

Efeito da Variação na Tarifação Pelo Uso da Água no Dimensionamento Otimizado de Rede de Irrigação Localizada Usando Algoritmos Genéticos

Francisco F. N. Marcuzzo

Serviço Geológico do Brasil, Gerência de Hidrologia - CPRM/GO
fmarcuzzo@gmail.com

Edson Wendland

Departamento de Hidráulica e Saneamento - EESC – USP – São Carlos/SP
ew@sc.usp.br

Recebido: 02/12/08 – revisado: 14/04/10 – aceito: 12/07/10

RESUMO

O custo de instalação de redes de irrigação localizada, que são as mais eficientes quanto à utilização da água, tendem a ser elevado, inibindo a sua utilização por parte da maioria dos produtores agrícolas. O presente trabalho teve como objetivo otimizar os custos de instalação e operação de redes de distribuição de água para irrigação localizada, frente a diferentes tarifações do insumo água. Foi desenvolvido um código em MatLab, considerando todas as perdas de energia distribuídas e localizadas entre o início da rede e o conjunto motobomba para uma rede de irrigação localizada de microaspersão. As variáveis de decisão para otimização, com auxílio de algoritmos genéticos, foram os diâmetros de cada trecho da rede, pré-definidos por: dois para linhas laterais, quatro para linhas de derivação, quatro para linhas secundárias e um para linha principal e de sucção. Os resultados mostram que os custos da rede ficam entre 1816,42 e 2312,13 R\$.ha⁻¹.ano⁻¹ para tarifas de uso da água que variam entre 0,01 R\$. (m³)⁻¹ e 0,10 R\$. (m³)⁻¹. Com os resultados obtidos neste estudo conclui-se que uma grande variação na tarifação pelo uso da água resulta em um acréscimo substancial nos custos de redes de irrigação localizada, podendo inibir a sua utilização.

Palavras-chave: tarifa da água, irrigação localizada, pesquisa operacional, otimização matemática, algoritmos genéticos.

INTRODUÇÃO

A competição acirrada pela água, entre vários setores da sociedade, atrelada aos movimentos ecológicos que buscam a conscientização da população para preservação do meio ambiente, as áreas irrigadas deverão ser conduzidas com o planejamento adequado de seu uso sobre o potencial hídrico da região. Assim, busca-se uma maior eficiência e resultados, reduzindo os impactos ambientais no que se refere à disponibilidade e qualidade de água para suas múltiplas finalidades (Silva e Pruski, 1997), entre elas a irrigação.

Aproximadamente 70% dos recursos hídricos disponíveis atualmente são destinados à irrigação, contra apenas 20% para a indústria e menos de 10% para abastecimento da população (higiene e consumo direto). Nos países desenvolvidos, o percentual de uso da água para irrigação é ainda maior, chegando próximo dos 80%. No entanto, mesmo lá, apenas 1% das áreas irrigadas adota o método de

gotejamento, um dos mais eficientes na relação alimento por litro de água utilizada, uma vez que reduz a possibilidade de evaporação (Robert, 2001).

Apesar de ser o setor que, na média nacional, mais consome água, a agricultura de irrigação tende a crescer algo em torno de 15% a 20% nos próximos 30 anos, atendendo à demanda crescente por mais alimentos, de uma população projetada em 8 bilhões de pessoas, além de responder à demanda econômica por produtos agrícolas de maior valor agregado (Allen *et al.*, 1998; Agência Nacional de Águas, 2007b; Doorenbos e Pruitt, 1977).

Em seu artigo sobre crise e negócio com água, Malvezzi (2004) mostra um novo panorama do conceito de exportar água afirmando que a exportação de grãos, significa, em última instância, exportação de água. Produzir grãos em território alheio significa poupar água no próprio território. Técnicas pesadas como pivôs centrais e irrigação por sulco consomem ainda mais água que a microaspersão. Não existem recursos hídricos para que esse modelo de produção continue indefinidamente.

Tem-se gerado um excepcional destaque à racionalização do uso da água, propondo a utilização e o desenvolvimento sustentável devido às condições de escassez em seu uso múltiplo. O direito de uso da água deixou de ser livre, ficando passível a cobrança por sua utilização. Tanto na concessão, como na cobrança pelo uso da água, o instrumento utilizado é a Legislação de Outorgas de Direito de Uso das Águas. Os pedidos de outorga são em sua maioria para irrigação, abastecimento público, lançamentos de efluentes de esgotamento sanitário, uso industrial e obras hidráulicas (Agência Nacional de Águas, 1997a). Destaca-se, neste ponto, o cuidado especial dispensado para com a outorga e a cobrança pelo uso da água na irrigação, devido ao grande volume de água consumida no funcionamento do sistema.

Definir valores para a cobrança pelo uso da água é um dos fatores limitantes de projetos agrícolas as quais dependem do retorno econômico do empreendimento. No caso da Bacia do Paraíba do Sul, que fica na fronteira entre os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, a limitação da cobrança pela capacidade de pagamento surgiu de forma explícita. A cobrança naquela bacia, aprovada em 2002 e iniciada em 2003, abrange todos os setores usuários, inclusive o agrícola. A representação do setor agropecuário exigiu que a cobrança não provocasse acréscimos superiores a 0,5% nos seus custos de produção, alegando que não poderiam arcar com aumentos superiores, face à baixa rentabilidade da produção agrícola. Por esta razão o setor agropecuário pagou 40 vezes menos que o estipulado para o saneamento e a indústria. No primeiro ano de cobrança, o setor agrícola contribuiu com apenas R\$ 10 mil (valor pago por 35 usuários, de um total de 700 usuários cadastrados), de uma arrecadação total de R\$ 8 milhões (Kelman e Ramos, 2005).

