ANÁLISE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM COMPONENTES HIDRÁULICOS USANDO O MÉTODO DOS CIRCUITOS

Robert Schiaveto de Souza[1]; Fazal Hussain Chaudhry[2];
Mauro Polizer[1]; Jorge Luiz Steffen[1] & Edinice Borges de Siqueira[3]

Resumo - A análise em regime permanente de sistemas de distribuição de água é um problema de grande importância na engenharia hidráulica. Atualmente, com a crescente disponibilidade de microcomputadores com grande capacidade de memória e velocidade de processamento e o desenvolvimento de inúmeras técnicas numéricas, faz-se necessário um reexame dos modelos teóricos utilizados para análise e projetos de grandes redes. Neste trabalho é proposto um modelo hidráulico para análise em regime permanente de redes de distribuição de água utilizando o método dos circuitos com componentes hidráulicos. A formulação proposta combina os métodos da teoria linear e de Newton-Raphson. Os resultados obtidos das simulações realizadas comprovam a eficiência do modelo proposto.

Abstract - Continuous mode analysis of water distribution systems is a problem of great importance in hydraulic engineering. Presently, with the growing availability of microcomputers with great memory capacity and processing speed, and the development of innumerous numerical techniques, the necessity has arisen for a reexamination of the theoretical models used for analysis and design of large networks. The present study proposes an hydraulic model for continuous mode analysis of networks of water distribution using the circuits method with hydraulic components. The proposed formulation combines the methods of linear theory and of Newton-Raphson. The results obtained of the simulations carried out demonstrate the efficiency of the proposed method.

Palavras-chave - Redes Hidráulicas, Componentes Hidráulicos, Método dos Circuitos.

[1] Professor Adjunto do Departamento de Hidráulica e Transportes do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - Departamento de Hidráulica e Transportes - Cidade Universitária s/no - Caixa Postal 549 - CEP: 79070-900 - Campo Grande - MS - Brasil - Tel: (067) 345 7497 - Fax: (067) 345 7450 - e-mail: rssouza@nin.ufms.br.
[2] Professor Titular da Escola de Engenharia de São Carlos / USP – e-mail: fazal@sc.usp.br
[3] Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. - e-mail: edinice@terra.com.br

INTRODUÇÃO

A análise em regime permanente de sistemas de distribuição de água é um problema de grande importância na engenharia hidráulica.

A solução para problemas de redes é obtida quando as vazões satisfazem as equações da continuidade em cada nó e a equação da energia em cada canalização. Estas equações são não-lineares tornando necessário a utilização de métodos numéricos iterativos, iniciando com uma solução aproximada que é aperfeiçoada esperançosamente a cada iteração.

A confiabilidade dos algoritmos aplicados na análise de redes é de grande importância. Solução com lenta convergência ou mesmo fracasso na sua obtenção é um inconveniente principalmente nos estudos de otimização onde a rede é avaliada inúmeras vezes.

Vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para a análise de sistemas de distribuição de água (DONACHIE 1974, SHAMIR e HOWARD 1977, DODGE, HOELLEIN e TETMATER 1978, COLLINS 1981, SOUZA 1994, dentre outros). Os modelos se baseiam em técnicas numéricas iterativas e incluem desde as analogias elétricas até as aplicações gráficas e os métodos de Hardy-Cross, Newton-Raphson e teoria linear.

O estado da arte tem avançado enormemente. Muitos algoritmos têm sido propostos para resolver as equações resultantes da análise de redes hidráulicas, e técnicas numéricas são largamente usadas na atualidade. No entanto, dificuldades têm sido observadas principalmente quanto à convergência (número de iterações e tempo computacional) e quanto à memória computacional necessária para o cálculo de redes. Por isso, os métodos para resolver problemas de redes têm sofrido constantes revisões e aperfeiçoamentos. Existem muitos programas disponíveis para análise de redes e comparações têm sido feitas entre os diversos métodos. Estas se referem geralmente à facilidade e flexibilidade de uso, generalização dos modelos incluindo os mais variados componentes hidráulicos do sistema, número de iterações, tempo e memória computacional necessários para a convergência do problema.

Atualmente, com a crescente disponibilidade de microcomputadores com grande capacidade de memória e velocidade de processamento e o desenvolvimento de inúmeras técnicas numéricas, faz-se necessário um reexame dos modelos teóricos utilizados para análise e projetos de grandes redes.

