

## USO DO EPANET NO DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Kennedy Flávio Meira de Lucena<sup>1</sup>

**Resumen:** O dimensionamento de sistemas de irrigação exige a análise de muitas alternativas para que se obtenha a opção mais viável técnica e economicamente, o que requer na maioria das situações o auxílio de modelos computacionais. Existem diversos modelos computacionais disponíveis para o dimensionamento e análise de redes hidráulicas, mas com uso mais difundido no meio acadêmico. Neste trabalho, faz-se uma aplicação do modelo computacional EPANET para o dimensionamento de um sistema de irrigação por aspersão, com o objetivo de avaliar suas potencialidades e promover sua maior difusão entre os profissionais da área. O modelo demonstrou adequação ao problema analisado neste trabalho.

**Abstract:** The irrigation systems design demands the analysis of many alternatives to achieve the viable technical and economical option, which requires aid of the computational models. There are several computational models available for networks design and analysis, but with greater use in the academic context. The objective of this work is to evaluate the potentialities of the computational model EPANET for sprinkler irrigation system design and to promote your largest diffusion among the professionals of the area. The model demonstrated to well-adjusted for the problem analyzed in this work.

**Palavras-clave:** modelo computacional, redes hidráulicas, aspersor, viabilidade técnica

**Keywords:** computational model, hydraulic network, sprinkler, technical viability

### INTRODUÇÃO

O dimensionamento de sistemas de irrigação pressurizados, a exemplo de sistemas de abastecimento de água, hidraulicamente, permite inúmeras possibilidades de configurações de redes que atendem às restrições físicas do problema (Gomes, 1999). No entanto, o atendimento dessas restrições não garante a melhor concepção econômica do projeto, que dever ser perseguida e também priorizada. As redes de irrigação, normalmente, apresentam menor complexidade de dimensionamento e operação que as de abastecimento urbano. Podem-se citar, como aspectos diferenciadores que: as redes de irrigação são na sua grande maioria ramificadas; as demandas nos pontos emissores são praticamente invariáveis no tempo; não permitem grandes variações nas vazões dos emissores; presenciam pouca variabilidade operacional e presenciam menos incertezas nos processos hidráulicos.

---

<sup>1</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba (CEFET-PB) – Avenida 1º de Maio 720, Jaguaribe – CEP 58015-430 – João Pessoa - PB (Brasil) – Tel: (+55) 83 3208 3073 – E-mail: kennedy@lsd.ufcg.edu.br

O principal objetivo dos projetos de redes hidráulicas para irrigação é a obtenção da combinação mais viável, técnica e economicamente, entre os custos fixos e os custos variáveis. Os sistemas de irrigação devido à elevada demanda hídrica consomem grande quantidade de energia com bombeamento que, em determinadas situações, pode ser o fator de insucesso dos empreendimentos. No entanto, em alguns sistemas como os de aspersão permanente ou os localizados, a rede de distribuição é o fator que mais afeta o custo total. Segundo Mantovani (2000) o custo médio estimado para sistemas de irrigação por aspersão convencional varia entre 400 US\$/ha e 600 US\$/ha, os do tipo pivô-central entre 500 US\$/ha e 800 US\$/ha e os de gotejamento entre 666 US\$/ha e 1333 US\$/ha. Os sistemas de aspersão do tipo permanente possuem uma rede enterrada que atende toda a área irrigada e, portanto, não exigem a movimentação de tubulações, como nos sistemas convencionais. Essa característica lhes conferem grande economia de mão-de-obra, e permite certo grau de automação, mas o elevado custo desses sistemas é o principal fator da baixa utilização dos mesmos.

Muitos métodos têm sido desenvolvidos e aprimorados para o dimensionamento de redes hidráulicas tais como: Hardy Cross (1936), Granados (1986), Gradiente Reduzido Generalizado (GRG2) (Lasdon et al., 1984). O uso da pesquisa operacional visa justamente a busca da solução mais viável, ou ótima, dentro de um determinado panorama onde existem limitações de várias naturezas, como a limitação de recursos econômicos. Assim, com a aplicação de técnicas de otimização pode-se encontrar a solução ótima para os problemas. Houve uma grande evolução no campo da pesquisa operacional nas últimas décadas com o desenvolvimento de técnicas numéricas para solução de problemas complexos através de modelos computacionais. Problemas esses que não poderiam ser solucionados analiticamente. Dentre as técnicas determinísticas para solução de problemas matemáticos podem-se citar: enumeração exaustiva (Lanna, 1997) e Dandy & Hassanli (1996), programação linear (Karmeli et al., 1968) e Gupta (1969) e a programação não linear (Porto & Azevedo, 1997).

Um grande número de programas computacionais estão disponíveis para a solução de problemas de programação não linear com ou sem restrições e que podem ser usados na otimização de redes hidráulicas. Muitos pacotes computacionais foram desenvolvidos e são de fácil acesso. Pode-se citar como exemplo: o programa ADS (Automated Design Synthesis) desenvolvido pela Universidade da Califórnia; o programa GAMS (General Algebraic Modeling System) da GAMS Development Corporation; o programa LANCELOT desenvolvido no Rutherford Appleton Laboratory da Inglaterra; o programa SOLVER existente em algumas planilhas eletrônicas como a EXCEL (Cirilo, 1997); o MATLAB; o MINOS; o GINO; entre outros. Os pacotes computacionais MINOS, GINO, GAMS e SOLVER baseiam-se na técnica do gradiente reduzido generalizado (GRG) para identificar o ótimo local do problema da rede. Algumas características dos algoritmos presentes nesses modelos de PNL são a inclusão, explicitamente, das restrições e os custos podem ser expressos como uma função não linear de diâmetro e comprimento do tubo.

Esses métodos e técnicas são amplamente difundidos no meio acadêmico, mas ainda têm pouca utilização pelos projetistas, que ainda fazem uso de procedimentos menos eficientes de cálculo. Algumas dessas técnicas foram implementadas em modelos computacionais para a análise e dimensionamento de redes hidráulicas, a exemplo do EPANET (Rossman, 2002). Este software é de uso livre e evidencia grande visibilidade e aceitabilidade no setor de abastecimento urbano, para o qual foi prioritariamente desenvolvido. Embora o EPANET apresente potencialidades para o uso em projetos de irrigação não se tem presenciado esse tipo de aplicação. Este trabalho visa, portanto, apresentar uma análise da aplicação do EPANET no dimensionamento de um sistema de irrigação, promovendo sua maior aplicação nessa área da engenharia de recursos hídricos.

## METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido a partir da análise do uso do software EPANET versão 2.0 no dimensionamento de um sistema de irrigação por aspersão permanente, levando-se em consideração apenas os aspectos hidráulicos da rede, partindo-se do pressuposto que as questões agrônômicas foram previamente abordadas.

O EPANET 2.0 foi desenvolvido para análise de sistemas de distribuição pressurizados, permitindo simulações, ao longo do tempo, do comportamento hidráulico da rede e da qualidade da água. Pode ser usado como uma ferramenta de projeto a partir da criação de cenários e de avaliação de sistemas, aumento o conhecimento dos processos e auxiliando na melhoria da gestão. Como principais características de modelação hidráulica podem-se citar: capacidade de representar redes de grandes dimensões; uso de diversas fórmulas de perdas de carga; modela bombas diversas e suas associações; calcula o custo com energia; modela vários tipos de válvulas; modela reservatórios com níveis variáveis; múltiplos consumos nos pontos de demanda (nós); modela dispositivos emissores (ex. aspersores) e permite a operação via controles. Possui uma interface que possibilita a visualização e impressão dos principais dados de interesse para a análise do sistema, como: elevações, pressões, demandas (vazões), velocidades de fluxo, diâmetros, comprimentos, níveis de reservatórios, mapeamentos, buscas refinadas, estados dos componentes do sistema, entre outras potencialidades (Rossman, 2002).

### Dados para aplicação do modelo

- Dimensões da área (Figura 1):

comprimento ( $L_x$ ) = 432 m

largura ( $L_y$ ) = 288 m

área irrigada (AI) = 12,44 ha

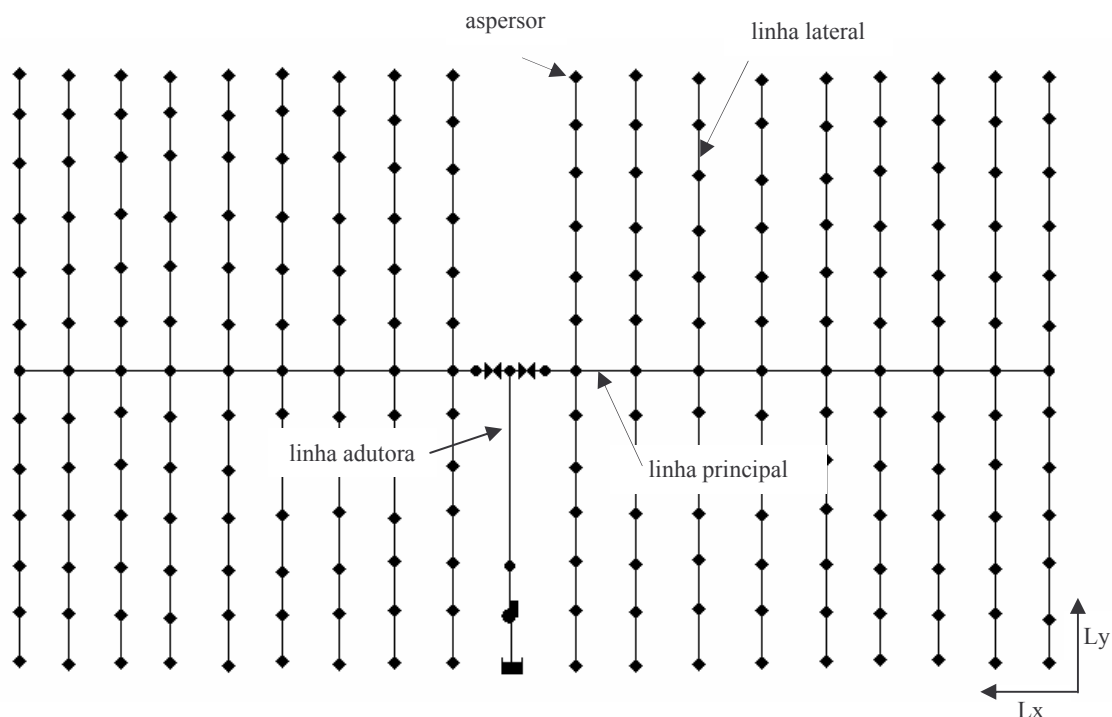


Figura 1. Representação esquemática da rede em estudo no EPANET

- Aspersor:
  - bocais = 4,0 mm x 7,2 mm
  - espaçamento (E) = 24 m x 24 m
  - pressões de serviço (PS) = 25 a 40 mca
  - diâmetro irrigado (DI) = 33 m a 37 m
  - equação do emissor,  $q = 0,2248 h^{0,4915}$ , com h (mca) e q (L/s)
- Bomba centrífuga:
  - para os cenários de 1 a 5
    - curva da bomba,  $H_{man} = -0,001384 Q^{2,04} + 70$ , com Q (L/s) e  $H_{man}$  (mca)
    - curva de rendimento,  $\eta = -0,0041 Q^2 + 0,9644 Q + 12,357$ , com Q (L/s) e  $\eta$  (%)
  - para o cenário 6
    - curva da bomba,  $H_{man} = -0,04815 Q^{1,78} + 80$ , com Q (L/s) e  $H_{man}$  (mca)
    - curva de rendimento,  $\eta = -0,059 Q^2 + 4,508 Q - 16,571$ , com Q (L/s) e  $\eta$  (%)
- Descrição do sistema:

O sistema apresenta layout retangular, composto por unidade elevatória e tubulação adutora que conduz água a duas unidades operacionais simétricas e com mesmas dimensões e características. Cada unidade é operada individualmente e é composta por uma válvula reguladora de vazão, mantendo-a aberta ou fechada, linha principal que alimenta um grupo de linhas laterais em ambos os lados, totalizando 18 laterais. Nos cenários de 1 a 5 em cada linha lateral estão instalados 6 aspersores com tubos de suporte com 2 m de altura. Desse modo, em uma unidade operacional trabalha-se com 108 aspersores em funcionamento simultâneo. No cenário 6 em cada linha lateral estão inseridos apenas 2 aspersores que serão movimentados juntos ao longo da linha. Foi inserido na rede um reservatório representando qualquer manancial sem variação de nível (Figura 1). Os aspersores estão representados na Figura 1 como nós da rede; os nós da linha principal têm apenas a função de conexão com a linha lateral. Cada trecho entre dois aspersores tem comprimento de 24 m (4 tubos), e entre o primeiro aspersor da linha lateral e a linha principal o espaçamento é de 12 m (2 tubos)

- Tubulação da rede em PVC (Quadro 1):

