

UMA NOVA METODOLOGIA PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE HORÁRIOS DE IRRIGAÇÃO

Kennedy Morais Fernandes

Universidade Federal da Bahia, Inst. de Ciências Ambientais e Desenvolvimento Sustentável
Rua José Seabra, s/n – Centro – CEP: 47.805-100 – Barreiras, BA – Brasil
kennedy.fernandes@ufba.br

Edwin Benito Mitacc Meza

Universidade Federal Fluminense, Pólo Universitário Rio das Ostras
Rua Recife, s/n – Jardim Bela Vista – CEP: 28890-000 – Rio das Ostras, RJ – Brasil
emitacc@vm.uff.br

Brauliro Gonçalves Leal

Universidade Federal do Vale do São Francisco, Colegiado de Engenharia da Computação
Av. Antônio Carlos Magalhães, 510 – Santo Antônio – CEP: 48.902-300 – Juazeiro, BA - Brasil
brauliro.leal@univasf.edu.br

Emerson Stiiipen Batista

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Informática
Campus Universitário – CEP: 36570-000 – Viçosa, MG - Brasil
stiiipen@gmail.com

RESUMO

Neste trabalho, propõe-se a utilização de uma nova metodologia baseada no método de Luus-Jaakola para a solução do problema de programação de escalas de horários de irrigação, tendo como fatores de influência os valores de água e energia consumidos e o limite de vazão disponível para as propriedades irrigantes. A metodologia adotada permite a execução do modelo não linear dentro de um cenário de tempo aceitável, pois reduz o número de parâmetros a serem estimados no problema de otimização. A programação de escalas de horários, considerando-se um número elevado de parâmetros foi processada com êxito, como mostram os resultados numéricos.

PALAVRAS CHAVE. Programação de Horários, Otimização, Luus-Jaakola.

Área principal: AG&MA - PO na Agricultura e Meio Ambiente

ABSTRACT

In this research, it is being proposed the use of a new methodology based on the Luus-Jaakola method for solving the scheduling problem for irrigation timetable, considering as influencing factors the consumed values of water and energy and the available flow limit to irrigating properties. The methodology adopted allows the implementation of the nonlinear model during a acceptable time scenario as it reduces the number of parameters to be estimated in the optimization problem. The programming timetables, considering a large number of parameters have been processed successfully, as presented by the numerical results.

KEYWORDS. Timetable. Optimization. Luss-Jaakola.

Main area: AG & MA - OR in Agriculture and Environment

1. Introdução

Nos últimos anos, a agricultura irrigada tem desempenhado um papel importante no desenvolvimento e modernização da agropecuária brasileira, trazendo consigo benefícios como: melhoria no desempenho financeiro de empreendimentos agrícolas, possibilidade de expansão da fronteira agrícola e diminuição do risco envolvido na própria atividade agrícola.

Por outro lado, o impacto mais expressivo relativo à agricultura irrigada é decorrente de sua alta demanda de recursos hídricos comparativamente a outros usos (consumo urbano, rural, industrial, etc.), o que a torna a maior fonte potencial de problemas no tocante ao uso e conservação de recursos hídricos. Em termos mundiais, estima-se que esse uso responda por cerca de 80% das derivações de água. No Brasil, esse valor supera os 60% (FGV, 2003).

A utilização adequada destes recursos tem sido uma preocupação constante de técnicos e cientistas das mais diferentes áreas do conhecimento, principalmente, de forma mais intensa nas últimas décadas, quando o homem percebeu que estava destruindo a capacidade de suporte dos ecossistemas.

O manejo da irrigação contempla a aplicação de água no momento correto e na quantidade demandada pela cultura para aquele momento. Este manejo deve ser adequado aos sistemas de irrigação de forma a se obter elevadas eficiências bem como significativas economias de água, energia, mão-de-obra e insumos.

Assim, um dos principais fatores críticos no processo de irrigação diz respeito ao compartilhamento do recurso hídrico entre as diversas propriedades, que possuem características de consumo e equipamentos específicos. Em grandes áreas irrigadas, manter o controle do direito à utilização do recurso hídrico se torna uma tarefa altamente difícil de ser realizada em tempo hábil.

O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma metodologia, baseada no método de Luus-Jaakola, para a solução do modelo matemático descrito por Araújo (2010) e Araújo *et al.* (2011) referente ao escalonamento de horários de irrigação que visa minimizar os custos referentes a energia elétrica e água. A elaboração desta escala deve obedecer às restrições impostas pela gestora da outorga do recurso hídrico, principalmente quando o consumo de cada uma das propriedades irrigantes não poderá ultrapassar o limite definido pelo gestor, buscando assim, racionalizar o uso dos recursos hídricos disponíveis de maneira que haja o menor impacto ao meio ambiente.

2. Descrição do problema de irrigação

Segundo a literatura, os métodos de irrigação podem ser divididos em Irrigação por superfície, Irrigação por Aspersão e Irrigação Localizada. O manejo da irrigação exige um conhecimento detalhado dos sistemas de irrigação, das suas características de funcionamento e aplicação de água.

Nos últimos anos, segundo Sandri e Cortez (2009), o sistema de aspersão por pivô central se expandiu acentuadamente no Brasil nos últimos anos, mais notadamente nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Bahia, motivado pelas facilidades operacionais e de controle da lâmina de irrigação, com custos competitivos pelo menor dispêndio de mão-de-obra e pela possibilidade de obter alta eficiência de aplicação e distribuição de água.