Neste trabalho é proposto um modelo hidráulico para análise de redes de distribuição de água utilizando o método dos circuitos quando componentes hidráulicos estão presentes na rede.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

NIELSEN (1989) propôs uma formulação para resolver problemas de redes pelo método dos circuitos sem a consideração de componentes hidráulicos presentes no sistema. O método por ele proposto é uma generalização e um aperfeiçoamento dos métodos apresentados por LAM e WOLLA (1972) e CHANDRASHEKAR e STEWART (1975). O autor argumenta que a escolha do modelo para resolver as equações não lineares resultantes da análise de redes é essencial para o comportamento do processo iterativo e sugere um modelo onde os métodos da teoria linear e Newton-Raphson são combinados. Observa-se que tal hibridização está implícita na operacionalização proposta por RIGHETTO (1977). A formulação proposta por NIELSEN (1989) pode ser usada tanto para o método da teoria linear (LTM) como para o método de Newton-Raphson (NR) e é dada pela equação (1):

$$q_{k+1} = q_k - C\left[C^t D'_k C\right]^{-1} C^t \left(D_k q_k + A_r h_r\right) \tag{1}$$

onde $D'_k = \text{diag}\left[d'_1(q_1),...,d'_m(q_m)\right]$ com $d'_k = \gamma K_k q_k^{\alpha-1}$; $H_k = K_k q_k^{\alpha}$ ou $q_k = K_k^{-\beta} H_k^{\beta}$; $D_k = \text{diag}\left[d_1(q_1),...,d_m(q_m)\right]$ com $d_k = K_k q_k^{\alpha-1}$; com $\beta = 1/\alpha$; sendo $\gamma = 1$ para LTM e $\gamma = \alpha$ para NR; q_k é o vetor de vazões m x 1 que satisfaz a continuidade; C é qualquer matriz m x (m-n) tal que $A^t C = 0$; A_r é a matriz de incidência (m x r) dos nós de reservatório; A é a matriz de incidência (m x n) dos nós interiores; h_r é o vetor (r x 1) de energia nos nós de reservatórios; Esse sistema é não linear de (m-n) equações com incógnita q.

A formulação de NIELSEN (1989) para o cálculo simultâneo das vazões embora forneça diretamente as vazões nos m tubos de um sistema de distribuição de água, na verdade o sistema de equações não linear resultante é de ordem (m-n), que é a ordem da matriz Jacobiana $\left[C^t D'_k C\right]$ que precisa ser invertida ou resolvida. Este sistema leva em conta apenas as (m-n) equações de circuito. A solução para o sistema de equações da continuidade $A^t q = Q$ pode ser escrita segundo Nielsen como:

$$q = q_c + Cu \tag{2}$$

onde q_c é qualquer solução para a expressão $A^t q = Q$, ou seja, qualquer solução de vazões que satisfaça a continuidade; C é qualquer matriz de ordem m x (m-n) tal que $A^t C = 0$; e u é qualquer vetor de ordem (m-n).

Segundo NIELSEN (1989), qualquer que seja o vetor u de ordem (m-n), o vetor de correção de vazões Cu realiza automaticamente o balanceamento das vazões de tal forma a garantir a continuidade do vetor q. Note que a matriz C de ordem m x (m-n) nada mais é do que uma matriz que representa as (m-n) equações de circuito necessárias.

Comparando as expressões (1) e (2), observa-se que o vetor - $\left[C^t D'_k C\right]^{-1} C^t (D_k q_k + A_r h_r)$ da formulação corresponde ao vetor u, e que o vetor q_k representa o vetor q_c. Como a formulação apresentada por NIELSEN (1989) é resultado apenas das (m-n) equações de circuito, as equações da continuidade estão representadas no vetor q_k que satisfaz a continuidade, ou seja, a expressão $A^t q = Q$. Portanto qualquer que seja o vetor -$\left[C^t D'_k C\right]^{-1} C^t (D_k q_k + A_r h_r)$, resulta q_{k+1} que satisfaz a continuidade.

