Modelagem de redes de distribuição de água ramificadas desenvolvida no programa *Engineering Equation Solver* ® (EES)

Lucas Vuolo Moreira [1]

[1]Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix (lvuolom@outlook.com)

Resumo

O cenário de escassez hídrica atual é o principal desafio da gestão de recursos hídricos. A ineficiência dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), principalmente em suas redes de distribuição, contribui significativamente para o aumento do índice de perdas de água ao longo dessas estruturas e negativamente nesse cenário. O uso de ferramentas computacionais que simulem e projetem redes de distribuição sob diversas condições promove a otimização dessas estruturas, evitando tanto o super quanto o subdimensionamento das mesmas. Nesse sentido, esse trabalho apresenta o processo de desenvolvimento do *Modelo para Redes Ramificadas* (MRR) construído no programa *Engineering Equation Solver* ® (EES). O modelo tem a função de dimensionar redes de distribuição ramificadas com traçado em *espinha de peixe*, contemplando as principais variáveis hidráulicas que devem ser analisadas desde a fase de projeto até a operação dessas redes. Depois de construído e testado, o MRR mostrou-se como uma alternativa segura e prática, devido a sua interface amigável, para dimensionamento e monitoramento de Redes de Distribuição de Água (RDA) ramificadas.

Palavras-chave: Escassez hídrica. Ferramentas computacionais. Modelo para Redes Ramificadas.

Área Temática: Tema 11 – Recursos Hídricos.

Modelling of branched water distribution networks on the *Engineering Equation Solver* ® (EES) software

Abstract

The recent water scarcity scenario is the main challenge of the water resources management. The inefficiency of water supply systems, especially on its distribution networks, heavily contributes with water losses through those structures and in the already mentioned scenario. Using computer tools that simulate and virtually build water distribution networks based on multiple conditions optimize those structures, avoiding unnecessary costs. Thus, this article presents the development process of the Branched Network Model (BNM) using the Engineering Equation Solver ® (EES) software as its building tool. The BNM simulates branched water distribution networks involving the most important hydraulic variables for building or even monitoring those networks. After totally finished and tested, it was concluded that the BHSM shows itself as a reliable and user friendly tool, thanks to its simple user interface, for building and monitoring branched water distribution networks.

Key words: Water scarcity. Computer tools. Branched Network Model.

Theme Area: Theme 11 – Water Resources.

1 Introdução

A aplicação de técnicas hidráulicas auxilia na compatibilização da oferta e demanda de água que se distribui de forma irregular, no tempo e no espaço, e no equilíbrio entre atendimento às diversas necessidades humanas e uso consciente dos recursos hídricos.

Em 1970, a população brasileira que era de 52 milhões de pessoas, aumentou para 123 milhões em 1996 e para 166,7 milhões em 2000 (CARVALHO; SILVA, 2006). Já a disponibilidade hídrica, segundo os mesmos autores, de 105 mil m^3.habitante^{-1}.ano^{-1}, em 1950, caiu para 28,2 mil m^3.habitante^{-1}.ano^{-1}, em 2000.

De acordo com a Agência Nacional de Águas – ANA (2010) grande parte das unidades de abastecimento está no limite de sua capacidade operacional, pois a capacidade total dos sistemas em operação no Brasil é de, aproximadamente, 587 m^3/s e as demandas máximas atuais estão em torno de 543 m^3/s. A ANA (2010) também destaca que de 2005 a 2025, projeta-se um aumento da população urbana de aproximadamente 45 milhões de pessoas, gerando um aumento das demandas de abastecimento urbano e exigindo aportes adicionais de 137 m^3/s nesse período.

Esses dados revelam que, no século XXI, tem-se observado o surgimento de uma crise nos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) em ambientes urbanos, sendo que um dos fatores que contribui para essa crise é a deficiência, em função da deterioração, dos sistemas mais antigos, principalmente nas Redes de Distribuição de Água (RDA), com problemas de rompimentos e vazamentos de água (TSUTIYA, 2006).

