

Estudo e análise de um sistema de distribuição de água: aplicação do método de Hardy Cross utilizando a equação universal de Darcy-Weisbach e o método de Hazen-Williams

A study and analysis of a water distribution system: applying the Hardy Cross method using the universal Darcy-Weisbach and the Hazen-Williams method

José Damião Justino¹
Élcio Nogueira²

Palavras-chave:

Sistema de distribuição de água
Método de Hardy Cross
Darcy-Weisbach
Hazen-Williams

Resumo

A análise do equilíbrio hidráulico de sistemas de distribuição de água é baseada nas duas leis fundamentais da mecânica dos fluidos, a da continuidade (Lei de Conservação da Massa) e a da Lei de Conservação da Energia e, além disso, numa relação entre a vazão (ou velocidade) e a perda de carga (ou variação de pressão), estabelecida através das equações de *Darcy - Weisbach* (fórmula universal da perda de carga) ou *Hazen - Williams*. Em termos gerais, esta análise requer a resolução de um sistema de equações não lineares, frequentemente com um elevado número de incógnitas, dependendo da dimensão e da complexidade do sistema de distribuição de água em jogo. O primeiro método de solução aproximada para este tipo de problema (*correções de vazões operadas individualmente para cada malha*) foi apresentado por HARDY CROSS, no ano de 1936, sendo o mais antigo e, provavelmente, aquele que maior divulgação teve até o momento. O método de Hardy Cross é o mais utilizado dentre os métodos de aproximações sucessivas para o cálculo de rede malhadas, por possibilitar o desenvolvimento dos cálculos, em sistemas simples, além de ser um método provido de significado físico, que facilita a análise dos resultados intermediários obtidos. No presente trabalho, para o dimensionamento do sistema de distribuição de água, em malhas, de MACUNDÚ, foi aplicado o método de HARDY CROSS através do programa computacional REDEM. EXE desenvolvido pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP, São Carlos, SP), que permite o dimensionamento ou verificação de uma rede de distribuição com até cem (100) trechos com um ou mais reservatórios de alimentação. O programa aceita como equações de resistência a equação de Hazen-Williams, ou a fórmula universal, ambas foram aplicadas, para efeito de comparação e análise. O sistema de distribuição considera-se resolvido quando são conhecidas as cotas piezométricas nos nós e as vazões em todos os trechos de tubulações, com a precisão definida pelo usuário. Os resultados obtidos estão apresentados em formas de tabelas, e mostram-se consistentes com as condições físicas impostas para determinação das vazões individuais de cada trecho da malha analisada. O trabalho apresenta e discute a aplicação de uma metodologia de execução exequível e refinada para sistemas de malhas de médio e grande porte.

ISSN
1809-9475

Artigo
Original

Original
Paper

Recebido em
07/2012

Aprovado em
08/2013

Cadernos UniFOA
Edição n° 22 - Agosto/2013

1 - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - FAT/UERJ – Resende, RJ

2 - UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.

Abstract

The analysis of the hydraulic balance of water distribution systems is based on two fundamental laws of fluid mechanics, the continuity (Law of Conservation of Mass) and the Law of Conservation of Energy and also a relationship between flow (or velocity) and pressure drop (or pressure variation), established by the equations of Darcy - Weisbach (the universal formula of head loss) or Hazen - Williams. In general, requires solving a system of nonlinear equations, often with a high number of unknowns, depending on the size and complexity of the water distribution system. The first method of approximate solution for this problem (corrections of flows operated individually for each mesh) was presented by HARDY CROSS, in 1936, being the oldest and probably the one that was better known to the present moment. Hardy Cross method is the most commonly used among the methods of successive approximations to calculate the meshed network, for enabling development of the calculations, simple systems, and is provided with physical meaning which facilitates analysis of the obtained intermediate results. In the present work, the system design of water distribution in meshes of MACUNDÚ, we applied the method HARDY CROSS through software developed by the School of Engineering of Sao Carlos (EESC-USP, São Carlos, SP) which allows the design and verification of a distribution network with up to one hundred (100) with one or more passages supply reservoirs. The program accepts as equations of resistance Hazen-Williams equation, or universal formula, both have been applied, for comparison and analysis. The distribution system is considered resolved when the piezometric nodes and flows in all pipes are known, with the desired accuracy. The results obtained are presented in forms of charts and tables, and are consistent with the physical conditions imposed to determine the flow rates of each individual piece of mesh analysis. The paper presents a methodology for implementing practical and refined meshes for systems of medium and large scale.

