

## **ARTIGO TÉCNICO**

### **DESEMPENHO DO MODELO ACQUANETXL NA ALOCAÇÃO DE ÁGUA EM SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS COMPLEXOS**

**ANDRÉ SCHARDONG<sup>1</sup>, ARISVALDO V. MÉLLO JÚNIOR<sup>2</sup>,  
ALEXANDRE N. ROBERTO<sup>3</sup>, RUBEM LA L. PORTO<sup>4</sup>**

**RESUMO:** Este artigo apresenta uma ferramenta para análise de sistemas complexos de recursos hídricos denominada AcquaNetXL, que foi desenvolvida no formato de planilha eletrônica, na qual foram incorporados dois modelos de otimização, um linear e outro não linear. Essa ferramenta mantém os conceitos e os atributos de um sistema de suporte a decisão, ou seja, possui as características de estreitar a comunicação entre o usuário e o computador, de facilitar o entendimento, a formulação do problema, a interpretação dos resultados de análise e auxiliar no processo de tomada de decisão, tornando-o mais ordenado, objetivo e transparente. O desempenho do algoritmo utilizado na solução dos problemas de alocação de água foi satisfatório, especialmente para o modelo linear.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistemas de Suporte a Decisões, simulação hidrológica, otimização.

### **PERFORMANCE OF THE MODEL CALLED ACQUANETXL IN THE ALLOCATION OF WATER IN COMPLEX WATER RESOURCE SYSTEMS**

**ABSTRACT:** This article presents a tool for the allocation analysis of complex systems of water resources, called AcquaNetXL, developed in the form of spreadsheet in which a model of linear optimization and another nonlinear were incorporated. The AcquaNetXL keeps the concepts and attributes of a decision support system. In other words, it straightens out the communication between the user and the computer, facilitates the understanding and the formulation of the problem, the interpretation of the results and it also gives a support in the process of decision making, turning it into a clear and organized process. The performance of the algorithms used for solving the problems of water allocation was satisfactory especially for the linear model.

**KEYWORDS:** Decision Support Systems, hydrologic simulation, optimization.

## **INTRODUÇÃO**

Os recursos hídricos são indispensáveis à vida e imprescindíveis ao desenvolvimento socioeconômico. O crescimento populacional, a necessidade de produzir alimentos e bens de consumo têm provocado o aumento da demanda e o acirramento dos conflitos pelo uso da água entre vários setores produtivos. Os conflitos provocados pelos múltiplos usos da água (abastecimento doméstico, industrial, irrigação, produção de energia hidroelétrica, controle da qualidade da água, controle ambiental, recreação, etc.) e a operação integrada de vários reservatórios tornam difícil a tarefa de estabelecer políticas operacionais eficientes. Hoje em dia, a busca das melhores alternativas de alocação de água é feita por meio da aplicação de potentes metodologias matemáticas e computacionais. Para isso, normalmente são empregados modelos de simulação e de otimização que usam algoritmos matemáticos específicos e que necessitam de ferramentas de modelagem computacional para sua resolução.

<sup>1</sup>Doutorando do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo andreschardong@usp.br

<sup>2</sup>Prof. Dr., Departamento de Engenharia Agrônômica, Universidade Federal de Sergipe, arimellojr@gmail.com

<sup>3</sup>Mestre em Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, nunesanr@usp.br

<sup>4</sup>Prof. Dr., Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, rlporto@usp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 18-4-2008

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 16-10-2009

A despeito das diferenças entre simulação e otimização, muitas vantagens podem ser extraídas do uso combinado dessas técnicas quando aplicadas no manejo de sistemas de reservatórios. Conforme comentado por YEH (1985), LABADIE (2004) e NGUYEN et al. (2007), o maior desafio da aplicação dos modelos de otimização sobre modelos de simulação é embutir algum tipo de simulação dentro dos modelos de otimização para manter a viabilidade das políticas operacionais. Segundo SIMONOVIC (1992), esta abordagem contribui para reduzir ou eliminar a distância entre teoria e prática na análise de sistemas de reservatórios.

Muitos pesquisadores têm sugerido o uso de métodos de otimização e de simulação de forma combinada na tentativa de extrair vantagens de ambas as técnicas (BARROS et al., 2003; MÉLLO JÚNIOR. et al., 2005 e SCHARDONG, 2006).

O Sistema de Suporte a Decisões (SSD) AcquaNet faz uso combinado das técnicas de simulação e de otimização para determinar a alocação da água em sistemas de recursos hídricos complexos sujeitos a restrições operacionais e prioridades de atendimento às demandas (PORTO et al., 2005). O *software* utiliza um algoritmo de otimização de rede de fluxo eficiente (*Out-of-Kilter - OFK*), o que significa que sistemas extremamente grandes e complexos podem ser tratados em microcomputadores comuns. Embora modelos de rede de fluxo sejam extremamente rápidos, os mesmos apresentam limitações. Os algoritmos desse tipo otimizam apenas sistemas lineares, e a função-objetivo é predefinida e, portanto, não pode ser livremente especificada pelo usuário. No AcquaNet, a otimização é executada em intervalo de tempo mensal, de forma sequencial, não garantindo o ótimo global para um período de tempo à frente. Melhores resultados poderiam ser alcançados com a utilização de um modelo que realizasse a otimização da rede de fluxo em todo o período de análise.

