



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

**ESCOAMENTO TRANSITÓRIO E PERDAS DE ÁGUA: ANÁLISE EM SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO DA CIDADE DE SALVADOR-BA**

JAMILE LEITE BULHÕES

Salvador
2017

JAMILE LEITE BULHÕES

ESCOAMENTO TRANSITÓRIO E PERDAS DE ÁGUA: ANÁLISE EM SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO DA CIDADE DE SALVADOR-BA

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade Federal da
Bahia como requisito para obtenção do
título de Mestre em Meio Ambiente, Águas
e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Andrade
Simões

Salvador

2017

-
- B933 Bulhões, Jamile Leite
Escoamento transitório e perdas de água: análise em sistemas de distribuição da cidade de Salvador-BA / Jamile Leite Bulhões. -- Salvador, 2017.
156 f. : il
- Orientador: André Luiz Andrade Simões.
Dissertação (Mestrado - Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) -- Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2017.
1. Transitório hidráulico. 2. Golpe de aríete. 3. Rede de distribuição de água. 4. Perdas de água. 5. Sistema de Abastecimento de Água. I. Simões, André Luiz Andrade. II. Título.
-



MAASA

Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITECNICA



Jamile Leite Bulhões

Escoamento transitório e perdas de água: análise em sistemas de distribuição da cidade de Salvador-BA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Luiz Andrade Simões
Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Lafayette Dantas da Luz
Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto
Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo

Salvador
15 de dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Ao professor André Luiz Andrade Simões, por quem guardo grande admiração e cuja capacidade, competência e postura me inspiram, agradeço pela orientação deste trabalho, pelas aulas, ensinamentos, conversas e apoio.

Aos professores Jorge Eurico Ribeiro Matos, Lafayette Dantas da Luz, Michel Sahade Darzé e Vivien Luciane Viaro, pela participação nas bancas que antecederam a defesa final e cujas contribuições foram de grande valia para consolidação desta dissertação.

Aos professores das disciplinas que fizeram parte desse curso, André Luiz Andrade Simões, Patrícia Campos Borja, Severino Soares Agra Filho, Márcia Mara de Oliveira Marinho, Lafayette Dantas da Luz, Iara Brandão de Oliveira e Viviana Maria Zanta, pelas aulas sempre muito enriquecedoras.

Ao professor Michel Sahade Darzé, pelas instruções práticas e por compartilhar seu valioso conhecimento e experiência.

Ao professor Rodrigo de Melo Porto, por disponibilizar o *software* CTran, utilizado na fase inicial desse estudo.

Ao professor Jorge Eurico Ribeiro Matos, pelas instruções, confiança e incentivo e ao colega, George Rodrigues de Sousa Araújo, pelo apoio e exemplo de competência e simplicidade.

Aos colegas da Geohidro, em especial ao engenheiro Raydalvo Landim, pela experiência compartilhada e aprendizado, além do convívio, amizade e torcida.

À minha avó Zélia, Conceição, tias, tios, primos, parentes e amigos, pelo estímulo, sorrisos, companhia, conselhos e apoio. Especialmente a tia Iza, pela prestatividade nas correções e sugestões a este e outros estudos.

À minha avó Marieta, meu avô Isái e meu irmão Rafa, por olharem por mim de outra dimensão e cujo amor transcende qualquer aspecto físico. Eu vejo os sorrisos de vocês daqui!

A Júnior, pelo amor, apoio e compreensão e por sempre ter um carinho e um aconchego para me oferecer, deixando toda essa trajetória mais leve e alegre.

À Força Superior que me guia e aos Mestres que vieram a esse mundo deixar ensinamentos que me trazem equilíbrio e me motivam a me capacitar para servir melhor à humanidade.

Por fim e especialmente agradeço a minha mãe, meu pai e meu irmão Celo, pelo apoio, compreensão e incentivo. Vocês são meu alicerce, meus guias, minhas raízes. Dedico esse fruto a vocês!

Minha Gratidão a todos!

“O importante é não parar de questionar.
A curiosidade tem sua própria razão de existir.
Não se pode deixar de ficar admirado
quando se contempla os mistérios da
eternidade, da vida, da maravilhosa estrutura
da realidade. Basta que se busque
compreender um pouco desse mistério a
cada dia. Nunca perca a curiosidade... não
pare de se maravilhar.”

Albert Einstein

AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

Nome do Autor: Jamile Leite Bulhões

Assinatura do autor: Jamile Leite Bulhões

Instituição: Universidade Federal da Bahia

Local: Salvador, BA

Endereço: Rua Aristides Novis, 02 - 4º andar, Federação - Salvador-BA

CEP. 40210-630

E-mail: jamile_bulhoes@hotmail.com

RESUMO

Os elevados índices de perdas de água dos sistemas de abastecimento de água (SAA) é um tema de especial relevância devido à escassez hídrica que assola várias regiões do Brasil e sua relação com o equilíbrio financeiro das prestadoras deste serviço. As perdas de água estão concentradas nos sistemas de distribuição e têm como causa múltiplos fatores que envolvem desde a concepção até a construção e operação do sistema. Uma fonte de esforços comumente dispensada em projetos de sistema de distribuição de água é a análise dos regimes transitórios. As pressões elevadas oriundas desse fenômeno podem danificar estruturas que propiciarão a perda real de água e, as pressões negativas podem facultar a infiltração de contaminantes nas tubulações, entre outros danos e consequências. Neste cenário o presente estudo tem o objetivo de analisar a influência do escoamento transitório nas perdas de água em Zonas de Abastecimento (ZA) do Sistema Integrado de Abastecimento de Água (SIAA) de Salvador - BA. Para isso, as linhas-tronco de quatro ZA do SIAA e uma rede secundária projetada foram avaliadas em regime permanente e transitório com o *software* Allievi, versão 2.2.0.0. Foram analisados os eventos transitórios oriundos de variações de consumo, abertura e fechamento de válvulas, rompimento de tubulação e interrupção de funcionamento do conjunto elevatório e também o uso de mecanismos de proteção contra transitórios hidráulicos como a manobra controlada de válvula, uso de válvulas de admissão e saída de ar, tanque alimentador unidirecional (TAU) e reservatório hidropneumático (RHO). As avaliações hidráulicas ainda consideraram cenários com maior e menor consumo nas redes. As análises em regime permanente apontaram, para algumas ZA, pressões elevadas que já podem justificar seus elevados índices de perdas. As análises do regime transitório oriundo de variações de consumo, rompimento de tubulação e abertura e fechamento de válvulas, considerando cenário de maior consumo na rede, não submeteu o sistema a pressões danosas. As simulações de fechamento de válvulas que consideraram menor consumo na rede, simulando um cenário noturno, apresentaram maiores oscilações de pressão juntamente com a parada de bombas, neste caso, mesmo considerando o consumo máximo horário na rede. De modo geral as pressões negativas foram mais significativas do que as positivas e representam um risco à saúde pública devido à possibilidade de contaminação da água. As sobrepressões, apesar de não terem ultrapassado a pressão de serviço admissível dos tubos, podem levar ao desencaixe e vazamento entre conexões. A manobra controlada de válvula conseguiu reduzir as oscilações de pressão na rede oriundas do fechamento da válvula. O RHO foi adequado para evitar oscilações de pressão e o TAU e as válvulas de ar, para evitar pressões negativas. Os resultados permitiram concluir que os transitórios hidráulicos originários de diversas ações podem estar contribuindo para os elevados índices de perdas do SIAA além de inferir um risco à saúde pública devido à possibilidade de sujeitar a rede a pressões negativas e devem ser considerados durante a elaboração de projetos de redes de distribuição de água.

Palavras-chave: Transitório hidráulico. Golpe de aríete. Rede de distribuição de água. Perdas de água. Sistema de Abastecimento de Água.

ABSTRACT

The high water loss levels in Water Supply Systems (WSS) is a subject of special relevance due the water scarcity that hit several regions of Brazil and because of its relation with the financial balance of the water supply companies. Water losses are concentrated in distribution systems and are driven by multiple factors ranging from design of the system till construction and operation. A commonly dispensed source of effort in water distribution system designs is the analysis of transient regimes. High pressures from this phenomenon can damage structures that will cause losses of water, and negative pressures can provide the infiltration of contaminants, among others damages and consequences. In this scenario, the present study has the aim of analyzing the influence of transient regime on water losses in Water Supply Zones (WSZ) of the Integrated Water Supply System (IWSS) of Salvador - BA. For this, the IWSS four WSZ were evaluated in a permanent and transient regime with the software Allievi, version 2.2.0.0. The transient events due to demands variations, valves closure and opening, pipes rupture and pump shutdown and also the use of protection mechanisms against hydraulic transients such as valve operation, use of air valves, feed tank and surge vessel were analyzed. Two scenarios were considered, with higher and lower water demands. The steady-state analyzes pointed to some WSZ high pressures that may already justify their loss levels. The analysis of the transient flow due to variations of demands, pipe rupture and valve opening and closure considering a scenario of higher demands did not submit the system to harmful pressures. The analysis of valves closure that considered less demands, simulating a nocturnal scenario, results in greater pressure oscillations. The same were observed with the pump shutdown, even considering the peak hourly demand. In general, negative pressures were more significant than positive ones and means a public health risk due to the possibility of water contamination. Overpressures, although they have not exceeded the maximum allowed pressure of the pipes, can lead to disengagement and leakage between connections. The controlled valve operation was able to reduce the pressure oscillations from valve closure. The surge vessel was suitable to avoid pressure oscillations and the feed tank and air valves to avoid negative pressures. The results allowed to conclude that the hydraulic transients may be contributing to the maintenance of the high water loss levels in the system and mean a public health risk due to the negative pressures and should be considered in the projects of water distribution system.

Key-words: Hydraulic transient. Waterhammer. Water distribution system. Water loss. Water Supply System.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 – Pontos frequentes de vazamentos em redes de distribuição | 41 |
| Figura 2 – Pontos frequentes de vazamentos em ramais | 41 |
| Figura 3 – Fases do golpe de aríete provocado por fechamento instantâneo de uma válvula | 45 |
| Figura 4 – Representação do transitório decorrente do fechamento de uma válvula em um ponto X à sua montante | 47 |
| Figura 5 – Diagrama do sistema para dedução da equação do movimento | 55 |
| Figura 6 – Diagrama do sistema para dedução da equação da continuidade..... | 57 |
| Figura 7 – Malha de cálculo para o método das características..... | 62 |
| Figura 8 – Curvas típicas de válvulas de regulação | 66 |
| Figura 9 – Fluxograma para análise dos transitórios hidráulicos..... | 76 |
| Figura 10 – Rede de distribuição antes e após simplificação..... | 80 |
| Figura 11 – Oscilação de pressão antes e após a simplificação de uma rede de distribuição | 81 |
| Figura 12 – Croqui da subadutora de água tratada R7-R15 | 86 |
| Figura 13 – Zona de Abastecimento 09 | 87 |
| Figura 14 – Localização das ZA analisadas..... | 88 |
| Figura 15 – Zona de Abastecimento 23 | 89 |
| Figura 16 – Rede secundária projetada – Liberdade – ZA 23..... | 90 |
| Figura 17 – Zona de Abastecimento 42 | 91 |
| Figura 18 – Zona de Abastecimento 60 | 93 |
| Figura 19 – Manobra de fechamento da válvula | 102 |
| Figura 20 – Valores de K para válvulas borboleta..... | 103 |
| Figura 21 – Configuração da Lei de vazão por tabela..... | 104 |
| Figura 22 – Fechamento da válvula – ZA 23..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figura 23 – Curva da bomba 12 LN 26 – ZA 42 | 109 |
| Figura 24 – Características do motor admitido | 110 |
| Figura 25 – Curva de consumo assimilada a uma senóide | 112 |
| Figura 26 – Fechamento controlado da válvula | 114 |
| Figura 27 – Gráfico para tamanho de ventosa de tríplice função | 115 |
| Figura 28 – Curva de admissão de ar – Ventosa com DN de admissão 200 e de expulsão 15 | 116 |
| Figura 29 – Curva de expulsão de ar – Ventosa com DN de admissão 200 e de expulsão 15 | 117 |
| Figura 30 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula (20 e 40 s) – ZA 09 – nó ZC3..... | 122 |
| Figura 31 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula – Lei de vazão por pressão e por tabela – ZA 09 – nó ZC3..... | 123 |
| Figura 32 – Variação de vazão – fechamento de válvula - Lei de vazão por pressão e por tabela – ZA 09 - nó ZC3 | 124 |
| Figura 33 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula - DMH e 10% da DMH – ZA 09 – nó ZC3 | 125 |
| Figura 34 – Oscilação de pressão – variação de consumo na subadutora – ZA 09 – nó ZC3..... | 126 |
| Figura 35 – Oscilação de pressão – rompimento de tubulação – ZA 23 – nó N25 . | 127 |
| Figura 36 – Oscilação de pressão – rompimento de tubulação (consumo mínimo) – ZA 23 – nó N25 | 127 |
| Figura 37 – Oscilação de pressão – abertura de válvula – ZA 23 – nó N3..... | 128 |
| Figura 38 – Oscilação de pressão – abertura de válvula – ZA 23 – nó N25..... | 129 |
| Figura 39 – Oscilação de pressão – abertura de válvula (consumo mínimo) – ZA 23 – nó N3 e nó N25..... | 129 |
| Figura 40 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula (consumo mínimo) – rede secundária – nó 34 | 130 |

| | |
|---|-----|
| Figura 41 – Oscilação de pressão – parada de bombas – ZA 42 – nó ZC11 | 132 |
| Figura 42 – Oscilação de pressão – parada de bombas – ZA 42 – nó ZC13..... | 132 |
| Figura 43 – Oscilação de pressão – parada de bombas – ZA 42 – nó ZC3..... | 133 |
| Figura 44 – Oscilação de pressão – variação de consumo – ZA 60 – nó ZC15..... | 134 |
| Figura 45 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula – ZA 60 – nó ZC15.... | 135 |
| Figura 46 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula – ZA 60 – nó N5 | 136 |
| Figura 47 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula com 20, 40 e 60 segundos e controlado – ZA 09 – nó ZC3 | 137 |
| Figura 48 – Oscilação de pressão – uso de válvulas de ar – ZA 09 – nó ZC3..... | 138 |
| Figura 49 – Oscilação de pressão – uso de RHO – ZA 23 – nó 34..... | 139 |
| Figura 50 – Oscilação de pressão – uso de TAU – ZA 09 – nó ZC3..... | 140 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 – Causas prováveis de falhas e rupturas em tubulações | 40 |
| Quadro 2 – Regime permanente – resumo dos resultados..... | 141 |
| Quadro 3 – Regime transitório – resumo dos resultados | 142 |
| Quadro 4 – Regime transitório – dispositivos de proteção – resumo dos resultados | 143 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Pressão máxima aceitável devido a incidentes em diferentes países e em códigos e normas internacionais..... | 82 |
| Tabela 2 – Percentual de ANC, DMD, DMH e população da ZA 09..... | 87 |
| Tabela 3 – Percentual de ANC, DMD, DMH e população da ZA 23..... | 90 |
| Tabela 4 – Percentual de ANC, DMD, DMH e população da ZA 42..... | 92 |
| Tabela 5 – Percentual de ANC, DMD, DMH e população da ZA 60..... | 92 |
| Tabela 6 – DN, DI, PSA, PMS e Celeridade – Ferro Fundido K7..... | 97 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- Abes – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AMT – Altura Manométrica Total
- ANC – Água Não Contabilizada
- ASME – American Society of Mechanical Engineers
- BS – British Standard
- DI – Diâmetro Interno
- DMD – Demanda Máxima Diária
- DMH – Demanda Máxima Horária
- DN – Diâmetro Nominal
- DVGW – Deutsche Verein des Gas-und Wasserfaches
- EDO – Equações Diferenciais Ordinárias
- EDP – Equações Diferenciais Parciais
- EE – Estação Elevatória
- Embasa – Empresa Baiana de Águas e Saneamento
- IPD – Índice de Perdas na Distribuição
- IS – Independent Study
- ISO – International Organization for Standardization
- NA – Nível de Água
- NBR – Norma Brasileira
- NEN – Nederlands Normalisatie-instituut
- Parms – Plano de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara
- PEAD – Polietileno de Alta Densidade
- PMS – Pressão Máxima de Serviço
- PN – Pressão Nominal
- PNCDA – Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água