Keywords

Water distribution system

Hardy Cross method

Darcy-Weisbach

Hazen-Williams

1. Introdução

Um sistema de distribuição de água é uma rede formada por um conjunto de tubulações, acessórios (conexões), reservatório, bombas hidráulicas, e que tem a finalidade de atender, dentro de condições sanitárias, de vazão e pressão convenientes, a cada um dos diversos pontos de consumo de uma cidade ou setor de consumo. A partir desta rede geral são alimentados, por meio de ramais de ligação (define-se ramal de ligação como a tubulação que assegura o abastecimento predial de água, desde a rede pública até ao limite da propriedade a servir), os diversos edifícios ou instalações.

São igualmente servidos, a partir das redes gerais de distribuição de água:

- As mangueiras ou moto-bombas dos serviços de bombeiros, através de hidrantes (bocas de incêndio e marcos de água);

- As mangueiras para alimentação de caminhões-tanque para utilização pública e para a lavagem de ruas e rega de espaços verdes, através de bocas de rega e de lavagem;
- Os sistemas de rega dos espaços verdes;
- As fontes, bebedouros e outros pontos de utilização de água.

Evidentemente, em função do porte do problema, o sistema de abastecimento torna-se bastante complexo, não só quanto ao dimensionamento, mas também quanto à manutenção e operação. Trata-se, em geral, da parte mais dispendiosa do projeto global de abastecimento, exigindo considerável atenção no que concerne aos parâmetros do sistema, hipóteses de cálculo assumidas e metodologias, de modo a se obter um projeto eficiente.

As redes gerais de distribuição de água podem classificar-se, no que respeita à sua configuração:

- **Redes malhadas**, em que os condutos se fecham sobre si mesmos constituindo malhas (define-se malha como um conjunto de tubulações que formam um circuito fechado);
- **Redes ramificadas**, em que há um duto principal longitudinal que se ramifica para ambos os lados;
- **Redes mistas**, que correspondem à conjugação, numa mesma rede de distribuição de água, das duas configurações anteriores.

Sob o ponto de vista hidráulico, nas redes de distribuição de água malhadas, o escoamento é bidirecional, enquanto que nas redes ramificadas é, normalmente, unidirecional, salvo se existir mais do que um ponto de alimentação do sistema (reservatório ou estação elevatória). Nas redes mistas, o escoamento é, simultaneamente, bidirecional e unidirecional.

As vantagens de uma rede de distribuição malhada podem ser resumidas ao seguinte:

- a) Pelo fato do escoamento ser bidirecional, para se atingir um dado ponto, existem percursos alternativos;
- b) No caso de avaria em uma tubulação (por exemplo, pela ocorrência de uma ruptura), é possível isolar uma determinada zona da rede de distribuição de água, através do fechamento de um conjunto de válvulas de secionamento, sem que os restantes consumidores sejam afetados do normal fornecimento;
- c) Quando ocorrem grandes flutuações de consumo na rede de distribuição, os efeitos, em termos de pressão, são pouco significativos.

No entanto, apresentam as seguintes desvantagens:

- a) Exige custos de investimento superiores, uma vez que requer uma maior quantidade de tubagens e de órgãos acessórios;
- b) O cálculo para a determinação das condições de equilíbrio hidráulico é mais complexo do que nas redes ramificadas (de fato, este cálculo exige a resolução de um sistema de equações não linea-

res, que traduzem as equações de continuidade e de conservação de energia).

Em contrapartida, entre as vantagens de uma rede de distribuição ramificada podem salientar-se as seguintes:

- a) Exige menores custos de investimento, uma vez que requer uma menor quantidade de tubagens e de órgãos acessórios;
- b) Os diâmetros das tubagens são mais econômicos;
- c) O cálculo para a determinação das condições de funcionamento hidráulico é mais simples do que nas redes malhadas, podendo dizer-se que é um problema trivial de hidráulica (de fato, este cálculo exige apenas a aplicação das equações de continuidade aos nós e só posteriormente a utilização da relação perda de carga/caudal, para a determinação das cotas piezométricas nos nós).