Uma situação comum em problemas de alocação de água é a dificuldade com a operação de sistemas de recursos hídricos complexos, em geral compostos por uma série de reservatórios, demandas e canais. Geralmente, a alocação da água para atendimento às demandas está condicionada não só à disponibilidade de água, mas também a restrições operacionais que afetam a entrega da água no curto prazo. O algoritmo até então utilizado pelo AcquaNet não considera o amortecimento das vazões na análise de problemas de operação de sistemas de recursos hídricos. Adaptações poderão ser feitas no programa para satisfazer a essa finalidade.

Nos últimos anos, a capacidade computacional oferecida pelas planilhas eletrônicas nos computadores pessoais tem aumentado sensivelmente. As planilhas eletrônicas oferecem alguns atrativos para resolver problemas de modelagem hidrológica. Enquanto muitos programas computacionais usados para a solução de problemas de engenharia de recursos hídricos são de difícil compreensão, as planilhas permitem que o processo representativo de um determinado fenômeno seja claramente entendido. Isso confere ao usuário mais confiança na análise do problema.

Vários autores vêm utilizando o *MS Excel* como ferramenta para o desenvolvimento de Sistemas de Suporte a Decisão, tanto na área de recursos hídricos como na área agrícola. O *MS Excel* tem como característica atraente o fato de integrar em um único ambiente a capacidade de armazenar dados, a interface gráfica com o usuário e algoritmos de programação, especialmente o *Solver*, que é gratuito.

WESTPHAL et al. (2003) criaram um SSD utilizando o *MS Excel* para a otimização da operação do sistema de abastecimento de água da cidade de Boston, Estados Unidos. O sistema possui a capacidade de fazer a otimização diária e/ou semanal da operação com o auxílio de algoritmos linear e não linear, utilizando o *solver*. Nesse SSD, também foi integrado um modelo de qualidade d'água em reservatórios. VARIS & KESKINEN (2006) utilizaram um modelo em planilha integrada com o *Solver* para analisar e obter regras de operação do lago "Tonpel Sap" em Camboja, considerando usos múltiplos da água. HUDDLESTON et al. (2004) utilizaram o *MS Excel* e o *Solver* para implementar uma versão linear e alternativa ao método de "Hardy Cross" destinada especialmente a estudantes iniciantes no estudo de redes de distribuição de água.

MECKLENBURG & WARD (2004) utilizaram uma planilha em *MS Excel* para o monitoramento de rios, incluindo interface gráfica, base de dados para armazenamento de seções transversais, ferramentas para a determinação de curvas-chave, entre outras funcionalidades. GRABOW & MCCOMICK (2007) criaram um modelo em uma planilha de *MS Excel* que integra quantidade e qualidade da água. Toda a interface gráfica do modelo foi desenvolvida na própria planilha, que também foi utilizada como base de dados para o mesmo. BENLI & KODAL (2003) utilizaram o *Solver* do *MS Excel* para a otimização, utilizando um modelo de programação não linear, da alocação ótima de água em condições de escassez, visando a maximizar o lucro com as culturas disponíveis nas fazendas da região estudada.

Este trabalho apresenta um modelo em planilha *MS Excel*, denominado AcquaNetXL, que é uma ferramenta auxiliar do AcquaNet, na qual foi incorporada uma solução de otimização não linear para alocação de água na bacia, utilizando o *Solver*.

## METODOLOGIA

O AcquaNetXL é uma ferramenta composta por macros e planilhas auxiliares, que permite ao usuário do AcquaNet visualizar todos os dados dos elementos da rede de fluxo num ambiente mais flexível, em que é possível maior liberdade de verificar e de manipular os resultados dos cálculos.

As macros são utilizadas para carregar os dados do AcquaNet e organizá-los e distribuí-los na planilha. Nesse processo, é montado o problema de otimização, que pode ser estritamente linear ou não linear, utilizando-se apropriadamente da técnica da programação linear (PL) ou da programação não linear para resolvê-lo.

A otimização tem a tarefa de distribuir a água disponível da melhor forma possível no sistema, tentando atender a todas as necessidades da rede da melhor forma possível. Os problemas lineares e não lineares têm abordagens diferentes, mas com o mesmo intuito de minimizar os “custos” referentes ao não atendimento de uma necessidade. A seguir, é detalhada a formulação da otimização linear e não linear. Maiores detalhes sobre a metodologia apresentada e a SSD em planilha Excel podem ser obtidos no endereço eletrônico <http://www.phd.poli.usp.br/labsid>, na seção de “Programas”, “AcquaNetXL”.

### Formulação do modelo linear

A formulação básica do modelo de otimização linear da rede de fluxo é representada pelas eqs.(1) a (6).

$$\text{Minimizar } \left\{ \sum_{i,j=1}^n c_{ij} q_{ij,t} + \sum_{p=1}^y c_p (D_{p,t} - q_{ij,t}^p) + \sum_{k=1}^m c_k d_{k,t}^- \right\} \quad (1)$$

em que,

- $n$  - o número de arcos;
- $y$  - número de demandas, e
- $m$  - número de reservatórios.

