

OTIMIZAÇÃO DA REDE HIDRÁULICA DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR¹

JOÃO CARLOS CURY SAAD, CLÁUDIO TOMAZELA², JOSÉ GEANINI PERES³,
FERNANDO CURI PERES⁴ e JOSÉ ANTONIO FRIZZONE⁵

RESUMO - Foi desenvolvido um modelo de Programação Linear visando a minimização do custo anual da rede hidráulica de um determinado sistema de irrigação por gotejamento, a ser instalado num pomar de citros (11,5 ha). O modelo foi desenvolvido e resolvido para duas situações: na primeira, foram considerados os custos com tubulação e com energia; na segunda, considerou-se apenas o custo da tubulação. O dimensionamento hidráulico-energético foi o mais eficiente na minimização dos custos, seguido pelo dimensionamento hidráulico e pelo dimensionamento efetuado por um especialista, dimensionamento, este, que foi utilizado para avaliar o modelo. Concluiu-se que, mantendo-se os demais custos constantes, o fator energia somente afetará o dimensionamento do sistema caso sua tarifa seja igual ou superior a US\$ 0,02522/kWh.

Termos para indexação: modelo de programação linear, pomar, citros, custos de tubulação, energia.

HYDRAULIC OPTIMIZATION OF A DRIP IRRIGATION SYSTEM USING LINEAR PROGRAMMING

ABSTRACT - A linear optimization model was developed to minimize the hydraulic network cost of a drip irrigation system, which will be used in a citrus orchard field. The model was applied in two situations: in the first one, the costs with pipe and energy were taken into consideration; in the second one, only the pipe cost was observed. The hydraulic-energetic design was the most efficient in cost reduction, followed by the hydraulic design and by the design done by an expert, which was used to evaluate the model. The results also showed that keeping the other costs constant, the energy factor will only interfere in the system design if its rate is equal or higher than US\$ 0.02522/kWh.

Index terms: linear model programming, orchard field, citrus, cost with pipe, energy.

INTRODUÇÃO

Uma das principais limitações à expansão do uso de sistemas de irrigação por gotejamento é o seu elevado custo de instalação, pelo fato de a rede hidráulica ser fixa e se estender por toda a área a ser irrigada. Para minimizar este custo,

deve-se atentar para a relação existente entre a rede hidráulica utilizada e a energia por ela consumida, pois 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, mas apresentam maior custo.

O fato de a tubulação ser fixa possibilita o uso de combinações envolvendo diâmetros distintos e diferentes comprimentos, nos diversos trechos da rede hidráulica destes sistemas de irrigação. Daí a existência de várias possíveis configurações hidráulicas, dentre as quais ocorre a de menor custo.

O dimensionamento econômico pode ser feito utilizando-se técnicas de pesquisa operacional, dentre as quais destaca-se a Programação Linear,

¹ Aceito para publicação em 7 de janeiro de 1994.

² Eng. - Agr., M.Sc., (pós-graduação em Irrigação e Drenagem). Dep. Eng. Rural, ESALQ/USP, Caixa Postal 09, CEP 13400 Piracicaba, SP.

³ Eng. - Agr., M.Sc., Prof. - Assistente, Dep. de Recursos Naturais, Centro de Ciências Agrárias, UFSCar, Caixa Postal 153, CEP 13600 Araras, SP.

⁴ Eng. - Agr., Ph.D., Prof. - Associado de Administração Rural, Dep. de Econ. e Sociol. Rural, ESALQ/USP.

⁵ Eng. - Agr., Dr., Prof., Dep. de Eng. Rural, ESALQ/USP.

que é, atualmente, o instrumento mais utilizado nos problemas de otimização, em decorrência de sua versatilidade e do fato de utilizar fundamentos matemáticos simples, como a análise e resolução de sistemas de equações lineares (Lanzer, 1988).

A Programação Linear tem sido aplicada no dimensionamento de sistemas fixos de irrigação para minimizar o custo da rede hidráulica. Porém, não se tem considerado o custo da energia por ela consumida (Oron & Karmeli, 1981 e Benami & Ofen, 1984).

Os objetivos deste trabalho foram: desenvolver um modelo de Programação Linear para minimização do custo anual do sistema de irrigação por gotejamento e dimensioná-lo sob duas situações: uma, considerando o custo da tubulação e o custo da energia consumida, e a outra, considerando apenas o custo da tubulação.