Ao incorporarmos componentes hidráulicos nessa nova formulação de vazões, faz-se necessário impormos ou fixarmos durante o processo iterativo valores de vazões nos trechos onde válvulas de retenção, válvulas redutoras de pressão e bombas estão presentes, dependendo das condições de operação desses elementos. Esses valores de vazões não podem ser adotados ou fixados no vetor q_k da formulação de vazões, pois isto provocaria um desbalanceamento desse vetor ferindo a continuidade. Por outro lado, como u = -$\left[C^t D'_k C\right]^{-1} C^t (D_k q_k + A_r h_r)$ pode ser definido como qualquer vetor de ordem (m-n) sem que Cu fira a continuidade, as condições de operação dos elementos hidráulicos serão introduzidas nesse vetor de tal forma a fazer com que a solução tenda iterativamente a condição final.

A seguir faz-se a descrição dos modelos dos vários componentes hidráulicos para a formulação de vazões com redução do número de incógnitas.

COMPONENTES HIDRÁULICOS

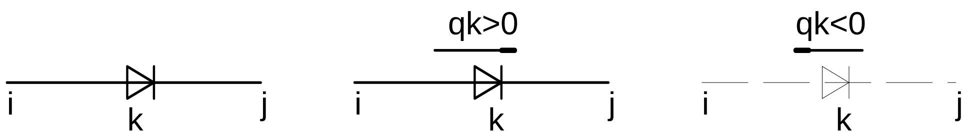
Um sistema de distribuição de água contém além de tubos, uma variedade de componentes hidráulicos. Esses componentes podem ser bombas, reservatórios, válvulas de retenção, válvulas redutoras de pressão, e outros mecanismos de controle (JEPPSON e DAVIS 1976; CHANDRASHEKAR 1980).

O método como proposto por NIELSEN (1989) não considera componentes hidráulicos na rede. No entanto, é importante e fundamental incorporar as características especiais desses elementos na análise para resolver o sistema da forma como ele é, fisicamente.

Pode-se aperfeiçoar a técnica sugerida por NIELSEN (1989) generalizando a idéia de incorporar a presença de componentes hidráulicos para análise de redes de distribuição de água.

Válvulas de Retenção

O efeito de uma válvula de retenção é permitir o fluxo somente em uma direção. Considere um tubo k com uma resistência K_k e contendo uma válvula de retenção como mostra a figura 1. Supondo que o tubo está conectado do nó i para o nó j:



(a) VR (b) VR desativada (c) VR fechada

Fig. 1 - Condição de operação da válvula de retenção.

A orientação da válvula é tal que se $q_k > 0$ haverá fluxo, e se $q_k < 0$ então a válvula se fechará, ou seja, isto é equivalente a remover o tubo ou adotar um valor de resistência infinita no trecho k que resulta em $q_k = 0$.

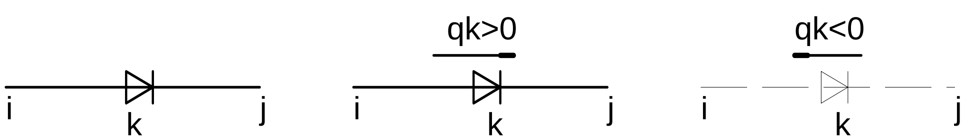
Válvulas Redutoras de Pressão

Uma válvula redutora de pressão é projetada para manter uma pressão constante a jusante dela se a pressão a montante estiver acima da pressão de controle da válvula h_{set}. Supondo que a pressão em um determinado ponto do sistema de distribuição de água supera a pressão máxima permitida, uma válvula redutora de pressão deve ser projetada nesse ponto com uma pressão de controle h_{set} igual a pressão limite. Uma exceção ocorre quando a vazão no trecho que contém a válvula torna-se negativa. Neste caso a válvula redutora de pressão age como uma válvula de retenção e, o modelo de válvula de retenção simples pode ser usado.

Considere um tubo k com uma válvula redutora de pressão onde o nó i é suposto ser o nó a montante. Definindo K_k e $\overline{K}_k$ como as resistências correspondentes aos comprimentos L do tubo e $\overline{L}$ do trecho entre a válvula e o nó de jusante respectivamente, duas condições podem ocorrer:

a) $q_k \leq 0$

A válvula redutora de pressão se fecha e funciona como uma válvula de retenção simples, isto é equivalente a remover o tubo ou assumir um valor de resistência infinita no trecho k, que resulta em $q_k = 0$ (Fig. 2).



