI} * \text{HI}) / \text{EF}) * E ;$$

$$\text{EHo}.. \quad H_o = E = \text{MAN} - He - Hu ;$$

$$\text{EH1}.. \quad H_1 = E = H_o - P('1')*dz - (1.05*\text{SUM}((G),(\text{JP1}(G)/100)*\text{LP1}(G))) ;$$

$$\text{EH2}.. \quad H_2 = E = H_1 - P('2')*dz - ((\text{SUM}((G),(\text{JSP}(G)/100)*\text{LP2}(G))) * 1.05) ;$$

$$\text{ELS1}.. \quad (\text{SUM}((G),(\text{JSP}(G)/100)*\text{LS1}(G)) * 1.05) = L = H_1 - H_{UO} ;$$

$$\text{ELS2}.. \quad (\text{SUM}((G),(\text{JSP}(G)/100)*\text{LS2}(G)) * 1.05) = L = H_2 - H_{UO} ;$$

$$\text{OPTION LIMROW} = 200 ;$$

$$\text{MODEL CONV10SE /ALL/ ;}$$

$$\text{SOLVE CONV10SE USING LP MINIMIZING Z ;}$$

Modelo de Programação Linear para o critério uniformidade de emissão, microaspersor não autocompensante, considerando o custo com energia.

*MODELO DE PL - Microaspersor não autocompensante ; ue ; lateral 16mm ; 50%/50% ; energia ; CONVUE

SETS

I diametro tubo pvc PN40 para linhas de derivacao /50, 75, 100, 125/

G diametro tubo pvc PN40 para as linhas secund e principal /75, 100, 125, 150/

T diametro tubo pvc PN80 para o trecho 1 da linha principal /100, 150, 200/

J trecho da linha de derivacao /1 * 19/

B(J) trechos da linha de derivacao com 7m de comprimento /2 * 19/

R linha secundaria /1, 2, 3/

U linha principal /1, 2, 3/ ;

SCALARS

N numero de unidades operacionais /12/

NLL numero de linhas laterais na unidade operacional /38/

NE numero de emissores por linha lateral /18/

Cm custo unitario do emissor em reais /1.068/

CL preco em reais por m de tubo de PE da linha lateral /0.26/

L comprimento da linha lateral em m /70/

D comprimento da linha de derivacao em m /129.5/

S comprimento da linha secundaria /225/

dz gradiente de declive em m por m /0.021/

HFL perda de carga na linha lateral em m /2.7/

He perda de carga na estacao de controle /12/

Hu	altura geometrica de succao	/3/
Hv	perda de carga na valvula reguladora de pressao	/2/
hm	carga hidraulica de operacao do microaspersor em mca	/15.5/
E	custo da energia eletrica em reais por Kwh	/0.08572/
DI	dias de irrigacao no ciclo	/120/
HI	horas de irrigacao por dia	/18/
EF	rendimento do conjunto motor 88% e bomba 70%	/0.616/
FRC	fator de recuperacao do capital com juros 6% aa e 10 anos vida util	/.13587/
VL	perda de carga permitida na linha de derivacao	/2.7/
VV	custo unitario valvula eletrica do inicio na unidade operacional	/490/
PC	custo do painel de controle para 12 valvulas	/985/
FI	sistema de filtragem composto filtros de areia e tela mais valvula retrolavagem	/9000/
Q	vazao na saida da bomba em m3 por s	/1.634E-2/ ;

PARAMETERS

P(U)	comprimento em m da linha principal	/1	133
		2	133
		3	133 /
CD(I)	preco em reais por m do tubo de pvc PN40	/50	1.35
		75	2.60
		100	4.16
		125	6.81 /
C40(G)	preco em reais por m do tubo de pvc PN40	/75	2.60
		100	4.16
		125	6.81
		150	9.67/
CP(T)	preco em reais por m do tubo de pvc PN80	/100	7.61

150 15.21

200 5.86/

J40(G) perda de carga em m por 100m para Q /75 4.951

100 1.151

125 0.422

150 0.175 /

JP40(G) perda de carga em m por 100m para 2Q /75 18.023

100 4.117

125 1.496

150 0.615 /

JP(T) perda de carga em m por 100m PN80 trecho 1 da linha principal

/100 2.114

150 0.356

200 0

.098/;