Basicamente, a irrigação por pivô central é um sistema de agricultura irrigada por meio de um pivô. Nesse sistema uma área circular é projetada para receber uma estrutura suspensa que em seu centro recebe uma tubulação e por meio de um raio que gira em toda a área circular, a água é aspergida por cima da plantação. A Figura 1 ilustra este sistema de irrigação, em uma vista aérea.



Figura 1 – Visão aérea de um sistema de irrigação por pivô central.

Este sistema de irrigação, por ser de grande porte, utiliza grandes vazões durante seu funcionamento. Por consumir muita água, muitos pivôs centrais funcionando simultaneamente podem causar impacto significativo nos recursos hídricos, retirando água além da vazão outorgada. Dessa forma, a criação de uma escala de funcionamento para pivôs centrais que atuam compartilhando um mesmo recurso hídrico é uma solução para controlar o consumo de água visando evitar possíveis danos ambientais sem comprometer a eficácia na irrigação.

Cada pivô central atende apenas um cliente fixo. Os clientes são áreas irrigáveis de plantações, cobertas pelo pivô e que possuem, a cada dia, um número diferente de horas de irrigação, via pivô central. Estas horas são estipuladas pelo técnico agrícola responsável pelo cliente, com o objetivo de atender as necessidades da plantação. O número de horas de cada pivô central pode variar graças a diversos fatores externos como clima, cultura irrigada, tipo de solo, entre outros.

Por se trabalhar, sempre, com o tempo de irrigação em horas diárias, toda solução construída estará dividida em 24 janelas de tempo, que correspondem às horas do dia. Assim, todo pivô terá o seu período de trabalho distribuído entre as 24 janelas de tempo que compõem a escala diária.

A principal restrição a ser controlada no problema é o volume de água total, utilizado por todos os pivôs centrais de um grupo, em cada janela de tempo. Cada pivô central possui um volume de água fixo, necessário para seu funcionamento. Sendo assim, a soma dos volumes de todos os pivôs centrais que estiverem funcionando, em uma determinada janela de tempo, sempre deverá ser menor ou igual ao volume de água que se permite retirar do recurso hídrico. Esta restrição é fundamental para evitar danos ambientais ao ecossistema.

O problema de escalonamento de pivôs centrais tem como meta a minimização do consumo de energia de todo o problema, que pode ser obtida de duas maneiras. A primeira maneira é graças ao custo reduzido da tarifa de energia elétrica em períodos noturnos, chegando esta tarifa a ser até 60 % mais barata nestes horários. A segunda maneira é escalonando os pivôs centrais de modo que eles funcionem o maior número possível de janelas de tempo ininterruptas, evitando-se assim o alto custo de colocá-lo em funcionamento.

3. Formulação e Modelagem Matemática do Problema

Nesta seção é apresentado o modelo de otimização do problema proposto por Araújo (2010) e Araújo *et al.* (2011), onde se definem os seguintes parâmetros e variáveis de decisão, descritos na Tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Parâmetros do Modelo.

Símbolo	Definição
N	Número total de setores irrigáveis.
I	Representa cada setor irrigável por um pivô central.
J	Representa cada janela de tempo.
DA_i	Demanda de água do pivô de irrigação do setor i .
DE_i	Demanda de energia do pivô de irrigação do setor i .
CA_j	Custo de água na janela de tempo j .
CE_j	Custo de energia elétrica na janela de tempo j .
T_i	Número de horas de irrigação exigida para o setor i .
V	Volume máximo de água disponível por janela de tempo.

Tabela 2 – Variáveis de Decisão.

Símbolo	Definição
x_{ij}	Variável binária que indica se o setor i esta sendo irrigado na janela de tempo j ($x_{ij}=1$) ou não ($x_{ij}=0$).
p_{ij}	Custo operacional do pivô de irrigação do setor i na janela de tempo j .

Utilizando esta notação, o problema de escalonamento de setores irrigáveis é formulado através do seguinte modelo de programação não linear inteira.

$$MIN \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{23} (CA_j DA_i + CE_j DE_i) x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{23} p_{ij} \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{j=0}^{23} x_{ij} = T_i \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n DA_i x_{ij} \leq V \quad j = 0, \dots, 23 \quad (3)$$

$$(CA_1 DA_i + CE_1 DE_i) x_{i1} = p_{i1} \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$(CA_j DA_i + CE_j DE_i) x_{ij} (1 - x_{i(j-1)}) = p_{ij} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 0, \dots, 23 \quad (5)$$

$$x_{ij} \in [0, 1] \quad i = 1, \dots, n \quad j = 0, \dots, 23 \quad (6)$$

$$p_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad j = 0, \dots, 23 \quad (7)$$

A função objetivo, representada pela Equação (1), visa minimizar o custo total de irrigação, sendo a primeira parcela representando a soma dos custos dos recursos de água e energia utilizadas em cada janela ativa e a segunda parcela representando os custos, na forma de

penalização, das mudanças de estado (ligado/desligado) de cada pivô central de irrigação em um determinado setor, ou seja, quando maior o número de janelas alocadas de forma descontínua, para um determinado pivô, maior será o valor da penalidade sobre a função objetivo do problema.

A restrição (2) garante que a demanda de cada um dos setores, representada pelo número de horas de irrigação exigidas, serão atendidas. Por sua vez, a restrição (3) assegura que o consumo do recurso hídrico não será maior do que o permitido para cada janela de tempo.

