



II-031 - IMPLEMENTAÇÃO E INVESTIGAÇÃO DE UM MÉTODO ANALÍTICO DE CALIBRAÇÃO DE REDES HIDRÁULICAS

Peter Batista Cheung⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Mestrando em Tecnologias Ambientais pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Alexandre Kepler Soares

Graduando de Engenharia Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Bolsista de Iniciação Científica - PIBIC/UFMS.

Robert Schiaveto de Souza

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos / USP. Professor Adjunto do Departamento de Hidráulica e Transportes do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.



Endereço⁽¹⁾: Rua João Azuaga, 536 - Vila Planalto - Campo Grande - MS - CEP: 79009-820 - Brasil - Tel: (67) 783-4823 - e-mail: peter@nin.ufms.br

RESUMO

A finalidade do processo de calibração de uma rede de distribuição de água, é ajustar os dados de entrada do modelo para reduzir o desvio entre os valores observados e prognosticados. Atualmente, com o desenvolvimento de inúmeras técnicas de calibração, faz-se necessário um reexame dos modelos teóricos comumente utilizados. Estas técnicas estão divididas em duas categorias principais: técnicas que ajustam apenas os coeficientes de perda de carga e técnicas na qual ajustam os coeficientes de perda de carga e as demandas nos nós. Os coeficientes de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós são inicialmente estimados e são ajustados esperançosamente para que os valores preditos se aproximem dos valores reais. Neste trabalho, três versões do método analítico de calibração são implementados em um modelo de rede teórica: método analítico convencional, método analítico modificado e um método analítico proposto. O principal objetivo foi avaliar a eficiência destas técnicas de calibração e compará-las entre si. O método analítico proposto demonstrou ser ligeiramente mais eficiente do que o método analítico convencional, enquanto que o método analítico modificado apresentou resultados de calibração relativamente divergentes dos valores reais.

PALAVRAS-CHAVE: Redes Hidráulicas, Calibração, Coeficiente de Rugosidade, Demanda.

INTRODUÇÃO

Devido a crescente demanda de água, existe uma grande necessidade em se obter sistemas de distribuição eficientes. Para isso, deve-se buscar novas tecnologias que contribuam para o uso e controle adequado de tal recurso, que por sua vez está tornando-se cada vez mais escasso.

Os modelos computacionais para a análise e projetos de redes hidráulicas vem sendo desenvolvidos por várias décadas, e muitos avanços foram realizados em relação as suas aplicações. Recentemente muitos autores tem propostos diferentes algoritmos para a calibração de redes hidráulicas. Estas técnicas tem sido baseadas em métodos analíticos, explícitos e técnicas de otimização. As técnicas baseadas em métodos analíticos geralmente requerem simplificação da rede diretamente com o uso de tubulações equivalentes, adequando as características geométricas e os parâmetros variáveis, coeficientes de rugosidade das tubulações e demanda nos nós, nas equações hidráulicas.

Os modelos de calibração foram desenvolvidos para minimizar os erros presentes nos dados requeridos de entrada, ajustar os valores prognosticados do sistema e combinar tais valores com o comportamento real da rede hidráulica. Porém, a calibração incorreta conduz a estimação de valores incorretos dos parâmetros envolvidos, contribuindo para um prognóstico não eficaz do comportamento dos sistemas de distribuição de água.



Atualmente, com o desenvolvimento de inúmeras técnicas de calibração, faz-se necessário um reexame dos modelos teóricos utilizados para a calibração de redes hidráulicas. A implementação dos algoritmos de calibração é complexa, devido as formulações matemáticas se apresentarem de forma não-linear.

Este trabalho teve como finalidade investigar um método clássico de calibração de sistemas de distribuição de água e implementá-lo em um modelo de rede teórica. Este método foi apresentado em três versões: o método analítico convencional, o método analítico modificado e um método analítico proposto. Portanto, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência destas técnicas de calibração e compará-las entre si. Esta é uma etapa preliminar para a implementação em campo do conceito de calibração em uma rede real. Espera-se que as técnicas de calibração estudadas nesta pesquisa possam ser aplicadas em uma próxima fase, contribuindo para a melhoria dos sistemas de distribuição e abastecimento de água existentes.

PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Modelos matemáticos tem sido desenvolvidos nas últimas décadas para calibração de redes de distribuição de água (SHAMIR 1974, DONACHIE 1974, SHAMIR e HOWARD 1977, WALSKI 1983,1986, BHAVE 1988 entre outros). A confiabilidade e eficiência dos algoritmos encontrados na literatura dependem do método de calibração utilizado. Percebe-se alguma diversidade nos trabalhos existentes no que tange aos métodos utilizados para estudo e análise do problema de calibração de sistemas de abastecimento e distribuição de água. Estas técnicas estão divididas em duas categorias principais: técnicas que ajustam apenas os coeficientes de perda de carga e técnicas na qual ajustam os coeficientes de perda de carga e as demandas nos nós.

As técnicas de calibração que ajustam apenas os coeficientes de perda de carga, admitem que as demandas nos nós prognosticadas são razoavelmente acuradas e apenas os coeficientes de perda de carga prognosticados precisam de ajuste. Estas técnicas utilizam a fórmula geral de perda de carga e ajustam as constantes de resistência das tubulações. Por outro lado, as técnicas de ajuste simultâneo dos coeficientes de perda de carga e demandas nos nós são recomendadas quando as demandas não são facilmente estimadas. WALSKI (1983,1986) e BHAVE (1988) propuseram uma técnica analítica que ajusta simultaneamente os coeficientes de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós. A técnica requer algumas informações que podem ser obtidas durante os testes de rotina nas redes de distribuição de água.