JD(J,I) perda de carga em m por 100m no trecho J da linha derivação para o diâmetro I

50 75 100 125

1 37.039 4.951 1.151 0.422

2 33.453 4.481 1.043 0.383

3 30.044 4.033 0.940 0.345

4 26.812 3.607 1.842 0.310

5 23.758 3.204 0.748 0.276

6 20.882 2.823 0.661 0.243

7 18.184 2.465 0.578 0.213

8	15.666	2.129	0.500	0.184
9	13.327	1.817	0.427	0.158
10	11.170	1.528	0.360	0.133
11	9.193	1.262	0.298	0.110
12	7.400	1.020	0.241	0.089
13	5.792	0.801	0.190	0.071
14	4.370	0.607	0.144	0.054
15	3.135	0.438	0.104	0.039
16	2.093	0.294	0.070	0.026
17	1.248	0.177	0.042	0.016
18	0.606	0.087	0.021	0.008
19	0.179	0.026	0.006	0.002 ;

VARIABLES

LD(J,I) comprimento da tubulacao de diametro i no trecho j da linha de derivacao

LS1(G) comprimento da linha secundaria 1 com diametro G

LS2(G) comprimento da linha secundaria 2 com diametro G

LS3(G) comprimento da linha secundaria 3 com diametro G

LP1(T) comprimento da linha principal 1 com diametro T

LP2(G) comprimento da linha principal 2 com diametro G

LP3(G) comprimento da linha principal 3 com diametro G

HMED carga hidraulica media na linha de derivacao em mca

HD(J) carga hidraulica nas saidas da linha de derivacao em mca

CE custo com consumo de energia

MAN altura manometrica total por bloco operacional

HUO carga hidraulica minima na entrada da UO antes da valvula

Ho carga hidraulica na saida da estacao de controle

H1 carga hidraulica na transicao entre os trechos 1 e 2 da linha principal

H2 carga hidraulica na transicao entre os trechos 2 e 3 da linha principal
 H3 carga hidraulica na transicao entre a linha principal e a linha secundaria 3
 CB custo do conjunto motobomba para man entre 50 e 82 mca
 HFD perda carga na linha de derivacao em mca
 HDo carga hidraulica na entrada linha de derivacao em mca
 Z custo total do sistema de irrigacao em reais ;

POSITIVE VARIABLES LD(J,I), LS1(G), LS2(G), LS3(G), LP1(T), LP2(G), LP3(G),
 HMED, HD,

MAN, Ho, H1, H2, H3, HUO, CB, HFD, HDo ;

EQUATIONS

FO funcao objetivo
 TRED1 comprimento do trecho 1 da linha de derivacao
 TRED(J) trechos de 2 a 19 da linha de derivacao
 SEC1 comprimento da linha secundaria 1
 SEC2 comprimento da linha secundaria 2
 SEC3 comprimento da linha secundaria 3
 PR1 comprimento do trecho 1 da linha principal
 PR2 comprimento do trecho 2 da linha principal
 PR3 comprimento do trecho 3 da linha principal
 EHD1 carga hidraulica na primeira saida da l de derivacao
 EHD(J) carga hidraulica nas demais saidas l derivacao
 EFLD(J) criterio de perda de carga na linha de derivacao
 EHM carga hidraulica media na l derivacao
 ehml
 EHUO calculo de HUO
 EHDo calculo da carga hidraulica no inicio da l deriv
 EHFD perda de carga na l derivacao
 EHFD1 restricao que assegura perda de carga igual ou maior que ganho de energia com

declive

E1	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E2	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E3	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E4	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E5	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E6	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E7	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E8	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E9	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E10	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E11	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E12	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E13	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E14	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E15	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E16	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E17	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E18	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E19	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E20	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E21	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E22	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
EHUO	calculo de HUO
EMAN	altura manometrica total
PN40	respeito a classe de pressao 40mca
PN80	respeito a classe de pressao 80 mca
ECE	calculo do custo com energia eletrica
ECB	eq para custo do sist de bombeamento
ECB1	eq 1 para custo de bombeamento