PSA – Pressão de Serviço Admissível

PVC – Policloreto de Vinila

RAD – Reservatório Apoiado de Distribuição

RED – Reservatório Elevado de Distribuição

RHO – Reservatório Hidropneumático

SAA – Sistema de Abastecimento de Água

Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

Sanasa – Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento

Sanepar – Companhia de Saneamento do Paraná

SIAA – Sistema Integrado de Abastecimento de Água

Sihs – Secretaria de Infraestrutura Hídrica e Saneamento

Snis – Sistema Nacional de Informação Sobre Saneamento

VRP – Válvula Redutora de Pressão

ZA – Zona de Abastecimento

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 31 |
| 2 | OBJETIVOS | 35 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 35 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 35 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 37 |
| 3.1 | SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA | 37 |
| 3.2 | PERDAS DE ÁGUA | 37 |
| 3.3 | AVALIAÇÃO HIDRÁULICA – REGIME PERMANENTE | 42 |
| 3.4 | AVALIAÇÃO HIDRÁULICA – REGIME TRANSITÓRIO | 43 |
| 3.4.1. | Principais consequências dos transitórios hidráulicos | 47 |
| 3.4.1.1. | Pressões máximas e mínimas no sistema | 47 |
| 3.4.1.2. | Condições de vácuo..... | 48 |
| 3.4.1.3. | Cavitação | 48 |
| 3.4.1.4. | Separação da coluna líquida..... | 49 |
| 3.4.1.5. | Vibrações | 49 |
| 3.4.1.6. | Comprometimento da qualidade da água | 49 |
| 3.4.1.7. | Erros de medição de consumo..... | 50 |
| 3.4.2. | Cálculo do transitório hidráulico..... | 51 |
| 3.4.3. | Equações que regem os fenômenos dos transitórios | 53 |
| 3.4.3.1. | Equação do movimento | 54 |
| 3.4.3.2. | Equação da continuidade..... | 56 |
| 3.4.4. | Método das características..... | 59 |
| 3.4.4.1 | Condição de Contorno | 63 |
| 3.4.5. | Proteção contra transitório hidráulico | 64 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.4.5.1 | Mudança no traçado e resistência mecânica da tubulação | 65 |
| 3.4.5.2 | Manobra de válvulas..... | 65 |
| 3.4.5.3 | Volante de inércia | 66 |
| 3.4.5.4 | Variação de rotação nos conjuntos motor-bomba | 67 |
| 3.4.5.5 | Válvula de Retenção..... | 67 |
| 3.4.5.6 | By pass..... | 68 |
| 3.4.5.7 | Válvula de alívio | 69 |
| 3.4.5.8 | Válvulas antecipadoras de ondas..... | 69 |
| 3.4.5.9 | Válvulas de admissão e saída de ar | 70 |
| 3.4.5.10 | Tanque alimentador unidirecional | 71 |
| 3.4.5.11 | Reservatório de ar comprimido ou hidropneumático..... | 72 |
| 3.4.5.12 | Chaminé de equilíbrio | 73 |
| 3.4.5.13 | Tubo atenuador de celeridade | 74 |
| 3.5 | TRANSITÓRIOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO | 74 |
| 3.5.1 | Análise dos eventos transitórios em redes de distribuição..... | 76 |
| 3.5.2 | Principais dificuldades e erros na análise dos transitórios hidráulicos em redes de distribuição..... | 79 |
| 3.5.3 | Pressões admissíveis durante os eventos transitórios em redes de distribuição | 82 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 85 |
| 4.1 | SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 85 |
| 4.1.1 | Zona de Abastecimento 09 | 86 |
| 4.1.2 | Zona de Abastecimento 23 | 88 |
| 4.1.3 | Zona de Abastecimento 42 | 91 |
| 4.1.4 | Zona de Abastecimento 60 | 92 |
| 4.2 | PROGRAMA ALLIEVI..... | 93 |
| 4.3 | SIMULAÇÃO | 96 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.3.1 | Zona de Abastecimento 09..... | 101 |
| 4.3.2 | Zona de Abastecimento 23..... | 104 |
| 4.3.3 | Zona de Abastecimento 42..... | 107 |
| 4.3.4 | Zona de Abastecimento 60..... | 111 |
| 4.3.5 | Mecanismos de proteção contra transitórios hidráulicos | 113 |
| 4.3.5.1 | Manobra de fechamento de válvulas de regulação..... | 113 |
| 4.3.5.2 | Válvulas de admissão e saída de ar | 114 |
| 4.3.5.3 | Reservatório hidropneumático | 117 |
| 4.3.5.4 | Tanque alimentador unidirecional | 118 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 121 |
| 5.1 | ZONA DE ABASTECIMENTO 09..... | 121 |
| 5.2 | ZONA DE ABASTECIMENTO 23..... | 126 |
| 5.3 | ZONA DE ABASTECIMENTO 42..... | 131 |
| 5.4 | ZONA DE ABASTECIMENTO 60..... | 133 |
| 5.5 | MECANISMOS DE PROTEÇÃO CONTRA TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS | 136 |
| 5.5.1 | Manobra de fechamento de válvula..... | 136 |
| 5.5.2 | Válvula de admissão e saída de ar..... | 137 |
| 5.5.3 | Reservatório hidropneumático..... | 138 |
| 5.5.4 | Tanque alimentador unidirecional..... | 139 |
| 5.6 | RESUMO DOS RESULTADOS | 140 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 145 |
| | REFERÊNCIAS..... | 151 |

1 INTRODUÇÃO

As perdas de água são um dos grandes problemas dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) de países em desenvolvimento, como o Brasil, e é um tema recorrente devido à escassez hídrica e sua relação com a segurança do abastecimento e saúde financeira dos prestadores de serviços.

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2017), em 2015, 58% dos municípios da região Nordeste decretaram Situação de Emergência, devido à seca ou estiagem, ao menos uma vez. Nesse mesmo ano, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO - SNIS, 2017), a região Nordeste apresentou índice de perdas na distribuição (IPD) de água de 45,7%.

No Sistema Integrado de Abastecimento de Água (SIAA) de Salvador a situação é ainda mais alarmante. Segundo Magalhães (2001, p. 19), em 1993, a perda anual de água do SIAA foi de 56%. Passados 20 anos, o sistema foi ampliado, esforços foram dedicados ao combate às perdas, porém, entre fevereiro de 2013 e janeiro de 2014, o SIAA perdeu 50% da água que captou enquanto os estudos hidrológicos dos mananciais que atendem o sistema vêm apontando para uma gradativa redução da vazão disponível (SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA E SANEAMENTO - SIHS, 2015; 2016a).

Este cenário de escassez hídrica de tamanha proporção, acompanhado de altíssimos índices de perdas de água nos SAA, é uma contradição e aponta para a urgência na realização de ações de combate às perdas de água nos sistemas de distribuição.

Apesar de a média de IPD do Brasil ter diminuído ao longo dos anos, ainda se situa no patamar dos 37% (SNIS, 2017). Quando se compara o Brasil com países desenvolvidos é notável o grande espaço para mudanças. Há cidades na Austrália e Nova Zelândia, por exemplo, que perdem menos de 10% da água que distribuem, enquanto cidades no Japão conseguiram romper o patamar inferior a 5% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - ABES, 2015; SNIS, 2017).

São diversas as causas para os elevados IPD dos SAA brasileiros. Vazamentos em adutoras, redes, ramais, conexões, reservatórios e outras unidades do sistema geram

perdas reais de água e estão associados às formas de operação, em especial ao excesso de pressão na rede, qualidade dos materiais e da mão de obra utilizados na implantação do sistema, idade das tubulações, ausência de programas de monitoramento de perdas, entre outras causas (SNIS, 2017).

A redução das perdas reais permite diminuir os custos de produção, com a diminuição do consumo de energia, de produtos químicos e outros, além de possibilitar o uso das instalações existentes para aumentar a oferta de água sem a necessidade de expansão das unidades do sistema produtor. A redução de perdas irá, sobretudo, postergar a necessidade de exploração de novos mananciais e otimizar o uso de um recurso precioso no contexto nordestino e brasileiro.

A prática de projetos e análises de redes hidráulicas de distribuição de água vem negligenciando alguns aspectos físicos inerentes ao problema. O conhecimento do comportamento das redes hidráulicas sob a ação de uma série de solicitações físicas e exigências operacionais é fundamental para que fatores socioeconômicos e ambientais sejam otimizados, objetivo almejado no sentido de solucionar a situação de escassez de recursos hídricos entre outras questões (ROCHA, 1998). Uma fonte de esforços comumente dispensada no projeto de sistema de distribuição de água é a análise dos regimes transitórios de operação (KARNEY; McINNIS, 1990).

Transitório hidráulico em conduto forçado ou golpe de aríete é o nome dado ao fenômeno de variação de pressão que se verifica no conduto quando ocorre mudança na velocidade do líquido devido a alguma ação ou alteração funcional de algum equipamento. É o regime variável que se dá na transição entre dois regimes permanentes, onde acontecem deformações elásticas tanto no líquido como na tubulação (CHAUDHRY, 2014).

O regime transitório se inicia quando ocorrem perturbações no regime permanente e essas perturbações podem ser causadas por mudanças acidentais ou por mudanças naturais do sistema (CHAUDHRY, 2014). Abertura e fechamento de válvulas, parada e partida de bombas e turbinas, rompimentos de tubulações, alterações nas vazões demandadas e utilização de hidrantes são causas comuns de transitórios hidráulicos em condutos forçados, especialmente em sistemas de adução e distribuição de água (KWON, 2007; CHAUDHRY, 2014).

As pressões elevadas oriundas dos transitórios hidráulicos podem danificar tubulações, válvulas, gerar fissuras nas paredes das tubulações, romper conexões entre seções e outras decorrências que resultarão na perda de água. Além disso, tem também grande implicação na qualidade da água uma vez que podem gerar escoamentos capazes de causar o desprendimento e recirculação do biofilme aderido às paredes dos tubos, possibilitar a infiltração de contaminantes presentes no solo devido às ondas de baixa pressão, entre outros danos e consequências (BOULOS *et al.*, 2005).

A análise dos transitórios hidráulicos nos sistemas de distribuição é, frequentemente, mais importante do que a análise do sistema operando em regime permanente, que geralmente é utilizado pelos projetistas como base para o dimensionamento. A severidade das pressões provocadas pelos transitórios deve ser determinada para que o sistema seja devidamente dimensionado para essas sobrecargas (BOULOS *et al.*, 2005).

A água é um elemento essencial à vida e às atividades humanas e os recorrentes episódios de escassez hídrica em diversas regiões do país tem evidenciado a importância de se combater os alarmantes níveis de desperdício. Desprezar os estudos dos fenômenos transitórios em redes de distribuição pode estar contribuindo para os elevados IPD dos SAA, inclusive do SIAA de Salvador. É importante a análise da intensidade dos transitórios nas redes de distribuição e as possíveis formas de tornar o sistema mais seguro na tentativa de reverter o quadro atual de perdas de água.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência do escoamento transitório nas perdas de água em Zonas de Abastecimento (ZA) do Sistema Integrado de Abastecimento de Água (SIAA) de Salvador.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar hidráulicamente em regime permanente e transitório as linhas-tronco das redes de distribuição das ZA 09, 23, 42 e 60 do SIAA de Salvador e de uma rede secundária projetada (fictícia) derivada da ZA 23;
- Analisar a intensidade dos transitórios hidráulicos nas linhas-tronco das redes de distribuição das ZA 09, 23, 42 e 60 e na rede secundária projetada (fictícia) e seus possíveis impactos nas perdas de água;
- Avaliar os efeitos do uso de mecanismos e dispositivos de proteção contra transitórios hidráulicos na ZA 09 e na ZA 23.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

De acordo com a Portaria nº 2.914, de 2011, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), um Sistema de Abastecimento de Água para consumo humano é constituído por um conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, que vão desde a zona de captação até as ligações prediais, destinado à produção e ao fornecimento coletivo de água potável, por meio de rede de distribuição.

Um SAA é composto pelos seguintes elementos: manancial (corpo de água superficial ou subterrâneo, de onde será feita a retirada de água); captação (conjunto de estruturas e dispositivos instalados junto ao manancial para retirada da água); estação elevatória (conjunto de obras e equipamentos destinados a recalcar água para a unidade seguinte); estação de tratamento de água (grupo de unidades que objetivam tratar a água de modo a adequar as suas características aos padrões de potabilidade); reservatório (elemento do sistema destinado a regularizar as vazões de adução e de distribuição); rede de distribuição (parte do sistema formado por tubulações e acessórios destinados a levar água potável aos consumidores) (TSUTIYA, 2006); e ramais prediais (tubulação compreendida entre a rede de distribuição e a extremidade montante do alimentador predial ou de rede predial de distribuição) (ABNT, 1998).

Os SAA têm o objetivo de disponibilizar, para a população, água em quantidade e qualidade adequadas, de forma mais eficiente possível, e devem ser dimensionados com base em muitos estudos devido a seus múltiplos aspectos. Quando os sistemas são mal projetados e/ou operados podem causar danos incalculáveis para o meio ambiente, para a saúde pública, além de prejuízos econômicos para os responsáveis pelo sistema.

3.2 PERDAS DE ÁGUA

Conceitualmente as perdas de água são divididas em aparentes e reais. As perdas aparentes, também chamadas de perdas não físicas ou comerciais, estão relacionadas ao volume de água que foi consumido pelo usuário, mas que, por algum motivo, não foi medido ou contabilizado, gerando perda de faturamento ao prestador de serviços. São falhas decorrentes de erros de medição, ligações clandestinas, *by*

pass irregulares nos ramais das ligações, falhas no cadastro comercial etc. (SNIS, 2017).

As perdas reais, também conhecidas como perdas físicas, referem-se a toda água disponibilizada para distribuição que não chega aos consumidores. Essas perdas acontecem por vazamentos em adutoras, redes, ramais, conexões, reservatórios e outras unidades operacionais do sistema. Elas compreendem, principalmente, os vazamentos em tubulações da rede de distribuição, provocados especialmente pelo excesso de pressão e também estão associados à qualidade dos materiais utilizados, à idade das tubulações, à qualidade da mão de obra para instalação, operação e manutenção e à ausência de programas de monitoramento de perdas, dentre outros fatores. A quase totalidade das perdas reais e comerciais em um sistema de abastecimento acontece na distribuição (SNIS, 2017).