De acordo com a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES (2013), a média brasileira de perdas de água durante o processo de distribuição é de aproximadamente 40%. Segundo Tsutiya (2006), redes de distribuição são os componentes de maior custo de SAA (50 a 75% do custo total) e Macedo (2010) destaca o fato de não ficarem sobre constante vigilância já que se tratam de estruturas que ficam enterradas, justificando a atenção especial que deve ser dada na concepção dessas.

Uma forma de contribuir para o projeto, construção, operação e monitoramento de SAA ocorre por meio do uso de recursos computacionais que tornam possível a simulação matemática de sistemas hidráulicos diversos (BAPTISTA; COELHO, 2010). O século XXI representa um momento especial para propor novas formas de se dimensionar RDA. “Mudanças na bem estabelecida prática de engenharia referente ao projeto de redes de distribuição de água vêm ocorrendo de forma surpreendente, influenciadas pelos sistemas modernos de gerenciamento e facilidades computacionais” (RIGHETTO, 2002, p. 2).

Este estudo é fruto das mudanças que incorporam recursos computacionais em projetos de RDA e da necessidade de se modernizar e otimizar projetos e operação dessas redes, respectivamente, oferecendo uma alternativa simples e capaz de contribuir com a eficiência e segurança dessas estruturas por meio da análise do comportamento e avaliação das várias possibilidades e estratégias para o projeto e operação das mesmas.

Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar o processo de construção de um programa de dimensionamento de RDA do tipo ramificada com traçado em *espinha de peixe* para múltiplas casas utilizando o programa *Engineering Equation Solver* ® (EES) e validação do mesmo por meio de um exemplo resolvido do livro *Fundamentos de Engenharia Hidráulica* (BAPTISTA; COELHO, 2010).

2 Metodologia

O modelo hidráulico projetado neste trabalho teve como base o programa EES da *F-Chart Software*, que tem a função básica de solucionar séries de equações algébricas por meio de comandos simples e intuitivos, dando origem a um programa capaz de apresentar as principais variáveis hidráulicas de redes de distribuição em função das variáveis de entrada

inseridas pelo usuário.

A metodologia de construção do MRR envolve equações governantes da Engenharia Hidráulica, equações lógicas compatíveis com a linguagem do EES que relacionam todas as variáveis utilizadas, dados de entrada determinados pelo usuário, ferramentas próprias do EES e a ordem em que esses elementos são inseridos. Algumas equações lógicas não serão apresentadas, pois estas representam o código fonte do MRR.

O primeiro passo foi a construção de um campo para o usuário inserir a quantidade de casas que serão abastecidas pela rede de distribuição. A quantidade de trechos de tubulação da rede é determinada em função da quantidade de casas respeitando-se a configuração padrão de redes ramificadas com traçado em *espinha de peixe* que o MRR contempla (Equação 1).

$$trechos = (2 \times casas) - 1 \qquad Eq.1$$

Onde:

$trechos$: $Quantidade\ de\ trechos\ da\ rede\ (adimensional)$;

$casas$: $Quantidade\ de\ casas\ que\ a\ rede\ irá\ abastecer\ (adimensional)$.

A vazão em marcha da rede também é determinada pelo usuário. Esta variável é utilizada na Equação 2. Em seguida, o comprimento, em metros, de cada trecho da rede deverá ser determinado pelo usuário. A quantidade de campos *comprimento* a ser preenchida depende da quantidade de trechos da rede. Esta variável tambem é utilizada na Equação 2. Dessa forma, determinando-se a vazão em marcha e comprimentos de tubulação, a vazão distribuída de cada trecho será automaticamente calculada.

$$Qd = q_{marcha} \times L \qquad Eq.2$$

Onde:

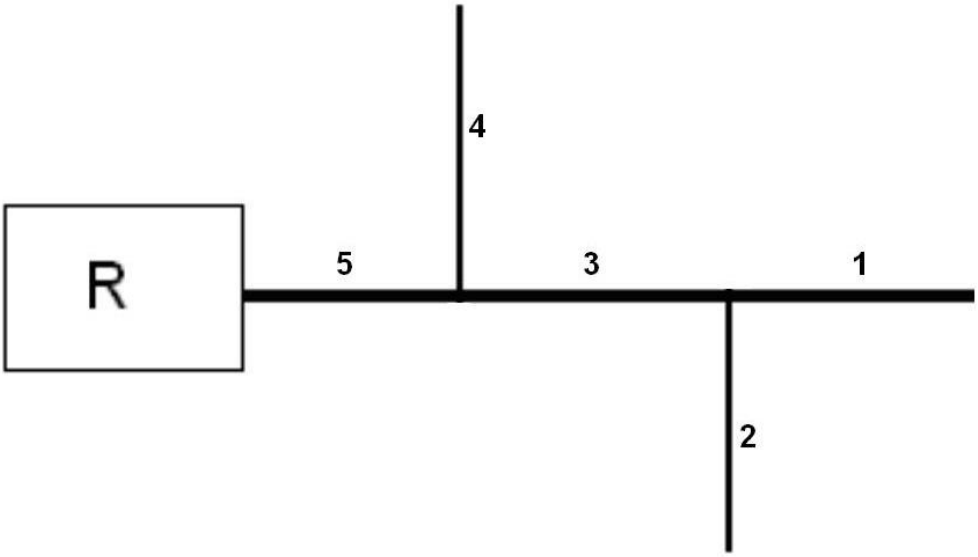
Qd: $Vazão\ distribuída\ (L/s)$;

q_{marcha}: $Vazão\ em\ marcha\ ou\ vazão\ específica\ (L/s \times m)$;

L: $Comprimento\ da\ tubulação\ (m)$.

A vazão à jusante representa vazões que alimentarão as casas da rede, pois elas se localizam nos pontos mais à jusante de cada trecho. Dessa forma, como pode ser visualizado na Figura 1, apenas as vazões à jusante dos trechos com numeração par e o trecho 1, localizado no ponto mais à jusante da rede, serão determinadas pelo usuário.

Figura 1 – Configuração padrão de RDA ramificada que o MRR contempla



Fonte: elaborada pelo autor (2015)

Como a vazão distribuída já foi calculada e com o preenchimento dos campos *vazão à jusante* que foram construídos, a Equação 3 irá determinar a vazão à montante de cada trecho.

$$Qm = Qj + Qd \qquad Eq.3$$

Onde:

Qm: *Vazão à montante* (L/s);

Qj = *Vazão à jusante* (L/s).

Em seguida, a Equação 4 será alimentada, pois com as vazões à jusante e à montante determinadas no programa, a vazão fictícia de cada trecho pode ser calculada. O diâmetro da tubulação em cada trecho é determinado em função da vazão fictícia que passa por cada trecho. Assim, uma tabela que relaciona essas duas variáveis em função do material da tubulação foi inserida na linguagem do programa.

$$Qf = \frac{Qj \times Qm}{2} \qquad Eq.4$$

Onde:

Qf: *Vazão fictícia* (L/s).

Um campo apresentando os possíveis materiais da tubulação da rede foi construído. A escolha do material com o preenchimento desse campo determinará o coeficiente de perda de carga contínua da Equação 6. Assim, esse campo associado à vazão fictícia já calculada para cada trecho determinará o diâmetro nominal da tubulação em cada trecho da rede. Por meio do diâmetro e da vazão à montante já calculada, a Equação 5 é alimentada, gerando a velocidade de escoamento da água em cada trecho.

$$U = \frac{\left(4 \times \left(\frac{Qm}{1000}\right)\right)}{\left(\pi \times \left(D_{escolhido}{}^{2}\right)\right)} \qquad Eq.5$$

Onde:

U: *Velocidade de escoamento* $(^{m}/_{s})$;

$D_{escolhido}$: *Diâmetro nominal da tubulação* (m).