Ressalta-se que a cobrança da água, prevista pela Lei Federal número 9433/97 (artigo 19), estabelece a água como um bem econômico sujeito à cobrança, e que os recursos financeiros arrecadados devem ser utilizados em financiamento de programas e intervenções para a recuperação ambiental da bacia hidrográfica onde foram gerados (Balsalobre *et al.*, 2003).

Em seu trabalho sobre o uso do sensoriamento remoto na demanda de água pra irrigação, Braga e Oliveira (2005), relatam que a implementação de vários projetos de irrigação sem a prévia quantificação do volume de água possível de ser utilizada, em algumas bacias como a do Guairá (São Paulo) e Rio Verde Grande (Minas Gerais), está gerando uma escassez de água à jusante para a ma-

nutenção de todo o sistema de irrigação. Tal situação levou em alguns momentos à total falta de água para o consumo humano, de animais e da fauna silvestre, causando com isso atritos entre os envolvidos e sérios impactos ambientais nas citadas regiões.

Carrijo e Reis (2006) citam que técnicas de otimização vêm sendo tradicionalmente usadas no dimensionamento de unidades de um sistema de distribuição de água, objetivando menores custos. Os mesmos autores também discorrem sobre a interface entre o modelo de simulação hidráulica e o modelo de otimização. Tal interface deve ser cuidadosamente elaborada, no sentido de dar melhor transparência ao modelo, de forma a facilitar o seu uso além de permitir a análise de problemas de maior complexidade, quando envolve múltiplos objetivos.

Georgiou *et al.*, (2006), trabalhando com pesquisa operacional no gerenciamento de reservatórios para irrigação na Grécia, concluíram que os resultados obtidos sugerem que a aproximação proposta da otimização pode ser usada eficazmente como uma ferramenta para a irrigação e o planejamento global ótimo da área da colheita.

Wardlaw e Bhaktikul (2001), em um trabalho de alocação de água para irrigação usando pesquisa operacional na Escócia, escrevem que a irrigação, por ser o maior consumidor de água doce do mundo, deve ter sua gerência melhorada, com o uso da pesquisa operacional. Os recursos hídricos devem ser usados a seu benefício máximo e de maneira equilibrada. A gerência da alocação de água em grandes sistemas de irrigação é importante, já que mesmo com uma melhoria pequena na operação pode-se conduzir a benefícios significativos.

Na otimização matemática de redes de irrigação, o problema da seleção do melhor conjunto de diâmetros tem sido discutido há muito tempo por engenheiros que trabalham com dimensionamento de sistemas. As técnicas de otimização clássicas na pesquisa operacional, que têm sido propostas até agora, são as seguintes: programação linear, não-linear e dinâmica. Pesquisas matemáticas, usando os métodos citados, são complexas e por esta razão a solução numérica resulta em inúmeros cálculos, especialmente no caso de redes de distribuição de água com muitas derivações (Theocharis *et al.*, 2006).

A escolha de tubulação com diâmetros maiores resulta em menor perda de carga e, conseqüentemente, requer menos energia para o bombeamento. Por outro lado, tubos de maior diâmetro custam mais caro, o que aumenta os custos fixos (Merkley, 1994). O ponto central é encontrar o custo total

mínimo, seguindo as restrições dos problemas hidráulico e econômico.

Bhave (1979) desenvolveu um método iterativo que seleciona o conjunto de diâmetros dos trechos centrado os diâmetros disponíveis consecutivos na solução da iteração anterior. Guimarães Junior (1998) desenvolveu uma metodologia geral de otimização do projeto hidráulico de sistemas de irrigação localizada, visando a formulação de um programa genérico que atenda as condições de projeto mais diversificadas possíveis.

Blanco *et al.* (2004) pesquisando sobre a viabilidade econômica da irrigação da manga para o Estado de São Paulo, observaram que o custo da compra de equipamentos coligado à sua vida útil foi o fator de maior sensibilidade na análise de viabilidade do empreendimento e que a cobrança pela água não inviabilizou a implantação do sistema de irrigação.

Marques e Coelho (2003) que analisaram a viabilidade da irrigação da pupunheira no oeste do Estado de São Paulo, variando o custo da água, a vida útil e o tipo de motobomba; concluíram que para todas as simulações a irrigação foi viável.

Verifica-se, com o exposto, que a otimização matemática é uma ferramenta útil para ser usada na solução de problemas simples e complexos em irrigação, permitindo a localização do melhor resultado matemático frente a inúmeras possibilidades. O dimensionamento de um sistema de irrigação pode ser abordado por algoritmos genéticos, por exemplo, com o objetivo de se buscar uma melhor localização de cultura, em uma área onde há conflitos de interesse sobre os recursos hídricos.