*Quadro 1. Diâmetros comerciais empregados nas simulações*

| Classe de pressão (mca) | DN (mm) | DI (mm) | Custo (US\$/m) |
|-------------------------|---------|---------|----------------|
| 40                      | 50      | 48,05   | 0,8            |
| 40                      | 75      | 72,45   | 1,6            |
| 40                      | 100     | 97,45   | 2,5            |
| 40                      | 125     | 119,75  | 3,7            |
| 40                      | 150     | 143,7   | 4,5            |
| 60                      | 200     | 212,45  | 7,2            |
| 60                      | 250     | 262,35  | 9,2            |

- Parâmetros econômicos

valor da tarifa de energia elétrica = 0,05835 US\$ kW/h (sem desconto)

taxa de juros anual,  $i = 6\%$

número de anos para amortização do capital,  $n = 15$

### Procedimento de dimensionamento

O EPANET é uma ferramenta de simulação que dá como resposta o equilíbrio hidráulico, ou seja as pressões e vazões em todos os pontos da rede, usando o Método do Gradiente para solução do problema (Rossman, 2002). Como não possui ferramentas de otimização econômica sua utilização como instrumento de projeto será baseada em critérios técnicos e na experiência do projetista. Portanto, a solução encontrada dependerá da sensibilidade do usuário ao problema e dos critérios adotados, podendo ser tecnicamente adequada, mas economicamente não ser a mais viável.

### Foram adotados os seguintes critérios de projeto

- Velocidade máxima nas tubulações de 2,8 m/s;
- Máxima variação de vazão entre os aspersores na unidade operacional de 10%;
- Pressão de operação média dos emissores de 30 mca;
- Máximas pressões admissíveis nas tubulações de 40 e 60 mca.

### Cenários experimentados nos dimensionamentos

- Cenário 1: Baseado nos limites máximos de velocidade e pressão nas tubulações para área em nível;
- Cenário 2: Considerando os limites máximos de velocidade e pressão nas tubulações e a máxima variação de vazão dos aspersores, usando a equação de Hazen-Williams ( $C = 145$ );
- Cenário 3: Cenário 2, usando a equação de Darcy-Weisbach ( $e = 0,005$ );
- Cenário 4: Baseado nos limites máximos de velocidade e pressão nas tubulações para área com desnível de 5% na direção da linha principal ( $Lx$ );
- Cenário 5: Baseado nos limites máximos de velocidade e pressão nas tubulações e na máxima variação de vazão dos aspersores para área com desnível 5% na linha principal;
- Cenário 6: Baseado nos limites de velocidade e pressão nas tubulações e na máxima variação de vazão dos aspersores para o sistema com dois aspersores por linha lateral.

### Parâmetros para comparação entre cenários simulados

*Custo total do sistema*

$$C_T = \frac{C_{REDE} FRC + C_{EN}}{A_I} \quad (1)$$

onde:

$C_T$  - custo total do sistema, US\$/ano ha

$A_I$  - área irrigada, ha

$C_{REDE}$  - custo da rede de irrigação (apenas linhas laterais e linha principal), US\$

FRC - fator de recuperação do capital

$C_{EN}$  - custo da energia, US\$/ano

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

onde:

$i$  - taxa de juros anual, decimal.

$n$  - número de anos de amortização do capital.

$$C_{EN} = C_{en} T_i P_{OT} \quad (3)$$

onde:

$C_{en}$  - valor da tarifa de energia elétrica, US\$ kW/h

$T_i$  - tempo de irrigação total na estação, h (estimado em 105 h)

$P_{OT}$  - potência requerida pelo sistema elevatório, kW

#### *Variação de vazão na unidade operacional*

$$\Delta q = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\max}} 100 \quad (4)$$

onde:

$\Delta q$  - variação de vazão na unidade operacional, (%)

$q_{\min}$  - vazão mínima do aspersor na unidade operacional, (L/s)

$q_{\max}$  - vazão máxima do aspersor na unidade operacional, (L/s)

#### *Variação de pressão na unidade operacional*

$$\Delta h = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{\max}} 100 \quad (5)$$

onde:

$\Delta h$  - variação de pressão na unidade operacional, (%)

$h_{\max}$  - pressão máxima do aspersor na unidade operacional, mca

$h_{\min}$  - pressão mínima do aspersor na unidade operacional, mca

#### *Coefficiente de uniformidade das vazões*

Um dos indicadores da performance do sistema de irrigação por aspersão é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (1942), CUC, que caracteriza com que performance está sendo aplicada a lâmina de irrigação ao solo. Neste trabalho o CUC foi adaptado para sua utilização, na fase de projeto, como parâmetro de avaliação da distribuição da vazão dos aspersores na unidade operacional.

$$C_{UV} = 100 \left( 1 - \frac{\sum |q_i - q_{med}|}{n q_{med}} \right) \quad (6)$$

onde:

$C_{UV}$  - uniformidade de vazão na unidade operacional, (%)  
 $q_i$  - vazão do aspersor  $i$  na unidade operacional, (L/s)  
 $q_{med}$  - vazão média dos aspersores na unidade operacional, (L/s)  
 $n$  - número de aspersores na unidade operacional

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro passo da modelação no EPANET 2.0, que consiste na representação esquemática da rede de distribuição, pode exigir um trabalho exaustivo inicial uma vez que depende do número de elementos que compõem um sistema de irrigação. No caso em estudo foram representados 235 trechos de tubulações, 216 aspersores ou nós com demandas, uma bomba e duas válvulas. Ressaltando, que a maioria dos trechos de tubulações, com 24 m de comprimento, foram formados por quatro tubos comerciais de 6 m. Assim, a representação completa de um sistema do tipo gotejamento demandaria um grande esforço, sendo necessário recorrer-se às simplificações da rede.

A segunda etapa do processo de modelação, a edição das propriedades dos elementos da rede, é facilitada pelas funções de edição disponíveis no programa. Algumas das propriedades foram previamente estabelecidas no “default”, tais como: comprimento dos trechos, diâmetros, rugosidade, equação de perda de carga, sistema de unidade, entre outras; e alteradas ao longo do processo de dimensionamento. Definidas as propriedades dos elementos e as condições operacionais iniciou-se o dimensionamento do sistema.

Com relação à operação do sistema analisado, apenas uma das unidades era operada com a abertura de uma das válvulas e, como as demandas nos nós não variam com o tempo, as simulações foram estáticas. Após cada simulação eram observados os critérios de projeto e realizados os ajustes necessários na rede. Esses ajustes basicamente consistiram de modificações nos diâmetros dos trechos da rede.