A perda de carga contínua foi contemplada no programa da seguinte maneira: com as variáveis *coeficiente de perda de carga contínua*, *vazão fictícia*, *diâmetro* e *comprimento das tubulações* já calculadas, a Equação 6 foi inserida, obtendo-se a perda de carga contínua de cada trecho.

$$\Delta H_c = \left(\frac{10{,}64}{c^{1{,}85}}\right) \times \left(\frac{\left(\frac{Qf}{1000}\right)^{1{,}85}}{D_{escolhido}{}^{4{,}87}}\right) \times L \qquad Eq.6$$

Onde:

ΔH_c: *Perda de carga contínua* (m);

c: *Coeficiente de perda de carga contínua* $(adimensional)$.

Em seguida, campos contemplando a quantidade dos principais acessórios, como válvulas de retenção e joelhos de 90°, que cada trecho irá possuir foram construídos. No caso de acessórios que não foram contemplados mas que seriam de interesse do usuário, foram construídos campos para determinar a quantidade e respectivos coeficientes de perda de carga localizada deles. São permitidos no máximo 3 acessórios com diferentes coeficientes de perda de carga localizada para cada trecho.

Por meio da velocidade de escoamento da água já calculada e do preenchimento de todos os campos ligados aos acessórios, a perda de carga localizada de cada trecho representada pela Equação 7 pode, então, ser calculada. Finalmente, após o cálculo das perdas de carga contínua e localizada de cada trecho, a perda de carga total de cada trecho é obtida.

$$\Delta H_l = \sum k \times \frac{U^2}{2 \times g} \qquad Eq.7$$

Onde:

ΔH_l: *Perda de carga localizada* (m);

k: *Coeficiente de perda de carga localizada* $(adimensional)$;

g: *Aceleração da gravidade* $\left(^{m}/_{s^2}\right)$.

As cotas do terreno à jusante e à montante de cada trecho da rede são determinadas pelo usuário. As pressões disponíveis à jusante e à montante de cada trecho são determinadas no programa por meio da equação da energia. Vale lembrar que a menor pressão disponível na rede é a pressão dinâmica mínima da NBR 12.218 (ABNT, 1994).

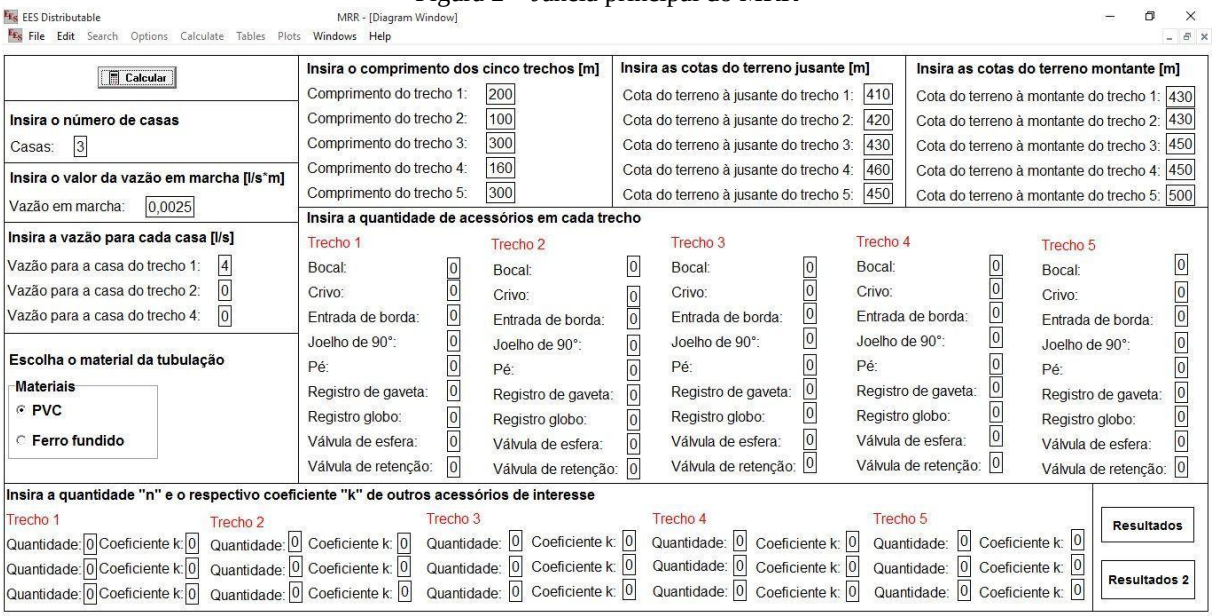
Conhecendo-se as cotas do terreno e pressão disponível à jusante e à montante de cada trecho, as cotas piezométricas à jusante e à montante de cada trecho são calculadas pelo programa. Lembrando que a pressão estática máxima citada na NBR 12.218 (ABNT, 1994) é resultado da diferença entre a maior cota piezométrica (geralmente é a cota piezométrica do reservatório que abastece a rede) e a menor cota do terreno da rede.