WALSKI (1983) declarou que muitos pesquisadores consideram os valores de rugosidade encontrados na literatura suficientes para uso nos modelos, porém isto não é geralmente verdadeiro pois: (1) os valores da literatura são meramente valores médios e há uma quantidade razoável de variações sobre a média; (2) em um modelo de um sistema eskeletonizado, uma tubulação deve também considerar a capacidade de carga dos condutos mais próximos ao qual foram eliminados pelo modelo; (3) o fator de rugosidade C para uma tubulação deve também considerar perdas de carga localizadas ao qual não estão explicitamente consideradas para uso nos comprimentos equivalentes; e (4) o consumo em um modelo é agrupado nos nós, enquanto no sistema real é espalhado entre os nós. O desenvolvimento do autor tornou possível o cálculo do fator de rugosidade C e consumos de água através de testes em hidrantes de incêndio. O problema destas aproximações está baseado na hipótese em que todos os erros não calibrados do modelo é um resultado de erros no fator C ou possivelmente no consumo de água. As experiências descritas concluíram que é improvável que um procedimento analítico simples ou uma técnica de otimização para calibrar um modelo sempre seja desenvolvido. Há simplesmente muitos outros fatores que podem estar incorretos em um modelo não calibrado, e existem muitas origens destes erros.

Na técnica proposta por WALSKI (1983), as demandas nos nós e as vazões de entrada nos nós de origem cresce ou decresce dependendo do valor do fator de ajuste de demanda. Assim sendo, definiu-se a calibração como uma das duas etapas do processo onde, compara-se as pressões preditas com aquelas observadas para conhecidas condições de operação, isto é, operação de bombas, níveis dos reservatórios, válvulas redutoras de pressão locais; e ajusta-se os dados de entrada para que o modelo melhore a relação entre valores observados e prognosticados.

Na técnica proposta por BHAVE (1988) é assumido que a vazão de entrada no nó de origem pode ser medido ou estimado com acurácia e então este parâmetro é conhecido e permanece fixo durante a calibração. Esta



técnica é uma modificação da aplicação feita por WALSKI (1983) usando um procedimento iterativo de calibração no qual ajusta simultaneamente as demandas nos nós e os coeficientes de resistência das tubulações. O modelo utilizado ajusta os coeficientes de resistência das tubulações e/ou as demandas dos nós, fazendo um prognóstico de pressões nos nós concordando razoavelmente com as respectivas pressões observadas.

Na técnica sugerida por BHAVE (1988), os coeficientes de resistência das tubulações e as demandas nos nós foram ajustados sucessivamente. A rede foi dividida em várias zonas conforme o número de testes disponíveis. As equações de calibração foram então formuladas e resolvidas. Os ajustes foram realizados por grupos de tubulações e concentrados de nós e os ajustes das demandas nos nós não foram concentrados mas distribuídos por toda rede. A técnica também foi realizada sob diferentes condições de carga, produzindo combinações exatas entre os parâmetros prognosticados e os observados.

Neste trabalho, os métodos apresentados por WALSKI (1983) e BHAVE (1988), juntamente com uma versão proposta, para calibração de sistemas de distribuição de água, foram implementados e aplicados em uma rede exemplo teórica, com a finalidade de investigar a qualidade dos resultados obtidos por cada método.

MODELO DE CALIBRAÇÃO HIDRÁULICO

Método Analítico Convencional

Este método desenvolvido por WALSKI (1983), apresenta uma formulação que auxilia na decisão de ajuste simultâneo dos coeficientes de rugosidade das tubulações e das demandas nos nós. O procedimento utilizado observa as pressões no sistema, em no mínimo duas condições de cargas. Os dados obtidos são sempre coletados em pontos conhecidos, hidrantes de incêndio por exemplo, onde se tem uma medição de vazão e energia.

O desenvolvimento das equações para correção dos coeficientes de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós, dependem dos dados fornecidos nos nós de teste. As informações seguintes refere-se aos testes de rotina nos nós:

As energias de um nó de teste (hidrante) correspondem a uma vazão baixa, Q (hidrante fechado), e a uma vazão alta, $Q + Q_f$ (hidrante aberto) e suas respectivas elevações de energia podem ser definidas como sendo h_1 e h_2 . Q_f é a vazão do nó de teste e H é a energia piezométrica de algum ponto de energia conhecida (bombas, tanques, válvulas redutoras de pressão). As informações pertinentes que geralmente são incluídas como incógnitas são: demanda Q e o fator C .

Para esta situação é possível desenvolver expressões para calcular o fator correto do coeficiente de rugosidade C , para tubulações de uma determinada área dada e demandas corretas, Q , para um dado grupo de nós em um modelo de rede.

WALSKI (1983) desenvolveu uma única regra de calibração, representando uma seção do sistema vindo de um nó com energia conhecida para um nó de teste através de uma tubulação equivalente. A perda de carga entre o ponto de energia conhecida e o nó de teste pode ser expresso como (equações 1 e 2):

$$H_1 - h_1 = K_1 \left(\frac{S}{C} \right)^{1,85} \quad \text{equação (1)}$$

$$H_2 - h_2 = K_2 \left(\frac{S + Q_f}{C} \right)^{1,85} \quad \text{equação (2)}$$

onde Q_f é a diferença de vazão entre duas condições de carga, por exemplo: hidrante aberto e fechado; H_1 é a energia no ponto de energia conhecida para baixa vazão (hidrante fechado); H_2 é a energia no ponto de energia conhecida para alta vazão (hidrante aberto); h_1 é a energia do nó de teste para baixa vazão; h_2 é a energia do nó de teste para alta vazão; K_1 é a constante da tubulação equivalente para baixa vazão; K_2 é a



constante da tubulação equivalente para alta vazão; S é o consumo dos nós significativamente afetados pelo teste (equação 3); e m é o número de nós afetados pelo teste.