Sujeita a:

$$\sum_{i \in I_j} q_{ij,t} - \sum_{k \in O_j} q_{ik,t} = 0 \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall t \quad (2)$$

$$l_{ij,t} \leq q_{ij,t} \leq u_{ij,t} \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (3)$$

$$\left(1 + e_{k,t} \frac{\alpha}{2}\right) S_{k,t} = \left(1 - e_{k,t} \frac{\alpha}{2}\right) S_{k,t-1} + I_{k,t} - w_{k,t} - q_{ij,t}^k - e_{k,t} \beta \quad (4)$$

$$S_{k,t} - d_{k,t}^+ + d_{k,t}^- - g_{k,t} = 0 \quad (5)$$

$$q_{ij,t} \geq 0; w_{k,t} \geq 0; d_{k,t}^+ \geq 0; d_{k,t}^- \geq 0 \quad (6)$$

em que,

- $q_{ij,t}$  - vazão média entre o nó inicial  $i$  e o nó final  $j$ , no mês  $t$ ;
- $q_{ij,t}^p$  - vazão para atendimento à demanda  $p$ ;
- $q_{ij,t}^k$  - descarga do reservatório  $k$ ;
- $c_p$  - custo unitário associado à vazão  $q_{ij,t}^p$ ;
- $c_k$  - custo unitário do desvio do volume do  $k^{\text{ésimo}}$  reservatório com relação ao seu volume-meta;
- $c_p = c_k = 100 - P$ , em que a prioridade  $P$  varia de 1 a 99;
- $c_{ij}$  - custo unitário associado à vazão  $q_{ij}$  ( $c_{ij} = c_0 + 99$ , em que  $c_0$  é o custo inicial);
- $D_{p,t}$  - demanda requerida  $p$  no mês  $t$ ;
- $d_{k,t}^+$  e  $d_{k,t}^-$  - variáveis auxiliares representando os desvios positivos e negativos com relação ao volume-meta no mês  $t$ ;
- $g_{k,t}$  - volume-meta especificado no  $k^{\text{ésimo}}$  reservatório no final do mês  $t$ ;
- $l_{ij,t}$  - vazão mínima no arco  $(i, j)$  no mês  $t$ ;
- $u_{ij,t}$  - vazão máxima no arco  $(i, j)$  no mês  $t$ ;
- $S_{k,t}$  e  $S_{k,t-1}$  - volume armazenado no  $k^{\text{ésimo}}$  reservatório no final e no início do mês  $t$ , respectivamente;
- $I_{k,t}$  - vazão natural afluenta ao  $k^{\text{ésimo}}$  reservatório no mês  $t$ ;
- $e_{k,t}$  - perda por evaporação no  $k^{\text{ésimo}}$  reservatório no mês  $t$ ;
- $\alpha$  e  $\beta$  - os parâmetros do melhor ajuste linear da área  $x$  volume de água armazenada no reservatório, e
- $w_{k,t}$  - volume vertido no  $k^{\text{ésimo}}$  reservatório no mês  $t$ .

A eq.(2) garante a satisfação do equilíbrio de massa em todos os nós. A restrição (3) representa os limites nos links e a eq.(4) garante a continuidade de fluxo na rede. O problema deverá ser resolvido para valores compatíveis das variáveis, portanto os volumes são transformados em vazões considerando o período de tempo  $t$ .

Os valores de  $c_{ij}$ ,  $c_p$  e  $c_k$  representam prioridades, portanto, ao atender a uma prioridade, o modelo estará diminuindo os custos da rede de um valor  $c_{ij}$ ,  $c_p$  e  $c_k$  por unidade de vazão fornecida.

O volume armazenado acima do nível-meta tem custo zero, ou seja, é livre para atender a quaisquer demandas por menores que sejam suas prioridades. Nesse caso,  $d_{k,t}^+$  seria eliminado da função-objetivo. As variáveis auxiliares permanecem nas restrições envolvendo  $g_{k,t}$ , uma vez que ambos os desvios ainda podem ocorrer.

### Formulação do modelo não linear

A formulação do modelo de otimização não linear da rede de fluxo é representada pela expressão (7), tendo como restrições as expressões (2), (3), (4), (5) e (6). Os termos das expressões foram definidos no item da programação linear.

$$\text{Minimizar} \left\{ \sum_{i,j=1}^n c_{ij} q_{ij,t} + \sum_{i,j=1}^y c_p \left( \frac{D_{p,t} - q_{ij,t}^p}{D_{p,t}} \right)^2 + \sum_{k=1}^m c_k \left( \frac{d_{k,t}^-}{g_{k,t}} \right)^2 \right\} \text{ para } \forall D_{p,t}, g_{k,t} > 0 \quad (7)$$

O modelo opera como se fosse cobrada uma “multa” cada vez que uma demanda ou o volume-meta de um reservatório não forem atendidos e quando um link tem algum custo adicional. O quadrado da diferença entre o que é requerido e o que se tem disponível é multiplicado pelo custo desse “não atendimento”, em que o custo cresce de acordo com a prioridade do ponto (a prioridade máxima é 1 e a mínima é 99). Assim, garante-se que os pontos prioritários serão atendidos primeiro. O modelo tenta minimizar esses custos de acordo com a disponibilidade hídrica.

Da mesma forma que o modelo linear, no modelo não linear, as unidades de medida foram uniformizadas para que se pudessem calcular os balanços de massa nos nós. Como os desvios entre os volumes-meta e os volumes finais nos reservatórios normalmente assumem valores maiores que os desvios entre os volumes requeridos das demandas e os volumes atendidos, esses desvios tornam-se adimensionais ao dividir cada termo quadrado da expressão (7) pelo volume-meta do reservatório ou pela demanda requerida.

### Interface do AcquaNetXL

A interface da planilha foi criada para importar os dados do arquivo gerado pelo AcquaNet para o formato da planilha e para facilitar o processamento dos dados. A tela inicial do AcquaNetXL é apresentada na Figura 1.