MATERIAL E MÉTODOS

Para caracterizar a utilização da Programação Linear no dimensionamento hidráulico de sistemas de irrigação

por gotejamento, utilizou-se um projeto cuja representação esquemática encontra-se na Fig. 1. A área tem 460 m x 250 m (11,5 ha), está cultivada com citros (espaçamento de 7 m x 5 m) e foi dividida em quatro unidades operacionais, cada uma composta por uma linha de derivação com 18 linhas laterais de cada lado, totalizando 36 linhas laterais.

As unidades operacionais de número ímpar medem 260 m x 125 m, apresentando linhas laterais de 127,5 m com 26 pontos de emissão. As unidades de número par medem 200 m x 125 m, apresentando laterais de 97,5 m com 20 pontos de emissão. Todas as linhas de derivação medem 122,5 m. A linha principal tem 150 m.

São duas as linhas secundárias: uma, com 130 m de comprimento, e outra, com 100 m. Cada linha atende a duas unidades operacionais.

A vazão do gotejador é de 4 l/h para a carga hidráulica de operação (hm) de 10m.c.a., e existem cinco emissores por planta. A equação vazão-carga hidráulica do gotejador é dada por:

$$q = 1,3562 \cdot h^{0,4704} \quad (1)$$

onde:

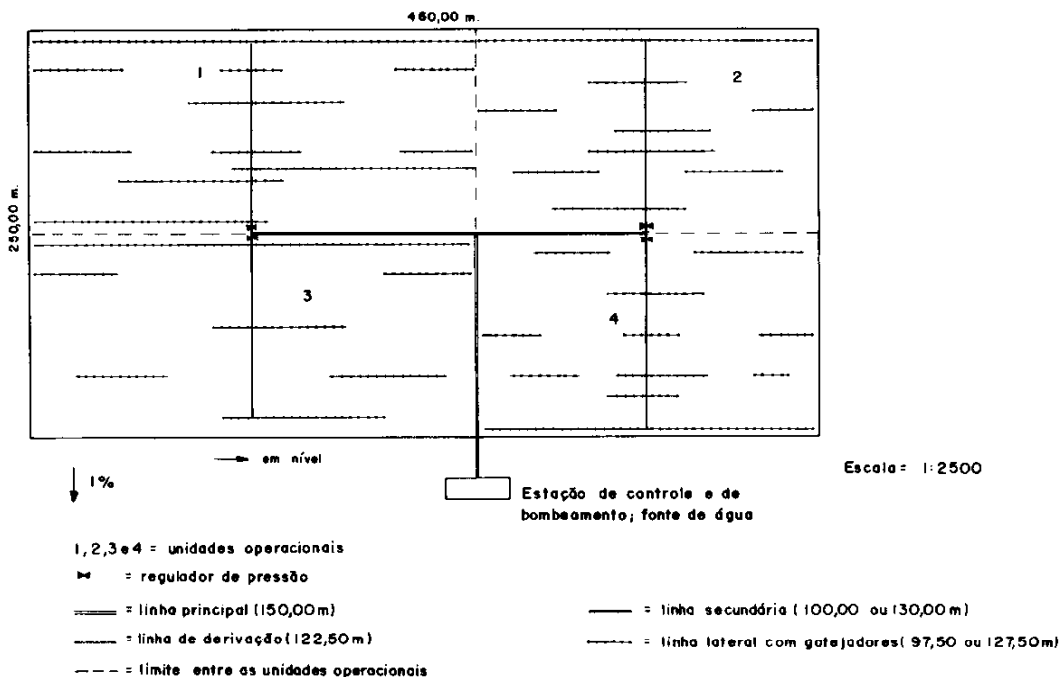


FIG. 1. Representação esquemática da área do pomar de citros e do projeto de irrigação por gotejamento.

q = vazão do emissor, em l/h;
h = carga hidráulica do gotejador, em m.c.a.

O turno de irrigação é de quatro dias, irrigando-se uma unidade operacional por dia.

Modelo de Programação Linear.

a) Função-objetivo.

