

OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR E NÃO LINEAR¹

José de Arimatea de Matos

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Agrícola – Av. Aprígio Veloso, 882 – Bodocongó – Campina Grande – PB

CEP: 59.109-970 – Fone: (83) 310.1318 – e-mail: jamatos@deag.ufpb.br

Raimundo Leite Cruz

João Carlos Cury Saad

UNESP – Câmpus de Botucatu – Faculdade de Ciências Agrônomicas

Depto. de Engenharia Rural – Cx. Postal 237 Fone: (14) 6802.7207

CEP: 18.606-810 – Botucatu – SP

1 RESUMO

O propósito deste trabalho foi utilizar técnicas de pesquisa operacional no dimensionamento de um sistema de irrigação por microaspersão, a ser instalado em um pomar de goiaba de 10,08 há. Foram utilizados modelos de Programação Linear e de Programação Não-Linear visando a minimização dos custos. Para as mesmas condições hidráulicas e para uma taxa de juros anual de 6% e vida útil de 10 anos, obteve-se resultados semelhantes para os dois modelos de programação analisados. O custo total por unidade de área fornecido pelo modelo de programação linear foi inferior em apenas 0,7% em relação ao modelo de programação não linear.

UNITERMOS: Pesquisa operacional, irrigação localizada, minimização.

MATOS, J.A., CRUZ, R.L., SAAD, J.C.C. DESIGN OPTIMIZATION OF A LOCALIZED IRRIGATION SYSTEM USING LINEAR AND NONLINEAR PROGRAMMING

2 ABSTRACT

The purpose of this paper was to apply linear and nonlinear models in the design optimization of a microsprinkler irrigation system.

The crops to be irrigated is guava (*Psidium guajava* L.) and the orchard total area is 10.08 ha.

The objective function was of minimization of the total costs. For the same hydraulic conditions with an annual interest rate of 6% and cycle-life of 10 years, there was no difference between the linear and the nonlinear models outputs.

The total cost for the linear programming model was only 0,7% lower than the cost for the nonlinear programming model.

KEYWORDS: Operational research, localized irrigation, minimization.

3 INTRODUÇÃO

Os sistemas de irrigação localizada apresentam tubulação fixa, sendo que o dimensionamento hidráulico admite inúmeras combinações que atendem aos requerimentos de vazão e pressão desejados nas unidades operacionais de irrigação.

Cada configuração hidráulica possível apresenta um custo total. O projetista, ao executar o dimensionamento, raramente avalia as múltiplas possibilidades de configuração da rede hidráulica, o que resulta na seleção de uma alternativa que nem sempre é a mais econômica.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e comparar modelos de programação linear e não-linear para minimização do custo total de um sistema de irrigação por micro-aspersão a ser utilizado em um pomar de goiaba, com área de 10,08ha.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Tomou-se como base para dimensionamento uma área de 10,08 ha, com dimensões de 400m x 252m, com declividade de 1% no eixo y e 0% no eixo x, para o cultivo da goiabeira com espaçamento de 6,0m x 5,0m, utilizando um emissor por planta, do tipo microaspersor rotativo Big swivel, que segundo Matos et al. (1997), para uma pressão de 150 kPa, possui vazão de 53,80 L h⁻¹, com coeficiente de variação de fabricação de 0,024. A equação hidráulica do referido emissor é dada por:

¹ Parte da tese de doutorado do primeiro autor

$$q = 3,11 * H^{0,569} \quad (1)$$

onde:

q = vazão do emissor, em L h⁻¹;

H = carga hidráulica do emissor, em kPa.