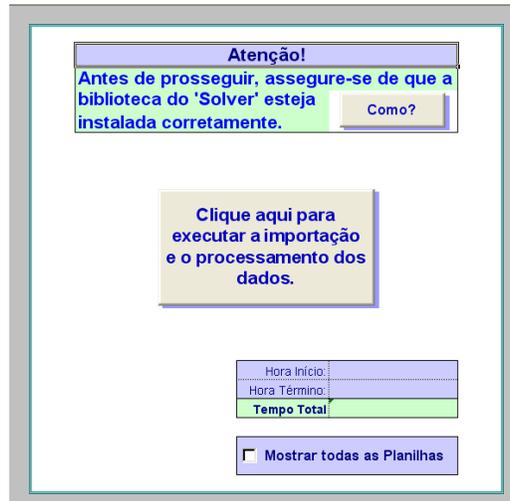


FIGURA 1. Tela inicial da planilha AcquaNetXL. **Home screen AcquaNetXL worksheet.**

O processo de importação cria as planilhas correspondentes aos elementos da rede de fluxo: Reservatórios, Demandas, Nós de Passagem e Links, conforme Figura 2, que exhibe a tela “Índice” com os links para essas planilhas. O próximo passo deve ser a execução da otimização da rede.

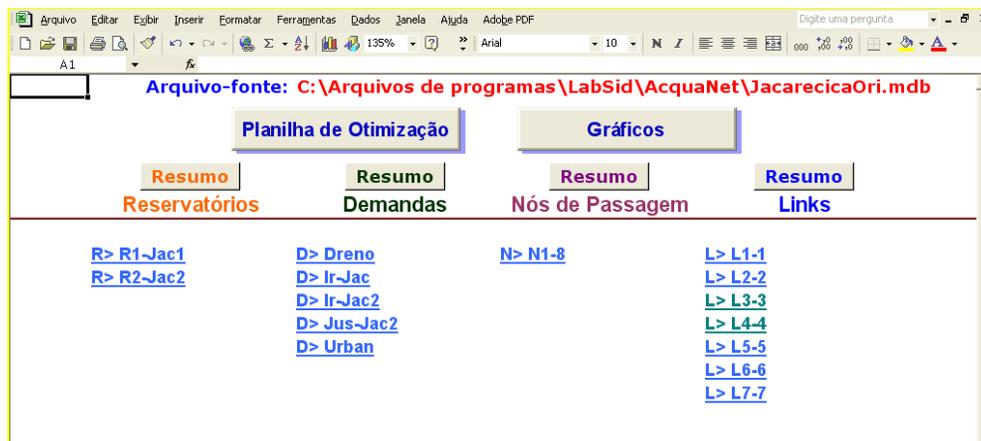


FIGURA 2. Tela de índice da planilha AcquaNetXL. **Index screen AcquaNetXL worksheet.**

### Otimização

Na tela de otimização, o usuário tem duas opções de função-objetivo a serem utilizadas: Função Linear ou Função Não Linear. Em caso de dúvida, os botões de ajuda (indicados pelo sinal de interrogação) mostram quais são as equações relacionadas a cada função, com detalhes quanto a restrições e definições de variáveis. Feita a opção, o usuário deve clicar no botão “Otimizar”, que dá

início ao processo. A otimização pode levar alguns minutos e até horas, dependendo do número de pontos da rede. Após a otimização ser concluída, a tela "Resumo" (Figura 3) é automaticamente preenchida, apresentando informações sintetizadas sobre cada um dos pontos da rede.

| Índice Demandas | Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses) | Frequência abaixo da demanda necessária (%) | Volume acumulado dos déficits (Mm³) | Vazão média fornecida (m³/s) | Índice Passagens | Vazão afluyente média (m³/s) | Vazão afluyente mínima (m³/s) | Vazão afluyente máxima (m³/s) | Vazão efluyente média (m³/s) | Vazão efluyente mínima (m³/s) | Vazão efluyente máxi (m³/s) |
|-----------------|---|---|-------------------------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| D> Dreno        | 307   | 98%   | 80.689,109                          | 1,282                        | N> N1-8          | 1,292                        | 0,000                         | 101,050                       | 1,292                        | 0,000                         | 101,050                     |
| D> Ir-Jac       | 20  | 6%  | 3,576                               | 0,046                        |                  |                              |                               |                               |                              |                               |                             |
| D> Ir-Jac2      | 229   | 73%   | 358,914                             | 0,007                        |                  |                              |                               |                               |                              |                               |                             |
| D> Jus-Jac2     | 0   | 0%  | 0,000                               | 0,010                        |                  |                              |                               |                               |                              |                               |                             |
| D> Urban        | 307   | 98%   | 177,516                             | 0,003                        |                  |                              |                               |                               |                              |                               |                             |

FIGURA 3. Tela de resumos da planilha AcquaNetXL. **Summary screen AcquaNetXL worksheet.**