$$S = \sum_{i=1}^m Q_i \quad \text{equação (3)}$$

Existem quatro incógnitas nas equações descritas acima, K_1 , K_2 , C , e S . K_1 e K_2 dependem dos diâmetros e comprimentos e são iguais se não houver consumos entre o ponto de energia constante e o nó de teste. K_1 e K_2 podem ser estimados utilizando valores iniciais de C e Q , referenciadas como C_e e Q_e . Dados os valores de C_e e Q_e , o modelo pode prognosticar uma energia piezométrica como h_3 para a vazão Q_e , e h_4 para a vazão $Q_e + Q_f$. As equações (4) e (5) são expressões similares a equação (1) e podem ser utilizadas para estimar K_1 e K_2 se as estimativas iniciais, $Q_e + Q_f$, não estão extremamente erradas.

$$K_1 = (H_1 - h_3) \left(\frac{C_e}{S_e} \right)^{1,85} \quad \text{equação (4)}$$

$$K_2 = (H_2 - h_4) \left(\frac{C_e}{S_e + Q_f} \right)^{1,85} \quad \text{equação (5)}$$

onde h_3 é a estimativa de h_1 do modelo para C_e e S_e ; h_4 é a estimativa do modelo de h_2 para C_e e S_e ; C_e é a estimativa inicial de C ; Q_e é a estimativa inicial de Q ; e S_e é a estimativa inicial de S (equação 6).

$$S_e = \sum_{i=1}^m Q_{ei} \quad \text{equação (6)}$$

Inserindo os valores de K_1 e K_2 na equação (1) e resolvendo para S e C produz:

$$S = \frac{Q_f}{\frac{b}{a} \left(1 + \frac{Q_f}{S_e} \right) - 1} = AS_e \quad \text{equação (7)}$$

$$C = \frac{Q_f C_e}{b(S_e + Q_f) - aS_e} = BC_e \quad \text{equação (8)}$$

onde:

$$a = \left(\frac{H_1 - h_1}{H_1 - h_3} \right)^{0,54} \quad \text{equação (9)}$$

$$b = \left(\frac{H_2 - h_2}{H_2 - h_4} \right)^{0,54} \quad \text{equação (10)}$$

$$A = \frac{Q_f}{\frac{b}{a} (S_e + Q_f) - S_e} \quad \text{equação (11)}$$

$$B = \frac{Q_f}{b(S_e + Q_f) - aS_e} \quad \text{equação (12)}$$

As equações (7,8,9,10,11,12) podem ser usadas para calcular valores melhorados de C e Q para calibração. Os coeficientes a e b são úteis como indicadores de erros nas estimativas iniciais.



Para ajustar as demandas nos nós individuais utilizamos a expressão (13):

$$Q_i = A Q_{ei}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{equação (13)}$$

Similarmente o coeficiente de rugosidade C para as tubulações na área deve ser ajustado, e a equação (8) pode ser mais corretamente escrita como:

$$C_j = B C_{ej}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{equação (14)}$$

onde n é o número de tubulações afetadas durante os testes. Os parâmetros A e B , são fatores de correção para demandas e coeficientes de rugosidade, respectivamente.

Método Analítico Modificado

Este método desenvolvido por BHAVE (1988), ajusta os coeficientes de rugosidade das tubulações e/ou as demandas nos nós através de um procedimento iterativo até alcançar a calibração com um certo grau de acurácia, combinando os valores prognosticados com os valores reais. As vazões de entrada podem ser medidas ou estimadas acuradamente e permanecem fixas durante o processo de calibração.

As equações básicas que governam o escoamento nas redes de distribuição de água são as equações de continuidade no nó e as equações de perda de carga no circuito. De acordo com a equação de continuidade no nó, a soma algébrica das vazões de um nó deve ser zero. Assim,

$$\sum_{\substack{i \text{ incidindo} \\ \text{em } j}} q_i + Q_j = 0 \quad \text{para todo } j \quad \text{equação (15)}$$

onde q_i é a vazão na tubulação i incidente no nó j , e Q_j é a vazão externa de abastecimento ou demanda no nó j . De acordo com a equação de “momentum” num circuito fechado, a soma algébrica de perdas de carga nas tubulações em um circuito deve ser zero. Assim,

$$\sum_{i \in c} h_{Li} = 0 \quad \text{para todo } c \quad \text{equação (16)}$$

onde h_{Li} é a perda de energia na tubulação i contida no circuito c .

A perda de carga em uma tubulação é geralmente expressa através da fórmula de Hazen-Williams (HW):

$$h_L = \frac{KLq^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.87}} \quad \text{equação (17)}$$

ou pela fórmula de Darcy-Weisbach (DW):

$$h_L = \frac{8fLq^2}{\pi^2 g D^5} \quad \text{equação (18)}$$

onde K é a constante de Hazen-Williams; L é o comprimento da tubulação; q é a vazão na tubulação; C é o coeficiente de Hazen-Williams; D é o diâmetro da tubulação; e f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach; e g é a aceleração da gravidade. A perda de carga pode também ser expressa através de uma fórmula geral:

$$h_L = R q^n \quad \text{equação (19)}$$

onde R é a constante de resistência da tubulação, que depende do comprimento, diâmetro, e rugosidade da tubulação; e n é o expoente, usualmente entre 1.7 e 2.0.



No método analítico modificado, ambos parâmetros, isto é, coeficientes de perda de carga das tubulações e demandas nos nós são ajustados como feito no método analítico convencional, desenvolvido por WALSKI (1983,1986). Contudo, no método citado, as demandas nos nós, e portanto a vazão de entrada do nó de origem cresce ou decresce condicionado ao valor do fator de ajuste. Neste método proposto por BHAVE (1988), é assumido que a vazão de entrada nos nós de origem podem ser medidos ou relativamente estimados com certo grau de acurácia e portanto isto é conhecido e permanece fixo durante a calibração. Quando as demandas dos nós são inicialmente atribuídas, estas são ajustadas, se necessário, até que a soma destas se igualem as vazões de entrada estimadas. Contudo, durante a calibração, a redistribuição de demandas nos nós pode tomar lugar até que algumas demandas nos nós cresçam e outras decresçam e o crescimento total igualem-se ao decrescimento total.