4.1 Função Objetivo

A função objetivo é de minimização de custo, tendo como variáveis de decisão comprimentos e diâmetros das tubulações, perda de carga permissível na unidade operacional, uniformidade de emissão, tempo disponível para irrigação, número de unidades operacionais, além dos custos de: tubulação, emissores, estação de bombeamento, painel de controle, estação de controle, válvulas e da energia consumida. A minimização é dada por:

$$FO = [(CEB + CPE + CPVC + CEC + CPC + CTE + CVR) * FRC + CENE] / A \quad (2)$$

onde:

CEB = custo da estação de bombeamento, em US\$;

CPE = custo do tubo de polietileno, utilizado nas linhas laterais, em função do diâmetro, em US\$/m;

CPVC = custo da tubulação de PVC, utilizada nas linhas de derivação, secundária e principal em função do diâmetro, em US\$;

CEC = custo da estação de controle, em US\$;

CPC = custo do painel de controle, em US\$;

CTE = custo total dos emissores, em US\$;

CVR = custo das válvulas e registros, em US\$;

FRC = fator de recuperação de capital, em decimal;

CENE = custo da energia elétrica, em US\$.

Os custos de cada item pode ser obtido pelas equações seguintes.

Custo da estação de bombeamento (CEB):

$$CEB = C1 * (13,33 * QT * HM / \eta) + C2 \quad (3)$$

onde:

C1 e C2 – coeficientes de regressão do custo de bombas em função da potência;

13,33 – fator de compatibilidade entre as unidades usadas;

QT – vazão total do sistema, em m³ s⁻¹;

HM – altura manométrica total, em m.c.a.; e,

η – rendimento do conjunto motobomba, em decimal.

Custo dos tubos de polietileno utilizado nas linhas laterais (CPE):

$$CPE = C3 * NLL * \sum DL_i^{C4} * L_i \quad (4)$$

onde:

C3 e C4 – coeficientes de regressão do custo do polietileno em função do diâmetro;

NLL – número de linha lateral por unidade operacional;

DL_i – diâmetro interno da tubulação i, da linha lateral, em m.

L_i – comprimento da tubulação de diâmetro i, em m.

NUO – número de unidades operacionais;

i – índice para o diâmetro nominal do tubo (i=16,0 e 20,0 mm).

Custo dos tubos de PVC utilizados nas linhas de derivação, secundária e principal (CPVC):

$$CPVC = C5 * \left[\frac{NUO}{2} (DDA^{C6} * LDA + DDD^{C6} * LDD) + LS * DS^{C6} * L_i + LP * DP^{C6} \right]$$

(5)

onde:

C5 e C6 – coeficientes de regressão do custo de PVC em função do diâmetro ;

DDA – diâmetro interno da linha de derivação em active, em m;

LDA – comprimento da linha de derivação em active, em m;

DDD – diâmetro interno da linha de derivação em active, em m;

LDD – comprimento da linha de derivação em declive, em m;
 DS – diâmetro interno linha secundária, em m;
 LS – comprimento total da linha secundária, em m;
 DP – diâmetro interno da linha principal, em m;
 LP – comprimento total da linha principal, em m;

Custo da estação de controle (CEC):

$$CEC = C7 * QT \quad (6)$$

onde:

C7 – coeficiente de regressão do custo da estação de controle em função da vazão do sistema;
 QT – vazão total do sistema, em $m^3 s^{-1}$;

Custo do painel de controle (CPC):

$$CPC = C8 * NUO + C9 \quad (7)$$

onde:

C8 e C9 – coeficientes de regressão do custo do painel de controle em função do número de unidades operacionais;

Custo total dos emissores (CTE):

$$CTE = TE * CE \quad (8)$$

onde:

TE – total de emissores;
 CE – custo por emissor, em US\$.

Custo das válvulas e registros (CVR):

$$CVR = C10 * NUO \quad (9)$$

onde:

C7 – coeficiente de regressão do custo das válvulas e registros em do número de unidades operacionais;

Custo da energia elétrica (CENE):

$$CENE = CKWH * g * Ni * Ai * HM / (\eta * 3600000) \quad (10)$$

onde:

CKWH – tarifa de energia, em US\$ Kwh⁻¹;
 g – aceleração da gravidade = 9,81 m s⁻²;
 Ni – necessidade de irrigação, em m³ ano⁻¹;
 Ai – área irrigada, em m²;
 HM – altura manométrica, em m;
 η – rendimento da bomba, em decimal.