Mognon (2004), em sua dissertação com algoritmos genéticos (AGs), cita que os AGs são métodos computacionais de otimização fundamentados nos princípios e conceitos da seleção natural e evolução. Os AGs são caracterizados como otimizadores estocásticos, pois utilizam operadores probabilísticos concebidos a partir de metáforas biológicas. A sistemática dos AGs consiste primeiramente na geração aleatória de uma população de possíveis soluções através de um processo iterativo de acordo com operadores genéticos. Desta forma, há uma tendência de que, na média, os indivíduos representem soluções cada vez melhores a medida que o processo evolutivo continua, até que um determinado critério de convergência seja atingido. São particularmente efetivos quando o objetivo é obter um máximo global aproximado para funções multimodais e que apresentam domínios multidimensionais.

O presente trabalho teve como objetivo otimizar, frente a diferentes tarifações do insumo água, os custos de instalação e operação de redes de distribuição de água para irrigação localizada. Ao final analisou-se a influência da variação na tarifação da água nos custos com equipamentos e energia elétrica da rede de irrigação.

MATERIAL E MÉTODOS

Algoritmos Genéticos

Descrição resumida para o problema

Os Algoritmos Genéticos (AGs) foram inseridos na Pesquisa Operacional no final de 1976 por John Holland e seus cooperadores; mas seu pleno desenvolvimento, só ocorreu a partir da década de 80, através do trabalho de Goldberg, treze anos mais tarde (Goldberg, 1989). Os AGs fundamentam-se na geração de uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos (no caso, redes hidráulicas) que podem ser possíveis soluções para um problema. Durante o procedimento de evolução (da minimização dos custos), esta população (de redes hidráulicas) é avaliada, sendo que para cada indivíduo (rede hidráulica) é dado um índice, refletindo sua capacidade de adaptação a um determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados (redes hidráulicas de menor custo) é mantida, enquanto os outros são rejeitados. Os membros selecionados (redes hidráulicas de menor custo) podem sofrer modificações em suas características fundamentais (diâmetro de tubulação) através de mutações e cruzamentos genéticos (entre as redes, respeitando-se as restrições estabelecidas de dimensionamento hidráulico), gerando descendentes para a próxima geração. Este processo de reprodução (de redes hidráulicas) é repetido até que um montante de soluções aceitáveis seja achado (Beasley *et al.*, 1993).

Leiaute da rede hidráulica ramificada em campo

A área modelo a ser irrigada consiste em 78,72 ha (787.200 m²), tendo 1600 metros de comprimento e 492 metros de largura. Considerando uma faixa mínima de mata ciliar de 57 metros das margens do rio mais uma faixa de 7,5 metros destinada à movimentação de implementos e máquinas, optou-se por definir a área irrigável a partir de 64,5 metros distante do curso de água onde se fará a captação direta para o bombeamento. A área útil para irrigação será de 68,40 ha (684.000 m²). A de-

clividade inicial adotada para o terreno foi de 0%. A Figura 1 mostra o esboço da rede de irrigação ramificada.

A rede hidráulica do sistema de irrigação localizada estudado neste trabalho consiste de: emissores (microaspersores), linhas laterais (nas quais os emissores ficam acoplados), linhas de derivação (nas quais as linhas laterais ficam acopladas), linhas secundárias (nas quais as linhas de derivação ficam acopladas), linha principal ou adutora (nas quais as linhas secundárias ficam acopladas), tubulação de sucção (a montante do conjunto moto-bomba), válvulas, registros, filtros (de areia e disco) e painel de controle.

Problema a ser otimizado – Função de Aptidão

O método de otimização da rede hidráulica por algoritmos genéticos visa à minimização do custo total do sistema, tanto de custos fixos (implantação do sistema) como variáveis (operação do sistema – energia elétrica e água), segundo os critérios que podem ser pré-estabelecidos pelo projetista. A Função de Aptidão, que avalia o objetivo (resultado) principal do problema a ser otimizado consiste em:

$$fa = \frac{(CEQ \cdot FRC) + CTE + CAGT}{AUI} \quad (1)$$

em que: fa – função de aptidão - custo total com a rede de irrigação ($R\$.ano^1 \cdot ha^{-1}$); CEQ – custo total com os equipamentos de irrigação ($R\%$); CTE – custo total com energia elétrica ($R\$.ano^1$); $CATG$ – custo total com água ($R\$.ano^1$); AUI – área útil irrigada (ha).

Com a utilização dos juros anuais, o Fator de Recuperação de Capital (FRC) fornece um coeficiente que permite, a partir do valor do investimento, calcular o custo fixo anual referente a este investimento. A função para o cálculo do FRC leva em conta a vida útil do equipamento e a taxa de juros ao ano:

$$FRC = \frac{J(J+1)^V}{(J+1)^V - 1} \quad (2)$$

em que: FRC - fator de recuperação de capital (decimal); J - taxa anual de juros (decimal); V - vida útil dos equipamentos (anos).

Variáveis de decisão

A metodologia de otimização por algoritmos genéticos utilizado neste estudo é baseado na variação de elementos ligados à Função de Aptidão, de forma a obter o menor custo de instalação e operação do sistema de irrigação.

As variáveis de decisão para a escolha do melhor sistema são os comprimentos das tubulações em cada trecho, com os respectivos diâmetros disponíveis:

- linha lateral: comprimento dos trechos L1 (primeiro trecho da linha lateral) e L2 (segundo trecho da linha lateral), com dois diâmetros diferentes;
- linha de derivação: comprimento dos trechos D1 (primeiro trecho da linha de derivação), D2 (segundo trecho da linha de derivação), D3 (terceiro trecho da linha de derivação) e D4 (quarto trecho da linha de derivação), com quatro diâmetros diferentes;
- linha secundária: comprimento dos trechos S1 (primeiro trecho da linha de secundária), S2 (segundo trecho da linha de secundária), S3 (terceiro trecho da linha de secundária) e S4 (quarto trecho da linha de secundária), com quatro diâmetros diferentes.