Depois do preenchimento dos campos destinados ao usuário, o resultado do cálculo de todas as variáveis básicas pode ser apresentado, permitindo sua análise e auxiliando no monitoramento e em fases de projeto, instalação e operação de RDA ramificadas.

3 Resultados

As figuras a seguir apresentam a interface de usuário do MRR, simulando o dimensionamento de uma rede para atendimento de 3 casas. A Figura 2 apresenta a janela principal do modelo contendo os dados de entrada que o usuário deve preencher para a realização do dimensionamento virtual de redes ramificadas.

Figura 2 – Janela principal do MRR

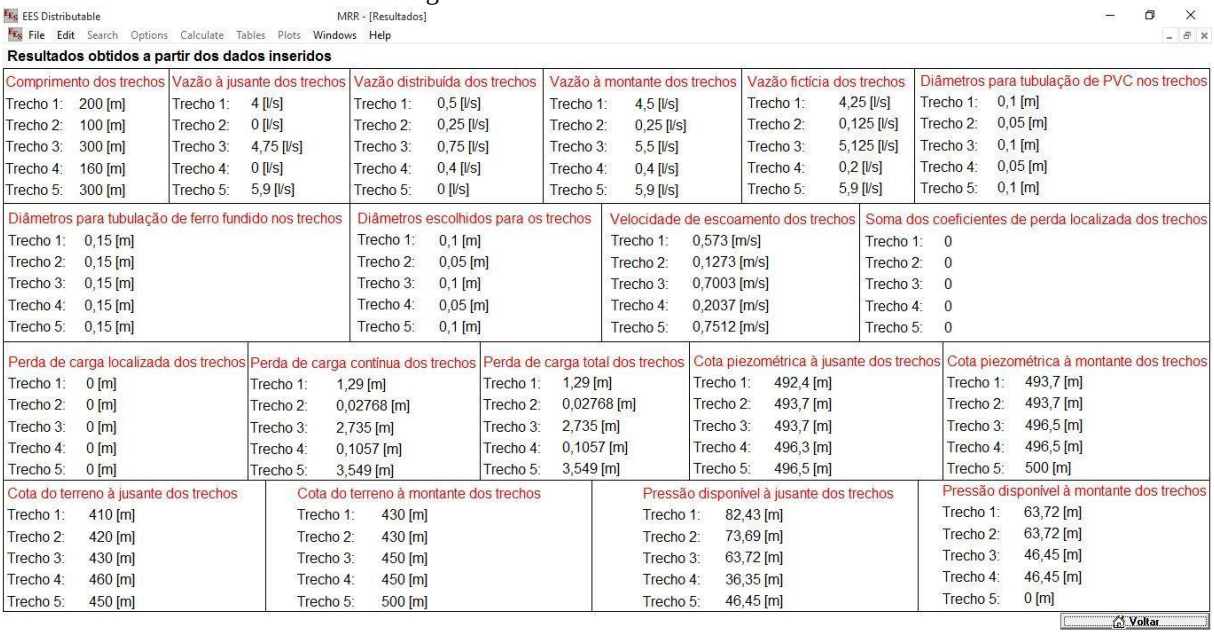


Fonte: elaborada pelo autor (2015)