A função-objetivo é de minimização de custo, e envolve custo da tubulação e custo da energia consumida, tendo como forma geral:

Minimizar

$$Z = \sum_{i=\Phi 1}^{\Phi m} \sum_{j=1}^4 \sum_{v=1}^V nj . ci . XLijv +$$

$$+ \sum_{i=\Phi 1}^{\Phi m} \sum_{j=1}^4 \sum_{p=1}^{18} ci . XDijp + \sum_{i=\Phi 1}^{\Phi m} \sum_{r=1}^2 ci . XSir$$

$$+ \sum_{i=\Phi 1}^{\Phi M} ci . XPi + E . HTT \quad (2)$$

onde:

- XLijv = comprimento (m) da tubulação de diâmetro i, no trecho v da linha lateral j;
- XDijp = comprimento (m) da tubulação de diâmetro i, no trecho p da linha de derivação j;
- XSir = comprimento (m) do trecho de tubulação de diâmetro i, da linha secundária r;
- XPi = comprimento (m) do trecho de tubulação de diâmetro i, da linha principal;
- nj = número de linhas laterais existentes na unidade operacional j (neste caso, V j=1,...,4, nj=36);
- ci = valor da anuidade (US\$/m) referente ao tubo de diâmetro i, calculada para uma vida útil de dez anos e taxa de juros de 12% a.a. (Tabelas 1 e 2);
- E = custo da energia elétrica, em US\$/mca . m³.s⁻¹;
- HTT = soma do produto das alturas manométricas dos blocos operacionais k pelas respectivas vazões, em mca.m³.s⁻¹;
- i = índice para o diâmetro nominal do tubo (i=Φ1,...,Φm);
- j = índice para o número da linha de derivação e unidade operacional (j=1,...,4);
- v = número que designa cada um dos v trechos (V=20 ou 26) que compõem a linha lateral (v=1,...,V). Cada trecho representa a distância entre dois conjuntos adjacentes de gotejadores;

TABELA 1. Tubos de polietileno para as linhas laterais.

DN ¹	Di ² (mm)	J ³ (m/m)		Anuidade US\$/m
		q=400 l/h	q=520 l/h	
12	9,4	0,0739	0,1170	0,0646
15	17,0	0,0239	0,0378	0,1253
20	21,8	0,0073	0,0116	0,1867

¹DN - diâmetro nominal

²Di - diâmetro interno

³J - perda de carga unitária

TABELA 2. Tubos de PVC para as linhas de derivação, secundárias e principal.

DN	Di (mm)	J (m/m)		Anuidade US\$/m
		Q=4,0 l/s	Q=5,2 l/s	
50	48,1	0,0914	0,1477	0,2295
75	72,5	0,0129	0,0204	0,4238
100	97,6	0,0031	0,0050	0,6235

P = número que designa cada um dos 18 trechos que compõem a linha de derivação (p=1,...,18). Cada trecho representa a distância entre linhas laterais adjacentes;

r = índice para o número da linha secundária (r=1 e 2);

Os custos com gotejadores, acessórios e mão-de-obra, não foram considerados neste modelo.

O custo da energia (E) é calculado pela equação:

$$E = \frac{9,80665 \cdot T \cdot P \cdot Ce}{\eta b \cdot \eta m \cdot D} \quad (3)$$

onde:

- T = período de irrigação por dia (20h/dia);
- P = período (em dia/ano) de irrigação por bloco operacional (neste caso, 45 dias/ano);
- Ce = tarifa da energia, em Cr\$/Kwh;
- ηb = rendimento do motor (96%);
- ηm = rendimento da bomba (75%);
- D = cotação do dólar (Cr\$ 279,25/US\$).

Para as linhas laterais 1 e 3 (Fig. 1) analisaram-se tubos de polietileno (PE) de diâmetro nominal 15 e 20, e nas laterais 2 e 4 estudaram-se tubos de PE de

diâmetro nominal 12 e 15. Nas demais linhas da rede hidráulica, examinou-se a adequação dos tubos de PVC de diâmetro nominal 50, 75 e 100.

b) Restrições.

b1) Quanto à área.