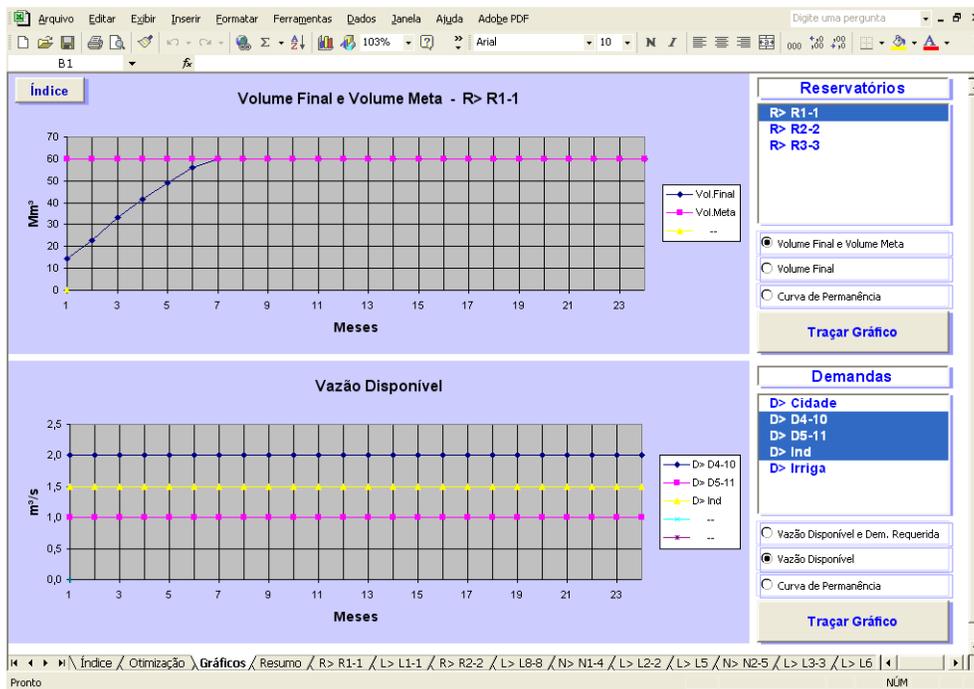
Caso não esteja satisfeito com os resultados, o usuário pode retornar à planilha "Otimização" e otimizar a rede novamente, quantas vezes desejar. Assim, pode-se fazer a otimização com os dois tipos de função-objetivo. Nesse caso, pode-se escolher entre manter os dados iniciais provenientes da última otimização e utilizá-los como solução inicial ou apagá-los, e partir com a solução inicial zerada, clicando no botão "Zerar a Solução Inicial". Essa alternativa é particularmente importante para a otimização não linear, pois a solução inicial influencia nos resultados finais. Na otimização linear, esse problema não ocorre.

**Análise dos resultados**

Os dados otimizados da rede podem ser analisados basicamente por meio de gráficos predefinidos, conforme apresentado na Figura 4, ou resumos de dados fundamentais. Pode-se, ainda, gerar outros gráficos fazendo uso dos recursos que o MS Excel oferece.

Os gráficos predefinidos são dinâmicos, podendo-se visualizar diferentes gráficos numa mesma tela. Basta selecionar o tipo de gráfico, o(s) ponto(s) desejado(s) e clicar em "Traçar Gráfico". Para selecionar mais de um ponto, deve-se clicar em cada nome mantendo a tecla "Ctrl" pressionada.

Os resumos são visualizados por meio dos botões localizados acima de cada expressão: "Reservatórios", "Demandas", "Nós de Passagens" e "Links", na tela "Índice", e são visualizados automaticamente ao final de cada otimização da rede. Eles fornecem os mesmos dados que o programa AcquaNet fornece em sua seção de resumos. Podem-se, também, selecionar as telas de cada ponto (Figura 5) para ter acesso aos dados específicos, bem como os valores de volumes e vazões que ocorreram em cada mês da série histórica.

FIGURA 4. Gráficos dos resultados da otimização. **Graphs of the optimization results.**