No entanto, uma rede de distribuição ramificada apresenta as seguintes desvantagens:

- a) Pelo fato do escoamento ser unidirecional, no caso de avaria em uma tubulação (por exemplo, pela ocorrência de uma ruptura) interrompe-se todo o fornecimento de água a jusante;
- b) Quando ocorrem aumentos ou se verificam flutuações de consumo na rede de distribuição, os efeitos para jusante, em termos de pressão, são significativos;
- c) Os detritos, nos pontos terminais da rede de distribuição, têm tendência a acumular sedimentos, devido às baixas velocidades do escoamento.

A distribuição de água potável a um aglomerado populacional pode ser feita por uma só rede geral ou por várias. A solução a adotar depende das características do aglomerado a abastecer, sendo necessário proceder a um estudo cuidadoso das mesmas.

Na existência de um aglomerado de certa dimensão, em que haja diferenciação nítida de zonas altimétricas, aconselha-se que se considere uma rede geral de distribuição de água

para cada zona. É o caso das cidades situadas em grandes encostas, que deve ser dividida em zonas de distribuição, por ex.: baixa, média, alta, etc.. Este critério apresenta grandes vantagens, pois a existência duma rede única obrigaria a uma elevação, do caudal total máximo, a uma altura correspondente à zona mais alta. Deste modo, não só haveria um gasto inútil de energia de bombeamento, como também ocorreriam elevadas pressões nas zonas baixas. Esta situação obrigaria à instalação de dispositivos de utilização mais resistentes e à implantação de tubulações da rede de distribuição de classes ou pressões de serviço maiores, o que aumentaria o custo total da mesma.

É indispensável à realização de trabalhos de campo que se efetue levantamentos topográficos para o conhecimento das cotas do terreno, nos pontos altos e baixos, nos arruamentos principais e secundários, não sendo estritamente necessário o conhecimento das linhas de nível, e para a determinação de outras infraestruturas de subsolo que possam interferir com a rede a projetar. O nível de rigor neste levantamento preliminar é função do tipo de projeto em análise. Nestes trabalhos de campo deve ser recolhida informação relativa à localização de arruamentos (principais e secundários), de edifícios, de parques públicos, de linhas de água, etc..

A análise do equilíbrio hidráulico de sistemas de distribuição de água malhados é baseada nas duas leis fundamentais da mecânica dos fluidos, a da continuidade e a da conservação da energia e, além disso, numa relação entre a vazão (ou velocidade) e a perda de carga (ou variação de pressão), estabelecida através das equações de *Darcy - Weisbach* (fórmula universal da perda de carga) ou *Hazen - Williams*. Em termos gerais, esta análise requer a resolução de um sistema de equações não lineares, frequentemente com um elevado número de incógnitas, dependendo da dimensão e da complexidade do sistema de distribuição.

O primeiro método de solução para este tipo de sistema hidráulico foi apresentado por HARDY CROSS (*correções de vazões operadas individualmente para cada malha*), no ano de 1936, sendo o mais antigo e, provavelmente, aquele que maior divulgação teve até o momento.

O método de Hardy Cross é o mais utilizado dentre os métodos de aproximações sucessivas para o cálculo de rede malhadas, por possibilitar o desenvolvimento dos cálculos, em sistemas simples, além de ser um método provido de significado físico, que facilita a análise dos resultados intermediários obtidos. Giles (01) e Porto (02) apresentam detalhadamente o procedimento adotado por Hardy Cross. Marques et all. (03) apresentam um estudo de caso, na cidade do Porto, em Portugal, e utilizam o software EPANET, baseado no método de Hardy Cross e desenvolvido na Universidade de Illinois – USA.

2. Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo apresentar e discutir uma metodologia de solução do dimensionamento de um sistema de distribuição de água em malhas. Para consecução do objetivo, aplicou-se o método de HARDY CROSS, através do programa computacional REDEM.EXE, desenvolvido pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP, São Carlos, SP) com objetivos didáticos, que permite o dimensionamento ou verificação de uma rede de distribuição com até cem (100) trechos com um ou mais reservatórios de alimentação. O sistema utilizado para estudo encontra-se na comunidade de MACUNDÚ, município de Rio Claro, Estado do Rio de Janeiro. A versão do programa utilizado aceita como equações de resistência a equação de Hazen-Williams ou a fórmula universal. Ambas as equações foram aplicadas neste trabalho, com objetivo de comparação e análise dos resultados numéricos obtidos.