A geometria da área e a disposição do sistema de irrigação estabelecem limitações quanto ao comprimento das linhas laterais, de derivação, secundária e principal, expressas nas seguintes restrições:

$$\sum_{i=\Phi 1}^{\Phi m} XL_{ijv} = Lv \quad \begin{matrix} V j = 1, \dots, 4 \\ V v = 1, \dots, V \end{matrix} \quad e \quad (4)$$

$$\sum_{i=\Phi 1}^{\Phi m} XD_{ijp} = Dp \quad \begin{matrix} V j = 1, \dots, 4 \\ V p = 1, \dots, 18 \end{matrix} \quad e \quad (5)$$

$$\sum_{i=\Phi 1}^{\Phi m} XS_{ir} = Sr \quad V r = 1 \text{ e } 2 \quad (6)$$

$$\sum_{i=\Phi 1}^{\Phi m} XP_i = P \quad (7)$$

onde:

L_v = comprimento (m) do trecho v da linha lateral (para $v=1$, $L_1=2,5$ m; para os demais valores de v , $L_v=5$ m);

D_p = comprimento (m) do trecho p da linha de derivação (para $p=1$, $D_1=3,5$ m; para os demais valores de p , $D_p=7$ m);

S_r = comprimento (m) da linha secundária r (100 m ou 130 m);

P = comprimento da linha principal (150 m).

b2) Quanto à variação de carga hidráulica permissível na unidade operacional.

A variação de carga hidráulica permissível na unidade operacional (linhas laterais e de derivação), com a finalidade de manter a uniformidade de distribuição de água em níveis satisfatórios, é definida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (1983) como sendo:

$$\Delta H_s = 2,5 \cdot (hm - h_{min}) \quad (8)$$

onde:

ΔH_s = variação permissível de carga hidráulica na unidade operacional, em m.c.a.;

hm = carga hidráulica média de operação do gotejador, m.c.a.;

h_{min} = carga hidráulica mínima na unidade operacional, m.c.a..

A vazão mínima do emissor (q_{min}), que possibilitará o cálculo de h_{min} utilizando a eq. 1, é obtida na fórmula da uniformidade de emissão (American Society of Agricultural Engineers, 1987):

$$UE = [1 - (1,27 \cdot CVF \cdot NE^{-0,5})] \cdot (q_{min}/qm) \quad (9)$$

sendo,

UE = uniformidade de emissão, em valor decimal;
 CVF = coeficiente de variação de fabricação do gotejador, decimal;

NE = número de gotejadores por árvore;

qm = vazão do gotejador correspondente à carga hidráulica média (hm), em m^3/s .

Neste trabalho, utilizou-se $\Delta H_s = 3,3$ m.c.a., correspondente a $UE=90\%$, $NE=5$ gotejadores/planta e $CVF=7\%$.

Karmeli & Peri (1972) recomendam que na linha lateral a perda de carga máxima permitida seja de $0,55 \cdot \Delta H_s$, e na linha de derivação seja de $0,45 \cdot \Delta H_s$.

As restrições referentes às linhas laterais têm como forma geral:

$$\sum_{i=\Phi 1}^{\Phi m} \sum_{v=1}^V J(XL)_{ijv} \cdot XL_{ijv} \pm \Delta z_j \leq \Delta HL \quad (10)$$

$$V j = 1, \dots, 4$$

sendo,

$J(XL)_{ijv}$ = perda de carga unitária (m/m) no tubo de seção i , no trecho v da linha lateral j (Tabelas 3 e 4). Este valor foi multiplicando por 1,03 para compensar a perda de carga localizada que ocorre na conexão do conjunto de gotejadores com a linha lateral (0,15 m de comprimento equivalente/conjunto de gotejador);

Δz_j = desnível geométrico entre a extremidade inicial e a extremidade final da linha lateral j , em m;

ΔHL = perda de carga admissível (m.c.a.) na linha lateral = $0,55 \cdot \Delta H_s = 1,8$ m.c.a..

As restrições referentes às linhas de derivação são dadas por:

$$\sum_{i=\Phi 1}^{\Phi m} \sum_{p=1}^{18} J(XD)_{ijp} \cdot XD_{ijp} \pm \delta z_j \leq \Delta HD \quad (11)$$

$$V j = 1, \dots, 4$$

onde:

$J(XD)_{ijp}$ = perda de carga unitária (m/m) no tubo de seção i , no trecho p da linha de derivação j (Tabelas 5 e 6);

δz_j = desnível geométrico entre a extremidade inicial e a extremidade final da linha de derivação, em m;

ΔH_D = perda de carga admissível (m.c.a.) na linha de derivação = 0,45. ΔH_s = 1,5 m.c.a.

b3) Perda de carga no bloco operacional k .

A perda de carga no bloco operacional k (DH $_k$) é a que ocorre desde a saída da estação de controle até o último gotejador da última linha lateral, no sentido do fluxo. A restrição que define tal perda é dada por:

$$\sum_{i=\Phi_1}^{\Phi_m} \sum_{v=1}^V J(XL)_{ijv} \cdot XL_{ijv} + \sum_{i=\Phi_1}^{\Phi_m} \sum_{p=1}^{18} J(XD)_{ijp} \cdot XD_{ijp} + \sum_{i=\Phi_1}^{\Phi_m} J(XS)_{ir} \cdot XS_{ir} + \sum_{i=\Phi_1}^{\Phi_m} J(XP)_{is} \cdot XP_i - DH_k = 0 \quad (12)$$

TABELA 3. Perda de carga unitária nos trechos v das linhas laterais 1 e 3.

Trecho v	J (m/m)	
	DN15	DN20
1	0,03890	0,01194
2	0,03633	0,01115
3	0,03382	0,01038
4	0,03140	0,00963
5	0,02905	0,00891
6	0,02677	0,00822
7	0,02458	0,00754
8	0,02247	0,00690
9	0,02044	0,00627
10	0,01850	0,00568
11	0,01664	0,00511
12	0,01486	0,00456
13	0,01317	0,00404
14	0,01157	0,00355
15	0,01006	0,00294
16	0,00864	0,00229
17	0,00731	0,00175
18	0,00554	0,00129
19	0,00396	0,00092
20	0,00271	0,00063
21	0,00174	0,00041
22	0,00104	0,00024
23	0,00055	0,00013
24	0,00024	0,00006
25	0,00008	0,000018
26	0,00001	0,000002

para: $j = 1, r = 1, s = 1$ e $k = 1$;
 $j = 2, r = 2, s = 2$ e $k = 2$;
 $j = 3, r = 1, s = 1$ e $k = 3$;
 $j = 4, r = 2, s = 2$ e $k = 4$.

onde:

$J(XS)_{ir}$ = perda de carga unitária (m.c.a./m) no tubo de diâmetro i , da linha secundária r (Tabela 2);

$J(XP)_{is}$ = perda de carga unitária (m.c.a./m) no tubo de diâmetro i da linha principal, quando sujeita à vazão s (Tabela 2);

s = índice para a vazão à qual está submetida a linha principal. Tem-se que: $s = 1$ para a vazão que alimenta a unidade operacional 1 ou 3, e $s = 2$ para a vazão que supre a unidade 2 ou 4;

k = índice para o bloco operacional ($k=1, \dots, 4$).

b4) Quanto à perda de carga admissível no bloco operacional k .

A carga hidráulica disponível na saída da estação de controle (H_0) e que será dissipada ao longo do sistema é de 20 m.c.a.. O valor de carga hidráulica requerido pela unidade operacional é assegurado por um regulador de pressão instalado no seu início, cuja perda de carga (HR $_p$) é de 1 m.c.a..

TABELA 4. Perda de carga unitária nos trechos v das linhas laterais.

Trecho v	J (m/m)	
	DN12	DN15
1	0,07612	0,02458
2	0,06959	0,02247
3	0,06331	0,02044
4	0,05728	0,01850
5	0,05151	0,01664
6	0,04601	0,01486
7	0,04078	0,01317
8	0,03582	0,01157
9	0,03114	0,01006
10	0,02674	0,00864
11	0,02263	0,00731
12	0,01882	0,00554
13	0,01532	0,00396
14	0,01089	0,00271
15	0,00702	0,00174
16	0,00417	0,00104
17	0,00221	0,00055
18	0,00097	0,00024
19	0,00031	0,00008
20	0,00004	0,00001

TABELA 5. Perda de carga unitária nos trechos p das linhas de derivação 1 e 3.

Trecho p	J (m/m)		
	DN50	DN75	DN100
1	0,14770	0,02036	0,00496
2	0,13299	0,01841	0,00449
3	0,11898	0,01655	0,00403
4	0,10569	0,01478	0,00360
5	0,09311	0,01309	0,00319
6	0,08105	0,01154	0,00281
7	0,07043	0,01003	0,00244
8	0,06045	0,00861	0,00210
9	0,05114	0,00728	0,00177
10	0,04250	0,00605	0,00147
11	0,03455	0,00492	0,00120
12	0,02732	0,00389	0,00095
13	0,02083	0,00297	0,00072
14	0,01511	0,00215	0,00052
15	0,01035	0,00147	0,00036
16	0,00626	0,00089	0,00022
17	0,00308	0,00044	0,00011
18	0,00091	0,00013	0,00003

TABELA 6. Perda de carga unitária nos trechos p das linhas de derivação 2 e 4.