As restrições (4) e (5) são introduzidas para penalizar cada início de uma alocação de irrigação em um determinado setor. Neste caso, será desconsiderada esta penalidade se não houver mudança no estado da alocação para janelas de tempo subsequentes. Observa-se que a restrição (5) faz com que o modelo se torne não linear. O domínio adequado das variáveis é determinado pelas restrições (6) e (7).

4. Metodologia proposta para resolução do problema

Considere um perímetro de irrigação composto por 4 setores, que possuem seus valores de demanda de água, demanda de energia e tempo total necessário de irrigação, conforme descrito na Tabela 3 (Araújo, 2010). A vazão imposta a este perímetro é de 12 m³/h, ou seja, o volume de água consumido por todos os setores dentro de uma janela de tempo de 1 hora não pode exceder este limite imposto.

Tabela 3 – Detalhamento dos 4 setores irrigados.

Setor <i>i</i>	Demanda de Água m ³ /h – <i>DA</i>	Demanda de Energia (kWh) – <i>DE</i>	Tempo de Irrigação (h) – <i>T</i>
1	5	20	12
2	5	10	13
3	2	30	4
4	5	20	20

Para o cálculo do custo total de irrigação destes setores, deve-se levar em consideração os custos de energia e água. O custo de energia (*CE_j*), apresentado na Tabela 4, possui duas faixas de valores em função do horário, sendo que a tarifa reduzida possuirá 60% de desconto com relação ao horário de tarifação normal. Já o custo de água (*CA_j*), terá o valor constante de 1 unidade monetária por metro cúbico consumido.

Tabela 4 – Custo de energia elétrica (CEMIG, 2006).

Horário	Tarifa	Valor
21h às 5h59min	Reduzida	0,4 u.m.
6 às 20h59min	Normal	1,0 u.m.

O modelo matemático apresentado nas Equações (1-6) possui restrições que garantem que cada setor tenha a sua demanda necessária de água atendida e que não seja violado o limite de vazão imposta sobre o perímetro.

O problema de irrigação, proposto nesta seção, com 4 setores possui uma matriz *x_{ij}* (4 linhas x 24 colunas), ou seja, 4 setores em 24 janelas (horas), um total de 96 variáveis a serem estimadas.

Inicialmente é apresentada na Figura 2 a disposição inicial dos 4 setores irrigados, que é a estimativa inicial do problema de acordo com o tempo de irrigação de cada setor apresentado na Tabela 3. O Setor 1 está sendo irrigado nas 12 primeiras horas do dia (0 às 11 horas), o Setor 2 nas 13 primeiras horas (0 às 12 horas), o Setor 3 nas 4 primeiras horas (0 às 3 horas), e por último, o setor 4 nas 20 primeiras horas (0 às 19 horas).

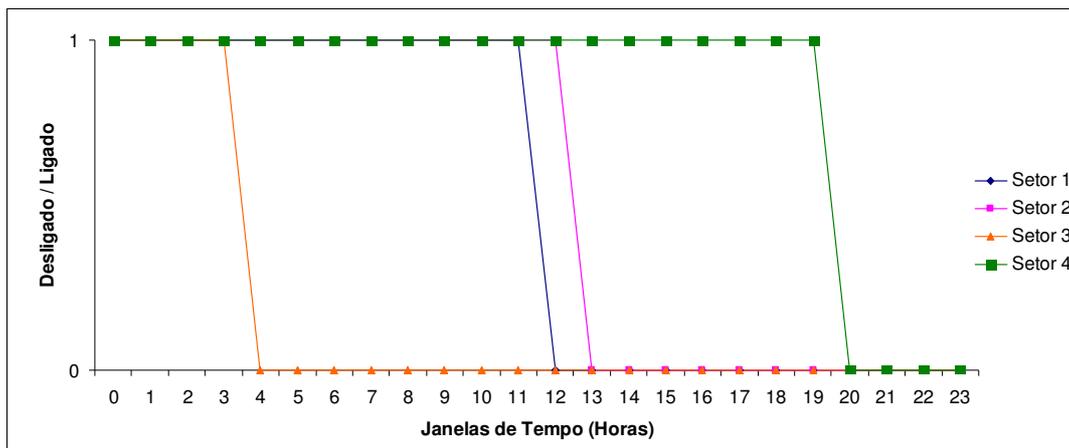


Figura 2 – Disposição inicial dos 4 setores irrigados: Matriz x_{ij} .

As disposições das horas na Figura 2 atendem a restrição da Equação 2, porém a restrição da Equação 3 não foi atendida em várias janelas de tempo, pois a vazão total ultrapassou a vazão máxima de $12\text{m}^3/\text{h}$ no intervalo das janelas de tempo de 0 até 11 horas, conforme é apresentado na Figura 3.