Restrições hidráulicas

As restrições hidráulicas para o dimensionamento da rede de irrigação serão descritas a seguir:

- velocidades máximas nos trechos da tubulação:
 - linha lateral: $VLL < 1,5 \text{ m.s}^{-1}$;
 - linha de derivação: $VLD < 2,5 \text{ m.s}^{-1}$;
 - linha secundária: $VLS < 4,0 \text{ m.s}^{-1}$;

uniformidade estatística (UEST) de distribuição de vazão dos microaspersores
 $UEST \geq 90\%$;

$$UEST = 100 \left(1 - \frac{\sigma}{q_{med}} \right) \quad (3)$$

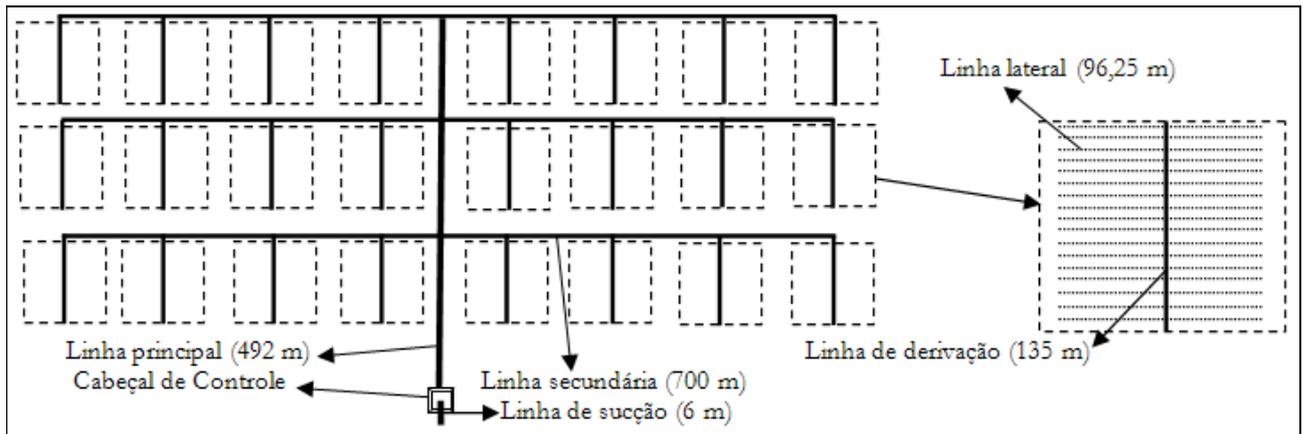


Figura 1 - Esboço da rede de irrigação por microaspersão com os respectivos comprimentos de cada tipo de tubulação.

em que: UEST – uniformidade estatística (%); σ – desvio padrão da vazão nos microaspersores (variável aleatória); q_{med} – média das vazões dos microaspersores ($L.h^{-1}$).

- faixa de pressão (h_e) no microaspersor (segundo o fabricante):
 - $10\text{ mca} \leq h_e \leq 20\text{ mca}$;
- variação máxima de perda de carga permitida:
 - linha lateral: PCLL = $0,55.DHV$;
 - linha de derivação: PCLD = $0,45.DHV$;

A variação de pressão na unidade operacional (DHV) é definida como sendo o somatório da variação de pressão na linha lateral e na linha de derivação. Saad e Frizzone (1996) adotaram faixas de tolerância para a variação de pressão de 60 e 40% para cada linha. Karmeli e Peri (1972) propuseram que a distribuição mais econômica seria de 55% da perda admissível para as linhas laterais e 45% para a linha de derivação. Esses valores foram adotados neste trabalho.

As restrições implementadas foram lineares e não-lineares. O problema deste mínimo custo de rede de irrigação é tipicamente não-linear, tanto no que diz respeito à função objetivo quanto à restrições hidráulicas.

A ferramenta computacional utilizada foi o programa MatLab, MATrix LABoratory (Leonard e Levine, 1995).

Tarifação da energia elétrica

Segundo a resolução da ANEEL DOU nº 313 de 07/04/2006, que é seguida pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), este projeto de irrigação enquadra-se no Grupo B - categoria do setor Rural, sendo paga a tarifa de consumo de $0,1768\text{ R}\$.kW^1$.

Segundo a CPFL, entre os horários de 21h30 e 06h00 ("janela" de aproveitamento de 8,5 horas) há um desconto de 60% sobre a tarifa do setor rural, o que resulta em uma tarifa de $0,0707\text{ R}\$.kW^1$ para esta faixa de horário.

Por heurística, pode-se ajustar o sistema para funcionar 4,25 horas, trabalhando em dois turnos por dia gerando economia em tubulação e potência requerida. Outra forma seria trabalhar com um turno de 8,5 horas. O ajuste pode ser feito aumentando a vazão dos emissores de acordo com a curva de vazão pela pressão fornecida pelo fabricante, ou simplesmente escolhendo outro emissor.

Volume de água a ser aplicado

Para determinar o volume de água a ser aplicado por ano, executou-se uma análise de regressão potencial (Frizzone, 1993) para os dados publicados por Bertonha (1997) que estudou a produtividade da cultura da laranja submetida a diferentes lâminas de água (Figura 2).