| Índice | Ano  | Mês | Mm³ Vini | m³/s Qafluente | m³/s Qnatural | m³/s Qtransf in | Mm³ Vevap | % Vmeta | Mm³ Vvertido | m³/s Qsai da | Mm³ Vfinal | Q L1-1 | Q L2-2 |
|--------|------|-----|----------|----------------|---------------|-----------------|-----------|---------|--------------|--------------|------------|--------|--------|
| 4      | 1963 | 1   | 4,40     | 0,00           | 0,02          | 0,00            | 0,11      | 1,00    | 0,00         | 0,11         | 4,05       | 0,11   | 0,00   |
| 5      | 1963 | 2   | 4,05     | 0,00           | 0,02          | 0,00            | 0,08      | 1,00    | 0,00         | 0,11         | 3,75       | 0,11   | 0,00   |
| 6      | 1963 | 3   | 3,75     | 0,00           | 0,05          | 0,00            | 0,08      | 1,00    | 0,00         | 0,10         | 3,54       | 0,10   | 0,00   |
| 7      | 1963 | 4   | 3,54     | 0,00           | 0,13          | 0,00            | 0,00      | 1,00    | 0,00         | 0,10         | 3,62       | 0,10   | 0,00   |
| 8      | 1963 | 5   | 3,62     | 0,00           | 0,52          | 0,00            | -0,05     | 1,00    | 0,00         | 0,25         | 4,40       | 0,01   | 0,24   |
| 9      | 1963 | 6   | 4,40     | 0,00           | 1,14          | 0,00            | -0,07     | 1,00    | 3,00         | 0,01         | 7,40       | 0,01   | 0,00   |
| 10     | 1963 | 7   | 7,40     | 0,00           | 0,33          | 0,00            | -0,09     | 1,00    | 0,00         | 1,48         | 4,40       | 0,00   | 1,48   |
| 11     | 1963 | 8   | 4,40     | 0,00           | 0,07          | 0,00            | 0,00      | 1,00    | 0,19         | 0,00         | 4,59       | 0,00   | 0,00   |
| 12     | 1963 | 9   | 4,59     | 0,00           | 0,06          | 0,00            | 0,04      | 1,00    | 0,22         | 0,03         | 4,62       | 0,03   | 0,00   |
| 13     | 1963 | 10  | 4,62     | 0,00           | 0,02          | 0,00            | 0,09      | 1,00    | 0,11         | 0,03         | 4,51       | 0,03   | 0,00   |
| 14     | 1963 | 11  | 4,51     | 0,00           | 0,03          | 0,00            | 0,11      | 1,00    | 0,00         | 0,03         | 4,40       | 0,03   | 0,00   |
| 15     | 1963 | 12  | 4,40     | 0,00           | 0,20          | 0,00            | 0,12      | 1,00    | 0,28         | 0,05         | 4,68       | 0,05   | 0,00   |
| 16     | 1964 | 1   | 4,68     | 0,00           | 0,17          | 0,00            | 0,13      | 1,00    | 0,31         | 0,11         | 4,71       | 0,11   | 0,00   |
| 17     | 1964 | 2   | 4,71     | 0,00           | 0,10          | 0,00            | 0,09      | 1,00    | 0,20         | 0,11         | 4,60       | 0,11   | 0,00   |
| 18     | 1964 | 3   | 4,60     | 0,00           | 0,08          | 0,00            | 0,09      | 1,00    | 0,05         | 0,10         | 4,45       | 0,10   | 0,00   |
| 19     | 1964 | 4   | 4,45     | 0,00           | 0,88          | 0,00            | 0,00      | 1,00    | 2,07         | 0,10         | 6,47       | 0,10   | 0,00   |
| 20     | 1964 | 5   | 6,47     | 0,00           | 0,93          | 0,00            | -0,07     | 1,00    | 0,00         | 1,73         | 4,40       | 0,01   | 1,72   |
| 21     | 1964 | 6   | 4,40     | 0,00           | 0,54          | 0,00            | -0,06     | 1,00    | 1,44         | 0,01         | 5,84       | 0,01   | 0,00   |
| 22     | 1964 | 7   | 5,84     | 0,00           | 1,03          | 0,00            | -0,07     | 1,00    | 0,00         | 1,59         | 4,40       | 0,00   | 1,59   |
| 23     | 1964 | 8   | 4,40     | 0,00           | 0,74          | 0,00            | 0,00      | 1,00    | 1,98         | 0,00         | 6,38       | 0,00   | 0,00   |
| 24     | 1964 | 9   | 6,38     | 0,00           | 0,34          | 0,00            | 0,06      | 1,00    | 2,72         | 0,03         | 7,12       | 0,03   | 0,00   |
| 25     | 1964 | 10  | 7,12     | 0,00           | 0,03          | 0,00            | 0,14      | 1,00    | 2,59         | 0,03         | 6,99       | 0,03   | 0,00   |
| 26     | 1964 | 11  | 6,99     | 0,00           | 0,38          | 0,00            | 0,18      | 1,00    | 3,26         | 0,05         | 7,66       | 0,05   | 0,00   |
| 27     | 1964 | 12  | 7,66     | 0,00           | 0,02          | 0,00            | 0,20      | 1,00    | 2,98         | 0,05         | 7,38       | 0,05   | 0,00   |
| 28     | 1965 | 1   | 7,38     | 0,00           | 0,06          | 0,00            | 0,19      | 1,00    | 2,65         | 0,11         | 7,05       | 0,11   | 0,00   |
| 29     | 1965 | 2   | 7,05     | 0,00           | 0,02          | 0,00            | 0,14      | 1,00    | 2,30         | 0,11         | 6,70       | 0,11   | 0,00   |
| 30     | 1965 | 3   | 6,70     | 0,00           | 0,02          | 0,00            | 0,13      | 1,00    | 1,95         | 0,10         | 6,35       | 0,10   | 0,00   |
| 31     | 1965 | 4   | 6,35     | 0,00           | 0,03          | 0,00            | 0,00      | 1,00    | 1,77         | 0,10         | 6,17       | 0,10   | 0,00   |
| 32     | 1965 | 5   | 6,17     | 0,00           | 0,03          | 0,00            | -0,07     | 1,00    | 0,00         | 0,71         | 4,40       | 0,01   | 0,70   |
| 33     | 1965 | 6   | 4,40     | 0,00           | 0,34          | 0,00            | -0,06     | 1,00    | 0,91         | 0,01         | 5,31       | 0,01   | 0,00   |
| 34     | 1965 | 7   | 5,31     | 0,00           | 0,49          | 0,00            | -0,07     | 1,00    | 0,00         | 0,86         | 4,40       | 0,00   | 0,86   |

FIGURA 5. Dados de um reservatório na planilha AcquaNetXL. **Data from a reservoir in the AcquaNetXL worksheet.**

## RESULTADOS

Os resultados de desempenho foram medidos através do tempo necessário para se concluírem dois procedimentos: os iniciais (para importar os dados do banco de dados, arranjá-los nas planilhas e calculá-los) e os de otimização. A comparação entre os tempos obtidos com a utilização de alguns computadores com diferentes características e desempenhos (processadores e quantidade de memória) está apresentada na Tabela 1.

Foram resolvidos dois problemas que resultaram em duas redes de fluxo distintas. Essas redes de fluxo foram utilizadas para a tomada dos tempos. A rede de fluxo denominada “JacarecicaOri.mdb” foi constituída por uma série histórica com 26 anos de dados e 15 nós, e correspondeu a um sistema com dois reservatórios para atender a dois projetos de irrigação e para abastecimento público. Já a rede de fluxo denominada “Sfran5.mdb” possuía uma série histórica com 5 anos de dados e 178 nós, e correspondeu ao sistema da bacia do Rio São Francisco, considerando a transposição para o Nordeste *Setentrional* (Tabela 2).

As duas redes de fluxo demandaram um tempo considerável para a etapa do processamento e, principalmente, para a otimização. A rede *JacarecicaOri* é um sistema de tamanho médio e sua simulação feita para um grande período de tempo. Já a rede *Sfran5* possui grande número de nós, configurando uma rede muito extensa, e sua análise foi feita para apenas 5 anos. Na Tabela 3, são apresentados os tempos de simulação de ambas as redes.