3. Metodologia

A metodologia apresentada neste trabalho encontra-se fartamente documentada em textos didáticos, Giles (01), Porto (02), Azevedo Neto (06), e vem sendo aplicada por décadas na área de Engenharia Civil e saneamento básico. A solução através da equação universal, entretanto, é relativamente nova, apesar de ter uma consistência física e matemática que satisfaz plenamente os princípios

de conservação da massa e da energia. A medida que novos textos e trabalhos científicos são publicados, a equação universal torna-se mais utilizada.

A partir dos trabalhos de campo e elaboração das plantas topográficas do aglomerado populacional em estudo, é possível proceder ao traçado da rede de distribuição de água, em planta, de acordo com os princípios enunciados anteriormente. Esta atividade, no âmbito do projeto, deve iniciar-se o mais cedo possível, de forma que sejam detectadas falhas de informação, as quais devem ser esclarecidas com uma visita ao local e, se necessário, com trabalhos de campo específicos.

A determinação dos consumos e das vazões de projeto de sistemas de distribuição constitui uma atividade vital para efeitos do dimensionamento deste tipo de infraestruturas. Estas vazões destinam-se a satisfazer os consumos domésticos, comerciais e de serviços, industriais e similares, e públicos; há que garantir, ainda, vazões para fazer face às perdas e fugas e para combate a incêndios.

Os sistemas de distribuição de água (e não apenas a rede de distribuição de água) são constituídos por um conjunto mais ou menos complexo de tubulações, instalações elevatórias, reservatórios e diversos tipos de outros dispositivos.

As expressões de avaliação de perdas de carga contínuas (hp) estabelecem as relações entre as seguintes cinco variáveis: comprimento (l), diâmetro (D), vazão (Q), perda de carga (hp) e rugosidade (ϵ). Em geral, no projeto são conhecidos os comprimentos (determinados pelo traçado da rede) e as rugosidades (determinados pelo tipo de material utilizado), pelo que o engenheiro terá de obter a solução para uma das três restantes. Enquanto que a determinação do caudal e da perda de carga é fundamentalmente um problema hidráulico, e a definição do diâmetro é, além disso, um problema econômico.

Na maior parte das situações em sistemas de distribuição de água, não se conhecem as vazões nas tubulações; pelo contrário, apenas se conhecem as vazões de entrada e saídas do sistema e a energia disponível num ou mais pontos de alimentação (reservatórios ou estações elevatórias).

A determinação das respectivas condições de funcionamento hidráulico consiste no cálculo da distribuição das vazões nas tubulações individuais e das cotas piezométricas (ou pressão) em cada um dos nós, conhecendo a energia disponível em pelo menos um dos pontos do sistema. O sistema de distribuição considera-se resolvido quando são conhecidas as cotas piezométricas nos nós e as vazões em todas as tubulações, com a precisão requerida pelo projetista.

Em linhas gerais, a definição das condições de equilíbrio hidráulico dos sistemas é estabelecida com base nas equações da continuidade e da conservação da energia e, além disso, numa relação entre vazão e perda de carga, e para tal, o método de HARDY CROSS é aplicado aos condutos principais (anéis principais) de uma rede malhada, a partir de alguns pressupostos do projeto e traçado da rede.

Embora o método original se limitasse à análise de sistemas de distribuição malhados, englobando apenas tubulações (sem elementos especiais), tem sido generalizado ao longo do tempo, com inclusões de sistemas de alimentação (reservatórios) e sistemas de potência hidráulica (bombas hidráulicas), podendo ser descrito sucintamente da seguinte forma:

- a) Imposição de um conjunto inicial de vazões (Q_0) nas tubulações, satisfazendo o princípio de conservação da massa, denominado princípio de continuidade, nos diferentes nós do sistema;
- b) Cálculo individual da parcela de correção de vazão (ΔQ) para o conjunto de tubulações que formam uma malha, de tal forma que seja satisfeita a equação da conservação da energia para essa malha (a aplicação desta parcela de correção não destrói o balanço do princípio da continuidade inicialmente estabelecido);
- c) Utilizando as soluções aproximadas em cada iteração, repete-se o passo (2), até que a parcela média de correção esteja dentro de uma tolerância pré-definida.