Todos os valores de entrada apresentados na Figura 2 são idênticos aos dados do enunciado do exemplo 4.4 da página 114 da terceira edição do livro *Fundamentos de Engenharia Hidráulica* (BAPTISTA; COELHO, 2010). Assim que o botão *Calcular* localizado na parte superior esquerda da Figura 2 é acionado, tanto os dados de entrada quanto os de saída podem ser visualizados pelo usuário por meio dos botões *Resultados* e *Resultados 2* localizados na parte inferior direita da Figura 2.

A Figura 3 apresenta a janela *Resultados* que contém todos os dados de saída calculados pelo programa além de parte dos dados inseridos pelo usuário.

Figura 3 – Janela *Resultados* do MRR



EES Distributable — MRR - [Resultados]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help

Resultados obtidos a partir dos dados inseridos

Comprimento dos trechos	Vazão à jusante dos trechos	Vazão distribuída dos trechos	Vazão à montante dos trechos	Vazão fictícia dos trechos	Diâmetros para tubulação de PVC nos trechos
Trecho 1: 200 [m]	Trecho 1: 4 [l/s]	Trecho 1: 0,5 [l/s]	Trecho 1: 4,5 [l/s]	Trecho 1: 4,25 [l/s]	Trecho 1: 0,1 [m]
Trecho 2: 100 [m]	Trecho 2: 0 [l/s]	Trecho 2: 0,25 [l/s]	Trecho 2: 0,25 [l/s]	Trecho 2: 0,125 [l/s]	Trecho 2: 0,05 [m]
Trecho 3: 300 [m]	Trecho 3: 4,75 [l/s]	Trecho 3: 0,75 [l/s]	Trecho 3: 5,5 [l/s]	Trecho 3: 5,125 [l/s]	Trecho 3: 0,1 [m]
Trecho 4: 160 [m]	Trecho 4: 0 [l/s]	Trecho 4: 0,4 [l/s]	Trecho 4: 0,4 [l/s]	Trecho 4: 0,2 [l/s]	Trecho 4: 0,05 [m]
Trecho 5: 300 [m]	Trecho 5: 5,9 [l/s]	Trecho 5: 0 [l/s]	Trecho 5: 5,9 [l/s]	Trecho 5: 5,9 [l/s]	Trecho 5: 0,1 [m]

Diâmetros para tubulação de ferro fundido nos trechos	Diâmetros escolhidos para os trechos	Velocidade de escoamento dos trechos	Soma dos coeficientes de perda localizada dos trechos
Trecho 1: 0,15 [m]	Trecho 1: 0,1 [m]	Trecho 1: 0,573 [m/s]	Trecho 1: 0
Trecho 2: 0,15 [m]	Trecho 2: 0,05 [m]	Trecho 2: 0,1273 [m/s]	Trecho 2: 0
Trecho 3: 0,15 [m]	Trecho 3: 0,1 [m]	Trecho 3: 0,7003 [m/s]	Trecho 3: 0
Trecho 4: 0,15 [m]	Trecho 4: 0,05 [m]	Trecho 4: 0,2037 [m/s]	Trecho 4: 0
Trecho 5: 0,15 [m]	Trecho 5: 0,1 [m]	Trecho 5: 0,7512 [m/s]	Trecho 5: 0

Perda de carga localizada dos trechos	Perda de carga contínua dos trechos	Perda de carga total dos trechos	Cota piezométrica à jusante dos trechos	Cota piezométrica à montante dos trechos
Trecho 1: 0 [m]	Trecho 1: 1,29 [m]	Trecho 1: 1,29 [m]	Trecho 1: 492,4 [m]	Trecho 1: 493,7 [m]
Trecho 2: 0 [m]	Trecho 2: 0,02768 [m]	Trecho 2: 0,02768 [m]	Trecho 2: 493,7 [m]	Trecho 2: 493,7 [m]
Trecho 3: 0 [m]	Trecho 3: 2,735 [m]	Trecho 3: 2,735 [m]	Trecho 3: 493,7 [m]	Trecho 3: 496,5 [m]
Trecho 4: 0 [m]	Trecho 4: 0,1057 [m]	Trecho 4: 0,1057 [m]	Trecho 4: 496,3 [m]	Trecho 4: 496,5 [m]
Trecho 5: 0 [m]	Trecho 5: 3,549 [m]	Trecho 5: 3,549 [m]	Trecho 5: 496,5 [m]	Trecho 5: 500 [m]