Quatro ferramentas do EPANET 2.0 foram fundamentais para as correções na rede. A primeira de *procura*, que permite a visualização dos parâmetros de avaliação hidráulica da rede: descarga dos emissores, pressões e velocidades. A segunda ferramenta de *consulta*, que permite a busca dos elementos com determinadas propriedades (ex. trechos com diâmetro igual a 48,05 mm, velocidades nos trechos maiores que 2,7 m/s, descarga do emissor menor que 1,15 L/s). A terceira de *seleção de tabela*, que permite a filtragem de informações. E a quarta, o *editor de grupo*, que possibilita a alteração de vários elementos simultaneamente (ex. substituir trechos com diâmetro igual a 48,05 mm por 72,45 mm) (Figura 2).

Normalmente, nos dimensionamentos de sistemas de irrigação, o conjunto motor-bomba é o último componente a ser dimensionado, mas neste tipo de aplicação se faz necessária a entrada da curva característica da bomba, que determinará o equilíbrio hidráulico da rede; afetando as pressões e as descargas dos emissores, e o custo com energia.

O processo de ajuste nas tubulações para o atendimento dos critérios de projeto, embora seja realizado por tentativas, exige poucas intervenções e depende do entendimento do usuário quanto ao problema. Esses ajustes são, de modo geral, simples e rápidos. Nos cenários analisados a maioria dos trechos apresentaram comprimentos de 24 m (4 tubos), logo para uma melhor aproximação com os valores definidos pelos critérios de projeto seria necessária uma maior discretização da rede, em comprimentos menores, o que levaria a um aumento significativo do número de trechos.



Nas Tabelas de 1 a 8 e Figuras 2 e 3 estão apresentados os principais resultados dos cenários simulados. O cenário 1 (Tabela 1) apresentou custo total cerca de 6% inferior aos cenários 2 e 3 (Tabelas 2 e 3). Isso era esperado, pois não considerou o limite de variação de vazão dos aspersores. Mesmo com o acréscimo de velocidade nas tubulações o custo com energia praticamente não diferiu dos cenários 2 e 3, em virtude da redução da vazão do sistema. No cenário 1 a máxima variação de vazão dos aspersores foi de 16,15%, mas apresentou um  $C_{UV}$  de 94,02% que pode ser um bom indicador da distribuição da água, uma vez que o CUC recomendado deve ser maior que 80% (Keller & Bliesner, 1990). O  $C_{UV}$ , deve no entanto, ser visto ressalvas, pois não considera as variações de fabricação dos aspersores, os problemas de funcionamento, as condições de campo e dá a mesma importância às variações acima ou abaixo da média.

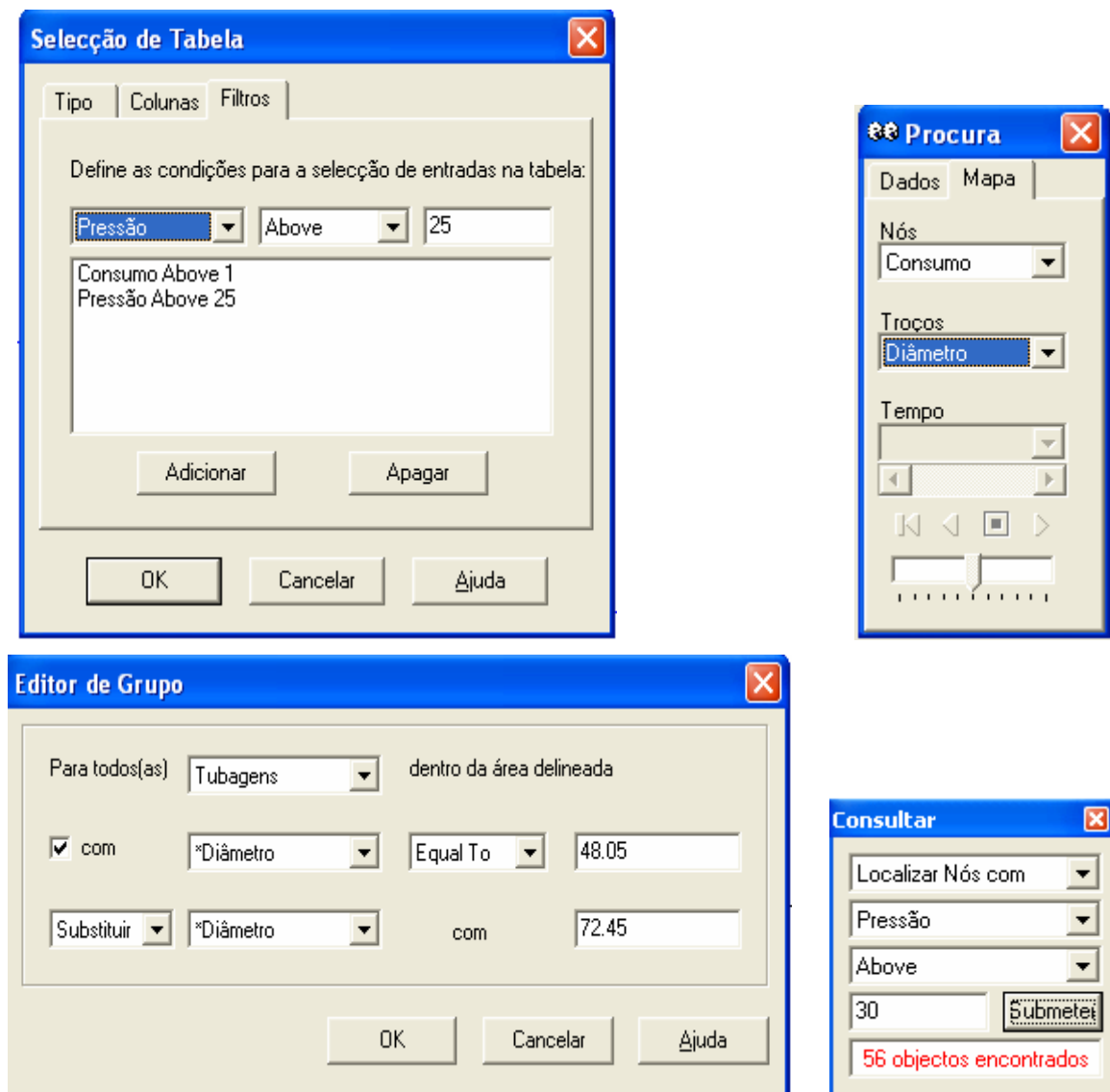


Figura 2. Funções do EPANET usadas para análise e ajustes na rede



O uso das Equações de Hazen-Williams e de Darcy-Weisbach (Tabelas 2 e 3) praticamente não promoveu diferenças nos dimensionamentos, ficando a opção por uma destas para o usuário, considerando-se as recomendações de aplicação da Equação de Hazen-Williams.

Comparando-se os cenários 4 e 5 (Tabelas 4, 5, 6 e 7) verifica-se a influência do critério variação de vazão nos custos do sistema. Para se obter uma variação de vazão em torno de 10% ocorreu um aumento de 2,45%, o que só foi possível na unidade em declive. Para a unidade em aclave o aumento foi de 15,22%.

Em todos os casos os custos com energia demonstraram ser importantes e, além disso, o projetista deve estar atento aos aumentos nas tarifas durante a vida útil do empreendimento, não desprezando a influência do custo da energia na definição da configuração de sistema.

Analizando-se o cenário 6 (Figura 5) verifica-se que a construção de uma rede com algum nível de movimentação dos aspersores reduz consideravelmente os custos do sistema (Tabela 8). Nesse caso são inúmeras as alternativas serem analisadas para se encontrar a mais viável.

Constatou-se que o modelo não executa a simulação quando se aplica um expoente de emissor da ordem de 0.05 ou menor nem com valores negativos. Esses dois casos podem ocorrer em dimensionamentos de sistemas de gotejamento ou de microaspersão.

Tabela 1. Resultados do dimensionamento para o cenário 1

| DN<br>(mm) | L<br>(m) | Pressão<br>(mca) |       | Vazão<br>(L/s) |        | Veloc.<br>(m/s) | P <sub>OT</sub><br>(kW) | Custo<br>(US\$/ha ano) |       |
|------------|----------|------------------|-------|----------------|--------|-----------------|-------------------------|------------------------|-------|
| 50         | 3456     | $h_{inP}$        | 38,02 | $q_{min}$      | 1,09   | $V_{max}$       | 74,69                   | $C_{REDE}$             | 62,86 |
| 75         | 1296     | $h_{fP}$         | 33,52 | $q_{max}$      | 1,30   | 2,75            | $H_{man}$ (m)           | $C_{EN}$               | 36,78 |
| 100        | 48       | $h_{inLin}$      | 37,82 | $q_{med}$      | 1,19   | $V_{min}$       | 40,42                   | $C_T$                  | 99,64 |
| 125        | 48       | $h_{fLin}$       | 28,25 | $Q_T$          | 128,46 | 0,6             | $\eta$ (%)              | -                      | -     |
| 150        | 48       | $h_{inLf}$       | 33,52 | $\Delta q$ (%) | 16,15  | -               | 68,15                   | -                      | -     |
| 200        | 144      | $h_{fLf}$        | 24,79 | $C_{UV}$ (%)   | 94,02  | -               | -                       | -                      | -     |
| 250        | 120      | $h_{med}$        | 29,73 | -              | -      | -               | -                       | -                      | -     |
| -          | -        | $\Delta h$ (%)   | 29,81 | -              | -      | -               | -                       | -                      | -     |

onde:

$h_{inP}$  – pressão no início da linha principal

$h_{fP}$  – pressão no final da linha principal

$h_{inLin}$  – pressão no início da primeira linha lateral

$h_{fLin}$  – pressão no final da primeira linha lateral

$h_{inLf}$  – pressão no início da última linha lateral

$h_{fLf}$  – pressão no final da última linha lateral

$h_{med}$  – pressão média na unidade operacional

$\Delta h$  – variação de pressão na unidade operacional

$H_{man}$  – altura manométrica

$q_{min}$  – aspersor de vazão mínima na unidade operacional

$q_{max}$  – aspersor de vazão máxima na unidade operacional

$q_{med}$  – vazão média na unidade operacional

$Q_T$  – vazão total bombeada

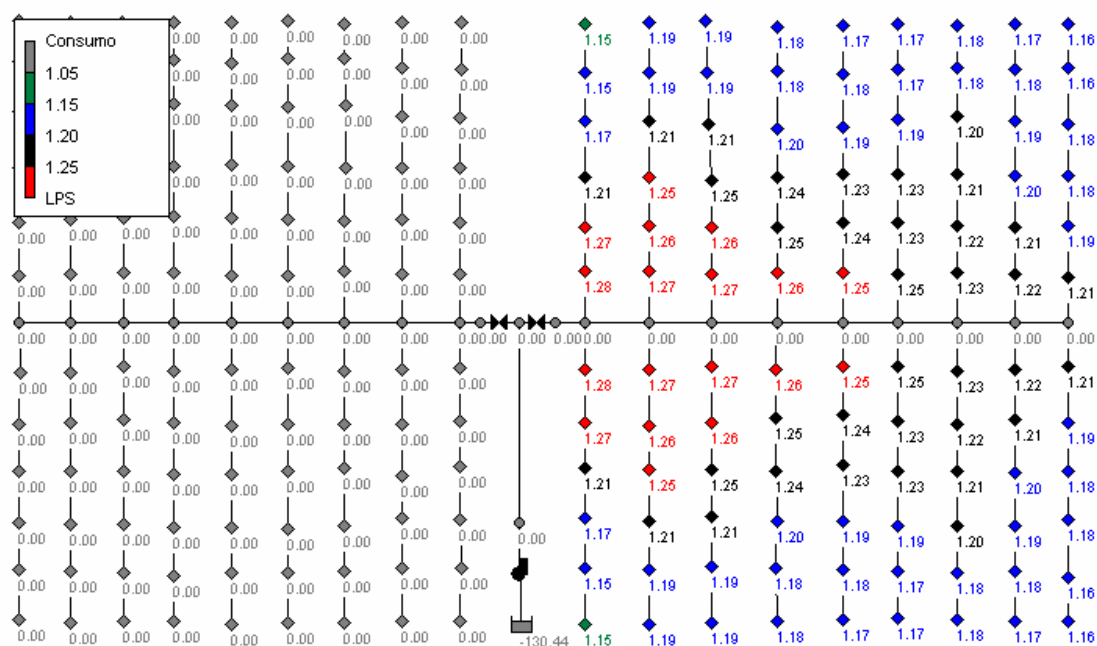
$\Delta q$  – variação de vazão na unidade operacional

$C_{UV}$  – uniformidade de vazão na unidade operacional

$V_{\min}$  – velocidade mínima nas tubulações  
 $V_{\max}$  – velocidade máxima nas tubulações  
 $P_{OT}$  – potência requerida no bombeamento  
 $\eta$  – rendimento da bomba  
 $C_{REDE}$  – custo da rede  
 $C_{EN}$  – custo da energia  
 $C_T$  – custo total do sistema