Como as demandas dos nós e os coeficientes das tubulações são simultaneamente ajustados no método analítico modificado, no mínimo duas condições adicionais devem ser avaliadas. Estas podem ser obtidas através de medições de energias de dois nós de demanda sob uma particular condição de carga, ou de um nó de demanda sob diferentes condições normais ou de vazões padronizadas de combate a incêndio como feita na aplicação de WALSKI (1983, 1986), ou de um nó demanda sob duas diferentes condições de carga.

A seguir, será apresentada a técnica proposta por BHAVE (1988) considerando uma rede de distribuição de água dada pela figura 1. O nó S é um nó de origem de energia conhecida, neste caso, o reservatório R , e os nós T_1 e T_2 são os nós de testes, 3 e 12 respectivamente, onde as energias são medidas sob uma particular condição de carga. Dividindo a rede em zonas, uma para cada nó de teste e supondo ΔQ_1 e ΔQ_2 sendo os ajustes de demanda das zonas, respectivamente, naturalmente $\Delta Q_2 = -\Delta Q_1$ até que o ajuste de demanda para toda rede seja zero.

Considerando um caminho vindo de S para T_1 e rotulando as tubulações neste caminho de 2,6,...i... Para este caminho, temos:

$$\mathbf{R}_2(q_{2p})^n + \mathbf{R}_6(q_{6p})^n + \dots + \mathbf{R}_i(q_{ip})^n + \dots = \mathbf{H}_s - \mathbf{H}_{t1p} \quad \text{equação (20)}$$

onde $R_2, R_6, \dots, R_i, \dots$ são as constantes de resistência das tubulações 2,6,...,i,...; $q_{2p}, q_{6p}, \dots, q_{ip}, \dots$ são as vazões nas tubulações 2,6,...,i,... para as demandas prognosticadas dos nós e constantes de resistência nas tubulações; H_s é a energia da origem S , e H_{t1p} é a energia prognosticada no nó T_1 .

Admitindo que a correção completa ΔQ_1 é aplicada para a primeira tubulação no caminho $S-T_1$, e que esta correção reduz ao longo o caminho $S-T_1$ na proporção que a descarga é conduzida, o ajuste da tubulação i , é

$$\text{dado por: } \Delta Q_i = \frac{q_{ip}}{q_{2p}} \Delta Q_1.$$

Se B é o fator de ajuste global para as constantes de resistência, então para o caminho $S-T_1$:

$$\mathbf{BR}_2(q_{2p} + \Delta Q_1)^n + \mathbf{BR}_6(q_{6p} + \frac{q_{6p}}{q_{2p}} \Delta Q_1)^n + \dots + \mathbf{BR}_i(q_{ip} + \frac{q_{ip}}{q_{1p}} \Delta Q_1)^n + \dots = \mathbf{H}_s - \mathbf{H}_{t1} \quad \text{equação (21)}$$

Expandindo a equação (21), desprezando os termos de alta ordem de ΔQ_1 , combinando com a equação (20) e simplificando:

$$\mathbf{B}(\mathbf{H}_s - \mathbf{H}_{t1p}) + \frac{n\mathbf{B}(\mathbf{H}_s - \mathbf{H}_{t1p})}{q_{2p}} \Delta Q_1 = \mathbf{H}_s - \mathbf{H}_{t1} \quad \text{equação (22)}$$

Como $B \cong 1$, fazendo $B = 1$ para simplicidade do segundo termo, a equação (22) é reduzida para:



$$B(H_s - H_{t1p}) + \frac{n(H_s - H_{t1p})}{q_{2p}} \Delta Q_1 = H_s - H_{t1} \quad \text{equação (23)}$$

Similarmente, considerando caminho $S-T_2$, e fazendo $\Delta Q_2 = -\Delta Q_1$

$$B(H_s - H_{t2p}) - \frac{n(H_s - H_{t2p})}{q_{1p}} \Delta Q_1 = H_s - H_{t2} \quad \text{equação (24)}$$

onde q_{1p} é a vazão na tubulação 1, a primeira tubulação no caminho $S-T_2$. Simultaneamente resolvendo linearmente as equações (23) e (24), os valores de B e ΔQ_1 são obtidos.

A constante de resistência da tubulação ajustada R_{ia} , o coeficiente de Hazen-Williams ajustado C_{ia} , e o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach f_{ia} ajustado são dados, respectivamente,

$$R_{ia} = BR_{ip} \quad \text{equação (25)}$$

$$C_{ia} = \frac{1}{B^{0.54}} C_{ip} \quad \text{equação (26)}$$

$$f_{ia} = Bf_{ip} \quad \text{equação (27)}$$

O ajuste de demanda por zona ΔQ_1 e $\Delta Q_2 (= -\Delta Q_1)$ são distribuídos na proporção para admitir demandas nos nós nas zonas 1 e 2, respectivamente. Portanto, a demanda ajustada no nó Q_{ja} pode ser apresentada por um equação geral:

$$Q_{ja} = Q_{jp} \left(1 + \frac{\Delta Q_z}{\sum_{j \in N_z} Q_{jp}} \right) \quad \text{equação (28)}$$

onde q_{jp} é a demanda prognosticada do nó j ; ΔQ_z é o ajuste total de vazão por zona; e N_z é o conjunto de nós de demanda na zona Z .

Os coeficientes de resistência e demandas nos nós são ajustados e então a análise da rede é realizada. É observado que a convergência processa sistematicamente e $B \rightarrow 1$ e $\Delta Q \rightarrow 0$. Contudo, como os termos de maior ordem de ΔQ são descartados e como é assumido que os ajustes das vazões são inteiramente levados pela primeira tubulação nos caminhos, a convergência é mais lenta, e diversas simulações do modelo podem ser necessárias para combinar os resultados ajustados com aqueles observados. Porém, na prática, dependendo da acurácia dos dados disponíveis, as simulações do modelo podem ser interrompidas quando uma relação razoável é alcançada entre resultados ajustados e observados.