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

$$FRC = \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (11)$$

onde:

i – taxa de juros anual, em decimal;
 n – número de anos de vida útil do sistema de irrigação.

4.2 Restrições

a. Quanto a geometria da área

A geometria da área e a disposição do sistema em campo, estabeleceram limitações quanto ao comprimento das linhas laterais, de derivação, secundária e principal, tendo sido usado fórmulas adaptadas por Saad (1993).

b. Quanto a variação de carga hidráulica permissível na unidade operacional

O critério adotado para determinar a variação de carga hidráulica permissível na unidade operacional (laterais e derivações), foi o de permitir uma variação de vazão de 10% na unidade, ou seja, a vazão máxima na unidade deve ser 1,10 vezes a vazão mínima. A variação de perda de carga foi definida por:

$$\Delta H = (\infty^{1/x} - 1) * H_{\min} \quad (12)$$

onde:

ΔH = variação permissível de carga hidráulica na unidade operacional, em mca.

∞ = relação entre a vazão máxima e mínima;

x = expoente de descarga da equação 1;

H_{\min} = carga hidráulica mínima na unidade operacional, em mca.

Para determinar a carga hidráulica mínima foi utilizada a equação 1, dividindo o valor correspondente por 9,797 para transformar kPa em m.c.a., que é a unidade utilizada nas equações de perda de carga. A vazão mínima que proporciona esta carga é determinada através da uniformidade de emissão. A fórmula de uniformidade de emissão, segundo a norma EP405.1 da American Society of Agricultural Engineers (1995), é dada por:

$$UE = [1 - (1,27 * CVF * NE^{0,5}) * (q_{\min}/q)] * 100 \quad (13)$$

onde:

EU – uniformidade de emissão, em decimal;

CVF – coeficiente de variação de fabricação, em decimal;

NE – número de emissores por planta;

q – vazão média do emissor, em l/h.

A variação permissível de carga hidráulica na unidade operacional será dividida entre as linhas laterais e de derivação, sendo que cada uma consumirá de 30% a 70% dessa variação, mas de tal forma que a soma seja igual a 100%.

c. Quanto ao dimensionamento das linhas secundárias e principal

O critério adotado para o dimensionamento das linhas secundárias e principal foi o de limite de velocidade, sendo a máxima de 2,5m/s.

4.3 Dimensionamento das tubulações

Para a estimativa da perda de carga na tubulação foi utilizada a equação de Darcy-Weisbach (Equação Universal de Perda de Carga), que é expressa por:

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (14)$$

em que:

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

f - coeficiente de atrito;

L - comprimento da tubulação, em m;

D - diâmetro interno da tubulação, em m;

V - velocidade da água na tubulação, em m s⁻¹;

g - aceleração da gravidade = 9,81 m s⁻²;

Segundo o valor do número de Reynolds (Re), calcula-se o coeficiente de atrito:

$$\text{Se } Re \leq 2000: f = \frac{64}{Re} \quad (15)$$

De acordo com Abreu et al. (1987), pode-se utilizar a equação proposta por Blasius para estimar o valor de f com suficiente aproximação, para tubos com diâmetro interno inferior a 125mm, e $2000 \leq Re \leq 10^5$, qual seja:

$$f = 0,316 * Re^{-0,25} \quad (16)$$

Em todos os casos Re , para água a 20° C, é dado por:

$$Re = 1,26 * 10^6 * (Q/D) \quad (17)$$

Substituindo-se as equações (16) e (17), na equação (14), tem-se:

$$H_f = 7,89 * 10^{-4} * L * Q^{1,75} * D^{-4,75} \quad (18)$$

Para tubulações com múltiplas derivações (linhas laterais e de derivações) o dimensionamento foi feito através do método trecho a trecho. Para as linhas laterais calcula-se a perda de carga entre um emissor e outro, enquanto que nas linhas de derivação entre uma linha lateral e outra.