Os dados de Bertonha (1997) foram ajustados pela equação potencial:

$$FPPL = -0,00000(VAP)^2 + 0,0331VAP + 111,52 \quad (4)$$

em que: FPPL – produtividade por planta de laranja ($\text{kg.planta}^{-1}.\text{ano}^{-1}$); VAP – volume de água aplicado ($\text{m}^3.\text{planta}^{-1}.\text{ano}^{-1}$).

Executando uma maximização não-linear da equação 4, obteve-se o volume de água aplicado ótimo, usado neste estudo, de $8.275 \text{ m}^3.\text{planta}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ que retorna a maior produtividade possível ($248,47 \text{ kg.planta}^{-1}.\text{ano}^{-1}$).

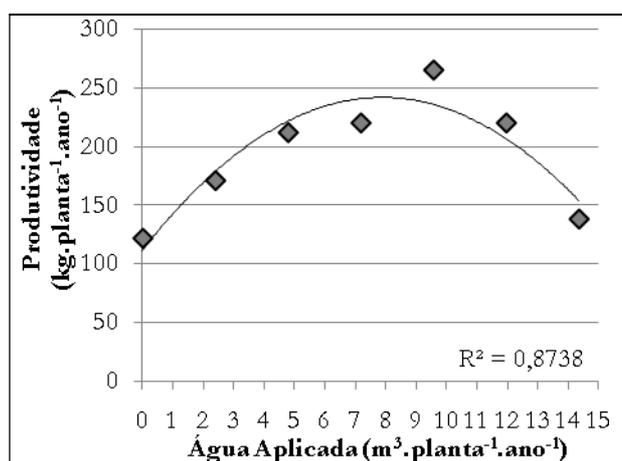


Figura 2 - Curva e equação potencial de resposta a produtividade da planta segundo o volume de água aplicado.

Tarifação da água e análise de sensibilidade proposta

O pagamento pelo uso da água na irrigação é uma prática já em uso por alguns comitês de bacia no Estado de São Paulo e iminente em outros Estados do Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2007a).

Para tornar o modelo de otimização de rede de irrigação localizada mais adequado às necessidades atuais, foi adotado a tarifa pelo uso da água como parâmetro de entrada para o custo operacional total do sistema.

Visando uma análise comparativa e crítica do peso da tarifação pelo uso da água nos custos totais de um sistema de irrigação localizada, adotou-se uma faixa para análise de sensibilidade variando de 0,01 a 0,10 R\$. $(\text{m}^3)^{-1}$.

Dados gerais de entrada do modelo de otimização

A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais dados de entrada utilizados no modelo computacional de otimização de rede de irrigação localizada.

Tabela 1 - Resumo dos principais parâmetros de entrada do código da função de aptidão.

Descrição do Parâmetro	Especificação
Laranja Pêra	Fruta
Cambissolo	Solo
Uniformidade de Emissão	92%
Espaçamento entre linhas	6,0 m
Espaçamento entre plantas	3,5 m
Precipitação efetiva avaliada	0 mm
Capacidade de Campo	24%
Ponto de Murcha Permanente	10%
Densidade aparente do solo	1,4 cm^3
Varição da umidade do solo	0%
Fator de disponibilidade de água no solo	50%
Viscosidade cinemática da água a 20°C	$1,004.10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
Profundidade efetiva do sistema radicular	1,0 m
Evapotranspiração de referência	3,0 $\text{mm}.\text{dia}^{-1}$
Coefficiente de cultura para cálculo da evapotranspiração	0,96
Número de subunidades do sistema	24
Tempo máximo de funcionamento da motobomba por dia	8,5 h
Número de subunidades operacionais irrigadas simultaneamente	4
Tempo de irrigação por conjunto de 4 unidades	4,25 h
Turno de rega escolhido	3
Volume de água aplicado por planta	$8,275 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O custo total da água, é calculado a partir da demanda de água da cultura devido à evapotranspiração, dias irrigados por mês, número de meses de operação do sistema por ano e o preço da água (R. $(\text{m}^3)^{-1}$$).

Analisa-se a eficiência da convergência da função de aptidão e as variáveis otimizadas frente à otimização por algoritmos genéticos e, em seguida, executa-se uma análise das variáveis otimizadas e dos custos das redes de irrigação.