TABELA 1. Configuração dos computadores de teste. **Test computers configuration.**

| Computador | Processador           | Memória RAM (MB) | Sistema Operacional | Versão Excel |
|------------|-----------------------|------------------|---------------------|--------------|
| A          | Centrino Duo 1.66 GHz | 2.0 GB           | Windows XP Pro      | Office 2003  |
| B          | Pentium 4 2.2 GHz     | 1.0 GB           | Windows XP Pro      | Office 2003  |

TABELA 2. Características de cada rede de fluxo testada. **Characteristics of each tested network flow.**

| Rede de Fluxo (arquivo .mdb) | Meses | Total de Nós | Reservatórios | Demandas | Nós | Links |
|------------------------------|-------|--------------|---------------|----------|-----|-------|
| Sfran5.mdb                   | 60    | 178          | 20            | 52       | 17  | 89    |
| JacarecicaOri.mdb            | 312   | 15           | 2             | 5        | 1   | 7     |

TABELA 3. Comparação de desempenhos por tempo. **Performances comparison by time.**

| Rede              | Computador | Otimização |             |
|-------------------|------------|------------|-------------|
|                   |            | Linear     | Não Linear  |
| Sfran5.mdb        | A          | 32 s       | 5 min 52 s  |
|                   | B          | 15 s       | 2 min 34 s  |
| JacarecicaOri.mdb | A          | 46 s       | 34 min 16 s |
|                   | B          | 18 s       | 15 min 12 s |

### Comparação dos resultados entre o AcquaNetXL e o AcquaNet

Os resultados fornecidos pelo AcquaNetXL, que utiliza o algoritmo *Solver*, devem, inevitavelmente, ser comparados aos fornecidos pelo AcquaNet, que usa o algoritmo *out-of-kilter*. Inicialmente, o sucesso dessa comparação seria a certeza da correta aplicação das ideias investidas no AcquaNetXL. No entanto, apenas a otimização linear dos dados pode ser comparada, já que o AcquaNet não oferece um modelo de otimização não linear.

Nas Tabelas 4 e 5, estão resumidos os resultados de cada método, *Solver* (AcquaNetXL) e o *Out-of-Kilter* (AcquaNet). É possível observar que, com o *Solver* (AcquaNetXL), os volumes dos reservatórios são mantidos mais tempo (em número de meses) próximo ao volume-meta,  $T_{máx}$  da Tabela 4, comparado ao resultado do *Out-of-Kilter* (AcquaNet). Isso, porém, tem impacto negativo no atendimento das demandas, em que é possível observar que o volume do déficit de atendimento é maior para o AcquaNetXL: coluna  $V_d$  da Tabela 5.

Os resultados obtidos para a rede de fluxo da bacia do Rio São Francisco e as bacias do Nordeste Setentrional também apresentaram tendência semelhante.

TABELA 4. Resultados dos modelos de otimização linear com o *Solver* (AcquaNetXL) e o *Out-of-Kilter* (AcquaNet) para os reservatórios do sistema JacarecicaOri. **Results of the linear optimization models with the *Solver* (AcquaNetXL) and the *Out-of-Kilter* (AcquaNet) for the reservoirs of the JacarecicaOri system.**

| Reservatórios        | Prioridade | Tmáx (meses) | F (%) | V (Mm <sup>3</sup> ) | Fvert (%) | Tesv (meses) | Fesv (%) |
|----------------------|------------|--------------|-------|----------------------|-----------|--------------|----------|
| <i>Solver</i>        |            |              |       |                      |           |              |          |
| R1-Jac1              | 2          | 9            | 46%   | 145,627              | 30%       | 0            | 0        |
| R2-Jac2              | 60         | 7            | 40%   | 371,982              | 46%       | 0            | 0        |
| <i>Out-of-Kilter</i> |            |              |       |                      |           |              |          |
| R1-Jac1              | 2          | 9            | 50%   | 0                    | 0         | 0            | 0        |
| R2-Jac2              | 60         | 151          | 95%   | 0                    | 0         | 9            | 23,4     |

Tmáx - tempo máximo abaixo do volume-meta; F - frequência abaixo do volume-meta; V - volume acumulado vertido; Fvert - frequência com que houve vertimento; Tesv - tempo máximo de esvaziamento; Fesv - frequência de esvaziamento.

TABELA 5. Resultados dos modelos de otimização linear com o *Solver* (AcquaNetXL) e o *Out-of-Kilter* (AcquaNet) para as demandas do sistema JacarecicaOri. **Results of the linear optimization models with the *Solver* (AcquaNetXL) and the *Out-of-Kilter* (AcquaNet) for the reservoirs of the JacarecicaOri system demands.**

| Demanda              | Prioridade | Tmáx. (meses) | F (%) | Vd (Mm <sup>3</sup> ) | Qmed. (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) |
|----------------------|------------|---------------|-------|-----------------------|---|
| <i>Solver</i>        |            |               |       |                       |   |
| Ir-Jac               | 1          | 1             | 2,0   | 0,353                 | 0,050                                   |
| Ir-Jac2              | 15         | 4             | 25,0  | 78,503                | 0,353                                   |
| Jus-Jac2             | 10         | 0             | 0,0   | 0                     | 0,010                                   |
| Urban                | 5          | 9             | 48,0  | 87,665                | 0,114                                   |
| <i>Out-of-Kilter</i> |            |               |       |                       |   |
| Ir-Jac               | 1          | 0             | 0,0   | 0                     | 0,050                                   |
| Ir-Jac2              | 15         | 8             | 22,1  | 108,536               | 0,317                                   |
| Jus-Jac2             | 10         | 8             | 20,5  | 1,682                 | 0,008                                   |
| Urban                | 5          | 8             | 19,9  | 29,197                | 0,184                                   |

Tmáx. - tempo máximo abaixo da demanda necessária; F - frequência abaixo da demanda necessária; Vd - volume acumulado dos déficits; Qmed. - vazão média fornecida.