Quando observações são feitas em apenas um nó sob condições de vazão normal e de incêndio ou sob duas diferentes condições de carga, t_2 e t_1 unem-se dentro de um único nó de teste. Como as observações e portanto as equações disponíveis são duas, a rede é dividida em duas zonas mas o nó de origem S e o nó de teste T são comuns para ambas zonas. Dois caminhos independentes, começando em S e terminando em T situados nestas duas zonas são selecionados. A demanda do nó T pode ser assumida para ser igualmente abastecida pelas duas zonas e é ajustada diretamente por ambas zonas. Os parâmetros de decisão das duas equações são: ΔQ_1 ; $\Delta Q_2 (= -\Delta Q_1)$; e B para a rede completa.



Método Analítico Proposto

A técnica proposta neste trabalho, ambos parâmetros continuam sendo ajustados simultaneamente, como feito por WALSKI (1983,1986) e BHAVE (1988). Enquanto que no método de BHAVE (1988), as demandas nos nós permanecem fixas durante o processo de calibração, no método proposto, como sugerido por WALSKI (1983), as demandas crescem e decrescem dependendo do fator de ajuste de demanda. No entanto, os valores dos coeficientes K_1 e K_2 , na técnica apresentada por WALSKI (1983), são calculados através das estimativas iniciais C_e e S_e , juntamente com h_3 e h_4 e permanecem fixos durante o processo de calibração, diferentemente da técnica proposta, que permite, a cada iteração obter novos valores de K_1 e K_2 e seus respectivos valores de h_3 e h_4 .

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Considerações Iniciais

Os algoritmos dos métodos de calibração de redes de distribuição de água descritos na seção anterior, foram implementados na linguagem Pascal/DELPHI. Três programas computacionais foram desenvolvidos. O primeiro programa foi desenvolvido para o ajuste dos coeficientes de resistência das tubulações e/ou as demandas nos nós usando o método analítico convencional (WALSKI 1983). O segundo programa foi desenvolvido através do algoritmo de calibração apresentado por BHAVE (1988), usando o método analítico modificado. E o terceiro, foi desenvolvido utilizando o método analítico convencional, com o aperfeiçoamento descrito no item anterior, então chamado de método analítico proposto.

Para estudar a eficiência e o comportamento dos métodos descritos neste trabalho, foi selecionada uma rede exemplo teórica (BHAVE 1988) com 23 trechos, 12 nós e 1 reservatório (figura 1). Os comprimentos, diâmetros e os coeficientes das tubulações são dados na tabela 1, juntamente com os valores de vazões e perdas de carga obtidos do modelo matemático desenvolvido por NIELSEN (1989) para análise de redes.

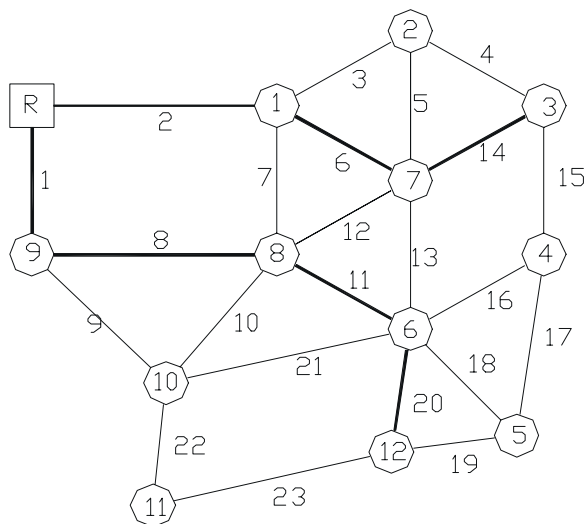


Figura 1 - Rede de estudo.

Os nós 3 e 12 foram escolhidos para serem os nós de teste ocorrendo simultaneamente. As energias nos nós de testes foram medidas para duas condições de carga: baixa vazão (low flow - hidrante fechado) e alta vazão (high flow - hidrante aberto), gerando quatro equações. A rede foi dividida em dois caminhos como mostrado na figura 1. Estes caminhos vão do reservatório até os nós de teste e foram selecionados com uma linha mais grossa. Os nós 1,2,3 e 7 são calibrados pelo fator de ajuste produzido pelo caminho R-3. Os demais nós são ajustados conforme o fator de ajuste gerado pelo caminho R-12.



A coluna “Low Flow” na tabela 1 corresponde às vazões e às perdas calculadas para as demandas reais apresentadas na tabela 2. A coluna “High Flow” é obtida considerando as demandas reais da tabela 2 incrementadas das vazões de 100 e 140 para os nós de teste 3 e 12 respectivamente, resultando assim, nas condições de carga.

Tabela 1 - Dados Reais da Rede de Estudo.

CONDIÇÃO REAL							
Tubulação	Comprimento	Diâmetro	Chw	VAZÃO		PERDA DE CARGA	
				Low Flow	High Flow	Low Flow	High Flow
1	300	400	120	145.60	229.70	1.11	2.57
2	400	400	120	254.40	410.30	4.14	10.03
3	350	300	110	61.10	107.90	1.23	3.53
4	500	250	100	18.40	58.80	0.55	4.74
5	400	300	100	12.70	19.10	0.09	0.19
6	300	350	110	103.50	181.00	1.32	3.72
7	400	300	100	49.70	81.40	1.15	2.85
8	500	300	90	79.80	130.00	4.18	10.32
9	600	250	110	55.80	89.80	4.34	10.45
10	300	200	120	8.10	7.60	0.15	0.14
11	300	250	110	62.40	118.70	2.66	8.77
12	300	300	90	19.10	45.00	0.18	0.87
13	400	250	100	46.80	87.30	2.49	7.90
14	300	300	80	28.50	97.90	0.46	4.55
15	500	200	120	26.90	36.60	2.36	4.18
16	400	250	110	17.50	28.50	0.34	0.83
17	300	200	100	14.40	35.20	0.63	3.26
18	500	250	90	22.40	48.90	0.96	4.10
19	400	200	130	3.20	-44.00	0.03	-4.05
20	300	250	100	32.20	103.70	0.93	8.15
21	300	150	90	12.90	25.10	2.51	8.63
22	400	200	80	31.00	52.20	5.21	13.67
23	500	150	100	-9.00	12.20	-1.76	3.12

Tabela 2 - Demandas nos Nós.