A parcela de correção de vazão para uma malha é calculada a partir da respectiva equação da conservação da energia e destina-se a

corrigir a vazão inicialmente arbitrada, de tal forma que a conservação da energia seja satisfeita. Deste modo, as novas vazões, em cada trecho, serão:

$$Q = Q_0 + \Delta Q \quad (01)$$

De modo a se atingir:

$$\sum h_p = \sum KQ^n = \sum K(Q_0 + \Delta Q)^n = \sum KQ_0^n \left[1 + \frac{\Delta Q}{Q_0} \right]^n = \alpha \quad (02)$$

Expressão que desenvolvida pelo binômio de Newton torna-se:

$$\sum KQ_0^n \left[1 + n \frac{\Delta Q}{Q_0} + \frac{n(n-1)}{2!} \left(\frac{\Delta Q}{Q_0} \right)^2 + \dots \right] = \alpha \quad (03)$$

Supondo-se que (ΔQ) é muito pequeno comparado a (Q_0) , isto é, que os valores supostos para as vazões são próximos dos valores reais, pode-se desprezar o terceiro termo da série e os seguintes, daí:

$$\sum KQ_0^n = -n \sum KQ_0^{n-1} \Delta Q \quad (04)$$

E finalmente:

$$\Delta Q = - \frac{\sum KQ_0^n}{n \sum \frac{KQ_0^n}{\Delta Q_0}} \quad (05)$$

$$\Delta Q = \frac{\sum h_{p_0}}{n \sum \frac{\Delta H_0}{Q_0}} \quad (06)$$

Cada tentativa para este método exige que sejam feitas as correções das perdas de carga para todas as malhas do sistema de distribuição antes de se prosseguir para a iteração seguinte. Prossegue-se com o método descrito até que se obtenham, em todos os anéis, valores (ΔQ) pequenos, dentro de uma precisão pré-estabelecida ou nula para a variação.

Com as vazões em cada trecho da malha conhecidas, as pressões disponíveis nos diversos pontos da rede são automaticamente determinadas. Se estas pressões forem inade-

quadas, modifica-se o sistema, ou a altura do reservatório ou os diâmetros de alguns trechos. Podem ocorrer, por exemplo, pressões negativas em trechos de tubulações distantes do sistema de alimentação e no final da malha. Neste caso, há um evidente equívoco na premissa inicial de vazão disponível e diâmetros de tubulações centrais, denominadas adutoras.

O problema de dimensionamento envolve, geralmente, um grande número de anéis e malhas e podem ser inviáveis cálculos manuais, que são extremamente laboriosos. Por envolver procedimentos iterativos tediosos, é comum o auxílio de um programa computacional para acelerar a análise das alternativas.

No presente trabalho, para o dimensionamento do sistema de distribuição de água, em malhas, de MACUNDÚ, foi aplicado o método de HARDY CROSS através do programa computacional REDEM.EXE desenvolvido pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP, São Carlos, SP), que permite o dimensionamento ou verificação de uma rede de distribuição com até cem (100) trechos com um ou mais reservatórios de alimentação, sistema unicamente por gravidade. O programa aceita como equações de resistência a equação de Hazen-Williams ou a fórmula universal.

4. Desenvolvimento

4.1. Trabalho de Campo

Após a realização de um trabalho de campo, é possível traçar um esquema da rede de distribuição de água, a partir de uma planta topográfica da localidade, com seus: trechos; nós; respectivos comprimentos e cotas de nível. Um dado primordial nessa ocasião é fazer um levantamento de todos os imóveis presentes como: lotes; casas; prédios públicos, praças, jardins, etc.. Outro dado importante é fazer o levantamento populacional seguida de uma projeção para no mínimo vinte anos.