A otimização com o *Solver* tende a minimizar as deficiências, enquanto a otimização realizada com o *out-of-kilter* segue as prioridades de modo rigoroso. Sendo assim, os resultados de cada método são ligeiramente diferentes, mas condizem com a estrutura da rede e seus limites, ficando a critério do usuário decidir qual o método a ser utilizado.

Deve-se considerar, porém, que os modelos têm duas diferenças relevantes entre si. Uma é devida à precisão dos cálculos fornecida pelos dois programas, em que o *MS Excel* tem maior precisão, ainda que a diferença seja mínima. A outra refere-se às abordagens das taxas de evaporação. Enquanto o AcquaNet admite uma relação polinomial entre volume do reservatório e área exposta ao calor, o *MS Excel* a faz de forma linear. Teoricamente, as diferenças entre os métodos são consideradas irrelevantes, pois são ofuscadas pela imprecisão da estimativa da taxa de evaporação adotada. Isso significa, na prática, que os volumes de água movimentados pela diferença entre chuvas e evaporações não podem ser calculados com precisão absoluta. Esse fato foi decisivo para a utilização do modelo linear para a estimativa da área do reservatório, devido a sua maior simplicidade de aplicação.

Fazendo a comparação entre a modelagem linear e não linear, utilizando a o AcquaNetXL, notou-se que, dependendo da configuração da rede de fluxo e das prioridades de cada nó, os

resultados da otimização do *Solver* pelos modelos linear e não linear serão diferentes. A diferença entre um modelo e outro está no equacionamento, conforme descrito anteriormente. Mas o que se observa é que o modelo não linear tende a favorecer o armazenamento de água no reservatório, evitando que o volume final fique abaixo do volume-meta e reduzindo o volume de vertimento. Isso geralmente provoca déficits na demanda.

## CONCLUSÕES

O AcquaNetXL assume com sucesso o papel de facilitar o entendimento e a formulação do problema de alocação de água na bacia, além de utilizar algoritmo de otimização muito eficiente, capaz de resolver problemas complexos linear e não linear. Para o usuário que está pouco familiarizado com o AcquaNet, o AcquaNetXL representa uma alternativa mais versátil, em que é possível ao usuário que já possui conhecimentos no *MS Excel*, manipular os dados com grande facilidade.

O AcquaNetXL mantém os conceitos e atributos de um sistema de suporte à decisão que tem as características de estreitar a comunicação entre o usuário e o computador, facilitar o entendimento e a formulação do problema, a interpretação dos resultados de análise e de auxiliar o processo de tomada de decisão, tornando-o mais ordenado, objetivo e transparente.

## REFERÊNCIAS

- BARROS, M.T.L.; TSAI, F.T-C.; YANG, S-L.; LOPES, J.E.G.; YEH, W.W-G. Optimization of large-scale hydropower system operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.129, n.3, p.178-188, 2003.
- BENLI, B.; KODAL, S. A non-linear model for farm optimization with adequate and limited water supplies Application to the South-east Anatolian Project (GAP) Region. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.62, n.3, p.187-203, 2003.
- GRABOW, G.L.; MCCORMICK, P.E. Planning for water allocation and water quality using a spreadsheet-based model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.133, n.6, p.560-564, 2007.
- HUDDLESTON, D.H.; ALARCON V.J.; CHEN, W. Water distribution network analysis using excel. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v.130, n.10, p.1.033-1.035, 2004.
- LABADIE, J.W. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.130, n.2, p.93-111, 2004.
- MECKENBURG, D.E.; WARD, A. Stream modules: spreadsheet tools for river evaluation, assessment and monitoring. St Joseph: ASAE, 2004. p.312-322 (Publication, 701P0904).
- MÉLLO JÚNIOR, A.V.; PORTO, R.L.L.; SCHARDONG, A.; ROBERTO, A.N. Aplicação do método de pontos interiores para otimização de sistemas de recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005. 1 CD-ROM.
- NGUEYEN, N.C.; WEGENER, M.; RUSSEL, I. Decision support systems in Australian agriculture: state of the art and future development. *AFBM Journal*, v.4, n.1-2, p.14-21, 2007.
- PORTO, R.L.L.; MÉLLO JÚNIOR, A.V.; ROBERTO, A.N.; PALOS, J.C. Acquanet: arquitetura, estratégias e ferramentas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005. 1 CD-ROM.
- SIMONOVIC, S. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.118, n.3, p.262-280, 1992.
- SCHARDONG, A. *Aplicação de técnicas de programação linear e extensões para otimização da alocação de água em sistemas de recursos hídricos, utilizando métodos de pontos interiores*. 2006.

126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VARIS, O.; KESKINEN, M. Policy analysis for the Tonle Sap Lake, Cambodia: A bayesian network model approach. *Water Resources Development*, v.22, n.3, p.417-431, 2006

WESTPHAL, K.S.; VOGEL, R.M.; KIRSHEN P.; CHAPRA, S.C. Decision support system for adaptive water supply management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.129, n.3, p.165-177, 2003.

YEH, W.W-G. Reservoir management and operation models: a state-of-the-art review. *Journal Water Resources Planning and Management*, New York, v.21, n.12, p.1.797-1.818, 1985.