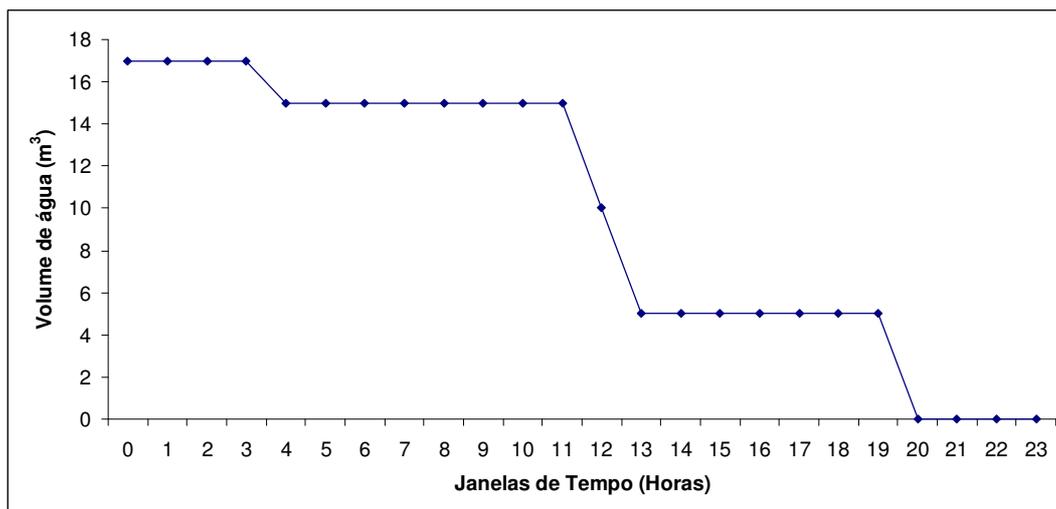


Figura 3 – Vazão de água por janela de tempo a partir da disposição inicial

Para atender a restrição da Equação 3 e garantir que a vazão máxima seja atendida, os elementos da matriz x_{ij} sofrerão alteração apenas nas suas posições, pois assim a restrição da Equação 2 continuará sendo atendida, ou seja, o tempo de irrigação de cada setor não será alterado. Ao invés de estimar 0 ou 1 para a matriz x_{ij} , será estimado um vetor de 4 valores inteiros (0 até 23 horas), que indicará a troca de posições em cada setor irrigável.

O Algoritmo 1 apresenta uma metodologia para otimização das vazões para os 4 setores de irrigação, o objetivo do algoritmo é obter uma configuração para a matriz x_{ij} onde a vazão de cada janela de tempo V_{hora} seja menor que a vazão máxima V do perímetro do rio, mas que seja a máxima possível, ou seja, $(\text{Máxima } V_{\text{hora}}) \leq V$.

Algoritmo 1 – Otimização das vazões: (Máxima $V_{hora} \leq V$).

1. **Faça** $hora = 0$ até 22, $hora = hora + 1$
2. **Algoritmo_1**($n, X, DA, DE, T, V, V_{hora}, CA, CE, hora$)
3. $minimo = hora + 1$
4. $maximo = 23$
5. $X_{antigo} = X$
6. $V_{antiga} = V_{hora}$
7. **Faça Enquanto** (*Metodologia de busca do algoritmo de otimização*)
8. **Se**($(V_{novo} < V_{antiga} \text{ E } V_{antiga} \geq V)$ OU $(V_{novo} > V_{antiga} \text{ E } V_{novo} \leq V)$)
9. $X_{antigo} = X_{novo}$
10. $V_{antiga} = V_{novo}$
11. **Fim Se**
12. **Fim Faça**
13. $X = X_{antigo}$
14. $V_{hora} = V_{antiga}$
15. **Fim do Algoritmo_1**
16. **Fim Faça**

A solução obtida pelo Algoritmo 1 é uma solução viável para o problema de irrigação mas não garante que é a melhor solução. Diferentemente da vazão máxima onde o objetivo é simplesmente não ultrapassar o seu limite, para o custo da irrigação, o agricultor sempre busca atingir o mínimo possível, não importa se a vazão seja a máxima ou a mínima possível. Posto isso, apresenta-se o Algoritmo 2 que segue a mesma metodologia do Algoritmo 1, mas com a finalidade de obter o custo mínimo verificando sempre se a vazão máxima foi atendida (linha 8 – Algoritmo 2).

Algoritmo 2 – Otimização da Função Custo.

1. **Faça** $hora = 0$ até 23, $hora = hora + 1$
2. **Algoritmo_2** ($n, X, DA, DE, T, Custo, V, CA, CE, hora$)
3. $minimo = 0$
4. $maximo = 23$
5. $X_{antigo} = X$
6. $Custo_{antigo} = Custo$
7. **Faça Enquanto** (*Metodologia de busca do algoritmo de otimização*)
8. **Se**($(Custo_{novo} \leq Custo_{antigo})$ E $Vazao(V_{novo})$)
9. $Custo_{antigo} = Custo_{novo}$
10. $X_{antigo} = X_{novo}$
11. $V = V_{novo}$
12. **Fim Se**
13. **Fim Faça**
14. $X = X_{antigo}$
15. $Custo = Custo_{novo}$
16. **Fim do Algoritmo_2**
- Fim Faça**

5. Método de Luus-Jaakola (LJ)

Para resolução dos Algoritmos 1 e 2, apresentados na seção anterior, foi utilizado o método de LJ para resolução de problemas de otimização não linear baseado em uma busca aleatória, proposto por Luus e Jaakola (1973). Este método, com algumas modificações, teve bastante êxito em problemas de otimização aplicados à identificação de danos em estruturas (Fernandes *et al.*, 2008).

Em síntese, o procedimento desenvolvido por Luus e Jaakola envolve dois passos:

Passo 1: Para um número especificado de iterações, calcular $H = H^* + Zr$, onde H^* é o vetor de horas ótimas corrente, Z é uma matriz diagonal com elementos aleatórios entre -1 e +1 e r é um vetor contendo os raios das regiões de busca para as variáveis do problema de identificação. Ao final de cada iteração, H^* é substituído por H , caso este possua uma configuração melhor.