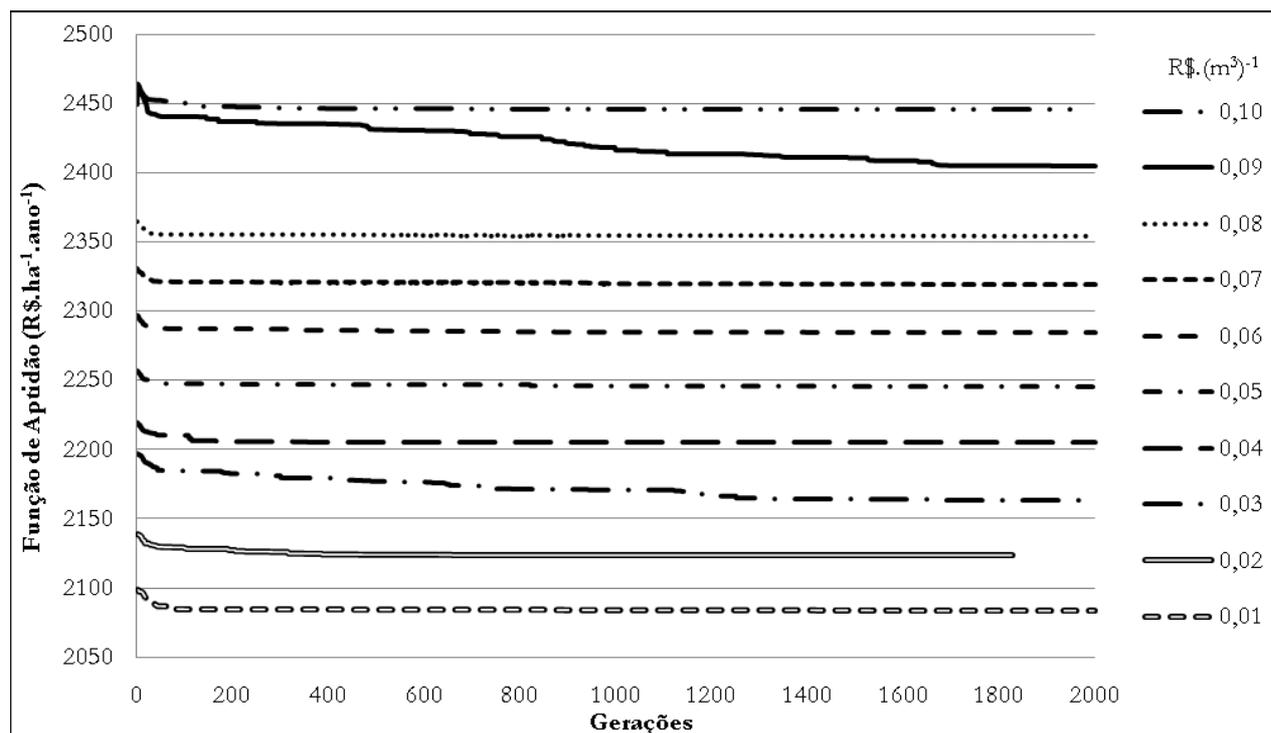


Figura 3 - Variação na convergência da função de aptidão para uma variação na tarifação da água entre 0,01 e 0,10 R\$.m³⁻¹.

Variação na Convergência da Função de Aptidão

A variação na convergência da função de aptidão, apresentada na Figura 3, mostra que, para a maioria das tarifas estudadas, o processo de otimização converge para o valor ótimo nas primeiras 200 gerações. Verifica-se que para as tarifas de 0,03 e 0,09 R\$.m³⁻¹ as primeiras populações de redes produziram progênies que resultaram em valores da função de aptidão muito longe do valor ótimo global, o que desfavoreceu uma rápida convergência. Verifica-se que para a tarifa de água de 0,09 R\$.m³⁻¹, obteve-se a maior amplitude entre a primeira e a última geração (44,22 R\$.ha⁻¹.ano⁻¹).

Verifica-se, também, que a convergência mais rápida, considerando todas as 2000 gerações, ocorreu com a tarifa do insumo água a 0,02 R\$.m³⁻¹. Neste caso 99,87% da convergência foi obtida até a geração de número 1000, restando uma evolução de apenas 0,13% para os valores produzidos pela função de aptidão para as 1000 gerações seguintes.

Análise das variáveis otimizadas e dos custos das redes de irrigação

A Tabela 2 mostra as variáveis da rede otimizadas para variação da tarifação da água entre 0,01 e 0,10 R\$.m³⁻¹. Houve pequenas modificações nos diferentes trechos de tubulação em cada linha da rede frente à variação da tarifação da água. Contudo, para a tarifação de 0,07 e 0,08 R\$.m³⁻¹ houve uma significativa modificação nos comprimentos do terceiro e quarto trecho da linha de derivação em comparação com as demais tarifas de água testadas. Este fenômeno resultou em redução dos custos com equipamentos (Tabela 3) tendo em vista que houve um aumento do quarto trecho da tubulação (menor diâmetro) e redução do terceiro trecho da tubulação (maior diâmetro). Em consequência observa-se uma elevação no custo com a energia elétrica para a tarifa de 0,08 R\$.m³⁻¹ devido ao aumento da perda de carga.

O aumento da tarifação pelo insumo água de 0,01 para 0,10 R\$.m³⁻¹ (1000%) resulta em um acréscimo de 8,4 vezes (de 2,07 para 17,42%) na participação do custo da água no custo total do sistema de irrigação.

Tabela 2 - Variáveis otimizadas para tarifação da água entre 0,01 e 0,10 R\$. (m³)⁻¹.

Tarifa de Água R\$. (m ³) ⁻¹	Variáveis Otimizadas									
	L ₁	L ₂	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
0,01	47,25	49	6	59	67	3	108	192	200	200
0,02	47,25	49	6	59	67	3	110	190	200	200
0,03	47,25	49	6	59	68	2	108	192	200	200
0,04	47,25	49	6	59	69	1	110	190	200	200
0,05	47,25	49	6	59	68	2	108	192	200	200
0,06	47,25	49	6	59	67	3	109	191	200	200
0,07	47,25	49	6	59	61	9	108	192	200	200
0,08	47,25	49	6	59	55	15	106	194	200	200
0,09	47,25	49	6	59	67	3	106	194	200	200
0,10	47,25	49	6	59	67	3	112	188	200	200

- L₁ – Primeiro trecho da linha lateral.
 L₂ - Segundo trecho da linha lateral.
 D₁ – Primeiro trecho da linha de derivação.
 D₂ – Segundo trecho da linha de derivação.
 D₃ – Terceiro trecho da linha de derivação.
 D₄ – Quarto trecho da linha de derivação.
 S₁ – Primeiro trecho da linha secundária.
 S₂ – Segundo trecho da linha secundária.
 S₃ – Terceiro trecho da linha secundária.
 S₄ – Quarto trecho da linha secundária.