*Tabela 2. Resultados do dimensionamento para o cenário 2*

| DN (mm) | L (m) | Pressão (mca)   |       | Vazão (L/s)     |        | Veloc. (m/s) | $P_{OT}$ (kW) | Custo (US\$/ha ano) |        |
|---------|-------|-----------------|-------|-----------------|--------|--------------|---------------|---------------------|--------|
| 50      | 2400  | $h_{inP}$       | 37,08 | $q_{\min}$      | 1,15   | $V_{\max}$   | 74,47         | $C_{REDE}$          | 69,91  |
| 75      | 2352  | $h_{fp}$        | 32,98 | $q_{\max}$      | 1,28   | 2,65         | $H_{man} (m)$ | $C_{EN}$            | 36,68  |
| 100     | 48    | $h_{inLin}$     | 36,80 | $q_{med}$       | 1,21   | $V_{\min}$   | 39,55         | $C_T$               | 106,59 |
| 125     | 0     | $h_{flin}$      | 27,49 | $Q_T$           | 130,44 | 0,63         | $\eta (\%)$   | -                   | -      |
| 150     | 96    | $h_{inLf}$      | 32,98 | $\Delta q (\%)$ | 10,16  | -            | 67,91         | -                   | -      |
| 200     | 144   | $h_{flf}$       | 28,01 | $C_{UV} (\%)$   | 96,40  | -            | -             | -                   | -      |
| 250     | 120   | $h_{med}$       | 30,62 | -               | -      | -            | -             | -                   | -      |
| -       | -     | $\Delta h (\%)$ | 20,06 | -               | -      | -            | -             | -                   | -      |



*Figura 3. Visualização da vazão dos aspersores para o cenário 2 no EPANET*

Tabela 3. Resultados do dimensionamento para o cenário 3

| DN (mm) | L (m) | Pressão (mca)      |       | Vazão (L/s)         |        | Veloc. (m/s)     | P <sub>OT</sub> (kW) | Custo (US\$/ha ano) |        |
|---------|-------|--------------------|-------|---------------------|--------|------------------|----------------------|---------------------|--------|
| 50      | 2496  | h <sub>inP</sub>   | 37,15 | q <sub>min</sub>    | 1,15   | V <sub>max</sub> | 74,44                | C <sub>REDE</sub>   | 69,30  |
| 75      | 2256  | h <sub>fP</sub>    | 33,43 | q <sub>max</sub>    | 1,28   | 2,67             | H <sub>man</sub> (m) | C <sub>EN</sub>     | 36,66  |
| 100     | 48    | h <sub>inLin</sub> | 36,97 | q <sub>med</sub>    | 1,21   | V <sub>min</sub> | 39,36                | C <sub>T</sub>      | 105,96 |
| 125     | 0     | h <sub>fLin</sub>  | 27,95 | Q <sub>T</sub>      | 130,87 | 0,63             | η (%)                | -                   | -      |
| 150     | 96    | h <sub>inLf</sub>  | 33,43 | Δq (%)              | 10,16  | -                | 67,83                | -                   | -      |
| 200     | 144   | h <sub>fLf</sub>   | 28,56 | C <sub>UV</sub> (%) | 96,49  | -                | -                    | -                   | -      |
| 250     | 120   | h <sub>med</sub>   | 30,83 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -      |
| -       | -     | Δh (%)             | 19,68 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -      |

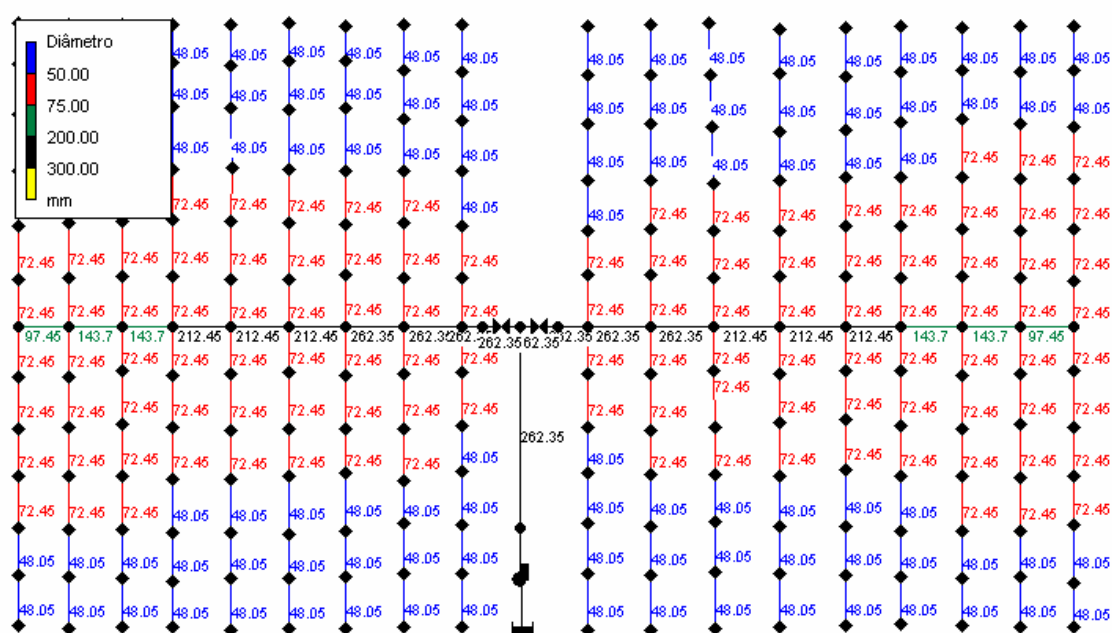


Figura 4. Visualização do dimensionamento da rede para o cenário 2 no EPANET

Tabela 4. Resultados do dimensionamento para o cenário 4 (unidade operacional em declive)