(a) VRP (b) VRP operativa (c) VRP fechada

Fig. 2 - Condição de operação da válvula redutora de pressão.

b) $q_k > 0$

Neste caso a válvula redutora de pressão é ativada. O vetor de vazão q_k da formulação permanece inalterado para não ferir a continuidade, como se a válvula não estivesse presente. Novos circuitos são formados depois que o tubo contendo a válvula redutora é imaginado desconectado e a válvula é substituída por um reservatório artificial com energia constante e equivalente a pressão de controle da válvula h_{set}. O trecho de montante a válvula deixa de existir. Esta nova configuração é equivalente a configuração original no que diz respeito às (m-n) equações de circuito (equações de energia), mas não é equivalente ou não satisfaz as equações de continuidade, pois o trecho de montante a válvula não está presente. Por outro lado, o vetor de vazões q_k em adição ao vetor de correção Cu garante a continuidade da configuração original ou real.

Para essa nova configuração, todos os parâmetros do vetor da formulação representado por $\left[C^t D'_k C\right]^{-1} C^t (D_k q_k + A_r h_r)$ são recalculados. Uma outra matriz C' de ordem m x (m-n) é obtida preservando a matriz C original. O número de reservatórios r é alterado para o número de reservatórios reais mais o número de reservatório(s) artificial (is), e conseqüentemente a matriz de incidência dos reservatórios A_r e o vetor das energias nos reservatório h_r são ampliados e alterados para a nova configuração da rede utilizando as energias dos reservatórios artificiais iguais as energias de controle h_{set} de cada válvula.

Note que o novo u = $\left[C'^t D'_k C'\right]^{-1} C'^t (D_k q_k + A_r h_r)$ agora representa as condições de operação das válvulas redutoras de pressão satisfazendo apenas as equações de circuito, mas por outro lado o vetor de correção $Cu = C\left[C'^t D'_k C'\right]^{-1} C'^t (D_k q_k + A_r h_r)$ realiza o balanceamento de vazões automaticamente de tal forma que quando somado ao vetor q_k garante a continuidade do vetor resultante q_{k+1} em relação a configuração original da rede. Em outras palavras, o vetor q_k representa o vetor de vazões que satisfaz a continuidade da rede a cada iteração, o vetor $\left[C'^t D'_k C'\right]^{-1} C'^t (D_k q_k + A_r h_r)$ representa as condições de operação das válvulas redutoras de pressão e a matriz C da configuração original proporciona as correções de vazões associando o vetor q_k que satisfaz a continuidade e o vetor $\left[C'^t D'_k C'\right]^{-1} C'^t (D_k q_k + A_r h_r)$ que satisfaz as equações de circuito.

Bombas

São componentes hidráulicos usados em um sistema de distribuição de água para manterem vazões adequadas e energias suficientes em certas partes do sistema. A maioria das bombas pode ser caracterizadas por:

$$h_b = Aq^2 + Bq + C \tag{3}$$

onde A, B e C são constantes, e h_b é a energia fornecida pela bomba à vazão q.

As (m-n) equações de circuito da formulação apresentada por NIELSEN (1989) representam os (m-n) circuitos selecionados da rede que estão representados pela matriz C ou C' de ordem m x (m-n). A soma das perdas de carga em cada um dos (m-n) circuitos deve ser igual a zero no caso de um circuito fechado, ou igual à diferença de energia entre dois pontos da rede com energia conhecida, como por exemplo entre dois reservatórios. Portanto nos trechos que contém bombas, a energia líquida fornecida pela bomba $h_b = Aq^2 + Bq + C$ deve ser adicionada à perda de carga do trecho com o sinal contrário. Este procedimento implicará em alterações nas funções de circuito e conseqüentemente na matriz Jacobiana. Em termos dos parâmetros da formulação, isto significa alteração da matriz D_k e D'_k.