Passo 2: Ao final do número de iterações especificadas no Passo 1, a região de busca é contraída através de uma expressão como:

$$r_{j+1} = (1 - \varepsilon) r_j$$

onde ε é um número próximo de zero.

5. Validação da metodologia proposta

Esta seção apresenta e valida a solução para o modelo matemático do problema de irrigação apresentado na Seção 3 com um grupo de 4 pivôs centrais (Tabela 3), utilizando os Algoritmos 1 e 2 com o método LJ. Na obtenção das soluções com este método foram executadas 300 iterações para calcular o vetor r com raios da região de busca, para o cálculo do vetor H das horas ótimas em cada região de busca foram executadas 150 iterações e $\varepsilon = 0,05$, mesmo valor utilizado em Fernandes *et al.* (2008).

Os processos foram executados num Notebook Dell XPS L502X com Processador Intel Core I5 e 6GB de memória RAM. O tempo total de processamento dos dois algoritmos com o método LJ foi aproximadamente 20 segundos.

A Figura 4 apresenta a disposição final do escalonamento de horários, matriz x_{ij} , utilizando o Algoritmo 1, juntamente com o valor do custo. O número de horas de irrigação em cada setor e a vazão máxima de 12 m³/h foi atingido em todas as janelas de tempo conforme é apresentado na Figura 5. O Algoritmo 1 apresenta uma solução viável, onde todos os critérios de restrição são atendidos, mas não necessariamente com o menor custo energético possível.

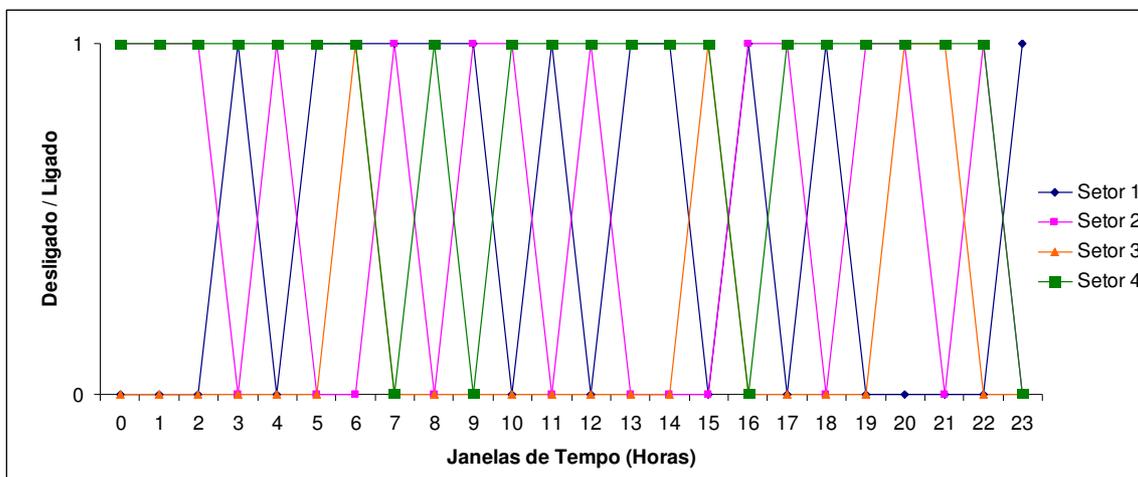


Figura 4 – Disposição final (Algoritmo 1) – Custo = 1.266 u.m.

A solução obtida com o Algoritmo 1 é a estimativa inicial de busca para o Algoritmo 2. A disposição final dos 4 setores calculados pelo Algoritmo 2 com o custo mínimo de 942 u.m. é apresentada na Figura 6.

Contabilizando na função objetivo (Equação 1) apenas o custo energético e custo da água, tirando o custo operacional, ou seja, $P_{ij} = 0$, o valor obtido foi de 835 u.m.. Este valor é menor do que o obtido por Araújo (2010), onde o custo mínimo sem contabilizar o custo operacional foi de 853 u.m.. Na Figura 7 é fácil perceber que os maiores valores de vazão de água se concentram nas janelas de tempo onde o custo de energia é 60% menor, por isso a solução do Algoritmo 2 obteve um custo inferior ao do Algoritmo 1.