| DN (mm) | L (m) | Pressão (mca)      |       | Vazão (L/s)         |        | Veloc. (m/s)     | P <sub>OT</sub> (kW) | Custo (US\$/ha ano) |       |
|---------|-------|--------------------|-------|---------------------|--------|------------------|----------------------|---------------------|-------|
| 50      | 1728  | h <sub>inP</sub>   | 35,50 | q <sub>min</sub>    | 1,13   | V <sub>max</sub> | 74,20                | C <sub>REDE</sub>   | 31,83 |
| 75      | 648   | h <sub>fP</sub>    | 40,82 | q <sub>max</sub>    | 1,35   | 2,81             | H <sub>man</sub> (m) | C <sub>EN</sub>     | 36,54 |
| 100     | 24    | h <sub>inLin</sub> | 35,89 | q <sub>med</sub>    | 1,24   | V <sub>min</sub> | 38,09                | C <sub>T</sub>      | 68,37 |
| 125     | 24    | h <sub>fLin</sub>  | 26,69 | Q <sub>T</sub>      | 133,69 | 0,62             | η (%)                | -                   | -     |
| 150     | 24    | h <sub>inLf</sub>  | 40,82 | Δq (%)              | 16,3   | -                | 67,26                | -                   | -     |
| 200     | 48    | h <sub>fLf</sub>   | 30,66 | C <sub>UV</sub> (%) | 93,46  | -                | -                    | -                   | -     |
| 250     | 84    | h <sub>med</sub>   | 32,25 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -     |
| -       | -     | Δh (%)             | 30,26 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -     |

Tabela 5. Resultados do dimensionamento para o cenário 4 (unidade operacional em alicive)

| DN (mm) | L (m) | Pressão (mca)      |       | Vazão (L/s)         |        | Veloc. (m/s)     | P <sub>OT</sub> (kW) | Custo (US\$/ha ano) |        |
|---------|-------|--------------------|-------|---------------------|--------|------------------|----------------------|---------------------|--------|
| 50      | 1680  | h <sub>inP</sub>   | 40,57 | q <sub>min</sub>    | 0,95   | V <sub>max</sub> | 75,05                | C <sub>REDE</sub>   | 63,17  |
| 75      | 696   | h <sub>fP</sub>    | 26,06 | q <sub>max</sub>    | 1,33   | 2,63             | H <sub>man</sub> (m) | C <sub>EN</sub>     | 36,96  |
| 100     | 24    | h <sub>inLin</sub> | 39,80 | q <sub>med</sub>    | 1,14   | V <sub>min</sub> | 42,79                | C <sub>T</sub>      | 100,13 |
| 125     | 24    | h <sub>fLin</sub>  | 32,49 | Q <sub>T</sub>      | 122,92 | 0,52             | η (%)                | -                   | -      |
| 150     | 24    | h <sub>inLf</sub>  | 26,20 | Δq (%)              | 28,57  | -                | 68,71                | -                   | -      |
| 200     | 96    | h <sub>fLf</sub>   | 18,82 | C <sub>UV</sub> (%) | 90,61  | -                | -                    | -                   | -      |
| 250     | 36    | h <sub>med</sub>   | 27,33 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -      |
| -       | -     | Δh (%)             | 49,46 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -      |

Tabela 6. Resultados do dimensionamento para o cenário 5 (unidade operacional em declive)

| DN (mm) | L (m) | Pressão (mca)      |       | Vazão (L/s)         |        | Veloc. (m/s)     | P <sub>OT</sub> (kW) | Custo (US\$/ha ano) |       |
|---------|-------|--------------------|-------|---------------------|--------|------------------|----------------------|---------------------|-------|
| 50      | 1392  | h <sub>inP</sub>   | 34,99 | q <sub>min</sub>    | 1,19   | V <sub>max</sub> | 74,08                | C <sub>REDE</sub>   | 33,57 |
| 75      | 984   | h <sub>fP</sub>    | 40,01 | q <sub>max</sub>    | 1,33   | 2,78             | H <sub>man</sub> (m) | C <sub>EN</sub>     | 36,48 |
| 100     | 24    | h <sub>inLin</sub> | 35,38 | q <sub>med</sub>    | 1,25   | V <sub>min</sub> | 37,62                | C <sub>T</sub>      | 70,05 |
| 125     | 24    | h <sub>fLin</sub>  | 30,02 | Q <sub>T</sub>      | 134,72 | 0,66             | η (%)                | -                   | -     |
| 150     | 24    | h <sub>inLf</sub>  | 40,01 | Δq (%)              | 10,53  | -                | -                    | -                   | -     |
| 200     | 72    | h <sub>fLf</sub>   | 30,01 | C <sub>UV</sub> (%) | 95,40  | -                | -                    | -                   | -     |
| 250     | 60    | h <sub>med</sub>   | 32,71 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -     |
| -       | -     | Δh (%)             | 20,92 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -     |

Tabela 7. Resultados do dimensionamento para o cenário 5 (unidade operacional em alicive)

| DN (mm) | L (m) | Pressão (mca)      |       | Vazão (L/s)         |        | Veloc. (m/s)     | P <sub>OT</sub> (kW) | Custo (US\$/ha ano) |        |
|---------|-------|--------------------|-------|---------------------|--------|------------------|----------------------|---------------------|--------|
| 50      | 1056  | h <sub>inP</sub>   | 39,03 | q <sub>min</sub>    | 1,10   | V <sub>max</sub> | 74,90                | C <sub>REDE</sub>   | 78,48  |
| 75      | 696   | h <sub>fP</sub>    | 27,60 | q <sub>max</sub>    | 1,30   | 2,63             | H <sub>man</sub> (m) | C <sub>EN</sub>     | 36,89  |
| 100     | 624   | h <sub>inLin</sub> | 38,25 | q <sub>med</sub>    | 1,17   | V <sub>min</sub> | 41,36                | C <sub>T</sub>      | 115,37 |
| 125     | 0     | h <sub>fLin</sub>  | 28,59 | Q <sub>T</sub>      | 126,29 | 0,15             | η (%)                | -                   | -      |
| 150     | 0     | h <sub>inLf</sub>  | 27,60 | Δq (%)              | 15,38  | -                | 68,37                | -                   | -      |
| 200     | 0     | h <sub>fLf</sub>   | 25,18 | C <sub>UV</sub> (%) | 90,10  | -                | -                    | -                   | -      |
| 250     | 204   | h <sub>med</sub>   | 28,72 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -      |
| -       | -     | Δh (%)             | 29,55 | -                   | -      | -                | -                    | -                   | -      |

Tabela 8. Resultados do dimensionamento para o cenário 6

| DN (mm) | L (m) | Pressão (mca)      |       | Vazão (L/s)      |       | Veloc. (m/s)     | P <sub>OT</sub> (kW) | Custo (US\$/ha ano) |       |
|---------|-------|--------------------|-------|------------------|-------|------------------|----------------------|---------------------|-------|
| 50      | 2376  | h <sub>inP</sub>   | 36,91 | q <sub>min</sub> | 1,12  | V <sub>max</sub> | 25,62                | C <sub>REDE</sub>   | 44,02 |
| 75      | -     | h <sub>fP</sub>    | 30,91 | q <sub>max</sub> | 1,25  | 2,64             | H <sub>man</sub> (m) | C <sub>EN</sub>     | 12,62 |
| 100     | 96    | h <sub>inLin</sub> | 36,44 | q <sub>med</sub> | 1,18  | V <sub>min</sub> | 42,68                | C <sub>T</sub>      | 56,64 |
| 125     | 48    | h <sub>fLin</sub>  | 31,72 | Q <sub>T</sub>   | 42,31 | 0,60             | η (%)                | -                   | -     |
| 150     | 60    | h <sub>inLf</sub>  | 30,91 | Δq (%)           | 10,40 | -                | 69,11                | -                   | -     |
| 200     | -     | h <sub>fLf</sub>   | 26,59 | -                | -     | -                | -                    | -                   | -     |
| 250     | -     | h <sub>med</sub>   | 28,98 | -                | -     | -                | -                    | -                   | -     |
| -       | -     | Δh (%)             | 20,78 | -                | -     | -                | -                    | -                   | -     |

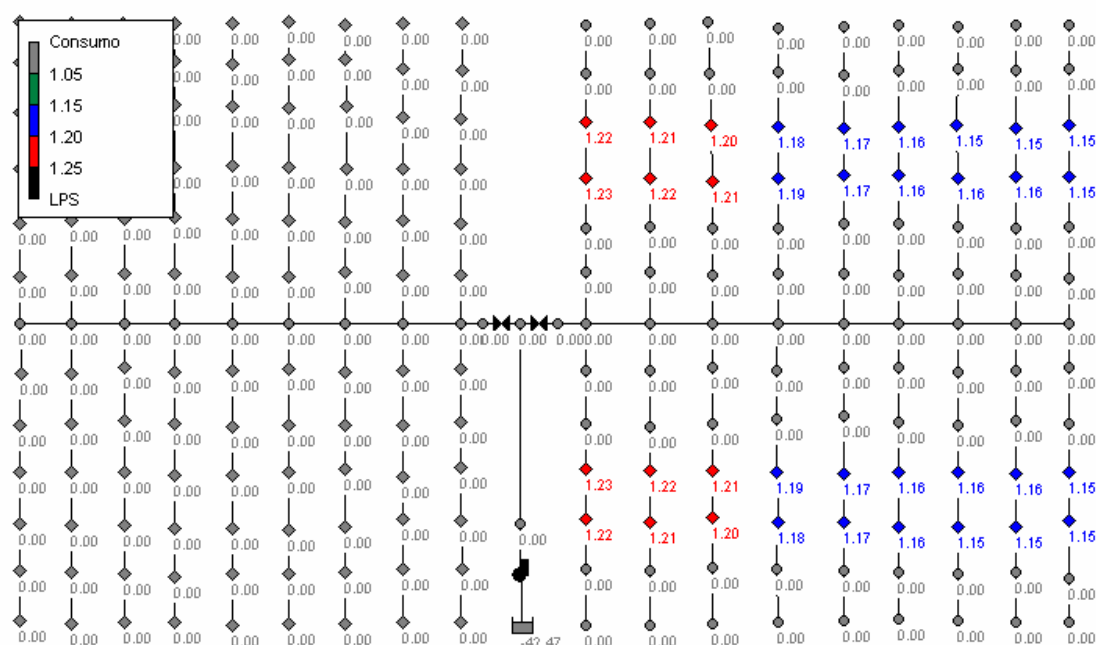


Figura 5. Visualização da vazão dos aspersores para o cenário 6 no EPANET

## CONCLUSÕES

O modelo computacional EPANET apresenta funcionalidades que permitem sua aplicação na análise e dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão, com rapidez, versatilidade e simplicidade. Uma das principais vantagens de sua utilização é a determinação e visualização das variáveis de interesse no dimensionamento: vazões, velocidades, pressões e custo de energia. Para grandes sistemas de irrigação sua aplicação exige simplificações na representação da rede. O modelo apresenta limitações com relação ao valor do expoente do emissor. Para o dimensionamento de sistemas complexos é aconselhável o uso do modelo associado a outro de otimização de custos.

## REFERÊNCIAS

- CHRISTIANSEN, J. E. Irrigation by sprinkling. Agricultural Experiment Station. University of California. Bulletin n. 670. 1942.124p.
- CIRILO, J. A. Programação não linear aplicada a recursos hídricos. In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Organizador: Rubem Laina Porto. Editora da Universidade. UFRGS. ABRH. Porto Alegre. p. 305-359. 1997.
- CROSS H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. Bulletin n. 286. Urbana: Eng. Experiment Station, Univ. of Illinois, 1936.
- DANDY, G. C.; HASSANLI, A. M. Optimum design and operation of multiple subunit drip irrigation systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 122, n. 5, p. 265-275. 1996.
- GOMES, H. P. Engenharia de irrigação: hidráulica de sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento. 3 ed. Campina Grande. Universidade Federal da Paraíba. 1999. 412p.
- GRANADOS, A. Infraestructuras de regadíos – Redes colectivas de riego a presión. Servicio de Publicación de la E.T.S.I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid. 1990.
- GUPTA, Linear programming analysis of a water supply system. Transactions of the ASCE, v. 1, n. 1, p. 56-61. 1969.
- KARMELI, D.; GADISH, Y.; MEYERS, S. Design of optimal water distribution network. Journal of Pipeline Division, ASCE. v. 94. n. 3, p. 1-10. 1968.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. Sprinkle and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold, New York. 1990. 652p.
- LANNA, A. E. Introdução. In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Organizador: Rubem Laina Porto. Editora da Universidade. UFRGS. ABRH. Porto Alegre. p. 15-41. 1997.
- LASDON, L.S.; WARREN, A. D.; RATNER, M.S. GRG2 User's guide. Austin, Tex, USA: University of Texas at Austin, 1984.
- MANTOVANI, E. C. A irrigação do cafeeiro. Irrigação & Tecnologia Moderna – ITEM. Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. ABID. n. 48. p. 45-49. 2000.
- PORTO, R. L. L.; AZEVEDO, L. G. T. Sistemas de suporte a decisões aplicados a problemas de recursos hídricos. In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Organizador: Rubem Laina Porto. Editora da Universidade. UFRGS. ABRH. Porto Alegre. p. 43-95. 1997.
- ROSSMAN, L. A. Manual do utilizador EPANET 2.0 em português. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2002.