Segundo a Sihs (2015), para estimativa da demanda *per capita* de água do SIAA de Salvador, considerou-se que, das perdas totais de água do SIAA, em média, 75% correspondem a perdas reais e 25% a perdas aparentes. Na Grande São Paulo, estima-se que as perdas reais correspondem a cerca de 62% das perdas totais (SABESP, 2015). Pires, Nakagawa e Alvares (2014) realizaram pesquisas em alguns SAA da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e concluíram que aproximadamente 70% das suas perdas sejam reais. Segundo a European Commission (2015), em 2013, no SAA de Salzburg, na Áustria, 91,9% das perdas totais de água foram reais, em Reggio Emilia, na Itália, no mesmo ano, 77,1% foram reais. Essas proporções variam consideravelmente em cada SAA e até mesmo dentro de um mesmo sistema de acordo as características ocupacionais, topográficas, entre outras, das áreas abastecidas.

Menores perdas reais implicam em redução de custos de produção, com a diminuição do consumo de energia, de produtos químicos e outros, e permite utilizar as instalações existentes para aumentar a oferta sem necessidade de expansão do sistema produtor, postergando a necessidade de novos investimentos e de exploração de novos mananciais. Por outro lado, a redução das perdas aparentes permite aumentar a receita tarifária, possibilitando melhorar a eficiência dos serviços prestados e o desempenho financeiro do prestador de serviços (PNCDA, 2003). A redução das perdas reais traz inúmeros benefícios para o bom funcionamento dos SAA, para as operadoras dos sistemas e para o meio ambiente.

Como coloca Pérez (2008), é desejável que o controle de perdas seja feito por subsistemas que podem ser subdivididos em subsistema de adução de água bruta, de tratamento, de reservação, de adução de água tratada e de distribuição.

As perdas reais no sistema de distribuição de água tratada correspondem ao escopo deste trabalho.

Segundo o Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA, 2003), as prováveis causas de rompimentos ou falhas que provocam vazamentos nas redes hidráulicas, em função da fase de desenvolvimento do sistema de distribuição, estão esquematizadas no Quadro 1 e podem ser subdivididas em:

- Planejamento e projeto: causadas, especialmente, por deficiências nas estimativas das demandas ao longo do tempo, ausência de análise em regime transitórios, falta de diálogo entre os projetistas e os operadores do sistema e o não estabelecimento de regras para a futura operação dos sistemas;
- Construção: causada principalmente por falta de inspeção da qualidade dos materiais e dos procedimentos de manuseio, armazenamento, transporte e instalação, uso de ferramentas e equipamentos inadequados, falta de treinamento dos operários e de fiscalização das obras;
- Operação, manutenção e expansão: falhas ocorrem, principalmente, pela falta de uma adequada organização operacional e do estabelecimento de políticas sólidas de manutenção preventiva e corretiva, não operação do sistema conforme previsto na fase de planejamento e expansões sem projeto e visão futura conjunta.

Quadro 1 – Causas prováveis de falhas e rupturas em tubulações

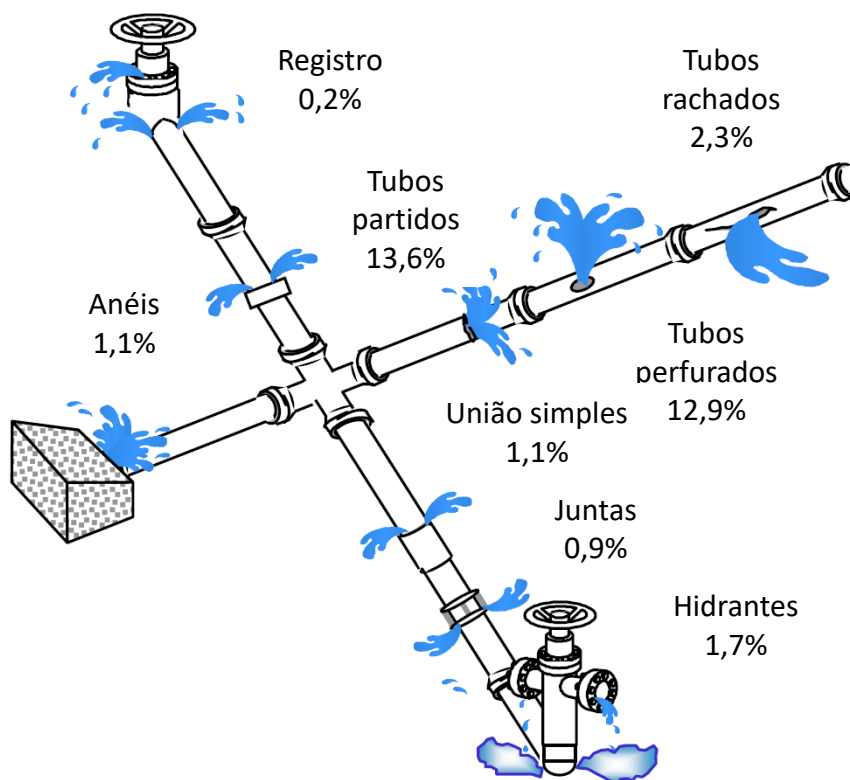
| FASE DA FALHA | CAUSA DA FALHA | CAUSA DA RUPTURA |
|------------------------|---|--|
| Planejamento e Projeto | <ul style="list-style-type: none"> • Subdimensionamento • Ausência de ventosa • Cálculo dos transitórios • Regras de operação • Setorização • Treinamento | <ul style="list-style-type: none"> • Sobrepressão • Subpressão • Sub e sobrepressão • Sub e sobrepressão • Sobrepressão • Sub e sobrepressão |
| Construção | <ul style="list-style-type: none"> • Construtivas • Materiais • Peças • Equipamentos • Treinamento | |
| Operação | <ul style="list-style-type: none"> • Enchimento • Esvaziamento • Manobras • Ausência de regras • Treinamento | <ul style="list-style-type: none"> • Sub e sobrepressão • Subpressão • Sub e sobrepressão • Sub e sobrepressão • Sub e sobrepressão |
| Manutenção | <ul style="list-style-type: none"> • Sem prevenção • Mal feita • Treinamento • Interação operação/usuário • Tempo de resposta | |
| Expansão | <ul style="list-style-type: none"> • Sem projeto • Sem visão conjunta | <ul style="list-style-type: none"> • Sub e sobrepressão • Sub e sobrepressão |

Fonte: PNCDA (2003, p.22).

Dentre os fatores que influenciam as perdas nos sistemas de distribuição de água, destacam-se as pressões elevadas na rede e as inadequadas manobras operacionais. Essas manobras podem propiciar a ocorrência de transitórios hidráulicos, causando rupturas e desencaixe de tubos, entre outros efeitos de origem dinâmica que tornam o sistema suscetível à ocorrência de vazamentos bem como a frequentes rupturas por fadiga do material das tubulações e acessórios (ALEGRE; COVAS, 2010).

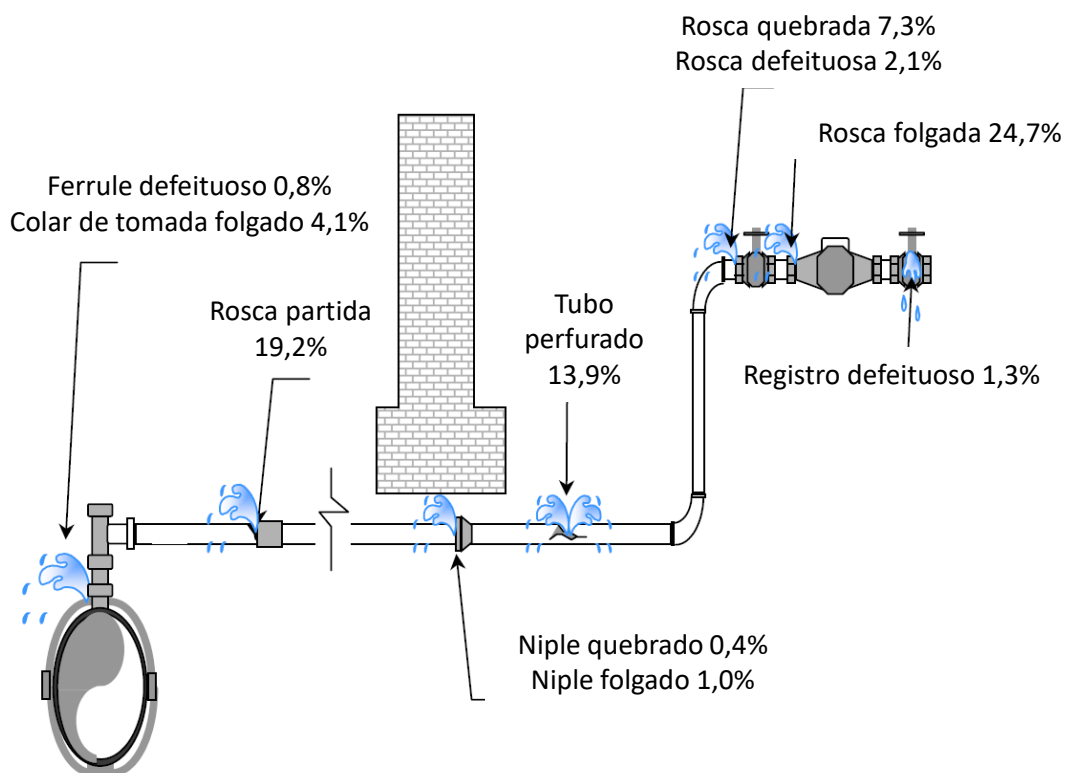
As experiências de técnicos da Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento (Sanasa) de Campinas, São Paulo, demonstraram que entre 70 e 90% da quantidade total de ocorrências de vazamentos está nos ramais prediais, mas, considerando o volume perdido, a maior incidência está nas tubulações da rede distribuidora (PNCDA, 2003). Os percentuais ilustrativos baseados na experiência da Sanasa de pontos frequentes de vazamentos na rede de distribuição estão apresentados na Figura 1, e de pontos frequentes nos ramais prediais estão apresentados na Figura 2.

Figura 1 – Pontos frequentes de vazamentos em redes de distribuição



Fonte: PNCDA (2003, p.17).

Figura 2 – Pontos frequentes de vazamentos em ramais



Fonte: PNCDA (2003, p.18).

Dada a importância da sobrepressão nas perdas de água, a maior parte das medidas, usualmente adotadas, para o combate de perdas físicas objetivam o controle da pressão. Segundo Farley e Trow (2003), a pressão, normalmente, é o segundo fator mais importante na determinação dos níveis de vazamentos, precedido pelas condições da infraestrutura. No entanto, o controle de pressões é mais efetivo do ponto de vista econômico do que a gestão da infraestrutura.

Entre as técnicas descritas por Farley e Trow (2003) para controle de pressão estão as seguintes: (1) instalação de Válvula Redutora de Pressão (VRP); (2) instalação de caixa de passagem em uma tubulação principal para criar uma descontinuidade no gradiente hidráulico; (3) nova setorização, através da instalação de novas tubulações e válvulas destinadas a abastecer áreas em diferentes formas; (4) controle de adutoras; (5) combinação entre *booster* e VRP, que pode resultar conveniente em regiões com topografia acidentada; (6) controle do bombeamento, utilizando controladores de partida ou bombas de velocidade variável; (7) controle da entrada nos reservatórios, para controlar a vazão de entrada em relação ao volume armazenado; (8) controles na saída dos reservatórios, destinados a induzir uma baixa diminuição da pressão, mas com efeitos sobre uma grande área; e (9) setores diurnos/noturnos, que alternam a abertura e fechamento de válvulas em função do horário, atendendo à demanda com excesso de pressão no dia e minimizando os vazamentos à noite.

O controle de transitórios hidráulicos ainda não aparece com frequência entre as medidas adotadas para controle de perdas no Brasil. Em maio de 2017 foi publicada a revisão da Norma Brasileira (NBR) 12218 (ABNT, 2017) que normatiza os procedimentos para elaboração de projetos de rede de distribuição de água para abastecimento público e que passou a exigir, entre outras análises, o estudo das pressões decorrentes dos transitórios hidráulicos.

3.3 AVALIAÇÃO HIDRÁULICA – REGIME PERMANENTE

No regime permanente as características do escoamento não variam com o tempo em um volume de controle. Para isso, as condições de contorno são invariáveis com relação ao tempo, incluindo as demandas, a operação das bombas, a abertura das válvulas ou os níveis dos reservatórios.

Os três princípios básicos da mecânica dos fluidos que assentam a análise e a modelação dos sistemas hidráulicos são: conservação de massa, segunda lei de Newton ou princípio da quantidade de movimento e primeira lei da termodinâmica ou princípio de conservação de energia. Para análise dos sistemas hidráulicos em regime permanente, em especial das redes de distribuição de água, é usual assumir algumas hipóteses, a saber: (1) escoamento unidimensional; (2) escoamento incompressível (massa específica constante); (3) volume de controle fixo e indeformável, com uma entrada e uma saída, apenas; (4) escoamento completamente desenvolvido (que implica relação linear entre a queda de pressão e a posição ao longo do conduto).

Em regime permanente, a equação de conservação de massa e a equação da energia são empregadas diretamente, em sua forma algébrica, pois não há variações temporais das grandezas que modelam os problemas hidráulicos (pressão, vazão, velocidade média etc.). Nesse regime é resolvido um cenário a cada cálculo e não há conexão entre os cenários (porque as taxas de variações temporais das grandezas do problema são nulas), o que não condiz com a realidade, uma vez que as condições de funcionamento das redes reais variam ao longo do tempo.

As práticas usuais de projeção e avaliação de redes de distribuição no Brasil levam em consideração apenas o regime permanente. Geralmente, as pressões estáticas são admitidas como pressões máximas e as pressões dinâmicas para a demanda máxima horária do dia de maior consumo, calculada para o final de plano do estudo, são consideradas as pressões mínimas a que o sistema será submetido.

3.4 AVALIAÇÃO HIDRÁULICA – REGIME TRANSITÓRIO

Denomina-se transitório hidráulico o regime variável que ocorre na passagem de um regime permanente inicial para outro regime final, também permanente que, em geral, tem a duração de breves instantes e características especiais. Durante o regime transitório verificam-se variações de pressão e, quando essas variações são significativas e mobilizam as forças elásticas do tubo e do líquido, o regime transitório é também designado golpe de aríete e o modelo matemático utilizado para sua análise é denominado modelo elástico. Quando as forças elásticas do tubo e do líquido podem ser desprezadas, diz-se que a situação transitória corresponde a uma oscilação de

massa e o modelo matemático utilizado para sua análise é denominado modelo rígido (ALMEIDA, 1982; DARZÉ, 1988).

O regime transitório se inicia quando ocorrem perturbações no regime permanente e essas perturbações podem ser causadas por mudanças acidentais ou por mudanças naturais do sistema. Abertura e fechamento de válvulas, operações com bombas e turbinas, mudanças nas condições de enchimento ou esvaziamento de tubulações, rompimentos de tubulações, alteração do nível de água em reservatórios, alterações nas vazões demandadas e utilização de hidrantes são causas comuns de transitórios hidráulicos em condutos forçados, especialmente em sistemas de adução e distribuição de água (BOULOS *et al.*, 2005; KWON, 2007; CHAUDHRY, 2014).

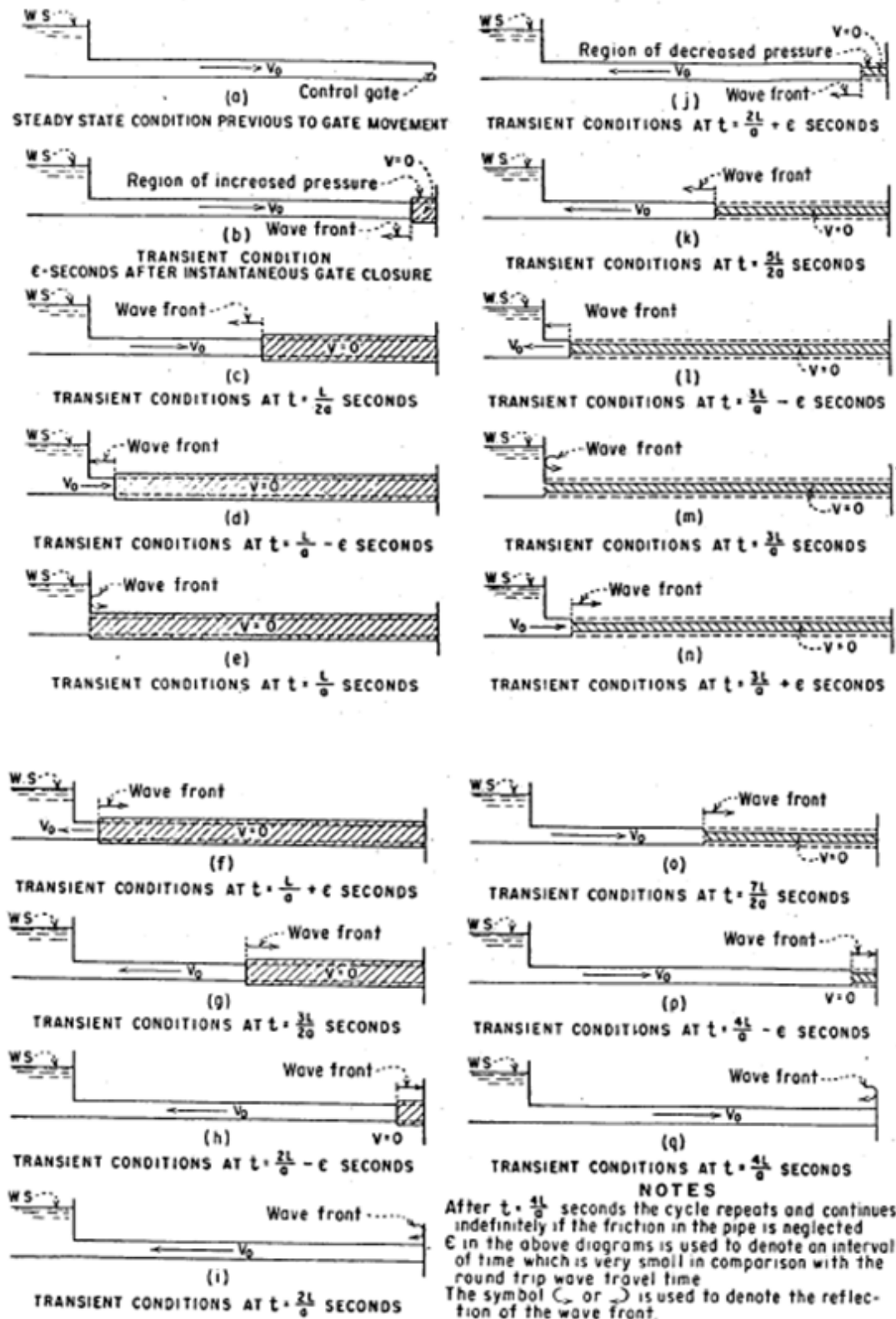
O fenômeno pode ser descrito com auxílio da Figura 4, apresentada por Parmakian (1963). Essa figura apresenta os eventos que ocorrem com o fechamento de uma válvula na extremidade de um sistema composto por um reservatório e uma tubulação, desprezando as perdas de carga.

No instante em que a válvula é fechada (em $t = 0$), a velocidade do fluido próximo à válvula é reduzida a zero, a tubulação se expande e a densidade da água aumenta. A energia cinética é transformada em potencial elástica e uma onda de pressão propaga-se para montante até atingir o reservatório com celeridade “a”. No instante em que a onda de pressão atinge o reservatório, o fluido encontra-se com velocidade $V = 0$ e o tubo expandido com a energia acumulada na forma de energia elástica (PARMAKIAN, 1963; TSUTIYA, 2006).

Como a carga dentro do tubo é superior à do reservatório e existe uma quantidade de água comprimida dentro do tubo que está expandido, irá ocorrer escoamento do tubo para o reservatório formando uma frente de onda que se propaga em direção à válvula com celeridade “- a”. Quando a frente de onda chegar à válvula, devido à inércia, a massa d’água dentro do tubo tenderá a manter-se em movimento. Como a válvula se encontra fechada, a camada junto a ela também permanecerá parada originando um rebaixamento de pressão. Supondo que a pressão seja superior à do vapor (e à de dessorção de gases dissolvidos na água) irá formar uma onda de descompressão no sentido da válvula para o reservatório. Quando a frente de onda atinge o reservatório, o tubo encontra-se com velocidade $V = 0$ e com diâmetro reduzido em relação ao original. Como a carga hidráulica no reservatório é maior do que a de dentro do tubo irá ocorrer escoamento do reservatório para o tubo. Com a chegada da onda de

pressão à válvula todo o padrão descrito se repetirá (PARMAKIAN, 1963; TSUTIYA, 2006).

Figura 3 – Fases do golpe de aríete provocado por fechamento instantâneo de uma válvula



Fonte: Parmakian (1963, p.32 e 33).

No exemplo supracitado foi considerado o fechamento instantâneo da válvula (manobra rápida) e desprezadas as perdas de carga. Nos casos reais a dissipação de energia amortece as amplitudes (cargas e vazões), sem que os períodos das ondas sejam afetados, até que o sistema atinja o repouso (TSUTIYA, 2006).

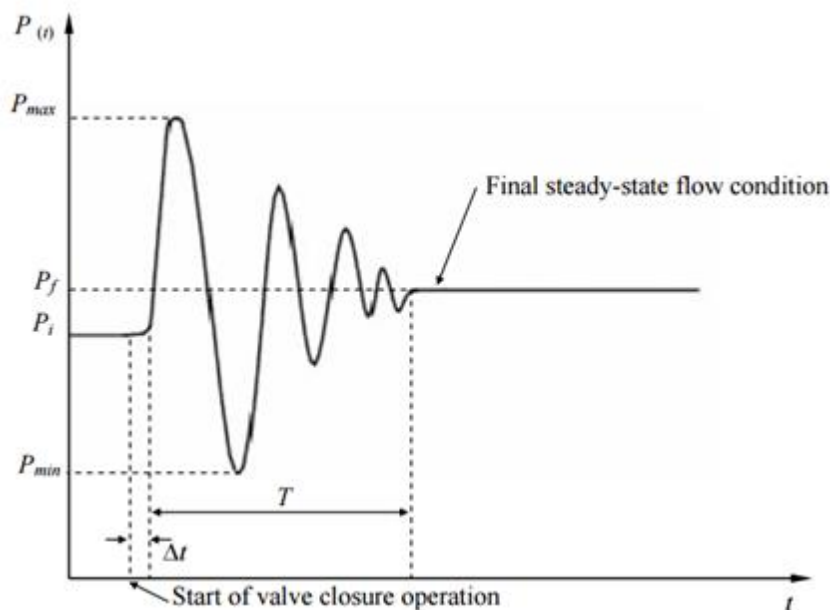
A denominação golpe de aríete vem do som de pancadas que algumas vezes é gerado pelo fenômeno e indica que a energia cinética originária do movimento do fluido é convertida tanto em energia de deformação, como também em energia sonora. Esta energia sonora, bem como outras fontes de dissipação de energia (inclusive dissipação por “atrito”), é responsável pela redução gradual das amplitudes das ondas de pressão dos transitórios até que se atinjam novas condições de escoamento em regime permanente (BOULOS *et al.*, 2005).

Quando ocorre o fechamento de válvulas gradualmente (manobra lenta), a análise pode ser feita da mesma forma que para oscilações de massa, podendo ser admitido o líquido incompressível e o conduto rígido (WYLIE; STREETER, 1979). Nos casos da manobra lenta, a onda de alta pressão, ao atingir a extremidade do tubo, é defletida e, quando retorna, anula a onda subsequente que se movimenta em sentido contrário (TSUTIYA, 2006).

Boulos *et al.* (2005) explicam que as ondas de pressão oriundas da mudança do regime de escoamento percorrem o tubo na velocidade do som, que dependerá das propriedades elásticas da água e da tubulação (como por exemplo o material e a espessura das paredes da tubulação). As ondas de pressão e as variações de vazão se propagam ao longo da tubulação, desde seu ponto de origem e seus efeitos são, via de regra, tão mais pronunciados quanto mais rápidas sejam essas variações.

Na Figura 4 está apresentada a evolução da pressão ao longo do tempo a partir do fechamento de uma válvula com intervalo de operação Δt . Em um ponto X a montante da válvula é representada pela variação de pressão P ao longo do tempo t , sendo P_i a pressão inicial e P_f a pressão ao final do fenômeno transitório. As pressões mínimas e máximas estão representadas por P_{max} e $P_{mín}$.

Figura 4 – Representação do transitório decorrente do fechamento de uma válvula em um ponto X à sua montante



Fonte: Amoah & Elbashir (2007, p.6).

Os transitórios em sistemas de distribuição de água são inevitáveis e de ocorrência natural. Porém, podem também ser muito severos gerando cargas de pressão que podem ultrapassar as pressões de projeto, colocando em risco a estabilidade da instalação hidráulica e gerar sérias consequências (FRANÇA, 2006; BOULOS *et al.*, 2005). As pressões geradas pelos transitórios chegam a ser, frequentemente, três vezes superiores aos valores de pressões em regime permanente (ARAÚJO, 2003).

3.4.1. Principais consequências dos transitórios hidráulicos

O estudo de transitórios hidráulicos é muito importante em projetos de sistemas de tubulações uma vez que se não quantificadas as cargas hidráulicas máximas e mínimas, bem como a frequências das oscilações, podem submeter os sistemas de distribuição a diversos problemas. As principais consequências dos transitórios hidráulicos estão descritas abaixo e decorrem das oscilações de pressão.

3.4.1.1. Pressões máximas e mínimas no sistema

As pressões demasiadamente elevadas que podem ser produzidas durante os eventos transitórios podem danificar gravemente as tubulações, válvulas, equipamentos e componentes do sistema bem como gerar pequenas fissuras nas

paredes das tubulações e romper conexões entre seções da tubulação (BOULOS *et al.*, 2005; CHAUDHRY, 2014). Muitas vezes os prejuízos não são percebidos no momento da ocorrência das ondas de sobrepressão, mas podem resultar em vazamentos, facilitar a corrosão, reduzir significativamente a resistência da tubulação e, quando combinada com novos e repetidos transitórios, pode culminar no rompimento dos condutos (SCHIMIDT, 2016).

Pressões baixas, abaixo dos níveis de pressão atmosférica, podem fazer com que as tubulações entrem em colapso, e podem resultar em implosão e achatamento das tubulações e derramamentos nas juntas dos tubos bem como aumentam também os riscos de cavitação (AMOAH; ELBASHIR, 2007) e outras consequências apresentadas na sequência.

3.4.1.2. *Condições de vácuo*

Pressões muito baixas, que se aproximam às condições de vácuo, podem gerar o rompimento de paredes das tubulações e blocos de ancoragem, principalmente se o sistema não foi concebido para suportar tais deformações e devem ser especialmente evitadas (BOULOS *et al.*, 2005).

3.4.1.3. *Cavitação*

Quando ocorrem pressões muito baixas, próximas ao valor da pressão de vapor à temperatura ambiente, o gás dissolvido na água é gradualmente liberado ou a água começa a se vaporizar e ocorre a cavitação (BOULOS *et al.*, 2005). Existem dois tipos distintos de cavitação, a cavitação gasosa e a cavitação de vapor. Na cavitação gasosa, há a formação de bolhas preenchidas com gases antes dissolvidos por causa da redução da pressão abaixo da pressão de saturação e, na cavitação por vapor, ocorre a formação e destruição de bolsas de vapor, ou cavidades preenchidas com vapor. A colisão e o rompimento destas bolsas de vapor podem resultar em vibrações e pressões que podem causar ruptura de tubulação ou danificar unidades do sistema (SCHIMIDT, 2016).

3.4.1.4. *Separação da coluna líquida*

A separação de coluna líquida ocorre quando há redução da pressão a valores críticos, próximos à pressão de vapor, formando cavidades de vapor no interior da tubulação que podem ocupar toda seção da tubulação, ocorrendo então a chamada separação de colunas. A separação de colunas ocorre em pontos de cotas elevadas ou convexas no perfil da tubulação durante a passagem de ondas negativas de pressão. Quando, posteriormente, ocorre a passagem das ondas de pressão positivas nestes pontos, as colunas separadas se juntam novamente, causando uma onda de choque frontal entre elas com pressões que podem romper as paredes da tubulação (ADAMKOWISKI; LEWANDOWSKI, 2012).

3.4.1.5. *Vibrações*

As vibrações provocadas pelos transitórios podem danificar tubulações, equipamentos de controle e até o concreto usado nos blocos de ancoragem. Em longo prazo, vibrações moderadas podem induzir à fadiga de peças e tubulações (BOULOS *et al.*, 2005).

3.4.1.6. *Comprometimento da qualidade da água*

Os eventos transitórios podem também ter implicações importantes para a qualidade da água e saúde pública ao provocar a ressuspensão de partículas precipitadas e o desprendimento de biofilme das paredes da tubulação. Quando ocorrem ondas de pressão inferiores à pressão atmosférica, ainda existe o risco de intrusão de água subterrânea contaminada através de juntas mal executadas ou trechos danificados da tubulação, além da entrada de gases que possibilitam a corrosão da tubulação (BOULOS *et al.*, 2005).

A depender da proporção da contaminação por intrusão de material presente no local do assentamento da tubulação, o cloro residual mantido na água distribuída pode ser insuficiente para desinfetar a água contaminada. Além disso, uma intrusão de apenas 0,05% de esgoto contaminado pode provocar um importante decaimento do cloro e requerer um aumento substancial do tempo necessário para inativar os patógenos (BERIBEAU *et al.*, 2005).

O controle das pressões da rede de distribuição é, sobretudo, uma questão de saúde pública. Em 2002, uma contaminação na rede de distribuição da cidade de Nova York provocou o grave adoecimento de seis residentes da região (BLACKBURN *et al*, 2004). A causa da contaminação foi atribuída a uma queda de energia no sistema elevatório de água que provocou pressões transitórias negativas na rede (JUNG; BOULOS; WOOD, 2007).

3.4.1.7. *Erros de medição de consumo*

Tratando-se especificamente de transitórios em redes de distribuição, outra preocupação que surge é a influência dos eventos transitórios nos equipamentos de medição do volume de água consumida pelos usuários.

No Brasil, a medição de consumo é comumente realizada com hidrômetros baseados no princípio de funcionamento velocimétrico. Os medidores possuem uma turbina que é acionada pelo fluido em movimento que se desloca em função da diferença de pressão e adquire velocidades tanto maiores quanto maior for essa diferença. No equipamento, a velocidade é transformada em pulsos proporcionais à sua intensidade e transmitidos a um totalizador de volumes onde é registrado o consumo do usuário. Porém, há limites de velocidades, inferiores e superiores, fora dos quais o hidrômetro não funciona. Para velocidades muito altas, acontece o fenômeno do “patinamento” (a turbina gira, mas não aciona o sistema que totaliza o volume) e, apesar de haver escoamento de água no aparelho, o volume não é medido (MELLO; FARIAS, 2001).

As ondas de pressão positivas devido aos eventos transitórios podem, momentaneamente, aumentar a velocidade da água que chega aos consumidores a tal ponto que impossibilite a aferição dos volumes consumidos adequadamente pelos hidrômetros. A depender da abrangência e da frequência isso poderá implicar na perda comercial de água, uma vez que um determinado volume será consumido e não medido, e trazer prejuízos, difíceis de mensurar, às companhias de saneamento.

Por outro lado, ondas de pressão negativas poderão provocar a entrada de ar nas tubulações de chegada dos reservatórios dos consumidores (quando essas tubulações estiverem abertas para a atmosfera) e esse ar poderá girar o hidrômetro em sentido contrário (refluxo), reduzindo o volume medido. Esse mesmo ar, quando expulso devido à onda de pressão positiva subsequente, poderá girar o hidrômetro

mais uma vez, compensando o volume subtraído. É difícil definir se as oscilações de pressão irão aumentar ou diminuir o volume de água medido porque, no caso dos hidrômetros velocimétricos, os erros irão depender da velocidade em que ocorre a passagem da água ou do ar (ou da mistura) pelo hidrômetro.

3.4.2. Cálculo do transitório hidráulico

Segundo Chaudhry (2014), muitos estudiosos contribuíram para que o golpe de aríete pudesse enfim ser descrito e analisado. Desde estudos realizados no século XVII, sobre a propagação das ondas de som no ar e em águas de pouca profundidade, até a descrição do fenômeno, por Menabrea, em 1858, e por Michaud, em 1878, muitas pesquisas foram fundamentais para a análise do fenômeno.

Entre os estudiosos que precederam a descrição do transitório hidráulico em condutos forçados, destaca-se Lagrange, que analisou a compressibilidade de fluidos e Monge com o desenvolvimento do método gráfico de integração de equações diferenciais parciais e a introdução do termo Método das Características, ambos em 1789. Laplace, em 1808, explicou a diferença entre a velocidade do som teórica e medida e Young investigou a propagação de ondas de pressão em tubos. Weber, em 1866, estudou a velocidade de ondas de pressão em condutos elásticos e Marey, em 1875, fez vários experimentos acerca da velocidade de ondas de pressão na água e no mercúrio. Korteweg, em 1878, foi o primeiro a determinar a velocidade da onda considerando tanto a elasticidade do tubo quanto do fluido (CHAUDHRY, 2014).

Apesar de diversos autores afirmarem que Michaud, em 1878, foi o primeiro a descrever o golpe de aríete, Anderson (1976 *apud* CHAUDHRY, 2014), traz que, na verdade, Menabrea, em 1858, foi o primeiro a realizá-lo. Após a descrição do fenômeno, muitas pesquisas foram e ainda são realizadas. Gromeka, em 1883, incluiu, pela primeira vez, as perdas por fricção, na análise do golpe de aríete, assumindo o líquido como incompressível e a perda por cisalhamento diretamente proporcional à velocidade.

No fim do século XIX, Frizell desenvolveu a expressão da velocidade da onda e da oscilação de pressão devido à redução instantânea da vazão e também discutiu os efeitos das ondas nos sistemas ramificados entre outras importantes questões, mas

não foi tão reconhecido quanto seus contemporâneos Joukowski e Allievi (CHAUDHRY, 2014).

Em 1897, Joukowski conduziu vários experimentos: desenvolveu a fórmula da velocidade da onda considerando tanto a compressibilidade da água quanto a elasticidade do fluido; desenvolveu a relação entre redução da velocidade e oscilação da pressão utilizando o princípio da conservação da energia e da conservação da massa; e ainda pesquisou e formulou uma teoria matemática para tubulações e equipamentos como válvulas, chaminés de equilíbrio e válvulas de alívio funcionando em diversas condições. Ele determinou que a oscilação de pressão era máxima quando o tempo de fechamento da válvula for $\leq 2L/a$, onde L é a extensão do tubo e “ a ” a celeridade (CHAUDHRY, 2014).

Allievi publicou a teoria geral do golpe de aríete em 1903, considerado a base dos desenvolvimentos posteriores sobre a matéria e continuou e aprofundou as teorias de Joukowski. Braun, em 1909, publicou equações similares à que foi apresentada por Allievi e, posteriormente, reivindicou que sua publicação o antecedeu, mas Allievi continua sendo considerado o criador da teoria básica do golpe de aríete (CHAUDHRY, 2014).

Wood, em 1926, demonstrou o método gráfico para análise do golpe de aríete, Löwy, independentemente, apresentou um gráfico idêntico em 1928. Bergeron ampliou o método gráfico para determinar as condições em uma seção intermediária da tubulação e, em 1930, Schnyder desenvolveu um método para o cálculo dos transitórios hidráulicos que foi chamado de Schnyder-Bergeron e constitui um método gráfico para solução dos transitórios conhecendo-se algumas condições de um sistema. Este método tornou-se bastante popular e foi o principal método de cálculo dos transitórios hidráulicos até o advento dos computadores. Schnyder foi também o primeiro a incluir as perdas por fricção nas análises gráficas (CHAUDHRY, 2014).

A partir da popularização do uso dos computadores, na década de 70, o método gráfico de Schnyder-Bergeron foi substituído por outros métodos, como o das características, e o fator de atrito e a compressibilidade do fluido foram inseridos no cálculo melhorando os resultados (FRANÇA, 2006).

Diversos pesquisadores se ocuparam do estudo dos escoamentos transitórios, entre 1940 e 1960, melhorando os métodos gráficos e analíticos de solução das equações,

entre os quais cabe destacar Parmakian, Rlech e Jaeger (FRANÇA, 2006). Streeter, Wylie, Tullis, Chaudhry, Wood, Almeida, Koelle, Ruus e Karney são nomes que se destacam entre os pesquisadores que se dedicaram ao estudo do regime transitório após 1960.

3.4.3. Equações que regem os fenômenos dos transitórios

Diferentemente dos modelos desenvolvidos em regime permanente, nos modelos de regime não permanente, as equações são diferenciais ordinárias (modelo rígido) ou diferenciais parciais (modelo elástico). Os equacionamentos básicos que são aplicados a um curto trecho de fluido num conduto para a obtenção das equações diferenciais do movimento transitório vêm dos princípios básicos da hidrodinâmica e são a equação da continuidade ou conservação da massa e equação da quantidade de movimento.

Na dedução das equações básicas que modelam o regime variável em condutos sob pressão, são usuais as seguintes hipóteses fundamentais (DARZÉ, 1988):

- O fluido em escoamento é a água, que se mantém homogênea e monofásica durante o regime variável;
- O escoamento é considerado unidimensional, admitindo-se em cada instante e em cada seção transversal do tubo, uma distribuição uniforme para a pressão e para a velocidade;
- Os coeficientes de Coríolis e de Boussinesq são considerados constantes e iguais à unidade;
- A água é moderadamente compressível e tem um comportamento reológico elástico e linear;
- As variações da temperatura na água são pequenas;
- As paredes dos tubos são tidas como pouco deformáveis e têm comportamento reológico elástico linear (a celeridade é constante e independente da pressão);
- Os eixos dos tubos permanecem imóveis e desprezam-se as forças de inércia das paredes;
- Os tubos são divididos em trechos uniformes (diâmetros, espessura e rugosidade constantes);

- As perdas de carga podem ser calculadas, em cada instante, como num regime uniforme tangente e permanente (hipótese quase estacionária);
- A velocidade de escoamento, em cada seção de cálculo, ao longo do regime variável, é sempre muito menor que a celeridade das ondas elásticas.

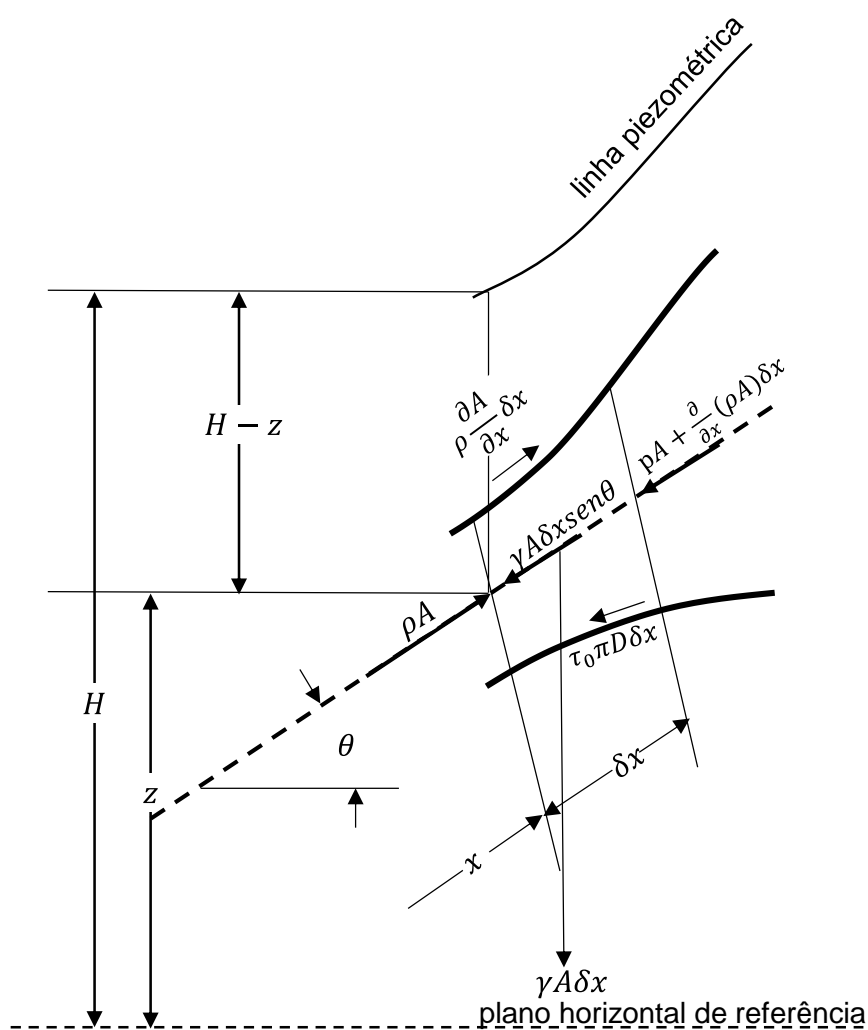
A seguir são apresentadas equações para os fenômenos dos transitórios demonstradas por Wylie e Streeter (1979).

3.4.3.1. Equação do movimento

Para obter a equação da quantidade de movimento é necessário aplicar a segunda lei de Newton num volume de controle. Na Figura 5 está representado o volume de controle definido num determinado instante t . Este volume corresponde a um sistema isolado, cujo elemento líquido está situado entre duas seções fixas, transversais ao eixo do tubo e distantes entre si Δx e apresenta uma deformação axial da seção transversal em função do tempo.

Na Figura 5 estão representadas as forças que atuam num elemento infinitesimal de dimensões $A dx$ e massa $m = \rho A dx$ em uma linha de corrente na direção x . A segunda lei de Newton estabelece que $\sum F = m.a$.

Figura 5 – Diagrama do sistema para dedução da equação do movimento



Fonte: adaptado de Wylie e Streeter (1979, p. 18).

Então:

$$-\frac{\partial(pA)}{\partial x} dx - \rho g A dx \sin \theta - \tau_o \pi D dx + p \frac{\partial A}{\partial x} dx = \rho A dx \frac{dV}{dt}$$

Equação 1

Dividindo-se a Equação 1 por $\rho A dx$ (a massa do elemento infinitesimal) e algum desenvolvimento tem-se:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \sin \theta - \frac{4\tau_o}{\rho D} = \frac{dV}{dt}$$

Equação 2

Sabendo-se para regime permanente $\tau_o = \frac{\rho f V |V|}{8}$ e considerando-se que o cisalhamento para o regime variável é igual ao cisalhamento para o regime permanente insere-se o cisalhamento na Equação 2 e, resolvendo, tem-se:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f V |V|}{2D} = 0$$

Equação 3

Em que V^2 é representado por $V |V|$, pois a velocidade pode mudar de sentido durante a ocorrência do fenômeno porque o atrito se opõe ao movimento do elemento.

Introduzindo o termo de aceleração $\frac{dV}{dt} = V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t}$ e, como para as aplicações em regime variável de escoamento $V \frac{\partial V}{\partial x} \ll \frac{\partial V}{\partial t}$, este último poderá ser omitido da Equação 3.

Deste modo:

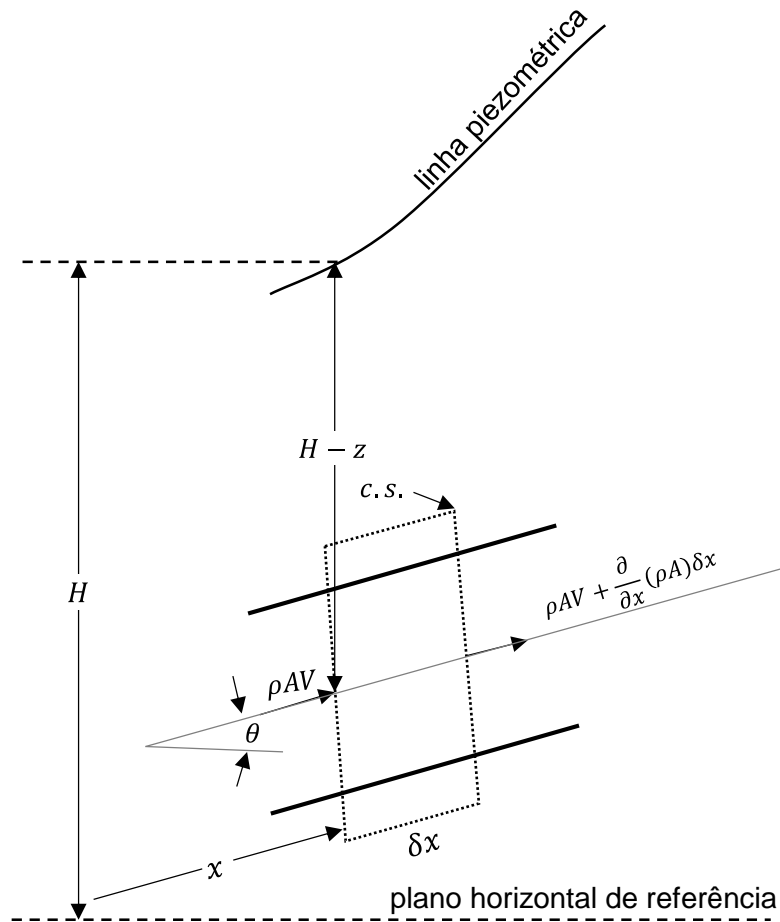
$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f V |V|}{2D} = 0$$

Equação 4 (Equação do movimento)

3.4.3.2. Equação da continuidade

Para obter a equação da continuidade foi considerado um volume de controle num instante de tempo t para aplicar a lei da conservação da massa. O volume de controle corresponde a um sistema isolado, cujo elemento líquido está situado entre duas seções fixas, transversais ao eixo da conduta e distante entre si Δx . Na Figura 6, está representado o volume de controle.

Figura 6 – Diagrama do sistema para dedução da equação da continuidade



Fonte: adaptado de Wylie e Streeter (1979, p. 20).

Analisando-a, pode-se perceber o princípio da conservação de massa ou da continuidade ao longo da tubulação, em que:

$$-\frac{\partial(\rho VA)}{\partial x} dx = \frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t}$$

Equação 5

Dividindo-se a Equação 5 pela massa ($\rho A dx$) e desenvolvendo ter-se-á:

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial A}{\partial t} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + AV \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$$

Equação 6

Rearranjando os termos da Equação 6 e dividindo por ρA , tem-se:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\frac{\partial V}{\partial x}$$

Equação 7

Neste caso, o primeiro termo da Equação 7 refere-se à elasticidade do tubo, o segundo à compressibilidade do líquido e o terceiro à variação do volume.

O módulo da compressibilidade volumétrica do fluido K é expressa por:

$$K = \frac{dp}{d\rho/\rho}$$

Equação 8

Esta equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{K} \frac{dp}{dt}$$

Equação 9

Sendo E o módulo de elasticidade do material do tubo, e a espessura da parede e D o seu diâmetro, têm-se a Equação 10:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{D}{eE} \frac{dp}{dt}$$

Equação 10

Substituindo a Equação 9 e a Equação 10 na Equação 7, tem-se a Equação 11:

$$\frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \left[\frac{KD}{Ee} + 1 \right] + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

Equação 11

A celeridade de um sistema é representada por:

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{Ee}k}}$$

Equação 12

Onde k é definido para cada caso e é função das características elásticas e do tipo de apoio da tubulação.

Assim substituindo a Equação 12 na Equação 11 tem-se a Equação 13:

$$\frac{1}{\rho a^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

Equação 13

E desenvolvendo $\frac{\partial p}{\partial t}$, tem-se:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

Equação 14 (Equação da continuidade)

3.4.4. Método das características

As soluções exatas do regime variável em pressão são de muito difícil ou, na maioria dos casos, até de impossível obtenção. Nesta conformidade há necessidade de utilizar métodos de integração aproximados, numéricos ou gráficos. Atualmente, o método de integração mais potente e versátil, para utilização do modelo elástico, é o método das características o qual permite, com relativa facilidade, a consideração de um número variável de seções de cálculo e dos efeitos do peso da água e uma modelação suficientemente aproximada das perdas de carga (ALMEIDA, 1982).

O método é uma forma particular de resolver duas equações diferenciais parciais (EDP) convertendo em quatro equações diferenciais ordinárias (EDO). O método possui melhor acuracidade entre os métodos de diferenças finitas, tem critérios de estabilidade bem definidos, as condições de contorno podem ser programadas bem facilmente, termos menos importantes podem ser omitidos e sistemas complexos podem ser modelados com facilidade. Sua conceituação e fundamentação exprimem bem a natureza real do escoamento transitório sob pressão e, historicamente, é a técnica mais utilizada nestes problemas (WYLIE; STREETER, 1979).

Alguns programas de análise de transitórios utilizam esse método como o Hammer (Bentley), WHAMO (*US army Corp of Engineers*), CTran (USP) e o Allievi (Universidade de Valência) o qual foi utilizado neste estudo.

Wylie e Streeter (1979) explicam que as equações do movimento e da continuidade são equações diferenciais parciais não lineares e possuem duas incógnitas. As variáveis dependentes são pressão, p , e velocidade média, V , que estão relacionadas em função de x e t . Essas equações podem ser transformadas em quatro equações diferenciais ordinárias pelo método das características.

As equações do movimento e da continuidade (desprezando os termos de pequena expressão na equação) são denominadas L_1 e L_2 respectivamente e combinadas por meio de um multiplicador desconhecido λ .

Deste modo, dois valores reais de λ podem ser encontrados, os quais fornecem duas equações em P e V que representam o mesmo fenômeno físico das equações originais (equação do movimento e da continuidade), podendo substituí-las para qualquer solução.

Pode haver uma grande simplificação se dois valores particulares de λ forem encontrados. Estes valores permitem a transformação das equações diferenciais parciais em equações ordinárias, como demonstrado a seguir, nas Equações 15 a 25.

$$L = L_1 + \lambda L_2 = \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \lambda \rho \alpha^2 \frac{\partial V}{\partial x} \right)_I + \lambda \left(\frac{1}{\rho \lambda} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right)_{II} + g \operatorname{sen} \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0$$

Equação 15

E rearranjando:

$$L = \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \lambda \rho \alpha^2 \frac{\partial V}{\partial x} \right)_I + \lambda \left(\frac{1}{\rho \lambda} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \right)_{II} + g \operatorname{sen} \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0$$

Equação 16

Para a parte I da Equação 16 fazendo-se $\lambda \rho \alpha^2 = \frac{dx}{dt}$, do cálculo este termo será a

derivada total de $\frac{dV}{dt}$:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial x} \lambda \rho \alpha^2 + \frac{\partial V}{\partial t}$$

Da mesma forma no termo II se fizer $\frac{1}{\rho \lambda} = \frac{dx}{dt}$, este termo será a derivada total de $\frac{dP}{dt}$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\rho \lambda} + \frac{\partial p}{\partial t}$$

Com isso então tem-se:

$$\frac{dx}{dt} = \lambda \rho \alpha^2 \text{ e } \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\rho \lambda}$$

Portanto:

$$\lambda \rho \alpha^2 = \frac{1}{\rho \lambda}$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{\rho^2 a^2}$$

E finalmente:

$$\lambda = \pm \frac{1}{\rho a}$$

Equação 17

Após isso a Equação 15 será:

$$L = \frac{dV}{dt} \mp \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \operatorname{sen} \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0$$

Equação 18

Desde que mantida a condição de $\frac{dx}{dt} = \lambda \rho a^2 = \frac{1}{\rho \lambda}$.

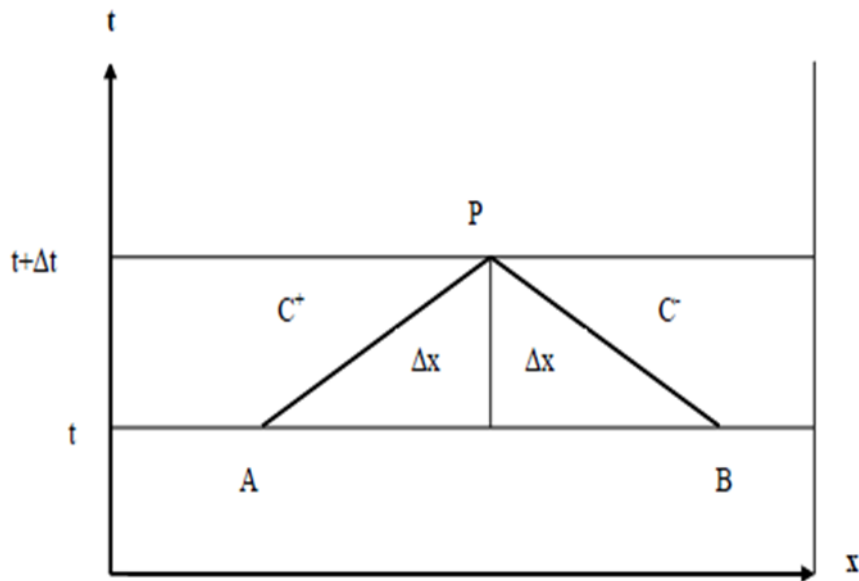
Onde então:

$$\frac{dx}{dt} = \mp \left(\frac{1}{\rho a} \rho a^2 \right) \rightarrow \frac{dx}{dt} = \mp a$$

Equação 19

Desta forma foram encontrados dois valores reais e distintos λ que convertem as duas equações diferenciais de derivadas parciais no par de equações diferenciais ordinárias sujeitas aos caminhos característicos $\frac{dx}{dt} = \mp a$. Pode-se então visualizar a solução da equação L em um diagrama x e t como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Malha de cálculo para o método das características



Fonte: Wylie e Streeter (1979, p.56).

Considera-se que o tubo começa na origem “0”, a montante, e termine em “L”, a jusante. Dessa forma “x” localiza um ponto no conduto e “t” o instante no qual as variáveis dependentes “V” e “p” devem ser determinadas.

Uma equação denominada C^+ torna-se válida ao longo da linha AP e no seu prolongamento, sendo a inclinação da linha AP, $\frac{dx}{dt} = \frac{1}{a}$, onde “a” é a velocidade de propagação de uma onda sonora pela tubulação.

Integrando a equação de “L” entre os pontos “A” e “P” e uma vez que $\rho a dt = dx$, a equação pode ser descrita sob a forma de diferenças finitas,

$$\rho a (V_P - V_A) + P_P - P_A + \rho g \text{sen} \theta \Delta x + \frac{\rho \Delta x f V_A |V_A|}{2D} = 0$$

Equação 20

Supondo θ constante de A até P e V constante igual ao valor conhecido em A no conduto, a equação C^- fica:

De maneira similar, agora para o caso de $-\lambda$ tem-se:

$$\rho a (V_P - V_B) + P_P - P_B + \rho g \text{sen} \theta \Delta x + \frac{\rho \Delta x f V_B |V_B|}{2D} = 0$$

Equação 21

Desta forma, podem-se resolver simultaneamente as equações 20 e 21 para se determinar P e V utilizando dados conhecidos em A e B.

Entretanto, tratando-se de tubulações, é mais conveniente se trabalhar com carga piezométrica (H) e vazão (Q), ao invés de pressão e velocidade. Além de realizar as transformações adequadas, onde $V=Q/A$, temos as equações C^+ e C^- , respectivamente:

$$C^+ \rightarrow H_P = H_A - \frac{a}{Ag}(Q_P - Q_A) - \frac{\Delta x f Q_A |Q_A|}{2gDA^2}$$

Equação 22

$$C^- \rightarrow H_P = H_B - \frac{a}{Ag}(Q_P - Q_B) - \frac{\Delta x f Q_B |Q_B|}{2gDA^2}$$

Equação 23

Para simplificar as equações faz-se então:

$$B = \frac{a}{gA} \text{ e } R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2}$$

Portanto:

$$C^+ \rightarrow H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_A |Q_A|$$

Equação 24

$$C^- \rightarrow H_P = H_B - B(Q_P - Q_B) - RQ_B |Q_B|$$

Equação 25

3.4.4.1 Condição de Contorno

A solução das equações do regime transitório depende do conhecimento das condições iniciais do regime de escoamento e das condições de contorno. O termo condição de contorno refere-se à condição na extremidade de cada tubulação. Pode ser um extremo de um sistema num reservatório, válvula etc. ou a conexão de uma tubulação a outra a um elemento de tipo diferente, por exemplo, uma bomba ou reservatório de acumulação. Para qualquer das muitas opções na extremidade de jusante de um conduto, a equação ao longo da característica C^+ é usada para interferir na condição de contorno escolhida (ALMEIDA, 1982; FRANÇA, 2006).

As condições de contorno têm de ser expressas em equações algébricas ou diferenciais cuja resolução, em conjunto com a das equações indefinidas, constitui o objetivo da análise matemática do regime variável sob pressão.

3.4.5. Proteção contra transitório hidráulico

Embora existam muitas opções de equipamentos utilizados para proteger o sistema contra transitórios hidráulicos, o estudo e dimensionamento do sistema e a correta operação podem atenuar as variações de pressão a níveis aceitáveis sem que para isso seja necessários equipamentos específicos. Tratam-se das medidas de ação diretas, assim denominadas por Thorley (2004), que são baseadas, fundamentalmente, na intervenção sobre as causas associadas à variação das condições de escoamento.

Entre as ações diretas para proteger o sistema contra transitório destaca-se o cálculo do tempo de abertura e fechamento de válvulas e hidrantes (quanto mais extensa a tubulação, mais lenta deverá ser a operação), controle das partidas e desligamentos das bombas, dimensionamento das tubulações de forma a evitar elevadas velocidades, mudanças nos traçados das tubulações etc. (THORLEY, 2004; AMOAH; ELBASHIR, 2007; MENDES, 2011).

No entanto, se os transitórios não puderem ser prevenidos, dispositivos de proteção específicos podem ser necessários. Os mecanismos que envolvem a transferência de energia, para o interior ou para o exterior de um sistema elevatório, integram a categoria dos métodos de ação indireta (THORLEY, 2004; AMOAH; ELBASHIR, 2007).

O principal objetivo dos dispositivos de proteção contra transitório hidráulico é atenuar as variações de pressão, motivadas pelo golpe de aríete, em determinados trechos do tubo. No regime variável, a diminuição da variação de pressão tem de corresponder, na mesma seção do tubo, a uma variação da vazão mais lenta. Desta forma, o princípio básico da proteção contra o golpe de aríete é o de aumentar o tempo de anulação da vazão nas seções do tubo após a perturbação do sistema (ALMEIDA, 1982).

Os objetivos dos dispositivos de proteção em um sistema podem ter um dos seguintes objetivos específicos (ALMEIDA, 1982):

- a. Diminuição da depressão máxima;
- b. Diminuição da sobrepressão máxima;
- c. Diminuição da depressão e sobrepressão máximas.

Existem diversos dispositivos que são concebidos para suavizar as transições entre estados de escoamento dos sistemas que podem ser utilizados isoladamente ou em conjunto. A seguir são apresentados alguns mecanismo e dispositivos utilizados para intervenção sobre as causas associadas à variação das condições de escoamento e para proteção dos sistemas quando da ocorrência de golpe de aríete.

3.4.5.1 Mudança no traçado e resistência mecânica da tubulação

Deve-se dar especial atenção a possibilidade de mudança no traçado e material da tubulação quando o sistema se encontra em fase de projeto ou ampliação. Quando o caminhamento da tubulação passa por vales ou picos muito acentuados esses pontos estarão mais suscetíveis à ocorrência de pressões muito elevadas (nos vales) ou cavitação e rotura da veia líquida (nos picos) durante os eventos transitórios.

O estudo do traçado da tubulação e os estudos das envoltórias de pressões máximas e mínimas, que devem ocorrer ainda nos estudos de alternativas, são um fator relevante no momento de decisão da alternativa a ser implantada.

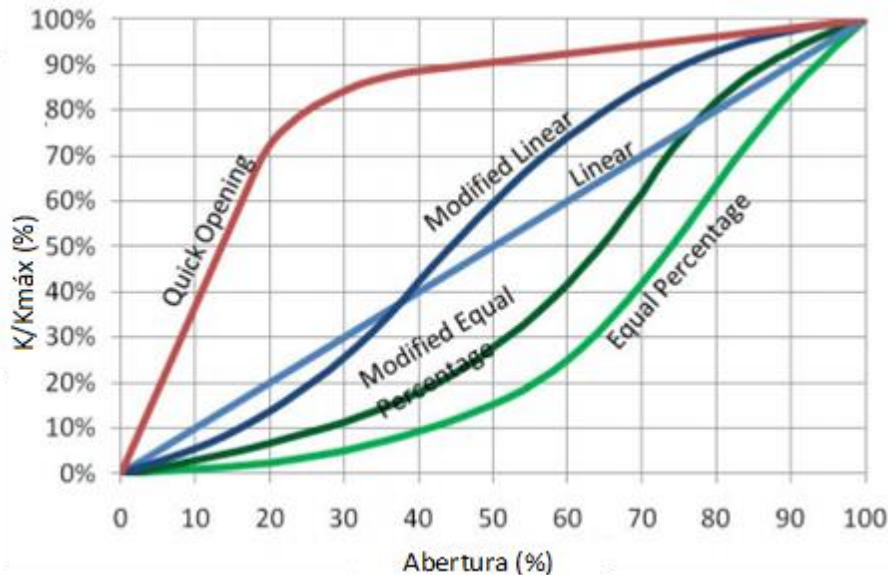
Quando a mudança do traçado é inviável para prevenção de sobrepressões e depressões no sistema, pode ser avaliada a instalação de tubos e acessórios com maior resistência mecânica. No entanto, deve-se atentar para, quando se trata de redes de distribuição de água tratada, que, independente da resistência do tubo ao colapso por esmagamento, pressões internas não devem ser inferiores às pressões atmosféricas devido à possibilidade de infiltração de contaminantes e comprometimento da potabilidade da água.

3.4.5.2 Manobra de válvulas

Quanto ao controle do evento transitório modificando os procedimentos de manobra de válvulas, chama-se atenção para a curva característica das válvulas de regulação que variará conforme o modelo e fabricante. Na Figura 8, estão apresentadas curvas típicas de diferentes tipos de válvulas de regulação. Observa-se que, a depender da

válvula, apenas depois que se evoluiu cerca de 70% no fechamento é que se obtêm as maiores reduções de vazão.

Figura 8 – Curvas típicas de válvulas de regulação



Fonte: Sines (2009, p. 1).

Quando a válvula tem curva semelhante à curva da válvula modelo “Quick Openning” da Figura 8, deve-se ter especial cuidado nas manobras de abertura e fechamento. É justamente quando a válvula já se encontra cerca de dois terços fechada, que, devido à elevada perda de carga singular e conseqüente dissipação de energia por diversas formas, o ruído e a vibração geralmente provocados induzem o operador a acelerar o fechamento. Fazer um fechamento rápido, especialmente no terço final da manobra, em válvulas com esse comportamento, provocará transitórios mais intensos devido a mais rápida anulação da vazão.

Logo, não basta estabelecer tempos de fechamento para as válvulas, mas estudar a curva das válvulas e capacitar os operadores ou programar as válvulas motorizadas para que a manobra ocorra adequadamente.

3.4.5.3 Volante de inércia

Os volantes de inércia são dispositivos de proteção contra transiente hidráulico para sistemas dotados de estações elevatórias e têm o objetivo de controlar pressões mínimas, não controlando suficientemente a envoltória de pressões máximas. São acoplados ao eixo da bomba para aumentar o momento de inércia do conjunto girante,

e diminuir a taxa de variação de rotação do conjunto, que está associada à queda de pressão após o desligamento de uma bomba (TSUTIYA, 2006).

O prolongamento do período de rotação da bomba e do motor, devido ao aumento do momento de inércia, permite prosseguir com o fornecimento de líquido à tubulação de recalque, atenuando o efeito de desaceleração da coluna líquida a jusante e, com isso, prevenir a ocorrência de situações de vácuo na extensão inicial do tubo (MENDES, 2011).

Esse dispositivo não é recomendado para o controle de pressão em sistemas extensos (AMOA; ELBASHIR, 2007) e para seu dimensionamento deve-se ter cuidado com inconvenientes de natureza elétrica e mecânica.

3.4.5.4 Variação de rotação nos conjuntos motor-bomba

A partida e a parada controlada da bomba, realizada com auxílio de dispositivos elétricos como chaves *soft-starter* e conversores de frequência, permitem que o conjunto elevatório entre e saia de operação de forma lenta, com um período pré-estabelecido entre a rotação zero e a rotação nominal do motor. Esses dispositivos funcionam como um mecanismo de proteção contra os transitórios gerados pelas partidas e paradas bruscas dos conjuntos elevatórios, reduzindo as variações rápidas de velocidade nas tubulações.

O funcionamento destes dispositivos está condicionado à disponibilidade de energia elétrica e, no caso de corte de fornecimento de energia, seu funcionamento também é interrompido. Os conversores de frequência não protegem o sistema contra outros tipos de perturbações como rompimento de tubos e manobras de válvulas (SILVA, 2006).

3.4.5.5 Válvula de Retenção

As válvulas de retenção têm por finalidade impedir o escoamento em sentido contrário da água, na bomba, após o seu desligamento, evitando que fluxo reverso gire a bomba ao contrário e podem ser instaladas juntamente com outros dispositivos como o *by pass*. As válvulas de retenção, teoricamente ideais para instalação num sistema

elevatório, deverão garantir um tempo de fechamento do obturador tão rápido quanto possível, logo que a vazão se anule (MENDES, 2011).

Situação menos usual, mas possível, é a utilização de válvulas de retenção como meio de proteção contra o golpe de aríete, sendo instaladas ao longo da tubulação de recalque, em particular, nas regiões passíveis de ocorrência de rotura da veia líquida (SHARP; SHARP, 1996). Em se tratando de redes de distribuição composta por anéis (malhada), essa opção está descartada uma vez que, mesmo em regime normal de operação, a depender do consumo dos usuários, a vazão poderá ocorrer em sentidos diferentes no anel.

Outra vantagem da utilização dessa válvula é que ela evita que a tubulação esvazie, prevenindo maiores problemas com transitórios no reenchimento da tubulação (BOULOS *et al.*, 2005).

3.4.5.6 *By pass*

O *by pass* é composto por trechos curtos de tubulação instalados entre o reservatório de montante e a tubulação de recalque a jusante da válvula de retenção que protege os grupos motor-bomba e são equipados com válvulas de retenção que impedem o retorno do líquido para o interior do reservatório de montante. Esse mecanismo cria um circuito alternativo entre o reservatório (ou poço de sucção) e a tubulação de recalque e permite a alimentação desta tubulação com uma vazão suplementar enquanto a cota piezométrica instantânea na seção de jusante do *by pass* for inferior à cota piezométrica da seção de montante (ALMEIDA, 1982).

Em sistemas que envolvem grandes alturas de elevação, o tempo que a linha piezométrica demora a cruzar o nível do reservatório de montante após a interrupção do funcionamento dos conjuntos motor-bomba, pode ser demasiado longo, retardando o início da alimentação da conduta principal através do *by pass*. Deste modo, este mecanismo não é eficaz na proteção de instalações com grande desnível entre o poço de sucção e o reservatório de chegada da tubulação de recalque, principalmente nos pontos altos e intermediários desta tubulação (MENDES, 2011).

O *by pass* não permite a proteção direta do sistema contra os efeitos das sobrepressões e, para que o seu funcionamento seja adequado, é necessário que o reservatório de montante apresente dimensões consideráveis e que o nível de água

em seu interior tenha uma cota superior à do eixo dos grupos motor-bomba (LOPES, 2016).

3.4.5.7 *Válvula de alívio*

A válvula de descarga automática ou válvula de alívio é um dispositivo que permite reduzir as variações de velocidade do escoamento na tubulação e as correspondentes elevações de pressão através da rápida descarga de água para o exterior do tubo. Os tipos mais usuais dessa válvula iniciam a abertura quando a pressão no tubo atinge um valor limite inferior e atingem a plena abertura quando a altura piezométrica atingir o valor limite superior (ALMEIDA, 1982).

Este dispositivo não oferece qualquer proteção contra os efeitos das depressões, não evitando, portanto, a ocorrência de fenômenos de cavitação e rotura da veia líquida. A extensão do efeito de proteção desse dispositivo é bem limitada e, por isso, ele deve ser colocado nos pontos de maior susceptibilidade para ocorrência de sobrepressões elevadas. Geralmente, na seção de jusante da válvula de retenção do grupo motor-bomba e nos pontos baixos da tubulação de recalque. A sua eficácia é tanto maior, quanto maior for a capacidade de vazão do dispositivo (MENDES, 2011).

Estas válvulas apresentam alguns inconvenientes, entre os quais a necessidade de um sistema para drenagem da água eliminada, além da perda do volume descarregado.

3.4.5.8 *Válvulas antecipadoras de ondas*

As válvulas antecipadoras de ondas mais comuns são construídas utilizando o corpo básico de uma válvula redutora de pressão, com modificações no circuito piloto. As mudanças de pressões acionam o atuador, no sentido de abertura ou fechamento, sempre que uma pressão na tubulação atinge valores pré-estabelecidos no circuito piloto da válvula. A válvula abre no início da onda de pressão negativa facultando a entrada de ar e permite uma descarga de água para a atmosfera quando submetida a pressões elevadas (SILVA, 2006).

Válvulas antecipadoras de ondas e de alívio de pressão excessiva podem ser operadas hidráulica ou eletricamente. A válvula que opera hidráulicamente, ao sentir

a pressão da linha, abre em resposta à pressão associada à parada repentina da bomba ou, quando operada eletricamente, abre imediatamente na inativação da bomba (BERMAD, 2016). A utilização desse dispositivo é relativamente baixa em comparação com o uso dos reservatórios hidropneumáticos, tanques alimentadores unidirecionais e chaminés de equilíbrio (SILVA, 2006).

3.4.5.9 Válvulas de admissão e saída de ar

O funcionamento das válvulas de admissão e saída de ar consiste em permitir a entrada de ar na tubulação quando as pressões no ponto forem inferiores as pressões atmosféricas ou quando a tubulação está sendo esvaziada evitando que pressões negativas ocorram dentro do tubo. Quando a pressão no sistema voltar a subir, a válvula permite a expulsão do ar com velocidade limitada, impedido o encontro de colunas de água nos bolsões com velocidades muito altas. As válvulas de admissão e saída de ar são geralmente instaladas em pontos de cotas elevadas para evitar baixas pressões e cavitação (TSUTIYA, 2006).

Os pontos altos de um sistema de adução, embora não exclusivamente, são muito sensíveis às depressões provocadas por transitórios hidráulicos. Dadas as consequências descritas no subitem 3.4.1, na página 47 deste trabalho, é muito importante limitar as depressões, sobretudo no caso de serem utilizados tubos de materiais considerados flexíveis como o aço, o poliéster reforçado com fibra de vidro e os plásticos (polietileno e policloreto de Vinila (PVC), fundamentalmente). Neste caso, com função de dispositivo de proteção contra o transitório hidráulico, também se poderá recorrer às ventosas (SANTOS, 2014).

São diversos os tipos de válvulas de ar com denominações que podem variar entre regiões e fornecedores. Algumas apenas admitem ou expulsam ar (unidirecionais), outras acumulam ambas funções (válvulas de duplo efeito). Há ainda as válvulas de pequenos orifícios ou purgadores cuja função é expulsar pequenas quantidades de ar, e válvulas de triplo efeito que acumulam as funções da válvula de duplo efeito e purgadores, entre outras. As válvulas podem ter diâmetro de admissão e saída de ar distintos e uma deficiente seleção do diâmetro pode conduzir a uma expulsão de ar demasiadamente rápida e, conseqüentemente, a uma sobrepressão excessiva devido ao reencontro das colunas de água.

Em redes de distribuição deve-se ter cuidado com o uso de válvulas de admissão e saída de ar devido à possibilidade de contaminação do sistema. O dispositivo deverá ser instalado de forma que, quando a válvula estiver aberta, não haja risco de aspirar material contaminado, especialmente quando a unidade estiver situada em áreas alagadiças, sujeitas a inundações, ou o seu abrigo possibilite o acúmulo de resíduos e detritos.

3.4.5.10 *Tanque alimentador unidirecional*

O Tanque Alimentador Unidirecional (TAU) é utilizado na prevenção de baixas pressões e separação da coluna líquida pela admissão de água na tubulação quando a pressão atinge valores inferiores à sua cota piezométrica. É um reservatório de água munido de válvula de retenção na ligação com a tubulação. Essa válvula permite a passagem da água quando o tubo está em depressão e impede a entrada da água para o reservatório que poderá ser reenchido através de um *by pass* munido de válvula especial que fecha logo que o plano de água atinja, no reservatório, um nível pré-estabelecido. É muito utilizado em pontos altos convexos da linha de recalque (ALMEIDA, 1982).

Os TAU podem ser instalados em qualquer ponto do sistema, mas quanto mais próximo da linha piezométrica correspondente ao regime permanente, maior será a rapidez na resposta aos efeitos transitórios. Estes dispositivos são, normalmente, localizados nos pontos mais elevados, possuem a desvantagem de não atenuar pressões máximas e há dificuldade na proteção de seções afastadas do dispositivo (ALMEIDA, 1982).

Além de implicarem na instalação de acessórios suplementares e da dificuldade em proteger seções afastadas do seu ponto de inserção, os TAU apresentam, como inconveniente, carecer, quando o regime transitório for resultante da saída de serviço da bomba, que seja aguardado algum tempo para tornar a dar partida no conjunto elevatório, para garantir que o tanque seja completamente enchido novamente (MENDES, 2011).

Estes tanques podem ser abertos ou fechados e, tratando-se de rede de distribuição de água tratada, deve-se ter especial cuidado com dispositivos de proteção com superfície aberta para atmosfera devido ao risco de contaminação. A depender das

características da contaminação, o cloro residual pode não ser o recurso adequado para devolver à água as características de potabilidade ou, ainda, estar em concentração insuficiente para inativar possíveis patógenos.

3.4.5.11 Reservatório de ar comprimido ou hidropneumático

Os Reservatórios Hidropneumáticos (RHO) funcionam com uma câmara estanque contendo água e ar comprimido e geralmente estão localizados próximos às estações elevatórias (EE). Quando dimensionado adequadamente, este dispositivo pode aliviar tanto pressões positivas quanto negativas (ALMEIDA, 1982).

Em regime permanente, a massa de água armazenada no interior do RHO encontra-se em equilíbrio, sob a ação da pressão do ar que ocupa a zona superior do dispositivo e a pressão na seção do tubo onde se estabelece a ligação. Este equilíbrio é rompido devido às variações de pressão, decorrentes de um regime transitório. Com a queda de pressão, logo após a saída de serviço da bomba, por exemplo, parte do volume de água armazenado no reservatório é escoado para o tubo, reduzindo o tempo de variação da vazão. Na fase posterior, quando o sentido de escoamento é invertido e a pressão aumenta, o reservatório irá absorver, total ou parcialmente, a vazão do tubo (esta situação também se verifica nos instantes após o arranque do grupo motor-bomba). O ar funciona, então, como uma mola, que “empurra” a água em situações de subpressão, alimentando o tubo com os volumes em falta e recebendo os volumes em excesso em situações de sobrepressão (MENDES, 2011; LOPES, 2016).

De forma a obter volumes menores dos RHO e a reduzir os efeitos das variações máximas de pressão, podem ser introduzidas perdas de carga adicionais na tubulação de ligação entre o RHO e a tubulação de recalque. Essas perdas de carga devem ser superiores na entrada de água no RHO (situação de sobrepressão) em comparação à saída (situação de subpressão), para a mesma vazão. Para isso pode-se usar acessórios que apresentam a particularidade de produzir uma perda de carga assimétrica, ou seja, maior quando o escoamento se processa em um sentido e menor no sentido inverso (MENDES, 2011; LOPES, 2016).