Tabela 3 - Variação no custo total do sistema de irrigação, equipamentos, energia elétrica e água com variação na tarifação da água entre 0,01 e 0,10 R\$. (m³)⁻¹.

Tarifa de Água R\$. (m ³) ⁻¹	Custos por Hectare, Anualizados, do Sistema de Irrigação			
	Equipamentos	Energia Elétrica	Água	Total
0,01	1571,20	337,33	40,28	1948,81
0,02	1571,80	337,08	80,56	1989,44
0,03	1572,00	337,33	120,84	2030,17
0,04	1573,40	337,08	161,12	2071,60
0,05	1572,00	337,33	201,42	2110,75
0,06	1571,50	337,21	241,68	2150,39
0,07	1566,40	337,38	281,96	2185,74
0,08	1562,00	343,89	322,24	2228,13
0,09	1570,60	337,58	362,52	2270,70
0,10	1572,40	336,84	402,80	2312,04

A variação na tarifação de água de 0,01 para 0,10 R\$. (m³)⁻¹ provoca um aumento de 15,71% no

custo total do sistema de irrigação (de 1948,81 para 2312,04 R\$.ha¹.ano⁻¹).

Observa-se que para as tarifas de água de 0,09 e 0,10 R\$. (m³)⁻¹ e energia elétrica de 0,1768 R\$.kW¹, a participação do custo da água é maior que da energia elétrica no custo total da rede de irrigação localizada.

Na Tabela 4 verifica-se que quanto maior a tarifação da água, menor é a participação percentual dos custos com equipamentos e energia elétrica no custo total do sistema de irrigação.

Tabela 4 - Variação percentual no custo total do sistema de irrigação, equipamentos, energia elétrica e água com a ampla variação na tarifação da água.

Tarifa de Água R\$. (m ³) ⁻¹	Porcentagem dos Custos por Hectare, Anualizados, do Sistema de Irrigação			
	Equipamentos	Energia Elétrica	Água	Total
0,01	80,62	17,31	2,07	100
0,02	79,01	16,94	4,05	100
0,03	77,43	16,62	5,95	100
0,04	75,95	16,27	7,78	100
0,05	74,48	15,98	9,54	100
0,06	73,08	15,68	11,24	100
0,07	71,66	15,44	12,90	100
0,08	70,10	15,43	14,46	100
0,09	69,17	14,87	15,97	100
0,10	68,01	14,57	17,42	100

CONCLUSÕES

Neste trabalho, estudou-se a variação da tarifação do uso da água utilizando um modelo de dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água para irrigação localizada.

Implementaram-se no código de otimização por algoritmos genéticos, cada perda localizada na rede, além de uma variação vetorial dos comprimentos de cada trecho, para cada diâmetro disponível. Tais implementações refinaram os resultados obtidos por um lado, mas dificultaram a implementação do código pelo outro.

O algoritmo genético utilizado nesta otimização resultou em uma resolução satisfatória das simulações da variação na tarifação pelo uso da água, sem tornar necessária a introdução de simplifi-

cações na formulação do código da função de aptidão.

Observou-se um grande acréscimo na participação do custo da água no custo total da rede de irrigação, de 2,07% a 17,42%, quando se aumenta a tarifação da água de 0,01 para 0,10 R\$. $(m^3)^{-1}$. Observou-se também que esta grande variação na tarifação de água resulta num aumento de 15,71% no custo total do sistema de irrigação, anualizado por hectare, o que possivelmente pode influenciar negativamente na decisão da adoção ou não da tecnologia de irrigação por parte do produtor agrícola.