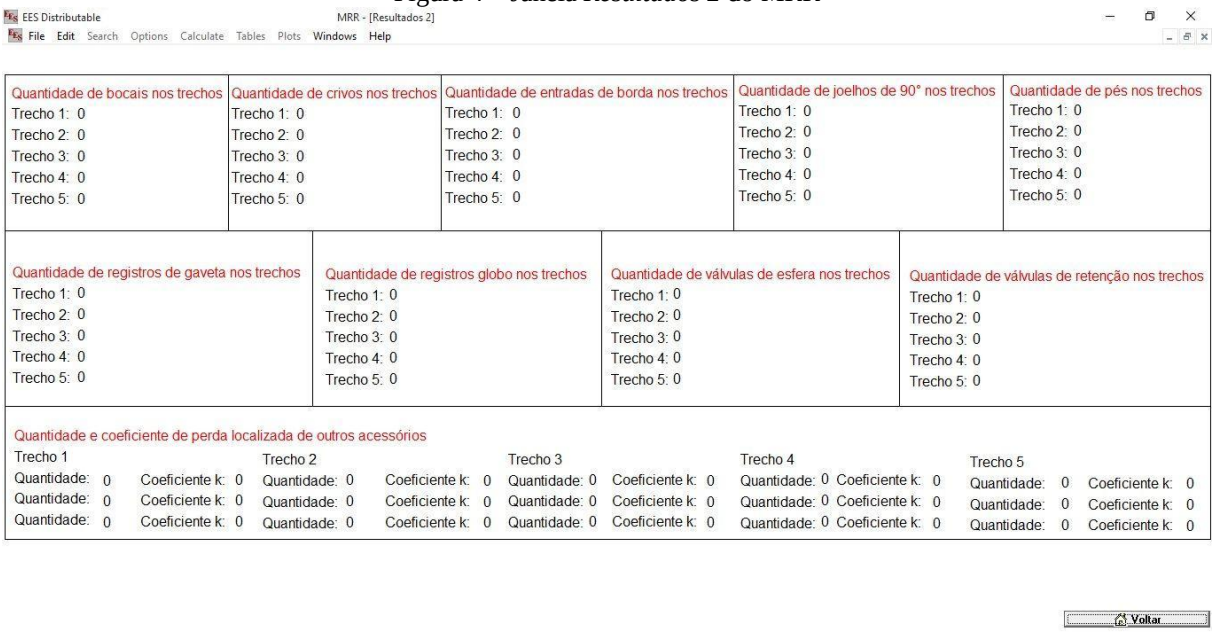
Cota do terreno à jusante dos trechos	Cota do terreno à montante dos trechos	Pressão disponível à jusante dos trechos	Pressão disponível à montante dos trechos
Trecho 1: 410 [m]	Trecho 1: 430 [m]	Trecho 1: 82,43 [m]	Trecho 1: 63,72 [m]
Trecho 2: 420 [m]	Trecho 2: 430 [m]	Trecho 2: 73,69 [m]	Trecho 2: 63,72 [m]
Trecho 3: 430 [m]	Trecho 3: 450 [m]	Trecho 3: 63,72 [m]	Trecho 3: 46,45 [m]
Trecho 4: 460 [m]	Trecho 4: 450 [m]	Trecho 4: 36,35 [m]	Trecho 4: 46,45 [m]
Trecho 5: 450 [m]	Trecho 5: 500 [m]	Trecho 5: 46,45 [m]	Trecho 5: 0 [m]

Voltar

Fonte: elaborada pelo autor (2015)

A Figura 4 apresenta a janela *Resultados 2* que possui, exclusivamente, a quantidade dos principais acessórios e a quantidade, com respectivo coeficiente de perda de carga localizada *k*, de acessórios extras inseridos pelo usuário. Como o exemplo utilizado para teste não possuía acessórios hidráulicos, todos os resultados apresentados nessa janela foram iguais a zero.