Trecho p	J (m/m)		
	DN50	DN75	DN100
1	0,09143	0,01286	0,00313
2	0,08181	0,01165	0,00284
3	0,07366	0,01049	0,00256
4	0,06553	0,00933	0,00227
5	0,05814	0,00828	0,00202
6	0,05114	0,00728	0,00177
7	0,04452	0,00634	0,00154
8	0,03803	0,00542	0,00132
9	0,03223	0,00459	0,00112
10	0,02685	0,00382	0,00093
11	0,02190	0,00312	0,00076
12	0,01738	0,00248	0,00060
13	0,01315	0,00187	0,00046
14	0,00958	0,00136	0,00033
15	0,00651	0,00093	0,00023
16	0,00396	0,00056	0,00014
17	0,00190	0,00027	0,00007
18	0,00056	0,00008	0,00002

A carga hidráulica disponível para ser dissipada nas linhas laterais de derivação secundária e principal é a diferença entre H_o e as perdas que ocorrem ao longo do sistema. A restrição tem a forma geral:

$$DHk \leq H_o - hm - HRP - \Delta Hk \pm \Delta Zk \quad (13)$$

onde:

ΔHk = perda de carga localizada (m.c.a.) no bloco operacional k, sendo estimada por:

$$\Delta Hk = 0,1 (H_o - hm) \quad (14)$$

ΔZk = desnível geométrico (m) entre a saída da estação de controle e o último gotejador da última linha lateral (no sentido do fluxo), para o bloco operacional k.

b5) Altura manométrica total para o bloco operacional k.

A altura manométrica total (HTk) para o bloco operacional k, é dada por:

$$- DHk + HTk = H_e + H_u + hm + HRP + \Delta Hk \pm \Delta Zk \quad (15)$$

para $V k = 1, \dots, 4$

onde:

H_e = perda de carga na estação de controle, em m.c.a.. Neste caso, $H_e = 11$ m.c.a.;

H_u = altura geométrica de sucção, em m.c.a.. Neste caso, $H_u = 3$ m.c.a..

b6) Soma do produto das alturas manométricas dos blocos operacionais k pelas respectivas vazões (HTT).

É dada por:

$$\sum_{k=1}^4 Q_k \cdot HTk - HTT = 0 \quad (16)$$

onde:

Q_k = vazão requerida pelo bloco operacional k, em m^3/s ($Q=0,0052 m^3/s$ para $k=1$ e 3 ; $Q=0,0040 m^3/s$ para $k=2$ e 4).

Situações analisadas

O modelo de Programação Linear desenvolvido foi resolvido para duas situações:

a. Dimensionamento hidráulico-energético: levou-se em consideração o custo da tubulação e o custo da energia consumida;

b. Dimensionamento hidráulico: levou-se em consideração apenas o custo da tubulação (E igual a 0 na eq.2).

Solução do problema de Programação Linear

Para solucionar o problema de Programação Linear caracterizado por uma matriz de 418 variáveis por 188 restrições, utilizou-se o software desenvolvido pela Eastern Software Product, Inc., denominado Linear Programming (LP-88), o qual tem como propósito resolver sistemas de equações lineares, através do algoritmo iterativo "Método Simplex Revisado".

Avaliação do modelo de Programação Linear

Para verificar a eficácia do modelo de Programação Linear utilizado, comparou-se os resultados por ele obtidos com aqueles provenientes do dimensionamento efetuado por especialista na área de Irrigação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos dimensionamentos hidráulico, hidráulico-energético e do efetuado pelo especialista, encontram-se na Tabela 7. O dimensionamento hidráulico-energético foi o mais econômico (custo total de US\$ 2.426,80), seguido pelo dimensionamento hidráulico (US\$ 2.429,64) e pelo calculado por especialista (US\$ 3.355,78). O dimensionamento efetuado pelo especialista considerou o custo da energia.