Considere um tubo k com uma resistência K_k e contendo uma bomba (Fig. 3). Supondo que o fluxo no tubo é do nó i para o nó j, temos:

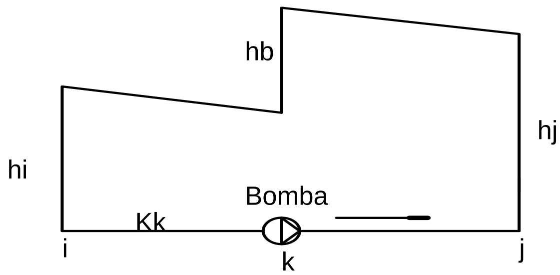


Fig. 3 - Linha de energia em um trecho com bomba.

$$h_i + h_b - K_k q_k^{\alpha} - h_j = 0 \tag{4}$$

Substituindo a curva característica da bomba:

$$h_i + Aq_k^2 + Bq + C - K_k q_k^2 - h_j = 0 \tag{5}$$

como:

$$H_k = h_i - h_j = d_k q_k \tag{6}$$

então:

$$
\begin{aligned}
&d_k = K_k q_k^{\alpha-1} - Aq_k - B - Cq_k^{-1} \\
&\text{e} \\
&d'_k = K_k \alpha q_k^{\alpha-1} - 2Aq_k - B
\end{aligned}
\tag{7}
$$

Observe que diferentemente da formulação em termos de energia, não há a necessidade do cálculo iterativo da vazão q_k da bomba, pois a mesma está incorporada diretamente no procedimento de análise.

Considerações Computacionais

O exemplo a seguir ilustra o procedimento de inclusão dos componentes hidráulicos como bombas, válvulas redutoras de pressão, válvulas de retenção para a rede da figura 4.

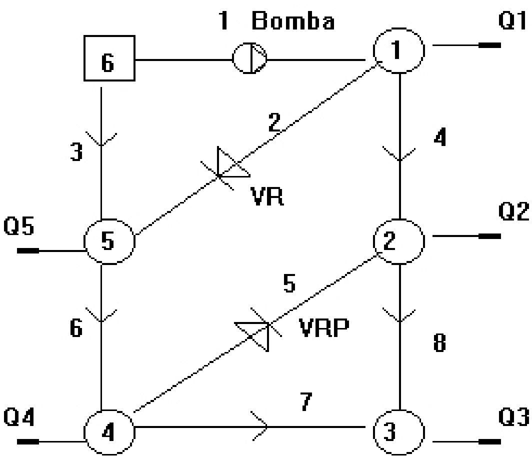


Fig.4 - Rede utilizada como exemplo por CHANDRASHEKAR e STEWART (1980)

Inicialmente vamos considerar a rede exemplo composta apenas por tubos simples.

A rede contem 8 tubos e 5 nós interiores. Isto significa que são necessários 8 - 5 = 3 equações de circuito. Selecionando por exemplo os circuitos compostos pelos tubos 1, 2, e 3; 4,5, 6 e 2; 5,8 e 7, as funções para cada circuito são dadas por:

$$
\begin{aligned}
F_1 &= H_1 + H_2 - H_3 \\
F_2 &= H_4 - H_5 - H_6 - H_2 \\
F_3 &= H_8 - H_7 + H_5
\end{aligned}
\tag{8}
$$

Substituindo as perdas de carga H_k em termos das vazões obtemos as funções que são representadas pelo vetor $C^t(D_k q_k + A_r h_r)$:

$$\begin{aligned} F_1 &= K_1 q_1^\alpha + K_2 q_2^\alpha - K_3 q_3^\alpha \\ F_2 &= K_4 q_4^\alpha - K_5 q_5^\alpha - K_6 q_6^\alpha - K_2 q_2^\alpha \\ F_3 &= K_8 q_8^\alpha - K_7 q_7^\alpha + K_5 q_5^\alpha \end{aligned} \qquad (9)$$

A matriz C de ordem m x (m-n) tal que $A^t C = 0$ está representada por estes três circuitos e é definida como:

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{ccc} F_1 & F_2 & F_3 \end{array} \quad \text{Tubo} \\ C = & \left[\begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{array} \end{array}$$

Chamando $d'_k = K_k \alpha q_k^{\alpha-1}$, a matriz Jacobiana $C^t D'_k C$ é:

$$C^t D'_k C = J_k = \begin{bmatrix} d'_1 + d'_2 + d'_3 & -d'_2 & 0 \\ -d'_2 & d'_2 + d'_4 + d'_5 + d'_6 & -d'_5 \\ 0 & -d'_5 & d'_5 + d'_7 + d'_8 \end{bmatrix} \qquad (10)$$

Observe que a matriz Jacobiana $C^t D'_k C$ é sempre simétrica quando somente tubos simples são envolvidos. Note também que as diagonais de cada linha representa os circuitos selecionados e que os elementos fora da diagonal representam os tubos comuns aos circuitos.