NÓ	DEMANDA (Low flow)		DEMANDA AJUSTADA		
	Real	Estimativa	MAC	MAM	MAP
1	40	60	44.38	27.65	32.07
2	30	40	33.28	18.43	24.05
3	20	40	22.18	18.43	16.03
4	30	20	29.30	28.82	36.28
5	40	30	39.07	43.23	48.38
6	50	60	48.84	86.46	60.47
7	60	40	66.57	18.43	48.81
8	40	50	39.07	72.05	48.38
9	10	20	9.77	28.82	12.09
10	20	10	19.54	14.41	24.19
11	40	20	39.07	28.82	48.38
12	20	10	19.54	14.41	24.19
Nó Teste	Vazão	MAC - Método Analítico Convencional			
2	100	MAM - Método Analítico Modificado			
3	140	MAP - Método Analítico Proposto			



Método Analítico Convencional (MAC)

Após obtidos os valores reais da rede em estudo (tabela 1), considerou-se os mesmos dados geométricos, como diâmetros e comprimentos, e aplicou-se o método analítico convencional (MAC), com estimativas iniciais de C iguais a 100 para todos os tubos e valores das demandas nos nós Q dados na tabela 2.

Os valores calibrados utilizando o método analítico convencional (MAC) desenvolvido por WALSKI (1983), foram aplicados em um modelo de análise de rede, no caso em estudo, NIELSEN (1989) e são demonstrados na tabela 3. A implementação do MAC não é complexa, porém o resultado produzido pelo modelo, apresenta-se de forma global. Foi necessário distribuir os valores de demandas nos nós proporcionalmente, já que a atribuição dos valores para os coeficientes de rugosidade está relacionada com o respectivo caminho (R-3, R-12), ou zona de interferência.

WALSKI (1983) declarou que uma diferença média na perda de carga no intervalo de ± 1.5 a ± 5.0 , seria considerada aceitável. Já CESARIO e DAVIS (1984) afirmaram que modelos podem ser calibrados para um acurácia de 3.5-7.0. Com isso observa-se que os valores do método analítico convencional (MAC) da tabela 3, encontram-se nestes intervalos.

Tabela 3 - Valores ajustados usando o MAC.

MÉTODO ANALÍTICO CONVENCIONAL - CONDIÇÃO AJUSTADA					
TUBUL.	CHW	VAZÃO		PERDA DE CARGA	
		Low Flow	High Flow	Low Flow	High Flow
1	106.73	166.09	261.03	1.77	4.08
2	100.75	244.49	389.54	5.36	12.69
3	100.75	57.88	101.01	1.32	3.71
4	100.75	15.05	50.29	0.38	3.53
5	100.75	9.54	17.44	0.05	0.16
6	100.75	96.43	168.54	1.38	3.87
7	100.75	45.81	75.63	0.98	2.48
8	106.73	98.83	159.53	4.58	11.09
9	106.73	57.47	91.72	4.89	11.60
10	106.73	10.60	13.86	0.32	0.52
11	106.73	60.25	113.73	2.67	8.64
12	106.73	34.73	68.50	0.40	1.39
13	100.75	44.64	83.61	2.27	7.25
14	100.75	29.50	104.30	0.33	3.37
15	100.75	22.38	32.42	2.34	4.64
16	106.73	18.43	26.22	0.40	0.76
17	106.73	11.51	29.34	0.37	2.08
18	106.73	23.30	47.33	0.77	2.84
19	106.73	4.24	37.61	0.08	-4.44
20	106.73	29.00	103.68	0.69	7.28
21	106.73	14.69	28.74	2.35	8.13
22	106.73	33.85	57.30	3.63	9.59
23	106.73	5.21	18.23	-0.59	5.81

Método Analítico Modificado (MAM)

Os valores calibrados utilizando o método analítico modificado (MAM) desenvolvido por BHAVE (1988) são demonstrados na tabela 4. A implementação do MAM foi um pouco complexa, necessitando de uma interface com um modelo de análise de rede, no caso em estudo, NIELSEN (1989). Foi necessário distribuir os valores de demandas nos nós proporcionalmente, e os valores para os coeficientes de rugosidade foram obtidos individualmente para cada tubulação.

**Tabela 4 - Valores ajustados usando o MAM.**

MÉTODO ANALÍTICO MODIFICADO - CONDIÇÃO AJUSTADA					
TUBUL.	CHW	VAZÃO		PERDA DE CARGA	
		Low Flow	High Flow	Low Flow	High Flow
1	127.00	198.36	310.99	1.800	4.090
2	90.85	200.43	328.76	4.480	11.230
3	90.85	46.90	84.30	1.060	3.210
4	90.85	14.99	48.74	0.440	4.040
5	90.85	14.59	17.11	0.100	0.190
6	90.85	81.74	141.77	1.160	3.400
7	90.85	45.41	75.26	1.250	2.970
8	127.00	107.64	180.59	3.930	10.120
9	127.00	61.41	101.39	4.020	10.130
10	127.00	7.63	2.60	0.080	0.020
11	127.00	77.45	138.20	3.020	8.990
12	127.00	14.86	43.08	-0.080	0.430
13	90.85	46.94	82.46	3.110	8.560
14	90.85	26.05	101.03	0.340	3.850
15	90.85	22.90	31.34	3.010	5.280
16	127.00	17.29	26.61	0.240	0.560
17	127.00	11.03	19.15	0.260	1.490
18	127.00	22.08	47.29	0.500	2.050
19	127.00	10.07	33.21	0.270	-2.560
20	127.00	18.83	96.42	0.230	4.610
21	127.00	19.76	36.05	2.940	8.970
22	127.00	34.35	53.58	2.700	6.140
23	127.00	5.61	24.76	0.460	7.440

De acordo com os dados observados na tabela 4, os valores também encontram-se nos intervalos citados por WALSKI (1983).