Figura 01 - Vista aérea da comunidade do Macundú, Rio Claro, RJ

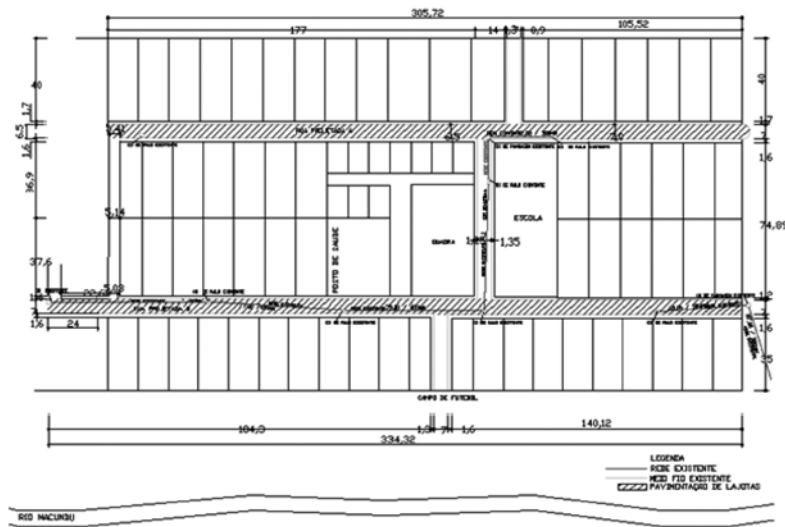


Figura 02 - Levantamento topográfico da comunidade de Macundú com ruas e lotes

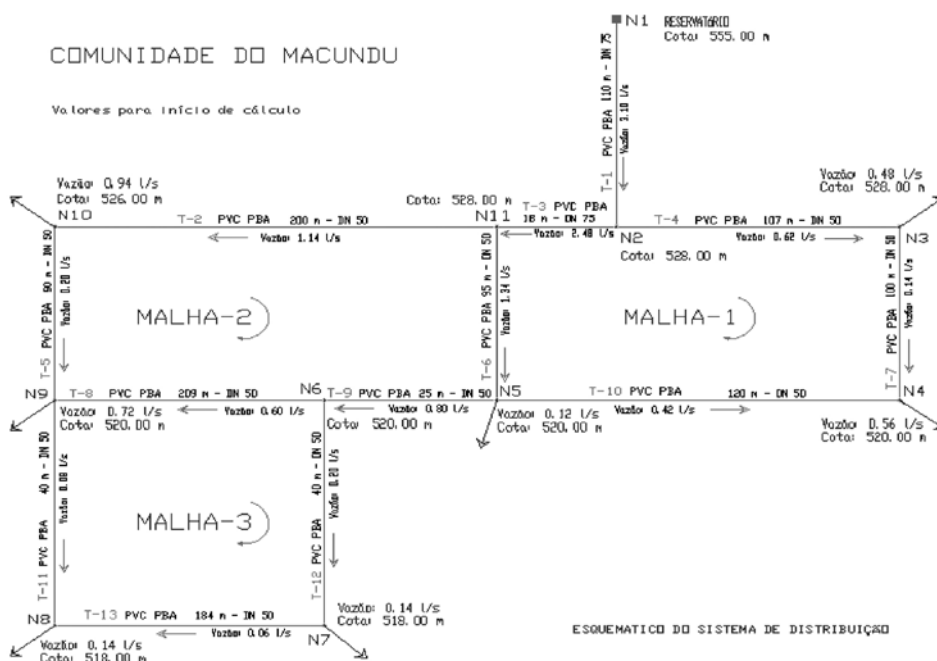


Figura 03 - Esquema da malha de distribuição de água com as respectivas vazões presumidas nos trechos e cotas altimétricas nos nós.

4.2. Vazão de adução e distribuição

Um sistema público de abastecimento de água é constituído por várias unidades, como captação, bombeamento, adução, unidade de tratamento, reservatórios e, finalmente, a rede de distribuição. O dimensionamento de cada unidade tem por parâmetro de cálculo a vazão de demanda, que é diretamente proporcional à população a ser atendida. A vazão média anual necessária pode ser expressa como:

$$Q_m = \frac{P \cdot q_m}{3600 \cdot h} \text{ (l/s)}$$

Em que (**P**) é a população a ser abastecida, determinada por métodos estatísticos de previsão populacional, a ser atingida no horizonte do projeto, (**q**) é a taxa ou cota de consumo per capita média da comunidade em L/habt./dia e (**h**) é o número de horas de operação do sistema ou da unidade considerada.

Segundo dados fornecidos pela prefeitura de Rio Claro, a comunidade do Macundú se encontra atualmente com 357 residências e uma população de 991 habitantes, sendo que o centro urbano, foco do presente trabalho, apresenta-se com 156 residências e **624 habitantes**. O número de horas de operação do sistema, a fim de atender a demanda da população sem interrupção é **h = 21 horas**.

Para levar em conta variações diárias de demanda ao longo do ano, a vazão média é multiplicada por um coeficiente de reforço **K1**, definido como *coeficiente do dia de maior*

consumo, que assume valores usuais entre 1,25 e 1,50, na forma:

$$Q_a = K_1 \cdot Q_m = \frac{K_1 \cdot P \cdot q_m}{3600 \cdot h} \text{ (l/s)}$$

A vazão **Qa** é denominada *vazão de adução* e é utilizada para dimensionamento das unidades do sistema que estão a montante dos reservatórios de distribuição, como captação, bombeamento, adução, tratamento e reserva.