Figura 4 – Janela *Resultados 2* do MRR



EES Distributable — MRR - [Resultados 2]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help

Quantidade de bocais nos trechos	Quantidade de crivos nos trechos	Quantidade de entradas de borda nos trechos	Quantidade de joelhos de 90° nos trechos	Quantidade de pés nos trechos
Trecho 1: 0	Trecho 1: 0	Trecho 1: 0	Trecho 1: 0	Trecho 1: 0
Trecho 2: 0	Trecho 2: 0	Trecho 2: 0	Trecho 2: 0	Trecho 2: 0
Trecho 3: 0	Trecho 3: 0	Trecho 3: 0	Trecho 3: 0	Trecho 3: 0
Trecho 4: 0	Trecho 4: 0	Trecho 4: 0	Trecho 4: 0	Trecho 4: 0
Trecho 5: 0	Trecho 5: 0	Trecho 5: 0	Trecho 5: 0	Trecho 5: 0

Quantidade de registros de gaveta nos trechos	Quantidade de registros globo nos trechos	Quantidade de válvulas de esfera nos trechos	Quantidade de válvulas de retenção nos trechos
Trecho 1: 0	Trecho 1: 0	Trecho 1: 0	Trecho 1: 0
Trecho 2: 0	Trecho 2: 0	Trecho 2: 0	Trecho 2: 0
Trecho 3: 0	Trecho 3: 0	Trecho 3: 0	Trecho 3: 0
Trecho 4: 0	Trecho 4: 0	Trecho 4: 0	Trecho 4: 0
Trecho 5: 0	Trecho 5: 0	Trecho 5: 0	Trecho 5: 0

Quantidade e coeficiente de perda localizada de outros acessórios

Trecho 1		Trecho 2		Trecho 3		Trecho 4		Trecho 5	
Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0
Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0
Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0	Quantidade: 0	Coeficiente k: 0

Voltar

Fonte: elaborada pelo autor (2015)

4 Conclusão

Os resultados demonstrados nas Figuras 3 e 4 revelam que o MRR foi desenvolvido com sucesso, pois os valores são idênticos ao exemplo do livro *Fundamentos de Engenharia Hidráulica* (BAPTISTA; COELHO, 2010) utilizado como teste. Portanto, todas as equações

hidráulicas, relações lógicas e ferramentas que a plataforma EES oferece foram inseridas e desenvolvidas corretamente, sendo seguro utilizar o programa no dimensionamento de RDA ramificadas com traçado em *espinha de peixe* para múltiplos pontos de abastecimento. A interface de usuário simples permite o fácil manuseio do MRR, agilizando a concepção e o monitoramento de redes ramificadas sem comprometer a segurança requerida nas fases de projeto, instalação e operação dessas estruturas hidráulicas.

Referências

ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Perdas em sistemas de abastecimento de água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate**. São Paulo, SP, 2013. 45 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional**. Agência Nacional de Águas; Engecorps / Cobrape. – Brasília: ANA: Engecorps / Cobrape, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218**: projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1994.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. rev. e ampl. – Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 473 p.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. **Introdução à Hidrologia**. Revista Hidrologia, p. 01-10, ago. 2006.

MACEDO, L. S. **Dimensionamento de rede de água e simulação do seu funcionamento utilizando o EPANET**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira – SP, 2010. 105 p.

RIGHETTO, A. M. Operação Ótima de Sistema Urbano de Distribuição de Água. In: **SEREA – Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas**, 2002. João Pessoa: 2002. CD-Rom. 16 p.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 643 p.