Método Analítico Proposto (MAP)

Finalmente, os valores calibrados utilizando o método analítico proposto (MAP) neste trabalho, são demonstrados na tabela 5.

Comparação dos Métodos

Segundo CESARIO e DAVIS (1984), EGGNER e POLKOWSKI (1976) e WALSKI (1983), uma metodologia para investigar a eficiência de um modelo de calibração, é analisar os dados em termos de diferenças dos valores calibrados em relação aos valores reais. Os desvios dos valores de demandas nos nós para os três métodos são mostrados na tabela 6 resultantes dos valores encontrados na tabela 2. Nas tabelas 7-9 encontram-se os desvios dos coeficientes de rugosidade, vazões e perdas de carga nos trechos para os respectivos métodos.

Verifica-se através da tabela 6 que o método analítico convencional (MAC) produz um menor desvio das demandas dos nós seguido pelo método analítico proposto. O maior desvio de demanda é observado no método analítico modificado (MAM).

Em relação aos desvios observados dos coeficientes de rugosidade, os métodos MAC e MAP apresentaram os melhores resultados (tabelas 7-9).

Avaliando os desvios globais (coeficientes de rugosidade e valores de vazões e perdas de cargas nos tubos), o método analítico proposto (MAP) forneceu desvios um pouco menores que o método analítico convencional (MAC). Embora no método analítico modificado (MAM) tenham sido observados os maiores desvios em



todas as situações, pode-se aumentar sua eficiência dividindo-se a rede em um número maior de zonas. É importante salientar que dentre os métodos estudados neste trabalho, este método é o único que permite esta flexibilidade.

Tabela 5 - Valores ajustados usando o MAP.

MÉTODO ANALÍTICO PROPOSTO - CONDIÇÃO AJUSTADA					
TUBULAÇÃO	CHW	VAZÃO		PERDA DE CARGA	
		Low Flow	High Flow	Low Flow	High Flow
1	97.97	162.11	246.15	1.98	4.29
2	110.20	263.47	416.43	5.22	12.16
3	110.20	62.32	107.37	1.29	3.51
4	110.20	18.41	53.84	0.47	3.39
5	110.20	19.85	29.48	0.18	0.37
6	110.20	108.92	184.64	1.46	3.88
7	110.20	60.18	92.35	1.38	3.04
8	97.97	91.13	145.21	4.61	10.91
9	97.97	58.88	88.84	5.99	12.81
10	97.97	21.55	25.67	1.38	1.90
11	97.97	67.51	115.53	3.86	10.42
12	97.97	13.87	47.98	0.08	0.84
13	110.20	64.23	106.30	3.78	9.58
14	110.20	30.31	107.70	0.29	3.03
15	110.20	32.70	45.51	4.01	7.37
16	97.97	19.63	25.10	0.52	0.82
17	97.97	16.05	34.34	0.80	3.26
18	97.97	28.72	52.85	1.32	4.08
19	97.97	3.60	38.81	0.07	-5.52
20	97.97	36.80	110.51	1.26	9.60
21	97.97	13.88	27.10	2.48	8.52
22	97.97	39.36	63.22	5.62	13.49
23	97.97	9.01	14.85	-1.89	4.64

Tabela 6 - Desvio Quadrado dos Valores de Demanda nos Nós.

DESVIO QUADRADO (Valor Real - Valor Ajustado) ²			
Nó	MAC	MAM	MAP
1	19.18	152.52	62.88
2	10.76	133.86	35.4
3	4.75	2.46	15.76
4	0.49	1.39	39.44
5	0.86	10.43	70.22
6	1.35	1329.33	109.62
7	43.16	1728.06	125.22
8	0.86	1027.2	70.22
9	0.05	354.19	4.377
10	0.21	31.25	17.56
11	0.86	124.99	70.22
12	0.21	31.25	17.56
	82.74	4926.93	638.477

**Tabela 7 - Desvio Quadrado do MAC.**

COMPARAÇÃO DO MAC - DESVIO QUADRADO - (Valor Real - Valor Ajustado) ²					
TUBULAÇÃO.	CHW	VAZÃO		PERDA DE CARGA	
		Low Flow	High Flow	Low Flow	High Flow
1	176.09	419.84	981.57	0.44	2.28
2	370.56	98.21	430.98	1.49	7.08
3	85.56	10.37	47.47	0.01	0.03
4	0.56	11.22	72.42	0.03	1.46
5	0.56	9.99	2.76	0.00	0.00
6	85.56	49.98	155.25	0.00	0.02
7	0.56	15.13	33.29	0.03	0.14
8	279.89	362.14	872.02	0.16	0.59
9	10.69	2.79	3.69	0.30	1.32
10	176.09	6.25	39.19	0.03	0.14
11	10.69	4.62	24.70	0.00	0.02
12	279.89	244.30	552.25	0.05	0.27
13	0.56	4.67	13.62	0.05	0.42
14	430.56	1.00	40.96	0.02	1.39
15	370.56	20.43	17.47	0.00	0.21
16	10.69	0.86	5.20	0.00	0.00
17	45.29	8.35	34.34	0.07	1.39
18	279.89	0.81	2.46	0.04	1.59
19	541.49	1.08	6660.19	0.00	0.15
20	45.29	10.24	0.00	0.06	0.76
21	279.89	3.20	13.25	0.03	0.25
22	714.49	8.12	26.01	2.50	16.65
23	45.29	201.92	36.36	1.37	7.24
Σ	4240.76	1495.54	10065.45	6.66	43.41
			Σ	Total	15851.82

Tabela 8 - Desvio Quadrado do MAM.

COMPARAÇÃO DO MAM - DESVIO QUADRADO - (Valor Real - Valor Ajustado) ²					
TUBULAÇÃO.	CHW	VAZÃO		PERDA DE CARGA	
		Low Flow	High Flow	Low Flow	High Flow
1	49.06	2783.62	6608.06	0.48	2.31
2	849.84	2912.76	6648.77	0.12	1.44
3	366.80	201.64	556.96	0.03	0.10
4	83.76	11.63	101.20	0.01	0.49
5	83.76	3.57	3.96	0.00	0.00
6	366.80	473.50	1538.99	0.03	0.10
7	83.76	18.40	37.70	0.01	0.01
8	1369.30	775.07	2559.35	0.06	0.04
9	289.14	31.47	134.33	0.10	0.10
10	49.06	0.22	25.00	0.00	0.01
11	289.14	226.50	380.25	0.13	0.05
12	1369.30	17.98	3.69	0.07	0.19
13	83.76	0.02	23.43	0.38	0.44
14	117.68	6.00	9.80	0.01	0.49
15	849.84	16.00	27.67	0.42	1.21
16	289.14	0.04	3.57	0.01	0.07
17	729.22	11.36	257.60	0.14	3.13
18	1369.30	0.10	2.59	0.21	4.20
19	8.98	47.20	5961.38	0.06	2.22
20	729.22	178.76	53.00	0.49	12.53
21	1369.30	47.06	119.90	0.18	0.12
22	2209.38	11.22	1.90	6.30	56.70
23	729.22	213.45	157.75	4.93	18.66
Σ	13734.70	7987.57	25216.86	14.18	104.63
			Σ	Total	47057.94

**Tabela 9 - Desvio Quadrado do MAP.**

COMPARAÇÃO DO MAP - DESVIO QUADRADO - (Valor Real - Valor Ajustado) ²					
TUBULAÇÃO	CHW	VAZÃO		PERDA DE CARGA	
		Low Flow	High Flow	Low Flow	High Flow
1	485.32	272.58	270.60	0.76	2.96
2	96.04	82.26	37.58	1.16	4.54
3	0.04	1.49	0.28	0.00	0.00
4	104.04	0.00	24.60	0.01	1.82
5	104.04	51.12	107.74	0.01	0.03
6	0.04	29.38	13.25	0.02	0.03
7	104.04	109.83	119.90	0.05	0.04
8	63.52	128.37	231.34	0.18	0.35
9	144.72	9.49	0.92	2.72	5.57
10	485.32	180.90	326.52	1.51	3.10
11	144.72	26.11	10.05	1.44	2.72
12	63.52	27.35	8.88	0.01	0.00
13	104.04	303.80	361.00	1.66	2.82
14	912.04	3.28	96.04	0.03	2.31
15	96.04	33.64	79.39	2.72	10.18
16	144.72	4.54	11.56	0.03	0.00
17	4.12	2.72	0.74	0.03	0.00
18	63.52	39.94	15.60	0.13	0.00
19	1025.92	0.16	6857.50	0.00	2.16
20	4.12	21.16	46.38	0.11	2.10
21	63.52	0.96	4.00	0.00	0.01
22	322.92	69.89	121.44	0.17	0.03
23	4.12	324.36	7.02	0.02	2.31
Σ	4540.45	1723.34	8752.34	12.78	43.08
			Σ	Total	15071.99

CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

Três versões do método analítico para calibração de redes de distribuição de água são implementados e analisados neste trabalho. A técnica pode ser usada para se determinar os coeficientes de rugosidade nas tubulações e as demandas nos nós quando as energias são medidas em um ou mais nós de demanda para uma condição particular de carga.

Os coeficientes de rugosidade das tubulações são inicialmente estimados com base em dados de campo ou experiência do usuário do modelo. As demandas nos nós são inicialmente assumidas também de forma similar, tal que, a demanda total seja igual ao consumo da rede. As técnicas apresentadas ajustam sucessivamente os coeficientes de rugosidade dos tubos e as demandas nos nós, e os valores preditos são comparados aos valores reais.

Para a rede estudada, a versão proposta para a calibração de redes hidráulicas utilizando o método analítico proposto demonstrou ser ligeiramente mais eficiente do que o método analítico convencional. O método analítico modificado por sua vez, apresentou resultados de calibração relativamente divergentes dos valores reais. No entanto, esta formulação apresenta a vantagem de poder dividir a rede em um número maior de zonas. Esta flexibilidade provavelmente possibilitará o aumento da eficiência deste método. Estudos nesta direção e para outras redes estão sendo realizados e são sugeridos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BHAVE, P. R. Calibrating Water Distribution Network Models. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING DIVISION, v. 114, p. 120-136, 1988.
2. CESARIO, A. L., DAVIS, J. O. Calibrating Water System Models. JOURNAL OF THE AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, v. 76, n. 7, p. 66-69, 1984.
3. DONACHIE, R. P. Digital Program for Water Network Analysis. JOURNAL OF THE HYDRAULIC DIVISION, v. 100, n. HY3, p. 393-403, 1974.



4. EGGENER, C. L. ,POLKOWSKI, L. B. Network Models and the Impact of Modelling Assumptions. JOURNAL OF THE AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, v. 68, n. 4, p. 189-196, 1976.
5. NIELSEN, H. B. Methods for Analyzing Pipe Networks. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, v. 115, n. 2, p. 139-157, 1989.
6. SHAMIR, U. Optimal Design and Operation of Water Distribution Systems. WATER RESOURCES, v. 10, n. 1, p. 27-36, 1974.
7. SHAMIR, U., HOWARD, C. D. D. Engineering Analysis of Water Distribution Systems. JOURNAL OF AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, v. 69, n. 9, p. 510-514, 1977.
8. WALSKI, T. M. Technique for Calibrating Network Models. JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT, v. 109, n. 4, p. 360-372,1983.
9. WALSKI, T. M. Case Study: Pipe Network Model Calibration Issues. JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT, v. 112, n. 2, p. 238-249,1986.