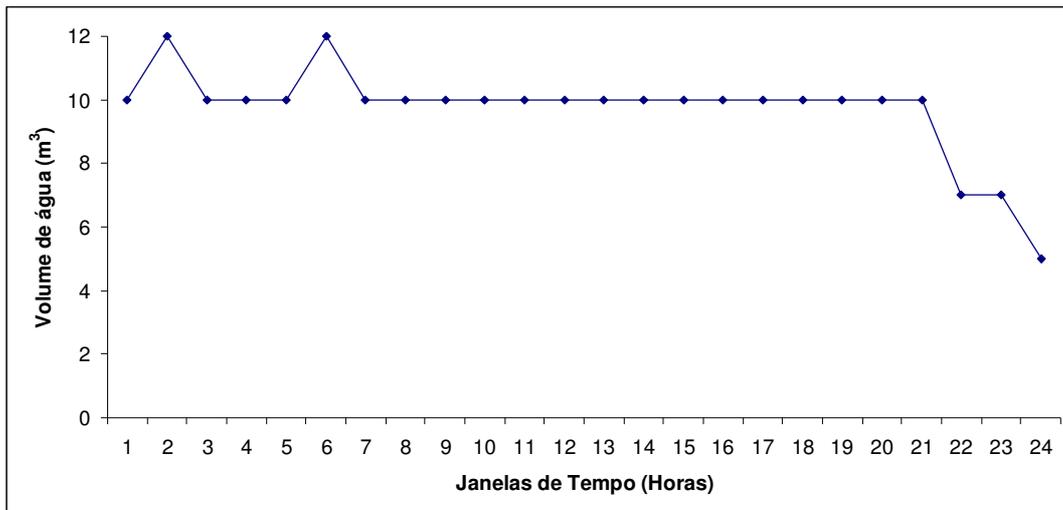


Figura 5 – Vazão de água por janela de tempo (Algoritmo 1) – Custo = 1.266 u.m.

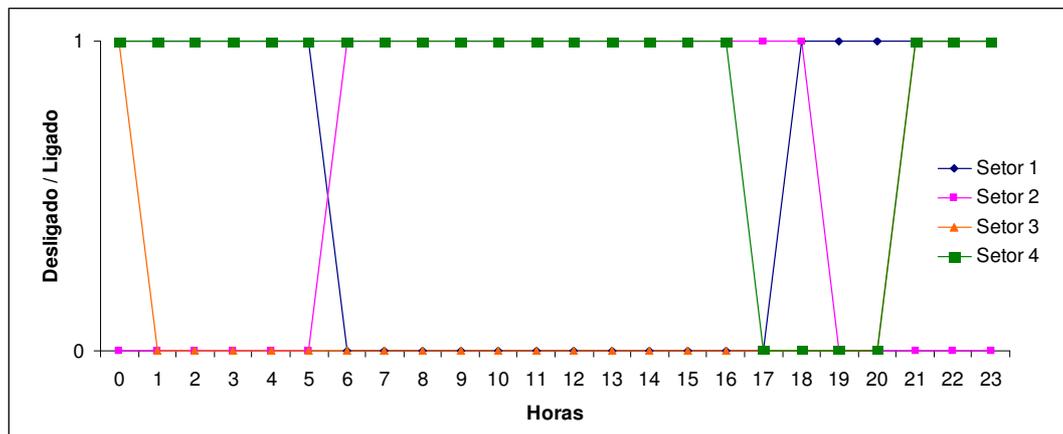


Figura 6 – Disposição final (Algoritmo 2) – Custo = 942 u.m.

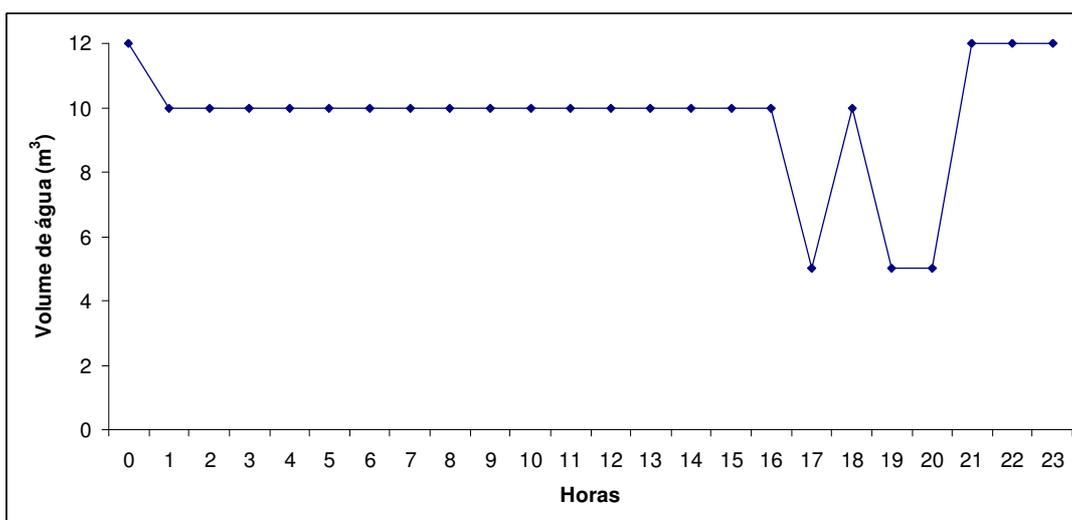


Figura 7 – Vazão de água por janela de tempo (Algoritmo 2) – Custo = 942 u.m.

6. Resultados numéricos

Para conhecer o real desempenho dos algoritmos e da metodologia proposta foi simulado um novo grupo com 300 pivôs centrais, com características de pivôs reais. As informações deste grupo de pivôs foram extraídas do projeto conhecido como Entre Ribeiros do rio Paracatu, que dá nome ao município do estado de Minas Gerais. Este rio pertence à Bacia do São Francisco, onde a região é relativamente seca, tendo sido necessário, para incentivar a agropecuária na região, a construção de imensos canais de irrigação para a instalação de pivôs centrais (Batista, 2007).

Como os valores ótimos não são conhecidos, foi feito um teste comparativo entre a metodologia apresentada neste trabalho com os resultados obtidos por Batista (2007), utilizando os métodos *Simulation Annealing* – SA e GRASP. Os pivôs centrais foram submetidos a duas diferentes vazões de água disponível, sendo uma vazão de 65.000 m³/h e outra de 80.000 m³/h. Os resultados obtidos por Batista (2007) não consideram o custo de água, ou seja, $CA_j = 0.0$.