Vamos considerar agora a rede exemplo com uma bomba, uma válvula de retenção e uma válvula redutora de pressão nos tubos 1, 2 e 5 respectivamente. Vamos assumir como exemplo que numa iteração qualquer a válvula de retenção está inibindo o fluxo no tubo 2 e que a válvula redutora de pressão está reduzindo a pressão à uma pressão de controle h_{set}. Essas condições estão mostradas na figura (5).

Primeiramente, a formulação e configuração da rede como que se nenhum componente hidráulico estivesse presente é utilizada para o cálculo das vazões iniciais satisfazendo a continuidade e para o cálculo da matriz C que multiplicada pelo vetor $\left[C'^{t}D'_{k}C'\right]^{-1}C'^{t}(D_{k}q_{k}+A_{r}h_{r})$ proporciona as correções das vazões sem ferir a continuidade. Uma nova configuração da rede com reservatórios artificiais é então utilizada para o cálculo da matriz $\left[C'^{t}D'_{k}C'\right]^{-1}C'^{t}(D_{k}q_{k}+A_{r}h_{r})$ que incorpora as condições de operação dos componentes hidráulicos.

Como anteriormente, há somente (m-n) equações que são as equações de energia nos três novos circuitos para a nova configuração:

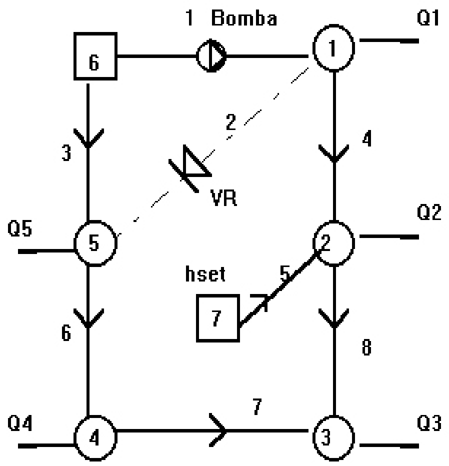


Fig.5 - Rede utilizada como exemplo por CHANDRASHEKAR e STEWART (1980).

O trecho de montante à válvula redutora de pressão deixa de existir e novos circuitos são formados depois que o tubo 5 que contém a válvula redutora é imaginado desconectado e a válvula é trocada ou substituída por um reservatório artificial no nó 7, com uma energia constante e equivalente a energia de controle da válvula h_{set}. Com esta nova configuração da rede, novas equações de energia (circuito) para as condições de operação dos componentes hidráulicos são estabelecidas. Escolhendo-se agora por exemplo os circuitos compostos pelos tubos 1, 2, e 3; 4, 5, 2 e 3; 8, 7, 6, 2 e 4 para a especificação de C'. A energia no nó 6 é especificada e portanto F é um vetor coluna composto de três elementos:

$$F_1 = H_1 - H_3 + H_2$$
$$F_2 = H_4 - H_5 - H_2 + H_3 - h_6 + h_{set}$$
$$F_3 = H_8 - H_7 - H_6 - H_2 + H_4$$

ou:

$$\begin{aligned}F_1 &= K_1 q_1^{\alpha} - Aq_1^2 - Bq_1 - C - K_3 q_3^{\alpha} + K_2 q_2^{\alpha}\\ F_2 &= K_4 q_4^{\alpha} - \overline{K}_5 q_5^{\alpha} - K_2 q_2^{\alpha} + K_3 q_3^{\alpha} - h_6 + h_{set}\\ F_3 &= K_8 q_8^{\alpha} - K_7 q_7^{\alpha} - K_6 q_6^{\alpha} - K_2 q_2^{\alpha} + K_4 q_4^{\alpha}\end{aligned} \qquad (11)$$

A nova matriz C' é:

$$C' = \begin{array}{cc} \begin{array}{ccc} F_1 & F_2 & F_3 \end{array} & \text{Tubo} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{array} \end{array}$$