Para solucionar os modelos utilizou-se o software GAMS (“General Algebraic Modeling System”), que permite a resolução de sistemas de equação lineares e não-lineares. No modelo de programação linear, foi fornecido ao programa perdas de cargas unitárias, em função da vazão para cada diâmetro comercial. Devido a não linearização dos custos de tubulação, estes foram fornecidos ao programa como valor constante.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma uniformidade de emissão de 90%, recomendada para dimensionamento, por Keller & Karmeli (1974), a variação de pressão permissível na unidade operacional foi de 2,446 m.c.a. Os dois modelos otimizaram os custos com perdas de cargas nas linhas laterais equivalente a 35% da variação permissível, enquanto que os 65% restantes foram consumidos pelas linhas de derivação.

Com relação as linhas secundárias e principal os dois modelos selecionaram o diâmetro de 100 mm, com velocidade de 0,84m/s.

Os custos com energia corresponderam a 23,1% dos custos totais por unidade de área, enquanto que os custos fixos, corresponderam a 76,9%. Este elevado percentual do custo da energia, mostra a importância da otimização no dimensionamento de sistemas de irrigação.

Na Tabela 1, são mostrados os resultados referentes a comprimentos e diâmetros de tubulação, obtidos para cada modelo de programação. Na Tabela 2, são mostrados os custos. O custo total (mínimo) equivale a função objetivo e corresponde ao valor anual por hectare, para uma vida útil do sistema de irrigação de 10 anos, com taxa de juros anual de 6%, incluindo o custo com energia. Os demais custos são para área total.

TABELA 1 – Comprimentos e diâmetros de tubos selecionados por cada modelo de programação.

ITEM	MODELO DE PROGRAMAÇÃO			
	Não Linear		Linear	
	L (m)	ϕ (mm)	L (m)	ϕ (mm)
Linha Lateral	32,5	20	31,2	20
	15	16	16,3	16
Linha derivação em aclave	81,3	100	87,0	100
	41,7	75	36,0	75
Linha derivação em declive	56,2	75	57,0	75
	66,7	50	66,0	50
Linha secundária	150,0	100	150,0	100
Linha principal	156,0	100	156,0	100

L – comprimento do diâmetro selecionado; e, ϕ – diâmetro nominal selecionado.

TABELA 2 – Custos em US\$, de cada item dos modelos de programação analisado.

ITEM	Não Linear	Linear
Polietileno	4.368,85	4.424,14
PVC	2.656,59	2.448,48
Emissores	5.376,00	5.376,00
Válvulas e registros	2.040,00	2.040,00
Estação controle	2.358,84	2.358,84
Painel de controle	253,55	353,47
Estação de bombeamento	466,06	480,82
Custo total de investimento	17.619,89	17.481,75
Custos Fixos	2.394,02	2.375,25
Energia	71,51	71,08
Total (Função Objetivo)	309,02	306,72

O consumo de energia e o custo total, correspondem ao custo anual por unidade de área.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados finais apresentados e as condições em que foram analisados, conclui-se que pode ser usado qualquer um dos modelos de programação, tendo em vista a semelhança dos resultados.

As pequenas divergências de alguns resultados podem ter sido ocasionados por aproximações nos cálculos. Na programação linear, as perdas de carga foram calculadas a partir da perda de carga unitária fornecida ao programa e os custos das tubulações foram fornecidos como valor constante, não havendo necessidade de cálculo através de equações, como no caso do modelo de programação não-linear.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.M.H. et al. *El riego localizado*. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, 1987. 317p.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. *Standars engineering practices data: EP405.1 design and instalation of microirrigation systems*. St. Joseph, 1995. p.720-3.
- KELLER, J., KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.17, n.4, p.678-84, 1974.
- MATOS, J. A., CRUZ, R. L., SAAD, J. C. C. Performance hidráulica do microaspersor rotativo Big swivel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande. *Anais...* Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. (CD Rom).
- SAAD, J. C. C. *Otimização de sistemas de irrigação localizada utilizando programação não-linear*. Piracicaba, 1993. 115p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo.