

OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE ÁGUAS DE EMERGÊNCIA POR GRAVIDADE PARA PROCESSOS MINERAIS E METALÚRGICOS¹

Bernardo Furquim Werneck Marinho²

Saulo Henrique Chiquito³

Camila Cristina de Freitas Lopes⁴

Pedro Garcia Ribeiro⁵

Andréia Abrahão Sant'Anna⁶

Resumo

Sistemas de águas de emergência são frequentemente utilizados nos processos minerais e metalúrgicos para suprir determinados serviços na ausência de energia elétrica, tais como o resfriamento de fornos e granulação do metal fundido, contribuindo para a segurança operacional da planta. Redes de abastecimento que operam por gravidade desempenham um papel primordial nesse processo, seja como sistema de emergência principal, seja atuando em redundância com bombas diesel. Entretanto, como o escoamento gravitacional resulta em condições limitadas de vazão e pressão, projetar o sistema corretamente é vital para o seu funcionamento. Para redes que servem diferentes ramais, é necessário um estudo detalhado, envolvendo arranjo, condições de processo e *modi operandi* de cada equipamento a ser alimentado, entre outros. Além disso, a construção desses sistemas é em geral onerosa, uma vez que as condições operacionais não raro exigem tanques elevados de alta capacidade e longos trechos de tubulações de grandes diâmetros. Um procedimento de otimização de redes de emergência, baseado no critério da diferença de energia disponível foi proposto e aplicado a um estudo de caso. A utilização da metodologia levou a uma rápida convergência dos resultados e determinação do conjunto de menores diâmetros que atendem aos requisitos de projeto do sistema estudado.

Palavras-chave: Águas de emergência; Utilidades; Otimização de processos.

OPTIMAL DESIGN FOR GRAVITY-FED EMERGENCY WATER SYSTEMS IN MINERAL AND METALLURGICAL PROCESSES

Abstract

Emergency water systems are often used in mineral and metallurgical processes to supply specific services in electric power outage, such as furnace cooling and molten metal granulation, contributing to plant operational reliability. Gravity fed supply networks play a key role in this process, either acting as the main emergency system or as backup for diesel pumps. However, as the gravity flow provides limited pressure and flow conditions, a correct and precise system design is vital to ensure proper operation. For networks that supply several spots, a detailed study is demanded, involving layout, process conditions and *modi operandi* of each equipment to be supplied, among others. Furthermore, building costs in this case are normally high, since operating conditions often require elevated tanks with high capacity and long pipe runs with large diameter. A procedure to optimize emergency water networks based on energy availability criteria is proposed and applied to a case study. The use of this methodology led to a quick convergence of results and to the determination of the set of the smallest diameters that meet the design requirements of the studied system.

Keywords: Emergency water; Utilities; Process optimization.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Químico. Engenheiro de Processos, Chemtech, a Siemens Business, Belo Horizonte, MG, Brasil

³ Engenheiro Químico. Engenheiro de Processos, Chemtech, Belo Horizonte, MG, Brasil

⁴ Engenheira Química. Coordenadora da Equipe de Tubulação, Chemtech, Belo Horizonte, MG, Brasil

⁵ Engenheiro Químico. Estagiário de Engenharia de Processos, Chemtech, Belo Horizonte, MG, Brasil

⁶ Engenheira Química. Coordenadora da Equipe de Processos, Chemtech, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de águas de emergência estão presentes em diversos tipos de plantas industriais e são responsáveis pelo fornecimento de serviços críticos na falta de energia elétrica, de forma a garantir a integridade de equipamentos e pessoas, a qualidade dos processos e minimizar impactos negativos na produção. Exemplos de aplicações desses sistemas para a indústria de processos minerais e metalúrgicos incluem o resfriamento de fornos e granulação de metal fundido.

Na indisponibilidade das bombas elétricas, o abastecimento de água pode ser garantido por bombas a diesel instaladas na linha principal, redes auxiliares que operam por gravidade ou ainda a associação de ambas as soluções. A configuração escolhida será função da criticidade do equipamento e do processo, além de aspectos econômicos. Neste contexto, redes de distribuição por gravidade têm larga aplicabilidade, seja como sistema de emergência único, seja como redundância de bombas a diesel.

Contudo, em função das restrições de vazão e pressão impostas pelo escoamento gravitacional, o dimensionamento preciso das tubulações é crítico para o funcionamento do sistema e viabilidade econômica do projeto. Por exemplo, os custos de tubulação típicos da indústria química representam de 10% a 20% dos custos de implantação do empreendimento.⁽¹⁾

Do ponto de vista da engenharia, a complexidade e extensão desses sistemas de emergência variam conforme a complexidade e extensão da planta. Para atendimento de poucos ramais concentrados em uma mesma unidade, podem ser utilizados, por exemplo, castelos d'água, instalados nas proximidades do local. Já em situações em que o serviço é solicitado por vários ramais ou por unidades distintas, torna-se mais vantajoso centralizar o fornecimento em grandes tanques elevados, associados a redes de distribuição complexas.

Tipicamente, o arranjo das redes é classificado como ramificado ou como malhado (em anel), conforme mostrado na Figura 1. Na prática, são construídas redes mistas, provenientes da associação de redes ramificadas e malhadas. Embora sejam de dimensionamento mais complexo, os trechos em malha apresentam maior flexibilidade para manutenções e intervenções, além de garantirem maior segurança operacional, por oferecerem diferentes configurações de fluxo.

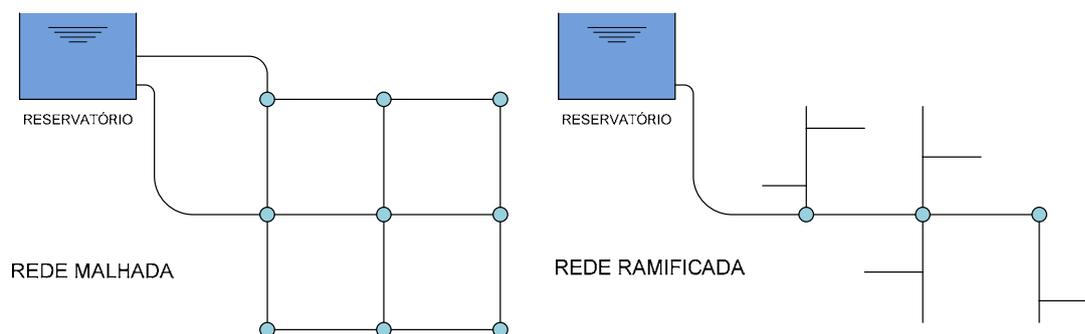


Figura 1. Tipos de configuração de redes de distribuição.

As metodologias clássicas de cálculo de redes malhadas são baseadas nas técnicas de Hardy Cross⁽²⁾ um método de tentativa e erro fundamentado em balanços de massa e energia. Entretanto, como possui um foco estritamente voltado para a hidráulica do sistema, a avaliação econômica do dimensionamento da rede exige a utilização de ferramentas de otimização de custo. Recentemente, técnicas de

otimização via programação linear e não linear têm sido aplicadas para dimensionamento para diversas configurações de redes.⁽³⁾

No presente trabalho, é realizado o modelamento matemático de um arranjo pré-definido, com o objetivo de se obter os diâmetros econômicos da rede de distribuição de água, através da proposição de uma metodologia de otimização.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição do Sistema

A simulação foi desenvolvida considerando-se o arranjo esquematizado na Figura 2. O sistema é composto por um reservatório elevado de nível fixo, conectado a uma adutora que abastece por gravidade uma rede de distribuição de água de emergência em anel com três ramificações para abastecimento dos equipamentos. Na situação de emergência, estipulou-se que cada equipamento demanda uma vazão de $650\text{m}^3/\text{h}$ e opera a pressão atmosférica.

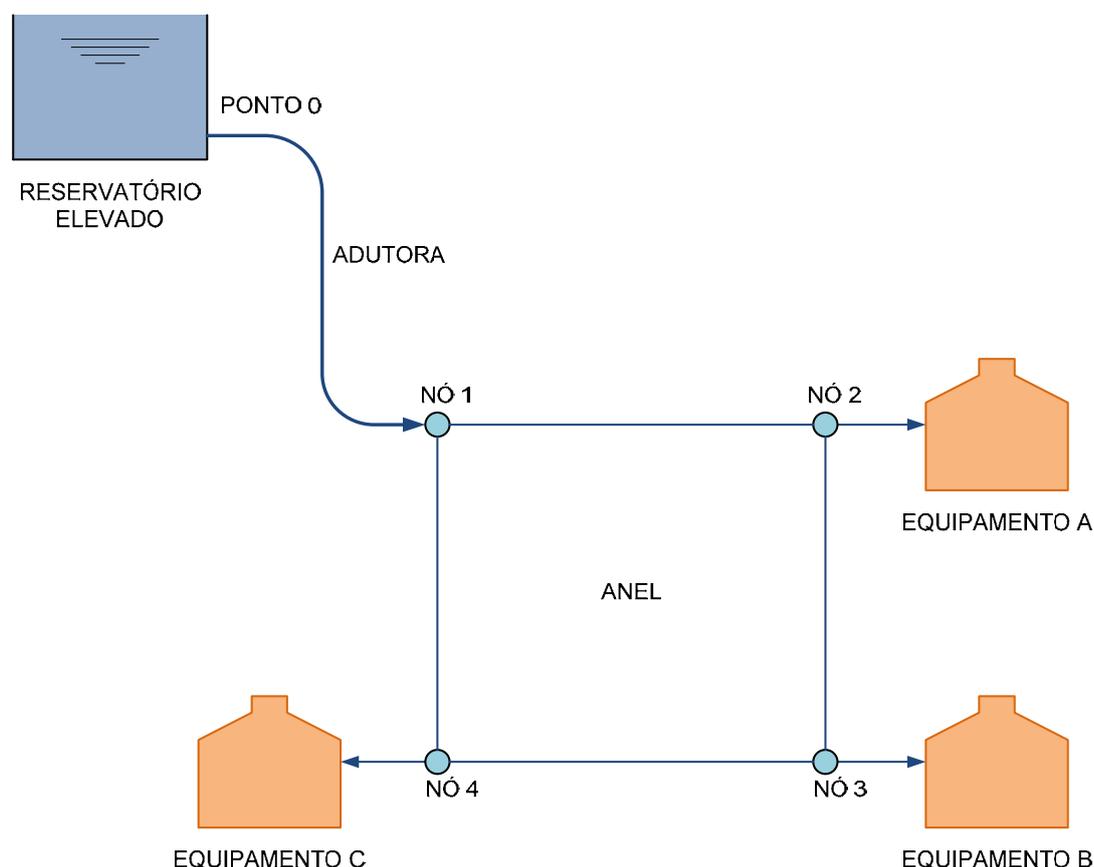


Figura 2. Esquema da distribuição de água.

Na Tabela 1 são apresentadas informações pertinentes ao arranjo físico dos trechos da rede, definidos pela associação de dois nós consecutivos, conforme apresentado na Figura 2. Considerou-se com ponto de elevação zero, o equipamento B.

Tabela 1. Informações relativas ao arranjo

Trecho	Comprimento Reto (m)	Elevação Inicial (m)	Elevação Final (m)
0-1	1500	50	0
1-2	200	0	0
1-4	100	0	0
2-A	100	0	5
2-3	100	0	0
3-B	50	0	0
3-4	200	0	0
4-C	150	0	10

Adicionalmente, são assumidas as condições de regime permanente e de tratamento da água como fluido incompressível. As propriedades da água foram avaliadas na temperatura de 25°C ($\rho=994,36\text{kg/m}^3$ e $\mu=0,8904\text{cP}$). A tubulação utilizada foi de aço carbono ($\varepsilon=0,00457\text{ mm}$)⁽⁴⁾ e os diâmetros internos foram determinados de acordo com a Tabela 2, baseada em Telles.⁽⁵⁾

Tabela 2. Diâmetros internos utilizados

Diâmetro nominal (pol)	Diâmetro Interno (mm)
8	202,7 ^(*)
10	254,5 ^(*)
12	304,8 ^(*)
14	336,5 ^(*)
16	387,3 ^(*)
18	438,1 ^(*)
20	488,9 ^(*)
22	498,6 ^(**)
24	590,5 ^(*)
26	631,4 ^(**)
28	682,4 ^(**)
30	736,6 ^(*)
32	778,0 ^(**)
34	829,0 ^(**)
36	879,0 ^(**)

(*) Valores normalizados pelas normas ANSI B.36.10 e B.36.19, *Schedule Std.*; (**) Valores normalizados pelas normas API-5L, API-5XL e API-5SL, *Espessura intermediária*.

2.2 Equacionamento

As equações e as rotinas de cálculo foram implementadas em uma planilha de Microsoft Excel®. De forma a validar o modelamento matemático utilizado, foi realizada uma simulação comparativa no software EPANET 2.0®, utilizado em dimensionamentos de redes de distribuição.⁽⁶⁾ A simbologia utilizada nas equações encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3. Simbologia utilizada nas equações

Símbolo	Grandeza
D	Diâmetro interno
ε	Rugosidade absoluta
F	Fator de atrito de Darcy
ϕ	Diâmetro nominal
G	Aceleração da gravidade
h_L	Perda de carga
k_{RO}	Constante do orifício de restrição
L	Comprimento reto
L_{EQ}	Comprimento equivalente
μ	Viscosidade
P	Pressão
Q	Vazão
ρ	Densidade
Re	Número de Reynolds
V	Velocidade
Z	Elevação

O modelamento matemático do sistema de emergência foi fundamentado nos balanços de massa (Equação 1) e de energia (Equação 2) para os pontos onde há separação ou junção de fluxo (nós 1, 2, 3 e 4).

$$\sum Q_{ij} = 0$$

Equação 1. Balanço de Massa (expresso em termos das vazões volumétricas)

$$p_i = p_j + \rho g [(z_i - z_j) - h_{Lij}]$$

Equação 2. Balanço de Energia (Equação de Bernoulli)

A resolução de tais equações, associada a equações auxiliares (Equações 3 a 8) e parâmetros de projeto descritos na seção 2.1, permite a obtenção dos diâmetros das linhas.

$$Q = \frac{v \pi D^2}{4}$$

Equação 3. Equação da Continuidade

$$h_L = f \frac{v^2 L_{EQ}}{2g D}$$

Equação 4. Equação de Darcy-Weisbach (Perda de Carga nas linhas)

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Equação 5. Definição do Número de Reynolds

$$f = \left\{ -2 \log \left[\left(\frac{6,97}{Re} \right)^{0,9} + \frac{\varepsilon/D}{3,7} \right] \right\}^{-2}$$

Equação 6. Swamee e Jain (Fator de Atrito)

$$\Delta p = \left(\frac{Q}{k_{RO}} \right)^2$$

Equação 7. Queda de pressão nos orifícios de restrição⁽⁷⁾

Posto que nenhuma consideração acerca do encaminhamento da tubulação e da quantidade de acessórios foi realizada, o comprimento equivalente foi estimado como sendo o maior valor entre comprimento reto e comprimento calculado a partir da Equação 8.⁽⁸⁾

$$L_{EQ} = \begin{cases} 21,579L^{0,627} \phi^{0,422} & 3 \text{ pol} \leq \phi \leq 8 \text{ pol} \\ 11,015L^{0,627} & \phi > 8 \text{ pol} \end{cases}$$

Equação 8. Correlações para o comprimento equivalente

2.3 Método de Otimização

Nesse trabalho, a otimização econômica de sistemas de águas de emergência tem foco na determinação do conjunto de menores diâmetros para a rede, dada a relevância dos custos relativos à tubulação para a implantação do projeto. Por outro lado, os diâmetros escolhidos devem garantir o atendimento dos requisitos mínimos de vazão e pressão, exigidos pelo processo.

O método proposto foi baseado no critério da diferença de energia disponível, uma vez que o sistema não dispõe de bombas. Esse critério estabelece que a tubulação escolhida não deve produzir uma perda de carga superior à energia do sistema.⁽⁸⁾

Para sistemas como o investigado, que apresentam interligação entre os ramais, a otimização pode se tornar um processo iterativo de difícil convergência. Dessa forma foi proposta a sequência de etapas detalhada a seguir, visando aumentar a eficiência do processo de otimização.

I – *Estimativa dos Diâmetros iniciais:* Os diâmetros iniciais de cada trecho foram calculados pela Equação 3, a partir de critérios de velocidade recomendada e das respectivas vazões requeridas. Devem ser utilizados valores de velocidade tão baixos quanto possíveis, de modo a superestimar os diâmetros e conseqüentemente as vazões do sistema. Utilizou-se, portanto, o valor de 1,0m/s para toda a rede, que é o menor valor recomendado para redes de abastecimento de água⁽⁵⁾.

II – *Otimização da Adutora:* Reduz-se sucessivamente o diâmetro da adutora de forma a ajustar a vazão total do sistema. Esse processo deverá ser realizado observando-se os diâmetros das derivações (anel e ramificações), que não deverão em caso algum superar o diâmetro da adutora.

III – *Otimização do Anel:* Reduz-se sucessivamente, caso necessário, os diâmetros do anel de modo a distribuir melhor a vazão entre os ramais.

IV – *Otimização dos Ramais:* Realiza-se o refinamento dos diâmetros dos ramais, visando o seu balanceamento hidráulico.

V – *Introdução de Orifícios de Restrição nos Ramais:* Procede-se ao ajuste fino das vazões nos ramais e balanceamento hidráulico definitivo do sistema, através do dimensionamento de placas de orifício nos ramais (Equação 7).

3 RESULTADOS

A Tabela 4 mostra os resultados referentes a determinação do diâmetro inicial (Etapa I). Para a determinação dos diâmetros da adutora (trecho 0-1) foram consideradas as vazões requeridas. Devido indisponibilidade de informações a respeito das vazões no anel, foi adotado nesse trecho o mesmo diâmetro dos ramais.

Tabela 4. Estimativa inicial dos diâmetros da rede

Trecho	Vazão (m ³ /h)	Velocidade (m/s)	Diâmetro Calculado (pol)	Diâmetro Nominal (pol)
0-1	1950	1,0	32,7	34
Demais	650	1,0	18,9	20

De posse dos diâmetros, foi realizada a primeira simulação na planilha, obtendo-se os valores de vazão exibidos na Tabela 5. Ainda nessa tabela, constam os resultados de vazão calculados pelo software EPANET® e os desvios entre os métodos.

Tabela 5. Comparativos entre métodos de cálculo

Trecho	Diâmetro Nominal (pol)	Vazão - Modelo Proposto (m ³ /h)	Vazão - EPANET (m ³ /h)	Erro (%)
0-1	34	9238,02	9239,43	-0,02
1-2	20	4452,03	4452,46	-0,01
1-4	20	4785,99	4786,96	-0,02
2-A	20	2659,13	2660,31	-0,04
2-3	20	1792,90	1792,16	0,04
3-B	20	4446,64	4446,94	-0,01
3-4	20	-2653,74	-2654,78	-0,04
4-C	20	2132,25	2132,18	0,003

Na Figura 3 está esquematizada a tela do Epanet® com os resultados gráficos da simulação.

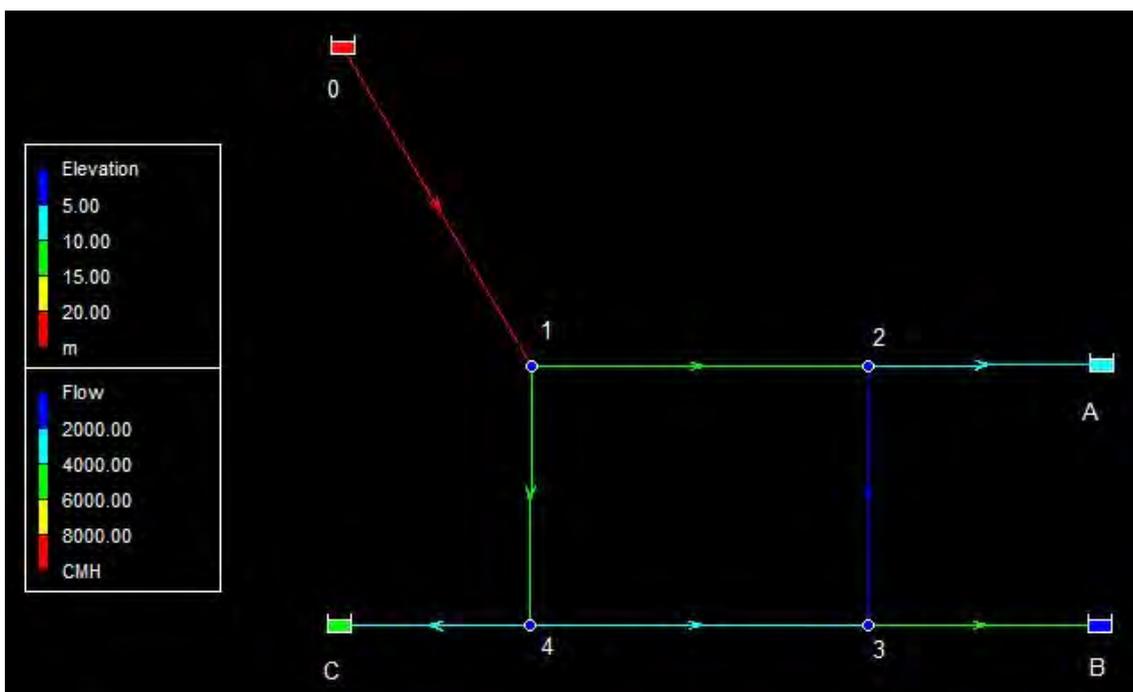


Figura 3. Tela do EPANET® com a distribuição de vazões ao longo da rede

Em seguida, procedeu-se à otimização da adutora (Etapa II). Na Figura 4 é apresentada a análise de sensibilidade das vazões da adutora e ramais com relação ao diâmetro da adutora.

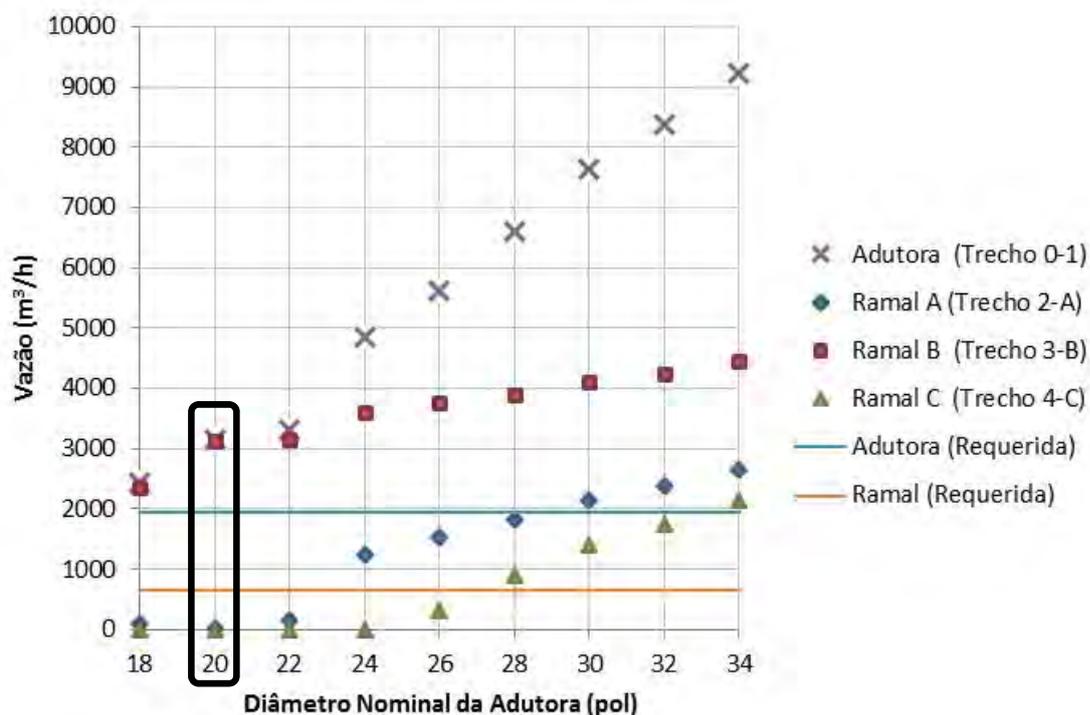


Figura 4. Análise de sensibilidade das vazões com relação ao diâmetro da adutora

Em seguida, foi realizada a otimização do diâmetro do anel de distribuição (Etapa III), cujos resultados são resumidos na Figura 5. Para a execução da simulação, os diâmetros dos ramais de distribuição foram simulados com os mesmos valores atribuídos para o diâmetro do anel.

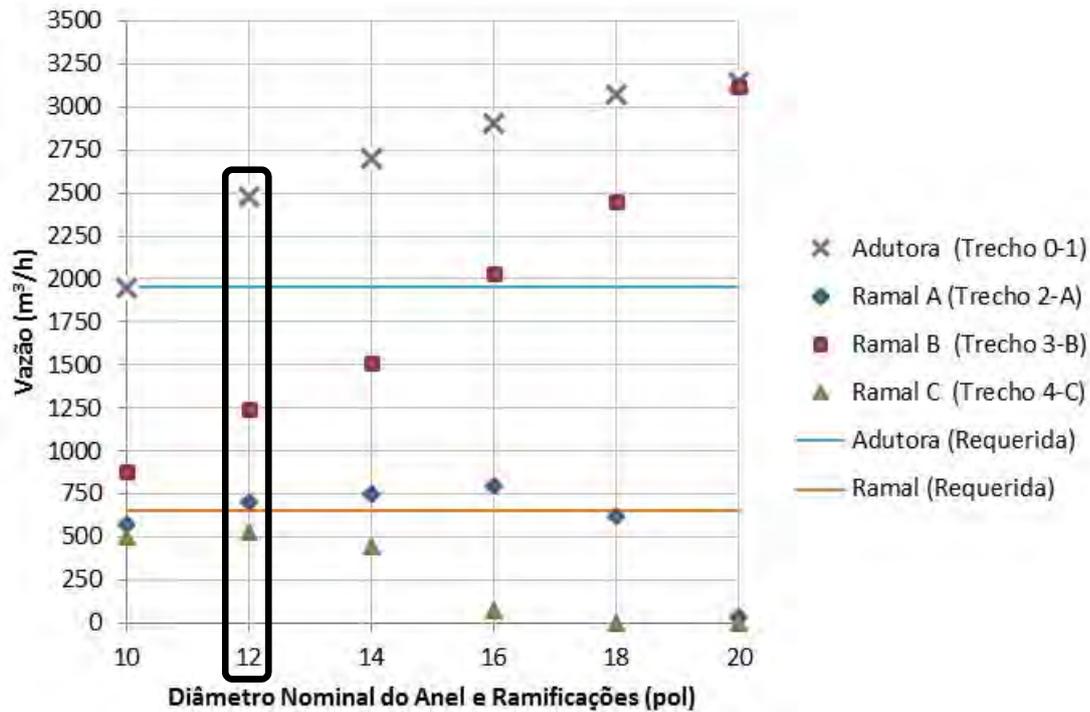


Figura 5. Análise de sensibilidade das vazões com relação ao diâmetro do anel e ramificações

Os resultados parciais de vazão ao final de cada etapa de otimização são apresentados na Figura 6.

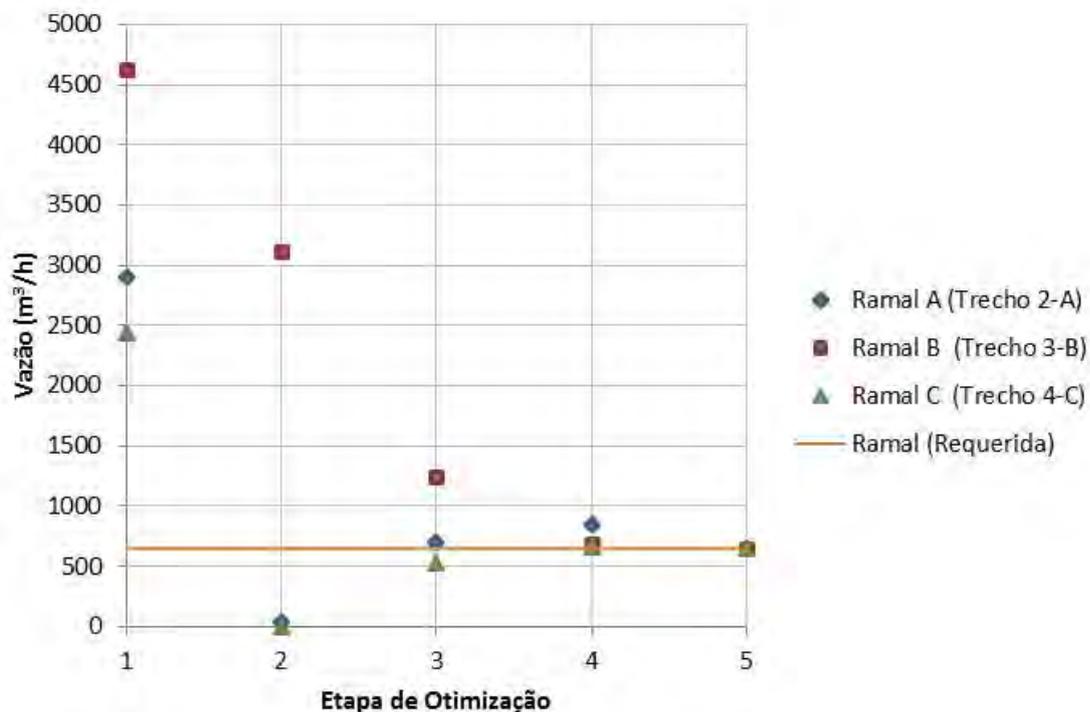


Figura 6. Evolução das vazões ao longo do processo de otimização.

Os principais resultados após a execução das Etapas I a V são resumidos na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados para o sistema otimizado

Trecho	Diâmetro Nominal (pol)	Comprimento Equivalente (m)	Constante Orifício de Restrição ($m^3/h \cdot (kgf/cm^2)^{-0,5}$)	Vazão (m^3/h)	Velocidade (m/s)
0-1	20	1500	-	1951	2,9
1-2	12	305	-	906	3,4
1-4	12	198	-	1045	4,0
2-A	10	198	586	650	3,5
2-3	12	198	-	256	1,0
3-B	8	128	683	650	5,6
3-4	12	305	-	-395	1,5
4-C	10	255	810	650	3,6

4 DISCUSSÃO

Como pode ser verificado na Tabela 5, a consistência numérica entre os valores encontrados nas duas simulações assegura a validade do equacionamento e das rotinas de cálculo utilizadas no processo de otimização. Adicionalmente, pelos resultados das vazões obtidas para os ramais (trechos 2-A, 3-B e 4-C) e para adutora (trecho 0-1), verifica-se que as estimativas iniciais de diâmetro determinadas conforme Tabela 4 estão em conformidade com a metodologia de otimização proposta, uma vez que as vazões do sistema (e conseqüentemente a sua energia) são superiores ao valor desejado.

Na Etapa II, como esperado, as vazões em todos os trechos da rede de distribuição diminuem com a redução do diâmetro da adutora (ver Figura 4), em função do aumento de perda de carga em um trecho comum a todos os ramais. Conforme destacado na Figura 4, o diâmetro escolhido para a adutora foi de 20". Esse é o menor diâmetro que garante ao sistema um excedente de energia, caracterizado por uma vazão total superior à requerida, suficiente para adequar os diâmetros do anel e dos ramais de distribuição conforme a vazão desejada.

Analisando-se a Figura 5, observa-se que, ao longo da Etapa III, à medida que os diâmetros do anel e ramificações são reduzidos, ocorre uma redistribuição das vazões, em função da assimetria do arranjo, reduzindo o fluxo preferencial para o ramal B e aproximando as vazões dos valores requeridos. Nesse caso, o diâmetro ótimo foi tomado com sendo de 12", pois para o diâmetro comercial imediatamente inferior (10"), a vazão total requerida é atingida sem que haja um excedente de energia para possibilitar o balanceamento da rede pela otimização dos diâmetros dos ramais de distribuição.

Pela condição ótima conseguida até o momento, verifica-se que ainda existe uma disparidade muito grande entre as vazões nos ramais, que justificou a necessidade da Etapa IV. Nessa etapa, reduziram-se sucessivamente os diâmetros dos ramais com maior vazão, aumentando a perda de carga naquele trecho e favorecendo a distribuição para os pontos de menor vazão. Conforme pode ser visualizado na Figura 6, a Etapa IV foi finalizada quando a vazão de cada ramal atingiu valores superiores, porém bem próximos ao exigido.

Por fim, foram instalados nos ramais, orifícios de restrição para ajuste exato das vazões ao valor requerido (Etapa V). As constantes obtidas para os orifícios, exibidas na Tabela 6, permitem a especificação das placas de orifício.

Analisando-se as velocidades de escoamento registradas na Tabela 6, verifica-se que os valores dessa grandeza para a adutora e os ramais A e C encontram-se dentro da faixa recomendada pela literatura⁽⁴⁾. Entretanto, como redes de emergência apresentam a particularidade de operarem de forma intermitente e

esporádica, as linhas são menos sujeitas aos efeitos erosionais relacionados com altas velocidades de escoamento. Pelo mesmo motivo, como o fluido permanece estagnado no interior da tubulação durante a maior parte do tempo, efeitos de deposição de sólidos são inerentes a esse tipo de sistema, de modo que é desprezível a contribuição do escoamento em baixa velocidade para esse fenômeno.

5 CONCLUSÃO

Projetos de redes de água de emergência visam a implantação de sistemas que garantam segurança operacional ao processo na ausência de energia elétrica, com o menor custo possível.

A metodologia de otimização econômica de redes proposta fornece uma sequência lógica de etapas, baseada no critério de energia disponível e na análise do comportamento do sistema. Para o estudo de caso apresentado neste trabalho, a aplicação da metodologia possibilitou uma rápida convergência de resultados. O sistema otimizado atendeu às exigências de projeto com o menor conjunto de diâmetros possível, sendo a utilização de orifícios de restrição apenas para o ajuste fino das vazões. Essa metodologia é aplicável a outros sistemas, desde que observadas as particularidades de cada caso.

A partir das discussões acerca do comportamento das vazões, critérios de restrição podem ser definidos e parametrizados e uma rotina de otimização pode ser implementada, automatizando o procedimento.

Agradecimentos

Nossos sinceros agradecimentos à Chemtech, pelo incentivo e apoio no desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos também aos colegas de trabalho que de alguma maneira contribuíram para a elaboração do artigo.

REFERÊNCIAS

- 1 COKER, A.K. Ludwigs Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plant – 4th Ed – Gulf Professional Publishing, 2007.
- 2 CROSS, H. Analysis of Flow in Networks Conduits or Conductors. Univ. Illinois Bull 286. Nov, 1936. USA.
- 3 AMIT, R.K. RAMACHANDRAN, P. Optimal Design of Water Distribution Networks: a Review. The Selected Works of R. K. Amit, 2009. Disponível em: <<http://works.bepress.com/rkamit/7>>. Acesso em: 30 mar. 2013.
- 4 PERRY, R.H. Perry's chemical engineers' handbook. — 7th ed – McGraw-Hill, 1997.
- 5 TELLES, P.C.S. Tabelas e Gráficos para Projetos de Tubulações – 6ª Ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- 6 Disponível em: Software: Epanet | Drinking Water Research | US EPA <www.epa.gov/nrmr/wswrd/dw/epanet.html>. Acesso em: 30 mar. 2013.
- 7 BEGA, E.A. Instrumentação Industrial – 3ª Ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
- 8 ROTAVA, O. Aplicações Práticas em Escoamento de Fluidos: Cálculo de Tubulações, Válvulas de Controle e Bombas Centrífugas. Rio de Janeiro: LTC, 2012.