A matriz Jacobiana J_k é uma matriz de ordem (m-n). Chamando $d'_k = K_k \alpha q_k^{\alpha-1}$, a matriz Jacobiana $C'^t D'_k C'$ é dada por:

$$J_k = C'^t D'_k C' = \begin{bmatrix} d'_1 + d'_2 + d'_3 & -d'_2 - d'_3 & -d'_2 \\ -d'_2 - d'_3 & d'_2 + d'_3 + d'_4 + \overline{d}'_5 & d'_2 + d'_4 \\ -d'_2 & d'_2 + d'_4 & d'_2 + d'_4 + d'_6 + d'_7 + d'_8 \end{bmatrix}$$

onde $d'_1 = K_1 \alpha q_1^{\alpha-1} - 2Aq_1 - B$ (12)

Observe que J_k é sempre simétrica quando componentes hidráulicos são incorporados na rede.

As mudanças observadas para esta nova configuração de rede são:

- A bomba se encontra no tubo 1. Por isso o elemento d'_1 deve ser calculado pela expressão $d'_1 = K_1 \alpha q_1^{\alpha-1} - 2Aq_1 - B$.

- A válvula de retenção se encontra no trecho 1-5 e foi suposta estar fechada. Portanto a resistência K_2 é fixada como infinita em relação às resistências dos demais trechos. Isto equivale a fixar d'_2 arbitrariamente grande.

- A válvula redutora de pressão se encontra no tubo 5 e é substituída por um reservatório artificial 7. O trecho de montante deixa de existir na nova configuração uma vez que as equações da continuidade já estão satisfeitas no vetor q_k da formulação. A resistência no trecho 7-2 (tubo 5) é calculada em relação à distância entre o reservatório artificial e o nó de jusante, no caso o nó 2. Portanto d'_5 é substituido por $\overline{d}'_5 = \overline{K}_5 \alpha q_5^{\alpha-1}$.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Desenvolveu-se um programa para o cálculo de sistemas de distribuição de água onde esses componentes hidráulicos foram incorporados. O programa foi usado para resolver a rede exemplo (Fig. 6) com uma válvula de retenção permitindo o fluxo somente do nó 5 para o nó 1, uma válvula redutora de pressão com uma energia de controle h_{set}=100 ft permitindo o fluxo do nó 2 para o nó 4 e com uma bomba cuja curva característica $h_b = -0.1q^2 + 4q + 15$.

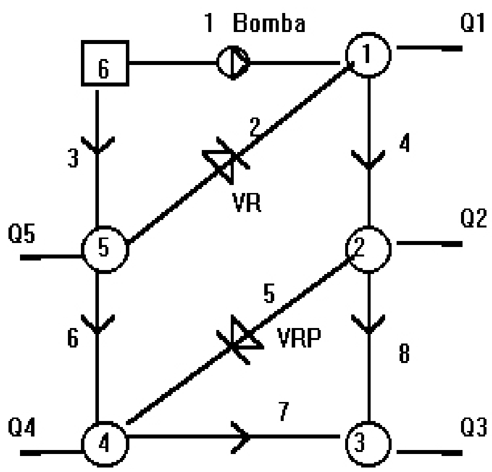


Fig.6 - Rede utilizada como exemplo por CHANDRASHEKAR e STEWART (1980).

Os dados utilizados por CHANDRASHEKAR E STEWART (1980) referentes às resistências nos trechos e condições operacionais constam das tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Resistências dos tubos da rede da figura 6.

Tubo	1	2	3	4	5	6	7	8
K_i	6.80	437,76	12.25	10.89	8.17	7.49	4.53	477.55

Tabela 2 - Consumo dos nós e energia do reservatório da rede da figura 6.

Nós	1	2	3	4	5	6
Consumo (ft^3/s)	1.9	3.6	3.2	2.0	1.6	-
Energia do Reservatório (ft)	-	-	-	-	-	500

Obs: Elevação dos nós igual a zero.

A solução para a rede exemplo com os componentes hidráulicos modelada dentro do esquema de NIELSEN (1989) foi idêntica para as formulações tanto em termos de energias como em termos de vazões conforme resultados de vazões e energias apresentados respectivamente nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Vazões nas canalizações para rede simples e com elementos hidráulicos da rede da figura 6.

Vazões nos Tubos (ft^3/s)								
	1	2	3	4	5	6	7	8
Rede simples	6.80	0.31	5.50	4.59	0.16	21	2.05	1.15
Rede com componentes hidráulicos	6.64	0.00	5.66	4.74	0.83	4.06	2.89	0.31

Tabela 4 - Energias nos nós para rede simples e com elementos hidráulicos para a rede da figura 6.