Comparando-se os valores de custo total, comprova-se que o uso do modelo de Programação Linear foi mais eficaz na minimização do valor do projeto, pois os dimensionamentos hidráulico e hidráulico-energético foram, respectivamente, US\$ 928,98 (27,7%) e US\$ 926,14 (27,6%) mais econômicos que o dimensionamento efetuado pelo especialista.

No seu dimensionamento, o especialista optou por um único diâmetro em cada linha lateral e de derivação, enquanto que o modelo de Programação Linear selecionou uma combinação de dois e até de três diâmetros para uma mesma linha.

A eficiência do uso de modelos de Programação Linear no dimensionamento de sistemas de irrigação por gotejamento tende a tornar-se evidente quando se pensa em projetos maiores, com redes hidráulicas complexas, que implica um universo numeroso de combinações de diâmetros e comprimentos. Nestes casos, o processo por tentativas realizado pelo projetista torna-se muito complexo e aumentam os riscos de erro.

A Tabela 7 apresenta os resultados que foram obtidos na resolução do modelo de Programação Linear. Comparando-se o dimensionamento hidráulico com o dimensionamento hidráulico-energético, verifica-se que houve diferenciação apenas na linha secundária 2.

Embora o custo com energia não tenha sido considerado no dimensionamento hidráulico, é possível calculá-lo multiplicando-se HTT por E, resultando no valor de US\$ 346,40. No dimensionamento hidráulico-energético, este valor foi 1,85% menor (US\$ 340,00). O custo da tubulação no dimensionamento hidráulico foi de US\$ 2.083,24, sendo US\$ 3,56 ou 0,17% menor que o valor obtido no dimensionamento hidráulico-energético (US\$ 2.086,80). Comparando com o custo total, verifica-se que o dimensionamento hidráulico-energético (US\$ 2.426,80) foi US\$ 2,84 ou 0,12% mais econômico que o dimensionamento hidráulico (US\$ 2.429,64).

Analisando-se os resultados da linha secundária 2, verifica-se que o dimensionamento hidráulico recomenda a combinação 81,6 m de DN75 com 18,4 m de DN50, enquanto o dimensionamento hidráulico-energético indica 100 m de DN75. A Tabela 8 demonstra que ao se considerar apenas o custo com tubulação (dimensionamento hidráulico), a combinação 81,6 m DN75/18,4 m DN50 apresenta menor valor (US\$ 38,81) que os 100 m de DN75 (US\$ 42,38), porém proporciona maior perda de carga. Ao se contabilizar o custo com energia nos dois dimensionamentos, verifica-se que o custo total indica os 100 m de DN75 como a opção de menor desembolso, pois a economia de US\$ 6,41 que ocorre no custo com energia ao se passar da combinação 78,6 m DN75/21,4 m DN50 para os 100 m de DN75 é maior que o correspondente aumento no custo da tubulação (US\$ 3,57).

Ainda que a diferença entre os dimensionamentos hidráulico e hidráulico-energético seja reduzida, pode-se afirmar que o custo da energia interferiu no dimensionamento do sistema, sendo recomendável a sua consideração nos cálculos.

A análise de sensibilidade revela que no dimensionamento hidráulico-energético, a tarifa de energia pode variar entre US\$ 0,02522/kWh e US\$ 0,05047/kWh, sem que a solução básica seja alterada. O dimensionamento hidráulico tem sua

TABELA 7. Resultados dos dimensionamentos hidráulico, hidráulico-energético e do especialista.