A Tabela 5 faz um comparativo entre as heurísticas SA e GRASP com $CA_j = 0.0$ e o método proposto LJ com $CA_j = 0.0$ e também com $CA_j = 1.0$.

Tabela 5 – Comparativo de desempenho dos métodos com um grupo de 300 pivôs centrais

Vazão disponível	SA (Batista, 2007) $CA_j = 0.0$	GRASP (Batista, 2007) $CA_j = 0.0$	LJ $CA_j = 0.0$	LJ $CA_j = 1.0$
65.000 m ³ /h	7.753.600	Sem solução	3.742.800	4.477.794
80.000 m ³ /h	7.144.400	6.973.200	3.732.400	4.405.506

Na Tabela 5 pode ser observada uma vantagem do método SA sobre o GRASP. O SA consegue encontrar solução mesmo com o volume de água de 65.000 m³/h de água. O GRASP não conseguiu encontrar solução para este problema, sendo necessário dar uma quantidade de água um pouco maior para o mesmo. Assim, com a quantidade de água maior o método GRASP obteve resultado melhor que o método SA, mas ainda muito inferior ao resultado obtido pelo método LJ com $CA_j = 0.0$ e $CA_j = 1.0$.

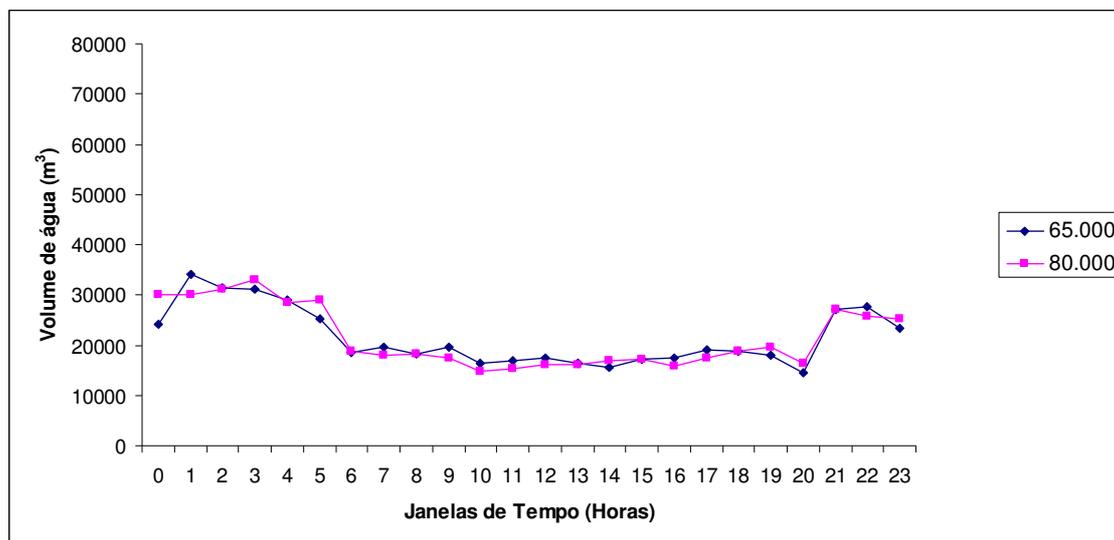


Figura 8 – Vazão de água por janela de tempo com 300 pivôs – Custo = 3.742.800 u.m.

Observa-se na Tabela 5 que o valor energético da função objetiva obtida com o método LJ com $CA_j = 0.0$ é menor que a metade do valor mínimo energia elétrica obtida pelo método SA, uma economia superior a 50%. Mesmo com $CA_j = 1.0$, o método LJ apresenta uma economia muito significativa de energia elétrica, superior a 40%. O mesmo acontece quando se utiliza a

demanda de água de 80.000 m³/h de água, o método LJ realiza o escalamento de horários dos pivôs centrais com custo energético bem inferior aos demais métodos.

O consumo de água otimizado obtido com o método LJ, para cada janela de tempo, com vazão máxima de água disponível de 65.000 m³/h e de 80.000 m³/h são apresentados, na Figura 8. Nota-se que o volume de água utilizado com a solução do escalamento de horários obtido pelo método LJ, está muito abaixo das vazões máximas de água disponíveis simuladas por Batista (2007).

Portanto, com o objetivo de reduzir o consumo de água foram realizados vários testes com diferentes vazões de água para o sistema de irrigação e chegou-se à vazão de água de 22.000 m³/h que atende à necessidade da propriedade agrícola em todas as janelas de tempo, conforme mostra a Figura 9. A Tabela 6 mostra que este valor de vazão máxima obtido corresponde a 66% de economia de água em relação ao melhor resultado obtido pelo método SA. Mesmo com uma vazão máxima de água muito pequena, 66% menor que a utilizada pelos métodos SA, o custo energético obtido foi de 4.258.400 u.m., uma enorme economia de 45% na conta de energia elétrica.