ECB2 eq 2 para custo de bombeamento
 EHo carga hidraulica na saida da estacao de controle
 EH1 eq para calculo de H1
 EH2 eq para calculo de H2
 EH3 eq para calculo de H3
 ELS1 dimensionamento da linha secundaria 1
 ELS2 dimensionamento da linha secundaria 2
 ELS3 dimensionamento da linha secundaria 3 ;

FO.. $Z = E = ((N * NLL * NE * C_m) + N * NLL * L * CL + N * VV + N * \text{SUM}((I, J), CD(I) * LD(J, I)) +$

$2 * (\text{SUM}((G), C40(G) * LS3(G)) + \text{SUM}((G), C40(G) * LS2(G)) + \text{SUM}((G), C40(G) * LS1(G))) +$
 $\text{SUM}((G), C40(G) * LP3(G)) + \text{SUM}((G), C40(G) * LP2(G)) +$
 $\text{SUM}((T), CP(T) * LP1(T)) +$
 $CB + PC + FI) * FRC + CE ;$

TRED1.. $\text{SUM}((I), LD('1', I)) = E = 3.5 ;$

TRED(B(J)).. $\text{SUM}((I), LD(J, I)) = E = 7 ;$

E1.. $LD('1', '50') = E = 0 ;$

E2.. $LD('2', '50') = E = 0 ;$

E3.. $LD('3', '50') = E = 0 ;$

E4.. $LD('4', '50') = E = 0 ;$

E5.. $LD('5', '50') = E = 0 ;$

E6.. $LD('6', '50') = E = 0 ;$

E7.. $LD('7', '50') = E = 0 ;$

E8.. $LD('8', '50') = E = 0 ;$

E9.. $LD('9', '50') = E = 0 ;$

E10.. $LD('10', '50') = E = 0 ;$

E11.. LD('11','50') =E= 0 ;
 E12.. LD('19','75') =E= 0 ;
 E13.. LD('17','100') =E= 0 ;
 E14.. LD('18','100') =E= 0 ;
 E15.. LD('19','100') =E= 0 ;
 E16.. LD('15','125') =E= 0 ;
 E17.. LD('16','125') =E= 0 ;
 E18.. LD('17','125') =E= 0 ;
 E19.. LD('18','125') =E= 0 ;
 E20.. LD('19','125') =E= 0 ;
 E21.. LP2('75') =E= 0 ;
 E22.. LP2('100') =E= 0 ;

 EHDo.. HDo =E= HUO - Hv ;

 EHD1.. HD('1') =E= HDo - 1.05*SUM((I),(JD('1',I)/100)*LD('1',I))+3.5*dz ;

 EHD(B(J)).. HD(J) =E= (HD(J-1) - SUM((I),(JD(J,I)/100)*LD(J,I))*1.05 +7 *dz);

 EFLD(J).. HD(J) - HDo =L= VL ;

 EHM.. HMED =E= SUM(J,HD(J))/(NLL/2) ;

 EHM1.. HMED =E= 17.525 ;

 EHFD.. HFD =E= 1.05*(SUM((J,I),(JD(J,I)/100)*LD(J,I))) ;

 EHFD1.. HFD =G= D*dz ;

 SEC1.. SUM((G),LS1(G)) =E= S ;

$$\text{SEC2..} \quad \text{SUM}((G), \text{LS2}(G)) = E = S ;$$

$$\text{SEC3..} \quad \text{SUM}((G), \text{LS3}(G)) = E = S ;$$

$$\text{PR1..} \quad \text{SUM}((T), \text{LP1}(T)) = E = P('1') ;$$

$$\text{PR2..} \quad \text{SUM}((G), \text{LP2}(G)) = E = P('2') ;$$

$$\text{PR3..} \quad \text{SUM}((G), \text{LP3}(G)) = E = P('3') ;$$

$$\begin{aligned} \text{EHUO..} \quad \text{HUO} = E = & (0.75 * \text{HFL}) + \text{hm} + \text{Hv} + \\ & (\text{SUM}((J, I), (\text{JD}(J, I) / 100) * \text{LD}(J, I)) * 0.63 * 1.05) - 0.5 * D * dz ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{EMAN..} \quad & (0.75 * \text{HFL}) + \text{hm} + \text{Hv} + ((0.63 * \text{SUM}((J, I), (\text{JD}(J, I) / 100) * \text{LD}(J, I)) + \\ & \text{SUM}((G), (\text{J40}(G) / 100) * \text{LS2}(G)) + \\ & \text{SUM}((G), (\text{JP40}(G) / 100) * \text{LP2}(G)) + \text{SUM}((T), (\text{JP}(T) / 100) * \text{LP1}(T))) * 1.05) + \\ & ((P('1') + P('2')) * dz) - (0.5 * D * dz) + \text{He} + \text{Hu} = E = \text{MAN} ; \end{aligned}$$

$$\text{ECB..} \quad \text{CB} = E = (13.976 * \text{MAN}) + 2890.5 ;$$

$$\text{ECB1..} \quad \text{MAN} = L = 82 ;$$

$$\text{ECB2..} \quad \text{MAN} = G = 50 ;$$

$$\text{PN40..} \quad \text{H1} = L = 40 ;$$

$$\text{PN80..} \quad \text{Ho} = L = 80 ;$$

$$\text{ECE..} \quad \text{CE} = E = ((9.80665 * 1.1 * Q * \text{MAN} * \text{DI} * \text{HI}) / \text{EF}) * E ;$$

$$\text{EHo..} \quad \text{Ho} = E = \text{MAN} - \text{He} - \text{Hu} ;$$

$$\text{EH1..} \quad H1 = E = H0 - P('1') * dz - (1.05 * \text{SUM}((T), (JP(T)/100) * LP1(T))) ;$$

$$\text{EH2..} \quad H2 = E = H1 - P('2') * dz - ((\text{SUM}((G), (JP40(G)/100) * LP2(G))) * 1.05) ;$$

$$\text{EH3..} \quad H3 = E = H1 - P('2') * dz - ((\text{SUM}((G), (J40(G)/100) * LP2(G))) * 1.05) - P('3') * dz - ((\text{SUM}((G), (J40(G)/100) * LP3(G))) * 1.05) ;$$

$$\text{ELS1..} \quad (\text{SUM}((G), (J40(G)/100) * LS1(G)) * 1.05) = L = H1 - HUO ;$$

$$\text{ELS2..} \quad (\text{SUM}((G), (J40(G)/100) * LS2(G)) * 1.05) = L = H2 - HUO ;$$

$$\text{ELS3..} \quad (\text{SUM}((G), (J40(G)/100) * LS3(G)) * 1.05) = L = H3 - HUO ;$$

MODEL CONVUE /ALL/ ;

SOLVE CONVUE USING LP MINIMIZING Z ;

Modelo de Programação Linear para o critério de 10% de variação de vazão, microaspersor autocompensante, considerando o custo com energia.

*MODELO DE PL - Microaspersor autocompensante ; 10% variação ; lateral 16mm ; 50%/50% ; energia ; AUTO6

SETS

I diâmetro tubo pvc PN40 para linhas de derivação /75, 100, 125, 150/

T diâmetro tubo pvc PN80 /100, 150, 200/

J trecho da linha de derivação /1 * 28/

B(J) trechos da linha de derivação com 7m de comprimento /2 * 28/

R linha secundária /1, 2/

U linha principal /1, 2/ ;

SCALARS

N número de unidades operacionais /6/

NLL número de linhas laterais na unidade operacional /56/

NE número de emissores por linha lateral /25/

Cm custo unitário do emissor em reais /2.401/

CL preço em reais por m de tubo de PE da linha lateral /0.26/

L comprimento da linha lateral em m /98/

D comprimento da linha de derivação em m /192.5/

S comprimento da linha secundária /200/

dz gradiente de declive em m por m /0.021/

HFL perda de carga na linha lateral em m /6/

He perda de carga na estação de controle /12/

Hu altura geométrica de sucção /3/

Hv perda de carga na válvula reguladora de pressão /2/

hm carga hidraulica de operacao do microaspersor em mca /15.5/
 E custo da energia eletrica em reais por Kwh /0.08572/
 DI dias de irrigacao no ciclo /120/
 HI horas de irrigacao por dia /18/
 EF rendimento do conjunto motor 88% e bomba 70% /0.616/
 Q vazao na saida da bomba em m3 por s /1.5555E-2/
 FRC fator de recuperacao capital juros 6% aa e 10 anos vida util /.13587/
 VD perda de carga permitida na linha de derivacao /12/
 VV custo unitario valvula eletrica do inicio na unidade operacional /490/
 PC custo do painel de controle para 6 valvulas /690/
 FI sistema de filtragem filtros de areia e tela mais valvula retrolavagem /9000/ ;

PARAMETERS

P(U) comprimento em m da linha principal /1 196
 2 196/

C4(I) preco em reais por m do tubo de pvc PN40 /75 2.60
 100 4.16
 125 6.81
 150 9.67 /

C40(I) preco em reais por m do tubo de pvc PN40 /75 2.60
 100 4.16
 125 6.81
 150 9.67 /

C80(T) preco em reais por m do tubo de pvc PN80 /100 7.61
 150 15.21

200 2

5.86

/

JS(I) perda de carga em m por 100m na linha secundaria de diametro I

/75

16.431

100 3.758

125 1.366

150 0.562 /

JP2(I) perda de carga em m por 100m na linha principal 2 para o diametro I

/75

16.431

100 3.758

125 1.366

150 0.562 /

JP1(T) perda de carga em m por 100m na linha principal 1 para o diametro T

/100

1.931

150 0.325

200 0.090 / ;

TABLE JD(J,I) perda de carga em m por 100m no trecho J da linha derivacao para o diametro I

	75	100	125	150
1	16.431	3.758	1.366	0.562
2	15.346	3.513	1.278	0.526
3	14.297	3.277	1.193	0.491
4	13.284	3.047	1.110	0.457

5	12.306	2.826	1.030	0.425	
6	11.365	2.613	0.953	0.393	
7	10.459	2.407	0.878	0.362	
8	9.590	2.210	0.807	0.333	
9	8.756	2.020	0.738	0.305	
10	7.960	1.839	0.672	0.278	
11	7.198	1.665	0.609	0.252	
12	6.474	1.500	0.549	0.227	
13	5.786	1.342	0.492	0.204	
14	5.135	1.193	0.438	0.181	
15	4.521	1.052	0.386	0.160	
16	3.943	0.919	0.338	0.140	
17	3.404	0.795	0.292	0.121	
18	2.902	0.679	0.250	0.104	
19	2.437	0.571	0.211	0.088	
20	2.010	0.472	0.174	0.073	
21	1.622	0.382	0.141	0.059	
22	1.273	0.300	0.111	0.046	
23	0.963	0.228	0.084	0.035	
24	0.694	0.165	0.061	0.026	
25	0.465	0.111	0.041	0.017	
26	0.278	0.067	0.025	0.011	
27	0.136	0.033	0.012	0.005	
28	0.041	0.010	0.004	0.002	;

VARIABLES

LD(J,I) comprimento da tubulacao de diametro i no trecho j da linha de derivacao

LS1(I) comprimento da linha secundaria 1 com diametro F

LS2(I) comprimento da linha secundaria 2 com diametro F
LP1(T) comprimento da linha principal 1 com diametro T
LP2(I) comprimento da linha principal 2 com diametro T
CE custo com consumo de energia
CB custo do conjunto motobomba para man entre 50 e 82 mca
MAN altura manometrica total por bloco operacional
HUO carga hidraulica minima na entrada da UO antes da valvula
HMED carga hidraulica media na linha de derivacao em mca
HD(J) carga hidraulica nas saidas da linha de derivacao em mca
HFD perda carga na linha de derivacao em mca
HDo carga hidraulica na entrada linha de derivacao em mca
Ho carga hidraulica na saida da estacao de controle
H1 carga hidraulica na transicao entre os trechos 1 e 2 da linha principal
H2 carga hidraulica na transicao entre a linha principal 2 a linha secundaria 2
ELD1
ELD2
ELD3
ELD4
ELD5
ELD6
ELD7
ELD8
ELD9
ELD11
ELD12
ELD13
ELD14
ELD15
ELD16
ELD17

ELD18

ELD19

ELD20

ELD21

ELD22

ELD23

Z custo total do sistema de irrigacao em reais ;

POSITIVE VARIABLES LD(J,I), LS1(I), LS2(I), LP1(T), LP2(I), MAN, HMED, HD, HDo, HFD, Ho, H1, H2, HUO, CE, CB ;

EQUATIONS

FO funcao objetivo

TRED1 comprimento do trecho 1 da linha de derivacao

TRED(J) trechos de 2 a 28 da linha de derivacao

SEC1 comprimento da linha secundaria 1

SEC2 comprimento da linha secundaria 2

PRI1 comprimento da linha principal 1

PRI2 comprimento da linha principal 2

EHD1 carga hidraulica na primeira saida da l de derivacao

EHD(J) carga hidraulica nas demais saidas l derivacao

EFLD(J) criterio de perda de carga na linha de derivacao

EFLD1

EHM carga hidraulica media na l derivacao

EHM1

EHUO calculo de HUO

EHDo calculo da carga hidraulica no inicio da l deriv

EHFD perda de carga na l derivacao

EHFD1 restricao que assegura perda de carga igual ou maior que ganho de energia com declive

E1 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada

E2 velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada

E3	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E4	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E5	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E6	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E7	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E8	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E9	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E10	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E11	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E12	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E13	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E14	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E15	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E16	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E17	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E18	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E19	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E20	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E21	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E22	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E23	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E24	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E25	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
E26	velocidade acima ou abaixo da faixa recomendada
EHUO	calculado de H _{UO}
EMAN	altura manométrica total
ECE	calculado do custo com energia elétrica
ECB	eq para custo do sist de bombeamento
ECB1	eq 1 para custo de bombeamento
ECB2	eq 2 para custo de bombeamento

EHo carga hidraulica na saida da estacao de controle

PN40 respeito a classe de pressao 40 mca

PN80 respeito a classe de pressao 80 mca

EHo carga hidraulica na saida da estacao de controle

EH1 eq para calculo de H1

EH2 eq para calculo de H2

ELS1 dimensionamento da linha secundaria 1

ELS2 dimensionamento da linha secundaria 2 ;

$$\begin{aligned} \text{FO..} \quad Z = E = & ((N * NLL * NE * C_m) + N * NLL * L * CL + N * VV + \\ & N * \text{SUM}((I, J), C4(I) * LD(J, I)) + 2 * (\text{SUM}((I), C40(I) * LS2(I)) + \text{SUM}((I), C40(I) * LS1(I))) + \\ & \text{SUM}((I), C40(I) * LP2(I)) + \\ & \text{SUM}((T), C80(T) * LP1(T)) + CB + PC + FI) * FRC + CE ; \end{aligned}$$

$$\text{TRED1..} \quad \text{SUM}((I), LD('1', I)) = E = 3.5 ;$$

$$\text{TRED(B(J))..} \quad \text{SUM}((I), LD(J, I)) = E = 7 ;$$

$$\text{E1..} \quad LD('1', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E2..} \quad LD('2', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E3..} \quad LD('3', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E4..} \quad LD('4', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E5..} \quad LD('5', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E6..} \quad LD('6', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E7..} \quad LD('7', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E8..} \quad LD('8', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E9..} \quad LD('9', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E10..} \quad LD('10', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E11..} \quad LD('11', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E12..} \quad LD('12', '75') = E = 0 ;$$

$$\text{E13..} \quad LD('13', '75') = E = 0 ;$$

$$E14.. \quad LD('27','100') = E = 0 ;$$

$$E15.. \quad LD('28','100') = E = 0 ;$$

$$E16.. \quad LD('26','125') = E = 0 ;$$

$$E17.. \quad LD('27','125') = E = 0 ;$$

$$E18.. \quad LD('28','125') = E = 0 ;$$

$$E19.. \quad LD('24','150') = E = 0 ;$$

$$E20.. \quad LD('25','150') = E = 0 ;$$

$$E21.. \quad LD('26','150') = E = 0 ;$$

$$E22.. \quad LD('27','150') = E = 0 ;$$

$$E23.. \quad LD('28','150') = E = 0 ;$$

$$E24.. \quad LS1('75') = E = 0 ;$$

$$E25.. \quad LS2('75') = E = 0 ;$$

$$E26.. \quad LP2('75') = E = 0 ;$$

$$EHDo.. \quad HDo = E = HUO - H_v ;$$

$$EHD1.. \quad HD('1') = E = HDo - 1.05 * SUM((I), (JD('1', I) / 100) * LD('1', I)) + 3.5 * dz ;$$

$$EHD(B(J)).. \quad HD(J) = E = (HD(J-1) - SUM((I), (JD(J, I) / 100) * LD(J, I)) * 1.05 + 7 * dz) ;$$

$$EFLD(J).. \quad HDo - HD(J) = L = VD ;$$

$$EFLD1(J).. \quad HDo - HD(J) = G = 0 ;$$

$$EHM.. \quad HMED = E = SUM(J, HD(J)) / (NLL / 2) ;$$

$$EHM1.. \quad HMED = L = 20.1 ;$$

$$EHFD.. \quad HFD = E = 1.05 * (SUM((J, I), (JD(J, I) / 100) * LD(J, I))) ;$$

$$EHFD1.. \quad HFD = G = D * dz ;$$

$$\text{SEC1..} \quad \text{SUM}((I), \text{LS1}(I)) = E = S ;$$

$$\text{SEC2..} \quad \text{SUM}((I), \text{LS2}(I)) = E = S ;$$

$$\text{PRI1..} \quad \text{SUM}((T), \text{LP1}(T)) = E = P('1') ;$$

$$\text{PRI2..} \quad \text{SUM}((I), \text{LP2}(I)) = E = P('2') ;$$

$$\begin{aligned} \text{EHUO..} \quad \text{HUO} = E = & (0.75 * \text{HFL}) + \text{hm} + \text{Hv} + \\ & (\text{SUM}((J, I), (\text{JD}(J, I) / 100) * \text{LD}(J, I)) * 0.63 * 1.05) - 0.5 * D * dz ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{EMAN..} \quad & (0.75 * \text{HFL}) + \text{hm} + \text{Hv} + ((0.63 * \text{SUM}((J, I), (\text{JD}(J, I) / 100) * \text{LD}(J, I)) + \\ & \text{SUM}((I), (\text{JS}(I) / 100) * \text{LS2}(I)) + \text{SUM}((I), (\text{JP2}(I) / 100) * \text{LP2}(I)) + \\ & \text{SUM}((T), (\text{JP1}(T) / 100) * \text{LP1}(T))) * 1.05) + \text{SUM}((U), P(U) * dz) - (0.5 * D * dz) + \text{He} \\ & + \text{Hu} = E = \text{MAN} ; \end{aligned}$$

$$\text{ECB..} \quad \text{CB} = E = (13.976 * \text{MAN}) + 2890.5 ;$$

$$\text{ECB1..} \quad \text{MAN} = L = 82 ;$$

$$\text{ECB2..} \quad \text{MAN} = G = 50 ;$$

$$\text{ECE..} \quad \text{CE} = E = ((9.80665 * 1.1 * Q * \text{MAN} * \text{DI} * \text{HI}) / \text{EF}) * E ;$$

$$\text{PN40..} \quad \text{H1} = L = 40 ;$$

$$\text{PN80..} \quad \text{Ho} = L = 80 ;$$

$$\text{EHo..} \quad \text{Ho} = E = \text{MAN} - \text{He} - \text{Hu} ;$$

EH1.. $H1 = E = H_0 - P('1') \cdot dz - (1.05 \cdot \text{SUM}((T), (JP1(T)/100) \cdot LP1(T))) ;$

EH2.. $H2 = E = H1 - P('2') \cdot dz - ((\text{SUM}((I), (JP2(I)/100) \cdot LP2(I))) \cdot 1.05) ;$

ELS1.. $(\text{SUM}((I), (JS(I)/100) \cdot LS1(I)) \cdot 1.05) = L = H1 - HUO ;$

ELS2.. $(\text{SUM}((I), (JS(I)/100) \cdot LS2(I)) \cdot 1.05) = L = H2 - HUO ;$

MODEL AUTO6 /ALL/ ;

SOLVE AUTO6 USING LP MINIMIZING Z ;