O consumo de água em uma cidade varia ao longo do dia e, neste caso, são previstos reservatórios de distribuição com capacidade conveniente; tais reservatórios servirão de volante para suprir as vazões necessárias nas horas de grande consumo. Desta forma a rede de distribuição deverá ser dimensionada para uma vazão denominada *vazão de distribuição*, dada por:

$$Q_d = K_2 \cdot Q_a = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot P \cdot q_m}{3600 \cdot h} \text{ (l/s)}$$

Em que **K2** é definido como *coeficiente da hora de maior consumo do dia de maior consumo*, e cujo valor comum é **K2 = 1,50**.

Os valores de **qm**, **K1** e **K2** adotados nos projetos variam com o porte do projeto e as características da cidade, industrial, turística etc., e, principalmente, com o nível sócio-econômico da população a ser atendida. Um valor usual adotado, em cidades de médio porte, para a cota per capita é **qm = 200 litros por habitante por dia**.

Portanto teremos uma vazão de distribuição (Qd) de:

$$Q_d = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot P \cdot q_m}{3600 \cdot h} = \frac{1,25 \cdot 1,50 \cdot 624 \cdot 200}{3600 \cdot 21} \cong 3,1 \text{ (l/s)}$$

Tabela 01 : Dados de entrada para solução da Rede de Malhas de Macundú

REDEM (ARQUIVO1)

Arquivo Calcular

Número de anéis: Total de trechos:

Número de nós: Tolerância na vazão: (m³/s)

Número máximo de iterações: Tolerância na perda de carga: (m)

Nó escolhido para fixar a pressão inicial: Carga de pressão no nó escolhido(m.c.a.):

Anel 1 Número de trechos:

Trecho	c/sinal
1	4
2	7
3	-10
4	-6
5	-3

próximo anterior

Anel 2 Número de trechos:

Trecho	c/sinal
1	6
2	9
3	8
4	-5
5	-2

próximo anterior

Anel 3 Número de trechos:

Trecho	c/sinal
1	12
2	13
3	-11
4	-8

próximo anterior

Características do trecho:

Trecho	NóMon	NóJus	L(m)	D(m)	Q(l/s)	Coef C	E(mm)
1	1	2	110	.075	3.1	140	.0015
2	11	10	200	.050	1.14	140	.0015
3	2	11	18	.075	2.48	140	.0015
4	2	3	107	.050	.62	140	.0015
5	10	9	90	.050	.20	140	.0015
6	11	5	95	.050	1.34	140	.0015
7	3	4	100	.050	.14	140	.0015
8	6	9	209	.050	.60	140	.0015
9	5	6	25	.050	.80	140	.0015
10	5	4	120	.050	.42	140	.0015
11	9	8	40	.050	.08	140	.0015
12	6	7	40	.050	.20	140	.0015
13	7	8	184	.050	.06	140	.0015

Cotas dos nós (m)

Nó	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cota	555	528	528	520	520	520	518	518	520	526	528

5. Resultados

Tabela 02: Resultados obtidos para a malha de Macundú (Fórmula Universal)

RESULTADOS(ARQUIVO1)

PELA FÓRMULA UNIVERSAL PARA A PERDA DE CARGA AS VAZÕES E VELOCIDADES APÓS 3 ITERAÇÕES SÃO:

Trecho	Q(l/s)	Vel(m/s)	Vmax(m/s)	Junção	Cota Piez	Pressão
1	3.1	.7	.71	1	556.5	1.5
2	1.14	.58	.67	2	555.74	27.74
3	2.48	.56	.71	3	555.34	27.34
4	.72	.37	.67	4	555.27	35.27
5	.66	.34	.67	5	555.31	35.31
6	.78	.4	.67	6	555.29	35.29
7	.24	.12	.67	7	555.27	37.27
8	.13	.07	.67	8	555.26	37.26
9	.34	.17	.67	9	553.64	33.64
10	.32	.16	.67	10	554.03	28.03
11	.07	.04	.67	11	555.66	27.66
12	.21	.11	.67			
13	.07	.03	.67			

COMPRIMENTO TOTAL DA REDE = 1338m
CUSTO DAS TUBULAÇÕES = R\$13697.