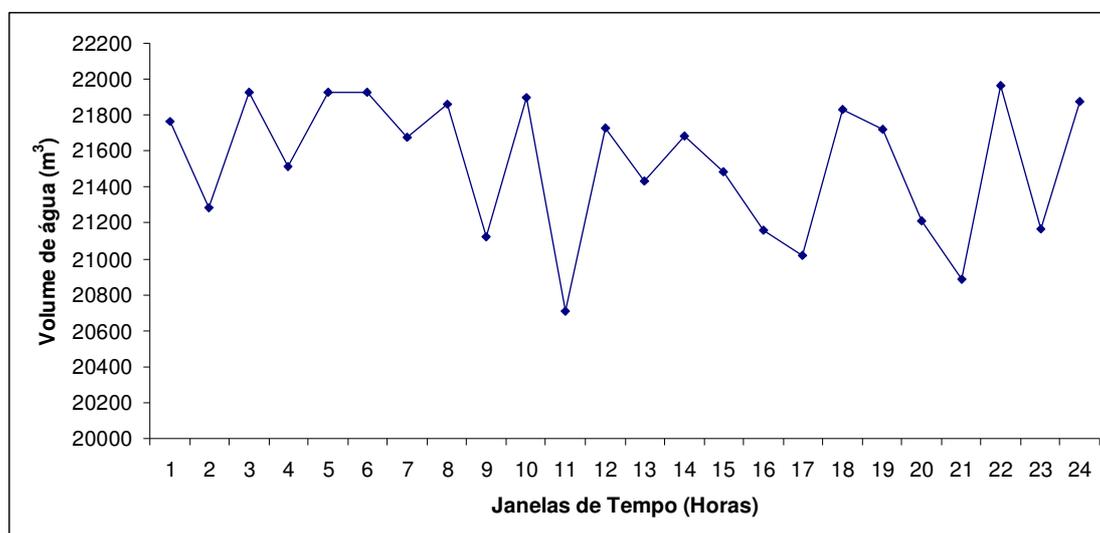


Figura 9 – Vazão de água por janela de tempo com 300 pivôs – Custo = 4.258.400 u.m.

Tabela 6 – Comparativo de desempenho entre os métodos para valores de água e custo energético

Métodos	Função Objetiva (Custo de energia)	Economia de energia	Vazão de água	Economia de água
SA (Batista, 2007)	7.753.600 u.m.	-----	65.000 m ³ /h	-----
LJ (CA _j = 0.0)	4.258.400 u.m.	45,0%	22.000 m ³ /h	66%
LJ (CA _j = 1.0)	4.888.039 u.m.	36,9%	22.000 m ³ /h	66%

6. Conclusões

Este trabalho apresentou uma abordagem para resolver o problema de escalamento de pivôs centrais. O modelo proposto foi capaz de representar o problema em todos os seus aspectos importantes, proporcionando o aumento da percepção da necessidade do uso racional dos recursos hídricos visando à sustentabilidade do agronegócio.

Como já foi exposto por Araújo (2010), dentro do estudo de caso analisado, a criação de um critério técnico para definição da escala de irrigação foi uma das maiores contribuições deste trabalho, pois até o presente momento, a elaboração de uma escala de tempo em função das horas de irrigação era inexistente. Existe somente a autorização para o produtor em função do dia, onde o mesmo é quem define a melhor hora para irrigação.

Computacionalmente, a modelagem computacional e a nova metodologia de escalonamento de horários proposta são de grande relevância, pois não foram encontrados na literatura, trabalhos dentro do mesmo contexto de otimização aplicados à engenharia de irrigação.

A utilização da metodologia proposta com o método LJ foi vista como uma boa alternativa para a obtenção de boas soluções em curtos espaços de tempo e com uma mínima exigência computacional, demonstrando ter sido uma escolha acertada para esta situação, pois atingiu os objetivos previstos.

O método LJ mostrou-se mais eficiente que o método SA e GRASP quando o recurso hídrico apresenta-se mais escasso, demonstrando capacidade de construir soluções com volumes de água mais baixos. Também é mais eficiente que os demais métodos quando o recurso hídrico não é tão escasso, pois obteve custos energéticos bem inferiores, levando a uma grande economia no consumo de energia elétrica.

Como trabalho futuro propõe-se a aplicação de outros computacionais além do LJ que utilizem a mesma metodologia adotada neste trabalho, a fim de analisar o tempo e a qualidade da solução.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

Referências

ARAÚJO, A. F. Aplicação de Metaheurísticas para a Solução do Problema de Programação de Horários de Irrigação. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2010.

ARAÚJO, A. F., LEAL, B. G., FERNANDES, K. M. Uso da Metaheurística Grasp para a Solução do Problema de Programação de Horários de Irrigação. In: XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa operacional, Rio de Janeiro, 2011.

BATISTA, E. S. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de escalonamento de pivôs centrais com uso de metaheurísticas - um estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Universidade Federal de Viçosa, MG, 2007.

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Relatório de avaliação ambiental estratégica do programa de eletrificação rural do noroeste de minas gerais, 2006.

FERNANDES, K. M., SILVA NETO, A. J., TENENBAUM, R. A., & STUTZ, L. T.. Abordagem de propagação de ondas aplicada à identificação de dano estrutural usando o método de Luus-Laakola. Anais do XI Encontro de Modelagem Computacional, Volta Redonda/RJ, 2008.

FGV – FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Agroanalysis. v. 18, n. 3, 2000.

LUUS, R. & JAAKOLA, T. Optimization by direct search and systematic reduction of the size of search region. AIChE Journal, vol. 19, pp. 760–766, 1973.

SANDRI, D., CORTEZ, D. DE A. Parâmetros de desempenho de dezesseis equipamentos de irrigação por pivô central. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v.33, n. 1, p. 271-278, 2009.