Energias nos Nós (ft)						
	1	2	3	4	5	6
Rede simples	263.64	81.01	68.68	96.85	213.36	500
Rede com elementos hidráulicos	311.57	117.97	64.73	97.09	197.23	500

Observe que neste exemplo, a válvula de retenção se fecha, e a válvula redutora de pressão está operando, ou seja, reduzindo a pressão a um valor de 100 ft.

A formulação em termos de vazões tem a vantagem de resultar em um sistema de equações de ordem (m-n) e é mais simples e automática quando elementos hidráulicos são incorporados na rede.

No entanto, a principal vantagem do modelo aqui proposto para incluir válvulas de retenção, válvulas redutoras de pressão, bombas e reservatórios para a formulação, reside no fato de que para todas as situações de operação desses componentes hidráulicos a matriz Jacobiana ou o sistema de equações resulta sempre simétrica. Esta vantagem é importante pois possibilita considerável redução de memória computacional requerida, principalmente quando da exploração da esparsidade desta matriz.

CONCLUSÕES

A análise em regime permanente de sistemas de distribuição de água é um problema de grande importância na engenharia hidráulica. Muitos algoritmos tem sido propostos e técnicas numéricas são largamente utilizadas na atualidade.

Poucos estudos, no entanto, tem tratado de componentes hidráulicos presentes na rede. O modelo proposto implementa ou incorpora válvulas de retenção, válvulas redutoras de pressão, bombas e outros elementos hidráulicos, resulta num sistema sempre simétrico e de ordem reduzida.

O modelo proposto demonstrou ser eficiente para sistemas de distribuição de água, com a presença de componentes hidráulicos na rede.

O aperfeiçoamento dos aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente realizados neste trabalho possibilitará a análise de redes com maior eficiência e servirá como um instrumento de cálculo para estudantes de engenharia civil e projetistas no meio profissional da engenharia hidráulica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHANDRASHEKAR, M. Extended Set of Components in Pipe Networks. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 106(HY1), 133-149, 1980.
2. CHANDRASHEKAR, M., STEWART, K. H. Sparsity Oriented Analysis of Large Pipe Networks. Journal of the Hydraulic Division, v. 101, n. HY4, p. 341-355, 1975.
3. COLLINS, M. A. Extended Set of Components in Pipe Networks. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY1, 149-152, 1981.
4. DODGE, E. R., HOELLLEIN, H. R., TETMATER, L. The Analysis of Large Complex Water Networks with Small Computer Systems. Journal American Water Works Association, 366-370, 1978.
5. DONACHIE, R. P. Digital Program for Water Network Analysis. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 100(HY3), 393-403, 1974.
6. JEPPSON, R. W., DAVIS, A. L. Pressure Reducing Valves in Pipe Networks Analysis. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 102(HY7), 987-1001,1976.
7. LAM, C. F., WOLLA, M. L. - Computer Analysis of Water Distribution Systems: Part I - Formulation of Equations. Journal of the Hydraulics Division, v. 98, n. HY2, p. 335-344, 1972.

8. LAM, C. F., WOLLA, M. L. - Computer Analysis of Water Distribution Systems: Part II - Numerical Solution. Journal of the Hydraulics Division, v. 98, n. HY3, p. 447-460, 1972.
9. NIELSEN, H. B. Methods for Analyzing Pipe Networks. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(2), 139-157, 1989.
10. RIGHETTO, A. M. Desenvolvimento de Modelos de Simulação para o Desenvolvimento de Redes de Distribuição de Água. São Carlos. 1977. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1977.
11. SHAMIR, U., HOWARD, C. D. D. Engineering Analysis of Water Distribution Systems. Journal American Water Works Association, 510-514, 1977.
12. SOUZA, R. S. Aspectos Computacionais da Análise de Redes de Distribuição de Água com Componentes Hidráulicos em Regime Permanente. São Carlos. 1994. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1994.
13. SOUZA, R. S. Conceitos de Linearização no Cálculo Hidráulico de Redes de Distribuição de Água, XVI Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Associação Internacional de Investigações Hidráulicas-AIIH. 1994. Anais. Santiago, Chile, 1994.