Salvar resp. Imprimir Fechar

Tabela 03: Resultados obtidos para a malha de Macundú (Fórmula de Hazen-Williams)

RESULTADOS(ARQUIVO1)

**PELA FÓRMULA DE HAZEN WILLIAMS PARA A PERDA DE CARGA
AS VAZÕES E VELOCIDADES APÓS 3 ITERAÇÕES SÃO:**

Trecho	Q(l/s)	Vel(m/s)	Vmax(m/s)	Junção	Cota Piez	Pressão
1	3,1	,7	,71	1	556,5	1,5
2	1,14	,58	,67	2	555,64	27,64
3	2,48	,56	,71	3	555,23	27,23
4	,73	,37	,67	4	555,17	35,17
5	,74	,38	,67	5	555,21	35,21
6	,69	,35	,67	6	555,19	35,19
7	,25	,13	,67	7	555,18	37,18
8	,08	,04	,67	8	555,18	37,18
9	,26	,13	,67	9	553,41	33,41
10	,31	,16	,67	10	553,77	27,77
11	,1	,05	,67	11	555,54	27,54
12	,18	,09	,67			
13	,04	,02	,67			

COMPRIMENTO TOTAL DA REDE = 1338m
CUSTO DAS TUBULAÇÕES = R\$13697.

Salvar resp. Imprimir Fechar

6. Conclusão

A aplicação de métodos iterativos de aproximações sucessivas, como o método de Hardy Cross, para dimensionamento de redes malhadas de distribuição de água, apresenta um número elevado de variáveis a serem determinadas. Como regra geral, uma rede malhada com (m) anéis e (n) nós, gera um total de $[m + (n - 1)]$ equações independentes, e a medida que a complexidade da rede aumenta, cresce proporcionalmente o número de equações. Evidentemente, uma solução algébrica da rede torna-se impraticável, portanto se lança mão de um programa computacional para a aplicação do método.

A aplicação do método de Hardy Cross, através do software REDEM, para solução da malha de Macundú, apresentou-se consistente e possibilitou a determinação de parâmetros fundamentais, vazão e pressão, para a consecução do sistema físico de distribuição de água para a comunidade.

Os resultados apresentados através das Tabelas 02 e 03 demonstram a equivalência entre a aplicação da equação universal e o mé-

todo de Hazen-Williams, para determinação da perda de carga em cada trecho. As diferenças observadas nas grandezas de interesse, vazões, pressões e cotas piezométricas, nas Tabelas 02 e 03, ocorrem na casa dos centésimos, que é insignificante para aplicações em engenharia. Entretanto, em função da consistência física, por satisfazer o princípio de conservação da massa e o princípio de conservação da energia, sugerimos a utilização da equação universal. O método de Hazen-Williams, apesar de ser relativamente preciso, conforme demonstram os resultados, dentro da faixa de valores analisados, é empírico e demanda certa experiência por parte do projetista em sua aplicação.

Este trabalho apresenta uma metodologia de execução exequível, detalhada, e refinada para sistemas de malhas hidráulicas de médio e grande porte.

Agradecimentos: José Damião Justino, ex-aluno do Curso de Engenharia Civil do UniFOA, agradece a oportunidade de desenvolver o presente trabalho dentro do Programa de Iniciação Científica.

7. Referências Bibliográficas

1. GILES, R.V. “**Mecânica dos Fluidos e Hidráulica**”. McGraw-Hill do BRASIL LTDA, PERNAMBUCO, 1977.
2. PORTO, R.M. “**Hidráulica Básica**”. EESC-USP, São Carlos, SP, 3ª edição, 2004.
3. MARQUES, JOSÉ A. A. DE SÁ; SOUSA, JOAQUIM J. O. “**Hidráulica Urbana – Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais**”. Porto, 2ª Edição, 2011.
4. PAULA, D.A. “**HISTÓRIA de RIO CLARO**”. ELETRONUCLEAR, RIO de JANEIRO, 2004.
5. CARESTIATO, A. & ABREU, C.S. “**PROGRAMA CURSO D’ÁGUA**”. CEIVAP Comitê de integração da Bacia do Rio Paraíba do Sul, RIO de JANEIRO, 1999.
6. AZEVEDO NETTO, J.M. & ALVAREZ, G.A. “**Manual de Hidráulica**”. Editor Edgard Blucher, São Paulo, 8ª edição, 2000.