Em decorrência dos resultados deste trabalho, evidencia-se a necessidade de mais estudos simulando a cobrança pelo uso da água no dimensionamento de diferentes tipos de redes de distribuição de água para irrigação com diferentes culturas e diferentes demandas de água. Com tais estudos poder-se-á analisar com mais informação o impacto da tarifação da água no dimensionamento dos diferentes tipos de sistemas de irrigação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (PROEX) e ao CNPq - Brasil (processos 141159/2006-5 e 504892/2008-8) pelo auxílio financeiro que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Brasília: ANA, 1997. Informativo eletrônico: *Outorga e fiscalização dos recursos hídricos no Brasil*. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/GestaoRecHidricos/OutorgaFiscalizacao/default.asp>. Acesso em: 8 jan. 2007.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Brasília: ANA, 2005. Informativo eletrônico: *O uso múltiplos, conflitos de interesse e a utilização da água no Brasil*. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/GestaoRecHidricos/UsosMultiplos/default.asp>. Acesso em: 31 jan. 2007.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BALSALOBRE, M.A.A.; SANTOS, P.M.; MAYA, F.L.A.; PENATI, M.A.; CORSI, M. Pastagens irrigadas. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGEM, 20., Piracicaba, 2003. *Produção animal em pastagens: situação atual e perspectivas*. Piracicaba: FEALQ, 2003. p.265-296.
- BEASLEY, D.; BULL, D.; MARTIN, R. An overview of genetic algorithms: Part 1, fundamentals, *Technical report*, Inter-University Committee on Computing. 1993.
- BERTONHA, A. *Funções de resposta da laranja pêra a irrigação complementar e nitrogênio*. 1997. 113 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1997.
- BHAVE, R. *Selecting pipe sizes in network optimization by LP*. Journal of Hydraulics Division, ASCE. August, 1979.
- BLANCO, F.F.; MACHADO, C.C; COELHO, R.D.; FOLEGATTI, M.V. Viabilidade econômica da irrigação da manga para o Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, n.1, p.153-159, 2004.
- BRAGA, A.L.; OLIVEIRA, J.C. Identificação e quantificação de áreas irrigadas por pivô central utilizando imagens CCD/CBERS. In: *Anais do XII simpósio brasileiro de sensoriamento remoto*, Goiânia, 16-21 abril 2005, INPE, p. 849-856.
- CARRIJO, I.B.; REIS, L.F.R. Extração de estratégias operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água utilizando algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina – aplicação ao sistema de macro-distribuição de água de Goiânia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre, v. 11, n. 2 abr/jun 2006, p. 161-172.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. *Crop water requirements*. Rome: FAO, 1977. 144p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).
- FRIZZONE, J.A. *Funções de resposta das culturas à irrigação*. Piracicaba: Departamento de Engenharia Rural - ESAL/USP, 1993 (Didática).
- GEORGIU, P.E.; PAPAMICHAIL, D.M.; VOUGIOUKAS, S.G. Optimal irrigation reservoir operation and simultaneous multi-crop cultivation area selection using simulated annealing. *Irrigation and Drainage*. v. 55, n. 2, 2006, p. 129-144.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, ISBN: 0201157675, Addison-Wesley Pub. Co., 1989.
- GUIMARÃES JUNIOR, J.A. *Projeto otimizado de sistemas de irrigação localizada: nova concepção*. 1998. 177 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.
- KARMELI, D. PERI, G. *Trickle irrigation design principles*. Haifa: The Technion Students Publishing House, 1972.
- KELMAN, J.; RAMOS, M. Custo, valor e preço da água utilizada na agricultura. *REGA: Revista de Gestão de Água*

- na América Latina. Editora Evangraf, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 39-48, jul./dez. 2005.
- LEONARD, N.E.; LEVINE, W.S. Using Matlab to Analyze and Design Control Systems. *The Mathworks*, Addison Wesley, 1995.
- MALVEZZI, R. 2004. Informativo eletrônico: *Água: crise e negócio*. Disponível em: http://ifas.org.br/download/candeia4/artigo_agua.doc. Acesso em: 31 jan. 2007.
- MARQUES, P.A.A.; COELHO, R.D. Estudo da viabilidade econômica da pupunha (*Bactris Gasipaes* H.B.K) para Ilha Solteira – SP, Brasil. *Ciência Rural*, v.33, n.2, p.291-297, 2003.
- MERKLEY, G.P. BIE 607 lecture 12. In: *Sprinkle and trickle irrigation course*, Logan Utah State University, 1995. 5 p.
- MOGNON, R.V. *Algoritmos genéticos aplicados na otimização de antenas*. 2004. 85 f. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- ROBERT, J.B. *Water in a changing world. Ecological Applications*. v. 11, n. 4, 2001. p. 1027-1045.
- SAAD, J.C.C.; FRIZZONE, J.A. Design and management optimization of trickle irrigation system using non-linear programming. *Journal of Agricultural Researches*. v. 64, n.1, 1996. p. 109-118.
- SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. *Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; Secretária de Recursos Hídricos; ABEAS; Universidade Federal de Viçosa, 1997. 252p.
- THEOCHARIS, M.E.; TZIMOPOULOS, C.D.; YANNOPOULOS, S.I.; SAKELLARIOU-MAKRANTONAKI, M.A.. Design of optimal irrigation networks. *Irrigation and Drainage*. v. 55, n. 1, 2006, p. 21-32.
- WARDLAW, R.; BHAKTILUL, K. Application of a genetic algorithm for water allocation in an irrigation system. *Irrigation and Drainage*. v. 50, n. 2, 2001, p. 159-170.
- high, inhibiting its use by most farmers. The purpose of this study was to optimize the costs of installation and operation of low pressure irrigation systems, considering the different water tariffs. A code in MatLab was developed taking into account all losses of distributed energy and located between the beginning of the network and the motor pump set for a low pressure irrigation system with micro sprinklers. The decision variables for optimization, with genetic algorithms, were the diameters of each stretch of the network, predefined as: two for lateral lines, four for derivation lines, four for secondary lines and one for main line and suction line. The results show that the costs of the network are between R\$816.42 and R\$2312.13.ha⁻¹.year⁻¹ for water use tariffs between R\$ 0.01 (m³)⁻¹ and R\$ 0.10(m³)⁻¹. With the results obtained in this study it is concluded that a large variation in the water tariff use results in a substantial increase in the costs of low pressure irrigation systems and may inhibit their use.*
- Key-words: water tariff, low pressure irrigation, mathematical optimization, genetic algorithms.*

Effect of the Water Tariff Variation on the Optimized Design of a Low Pressure Irrigation Network Using Genetic Algorithms

ABSTRACT

The cost of installing a low pressure irrigation network that presents the most efficient water use tends to be