Item	Dimensionamento			
	Hidráulico	Hidráulico- -energético	Especialista	
Linha lateral	1	0,2 m DN20/ 127,3 m DN15	0,2 m DN20 127,3 m DN15	127,5 m DN20
	2	21,5 m DN15/ 76,0 m DN12	21,5 m DN15 76,0 m DN12	97,5 m DN15
	3	0,2 m DN20/ 127,3 m DN15	0,2 m DN20 127,3 m DN 15	127,5 m DN20
	4	21,5 m DN15/ 76,0 m DN12	21,5 m DN15 76,0 m DN12	97,5 m DN15
Linha de derivação	1	80,7 m DN100/ 34,8 m DN75/ 7,0 m DN50	80,7 m DN100/ 34,8 m DN75/ 7,0 m DN50	122,5 m DN100
	2	52,5 m DN100/ 51,5 m DN75/ 18,5 m DN50	52,5 m DN100/ 51,5 m DN75 18,5 m DN50	122,5 m DN100
	3	42,9 m DN75/ 79,6 m DN50	42,9 m DN75/ 79,6 m DN50	122,5 m DN75
	4	21,3 m DN75/ 101,2 m DN50	21,3 m DN75/ 101,2 m DN50	122,5 m DN75
Linha secundária	1	12,4 m DN100/ 117,6 m DN75	12,4 m DN100 117,6 m DN75	130 m DN75
	2	81,6 m DN75/ 18,4 m DN50	100 m DN75	100 DN75
Principal		150 m DN100	150 m DN100	77,5 m DN100/ 72,5 m DN75
DH1		5,275 m.c.a.	5,275 m.c.a.	5,275 m.c.a.
DH2		5,275 m.c.a.	3,830 m.c.a.	3,486 m.c.a.
DH3		7,725 m.c.a.	7,725 m.c.a.	5,913 m.c.a.
DH4		7,725 m.c.a.	6,280 m.c.a.	3,892 m.c.a.
HT1		34,000 m.c.a.	34,000 m.c.a.	34,000 m.c.a.
HT2		34,000 m.c.a.	32,555 m.c.a.	32,211 m.c.a.
HT3		34,000 m.c.a.	34,000 m.c.a.	30,167 m.c.a.
HT4		34,000 m.c.a.	32,555 m.c.a.	30,167 m.c.a.
HTT (mca.m ³ /s)		0,6256	0,6141	---

Continua...

TABELA 7. Continuação.

Item		Dimensionamento		
		Hidráulico	Hidráulico- -energético	Especialista
C	Tubulação	US\$ 2.083,24	US\$ 2.086,80	US\$ 3.027,06
U				
S	Energia	US\$ 346,40	US\$ 340,00	US\$ 328,72
T				
O	Total	US\$ 2.429,64	US\$ 2.426,80	US\$ 3.355,78

TABELA 8. Comparação entre a combinação 81,6 m DN75/18,4 m DN50 e os 100 m de DN75.

Item	Linha secundária 2	
	Hidráulico	Hidráulico energético
	81,6 m DN75/18,4 m DN50	100 m DN75
Tubulação	US\$ 38,81	US\$ 42,38
Perda carga	2,730 mca	1,286 mca
Energia	US\$ 12,10	US\$ 5,69
Custo total	US\$ 50,91	US\$ 48,07

solução ótima mantida sempre que a tarifa energética estiver abaixo de US\$ 0,02522/kWh. Como a tarifa de energia utilizada neste trabalho foi de US\$ 0,04517/kWh, a energia interferiu no dimensionamento, e o enfoque hidráulico-energético foi o mais econômico. Pode-se afirmar que o fator energia só afetará o dimensionamento caso sua tarifa seja igual ou superior a US\$ 0,02522/kWh.

CONCLUSÕES

1. O dimensionamento hidráulico-energético e o dimensionamento hidráulico foram, respectivamente, mais eficazes na minimização do custo do sistema de irrigação por gotejamento comparado com o dimensionamento efetuado pelo especialista.

2. O custo da energia interferiu na otimização do dimensionamento do sistema de irrigação.

3. Mantendo-se os demais custos constantes, o fator energia só afetará o dimensionamento do sistema caso sua tarifa seja igual ou superior a US\$ 0,02522/kWh.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Design, installation, and performance of trickle irrigation systems. In: HAHN, R.H.; ROSENRETER, E.E. *ASAE Standards 1987*. 34. ed. St. Joseph: ASAE, 1987. 614p. p.522-525. (ASAE Engineering Practice: ASAE EP405).
- BENAMI, A.; OFEN, A. *Irrigation engineering*. 2. ed. Haifa: Irrigation Engineering Scientific Publications, 1984. 257p.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. *Trickle irrigation*. Washington, 1983. (SCS National Engineering Handbook. Sec. 15. Irrigation, 7).
- KARMELI, D.; PERI, G. *Trickle irrigation design principles*. Haifa: Technion Students Publishing House, 1972. 112p. Original hebraico.
- LANZER, E.A. *Programação linear: conceitos e aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: IPEA/INPES, 1988. 270p. (Série PNPE, 4).
- ORON, G.; KARMELI, D. Solid set irrigation system design using linear programming. *Water Resources Bulletin*, Urbana, v.17, n.4, p.565-570, Aug. 1981.