Apesar de este sistema ser mais custoso e sua manutenção mais complexa, em muitos casos convém sua utilização já que corresponde a um dos sistemas mais efetivos no controle dos transitórios (ALMEIDA, 1982). O avanço das tecnologias tem

ajudado a superar muitas dificuldades conhecidas a respeito da manutenção dos RHO. Os RHO com membrana (bexiga), por exemplo, diferenciam-se dos reservatórios hidropneumáticos convencionais pela utilização de uma bexiga de material flexível montada dentro do reservatório. A função da bexiga é isolar o líquido do ar comprimido e, desta maneira, não é necessária a utilização de compressores auxiliares para a reposição contínua do ar comprimido que se dissolve na água (ROSA, 2009). O resultado é a minimização dos custos do projeto pela eliminação dos compressores de ar comprimido e redução dos custos de manutenção e operação.

3.4.5.12 Chaminé de equilíbrio

O funcionamento das chaminés de equilíbrio consiste na retirada de água do sistema durante as sobrepressões e adição de água ao sistema durante as subpressões fazendo com que as ondas de pressão sofram reflexões já na chaminé, e, uma manobra que, sem a chaminé, seria uma manobra rápida, pode se transformar em uma manobra lenta com a sua presença. Entretanto, as chaminés de equilíbrio possuem uma desvantagem: como o seu nível d'água atinge a cota piezométrica de regime permanente no local, seu posicionamento fica limitado às cotas mais elevadas nas tubulações para que seu custo não se torne excessivo (TSUTIYA, 2006; AMOAH; ELBASHIR, 2007).

A variação da vazão no trecho do tubo entre a chaminé e a condição de contorno a jusante, é muito mais gradual do que se verifica no trecho do tubo compreendido entre as bombas e a chaminé. Esta atenuação é motivada pela variação do plano de água na chaminé, estabelecendo-se, entre esta e a condição de contorno de jusante, um escoamento gradualmente variável, do tipo oscilação de massa, de baixa frequência, no qual os efeitos elásticos são, em geral, desprezíveis (ALMEIDA, 1982).

Por esse dispositivo ter a superfície aberta para a atmosfera, cabe-lhe a mesma ressalva feita para o TAU acerca do risco de comprometer a qualidade da água a ser distribuída para a população. Além disso, as chaminés de equilíbrio, normalmente, envolvem estruturas de grande dimensão e constituem um impacto esteticamente desfavorável, especialmente quando se trata de centros urbanos.

3.4.5.13 *Tubo atenuador de celeridade*

O tubo atenuador de celeridade é um dispositivo constituído por um pequeno tubo flexível com ar comprimido que é introduzido em trechos preestabelecidos da tubulação “rígida” (denomina-se tubulação “rígida” a tubulação que irá conduzir o fluido e que possui elasticidade muito inferior à elasticidade do tubo atenuador de celeridade). Este tubo elástico com ar comprimido, o qual periodicamente passará por manutenção com auxílio, inclusive, de um compressor móvel, provocará mudanças nas características do meio fluido, de forma que haja uma redução no coeficiente de elasticidade volumétrica da mistura (água, ar, polímero) com efeito direto na redução da celeridade da onda. Como a variação da carga é diretamente proporcional à celeridade da onda “a”, uma redução no valor da celeridade provocará redução imediata no valor da variação da carga (SILVA, 2006).

Estudos desenvolvidos por Silva (2006) demonstraram que o atenuador de celeridade funciona com a mesma precisão dos RHO nas condições estabelecidas para o estudo. O pesquisador também alega que a questão amplamente divulgada sobre as dificuldades de manutenção e instalação desse dispositivo, tem sido superada com o avanço das tecnologias nas áreas químicas e metalúrgicas. O autor não traz relatos do uso desse dispositivo em redes de distribuição de água.

3.5 TRANSITÓRIOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Embora as redes de distribuição de água existam há centenas de anos, o regime transitório não tem sido detalhadamente considerado nos projetos. As redes hidráulicas eram alimentadas por gravidade por meio de grandes reservatórios e as condições “quase permanentes” prevaleciam. Além disso, os diâmetros dos tubos e os comprimentos das linhas eram pequenos, bem como as pressões baixas. O foco então era prever uma distribuição adequada do fluxo sob determinadas condições de demanda. Devido a isso, há uma ideia generalizada de que condições transitórias são intrinsecamente menos severas em redes de distribuição (KARNEY; McINNIS, 1990; ARAÚJO, 2003).

Modernos sistemas de distribuição de água, pelo contrário, são alimentados por numerosas estações de bombeamento descarregando diretamente no sistema e

distúrbios de fluxo são comuns. Sejam em projetos ou pesquisas, as condições transitórias não devem ser excluídas. Uma boa análise implica em investigar o fenômeno transitório sob uma larga variedade de condições de fluxo, operações e combinações de mecanismos e componentes do sistema para que, então, as características da tubulação sejam racionalmente selecionadas, bem como os dispositivos de controle de pressão e o estabelecimento das regras de operação do sistema. Os benefícios de tal análise incluem uma melhora no modelo, uma operação mais econômica e possivelmente um custo mais baixo (KARNEY; McINNIS, 1990; ARAÚJO, 2003).

Kwon (2007), utilizando o método das características, realizou várias simulações de transitórios hidráulicos em redes de distribuição, mostrou como as oscilações rápidas de demandas provocam oscilações de pressão, fluxo reverso, pressões negativas e como esse fenômeno pode trazer consequências ruins para o sistema e para os usuários. Sharp (1981 *apud* KARNEY, 1984) acrescenta, no entanto, que, se as mudanças nas condições de vazão ocorrem lentamente, é possível ir, gradualmente, de uma condição de regime permanente para outro regime permanente, sem grandes oscilações de pressão ou vazão. A magnitude dos picos de pressão depende de detalhes da configuração do sistema e das condições específicas que iniciaram os transitórios.

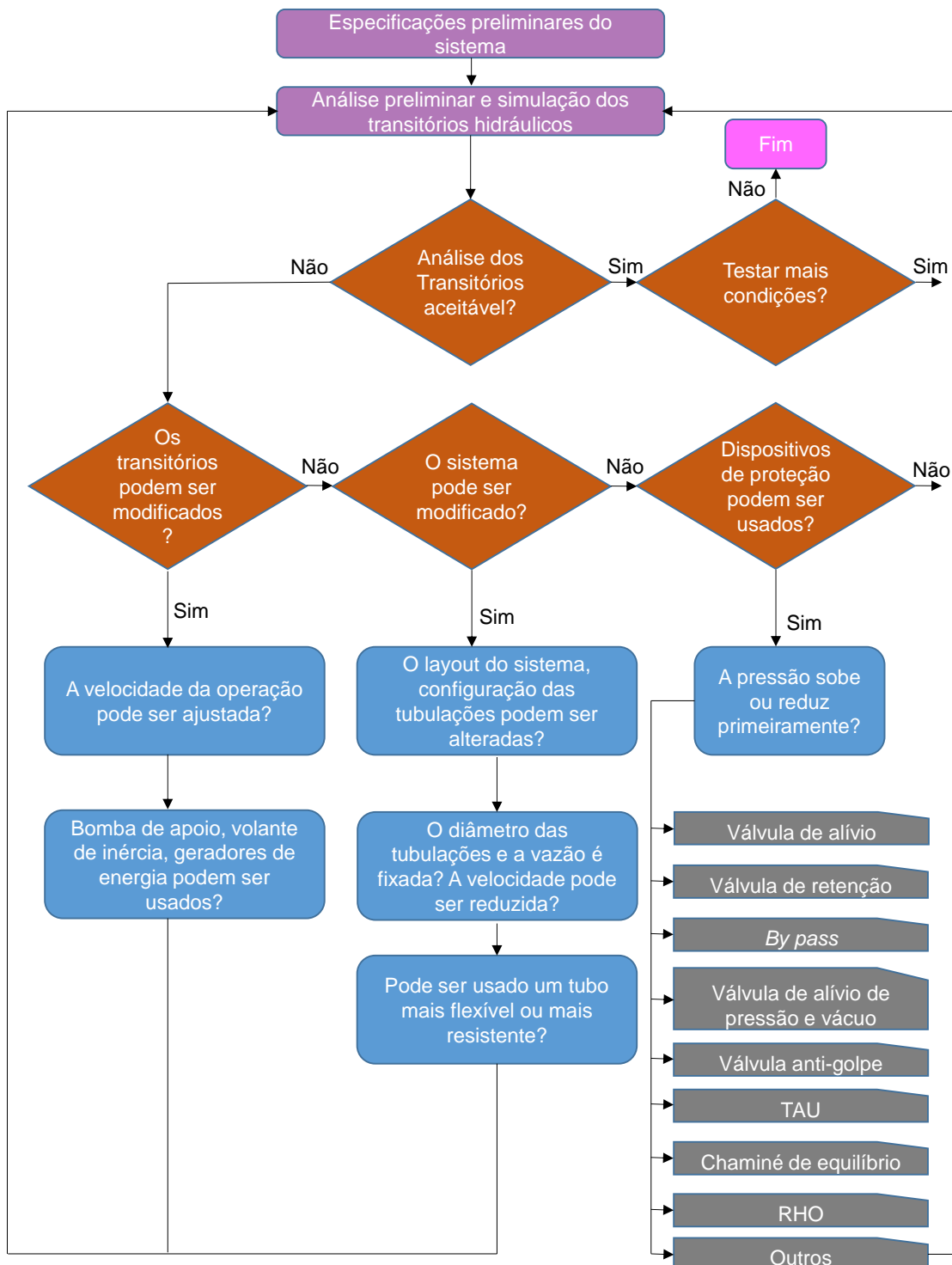
O estudo dos transitórios em redes de distribuição, por requerer um esforço matemático e ser de difícil análise, foi durante algum tempo negligenciado. Dois fatores impediram estudos mais detalhados sobre o assunto. Primeiramente, os pesquisadores, vez por outra, subestimavam a ocorrência e a severidade dos transitórios em redes, pois eles acreditavam que o próprio sistema reduziria o impacto do efeito transitório. Entretanto, há pouca base racional para essa atitude, e, em alguns casos, a posição contrária é verdadeira (KARNEY; McINNIS, 1990). Segundo, há uma grande dificuldade e um alto custo na construção de modelos em regime não permanente, além da estafante tarefa de se conseguir dados de campo para alimentação do modelo (ARAÚJO, 2003).

Se os objetivos são: selecionar racionalmente o diâmetro e a resistência requerida do tubo; alocar e dimensionar adequadamente os dispositivos de proteção contra transitório; e projetar as regras operacionais do sistema adequadamente, uma análise confiável dos fenômenos transitórios na rede de distribuição é essencial.

3.5.1 Análise dos eventos transitórios em redes de distribuição

Boulos *et al.* (2005) propôs um fluxograma para tratar os transitórios hidráulicos em sistemas de distribuição de água, que posteriormente foi ampliado por Jung e Karney (2009). O fluxograma está apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma para análise dos transitórios hidráulicos



Fonte: adaptado de Boulos *et al.* (2005); Jung e Karney (2009).

Boulos *et al* (2005) explicam que o procedimento de análise dos transitórios hidráulicos em sistemas de distribuição de água começa na parte superior do diagrama com a determinação da especificação preliminar e configuração do sistema. Esses procedimentos iniciais nunca devem ser negligenciados porque pode ter uma influência notavelmente forte em todas as outras etapas. Uma vez que este sistema tenha sido especificado, a simulação computacional preliminar pode ser realizada para estabelecer as características da resposta do sistema às perturbações. Inicialmente, é provável que as perturbações sejam oriundas de operações súbitas de válvulas, partidas ou paradas de bombas ou falhas de energia, mas outras combinações de interações do sistema podem ser investigadas também.

Uma vez que a resposta transitória preliminar foi determinada, é necessário compará-la com algum critério de desempenho ou com a resposta transitória desejável (ou admissível) para o sistema. O que isso significa na prática, às vezes, é desafiador e pode exigir alguma experiência e uma série de interações entre gerentes, operadores e projetistas. Contudo o padrão mínimo para a concepção transitória é geralmente estabelecido de forma a garantir que o sistema nunca experimente pressões mais elevadas do que pode suportar rotineiramente ou pressões negativas (BOULOS *et al.*, 2005).

Há momentos em que essa especificação precisa ser expandida, possivelmente para considerar velocidades mais complexas. Se a resposta transitória for determinada como sendo aceitável, então deve ser determinado se outras cargas prováveis ou eventos precisam ser considerados. Assim, seguindo a linha horizontal superior do fluxograma, apenas uma vez que a resposta transitória a todas as cargas esperadas tenha sido determinada como aceitável está estabelecida uma estratégia de proteção adequada (BOULOS *et al.*, 2005).

Se a resposta transitória a uma ou a todas as avaliações é inaceitável, é necessária uma modificação do sistema e as modificações possíveis são variadas. As duas primeiras considerações apresentadas no fluxograma são, muitas vezes, negligenciadas, mas, às vezes, desempenham um papel importante na determinação do *design* final. São as estratégias de *ação direta* que tentam influenciar o comportamento das causas primárias de mudanças de fluxo, tais como operações de válvulas ou bombas. O conjunto de opções de dispositivos para proteção contra

transitórios é geralmente mais considerado com o intuito de tentar controlar o transitório, uma vez que tenha sido criado (BOULOS *et al.*, 2005).

Como os eventos transitórios ocorrem sempre que as condições do sistema mudam, a primeira questão na abordagem de *controle direto* é determinar se a taxa na qual a perturbação é criada pode ser mais suave. Isto poderia ser conseguido através do treinamento do operador ou possivelmente bloqueando um mecanismo de liberação ou parada rápida no sistema. Por exemplo, adotar medidas para garantir que um conjunto de válvulas seja operado convenientemente, o que, inclusive, é uma das medidas de controle menos custosa. Outras ações similares incluem aumento da inércia da bomba (adição de um volante em operação de bomba prolongada), prevenção de parada de todas as bombas (colocando uma bomba ligada a um gerador) entre outras medidas. Estes são os tipos de mudanças imaginadas pela pergunta: "Os transitórios podem ser modificados?" (BOULOS *et al.*, 2005).

Outras ações diretas incluem reforço e mudança do traçado dos tubos (quando o projeto se encontra em elaboração), utilização de tubos de diâmetro maior, alteração do material do tubo ou aplicação de alterações estratégicas na topologia do tubo. Estes são os tipos de alterações a serem consideradas sob o título "O sistema pode ser modificado?" (BOULOS *et al.*, 2005).

Como qualquer uma dessas alterações irá alterar tanto o sistema como sua resposta transitória, após cada mudança, uma nova simulação deve ser realizada. Essas mudanças são muitas vezes caras, mas, se feitas no início da elaboração do projeto das redes, elas podem fazer parte de uma abordagem eficaz e barata de controle de pressões transitórias (BOULOS *et al.*, 2005).

A etapa final no fluxograma considera se os dispositivos de controle de sobrepessão e depressão devem ser empregados. Tais dispositivos de proteção controlam a pressão através da retirada ou inserção do fluido na rede de modo a reduzir a taxa de mudanças de fluxo. Em geral, o processo é iterativo à medida que cada mudança ajusta a resposta do sistema, e o *design* geral converge gradualmente para uma resposta aceitável (BOULOS *et al.*, 2005).

As soluções propostas por Boulos *et al.* (2005) para o caso de a análise dos transitórios apresentar oscilações de pressão inaceitáveis podem ser resumidas em três ações que devem ser realizadas, de preferência, sequencialmente:

1. Controlar a causa do evento transitório, como modificar os procedimentos de manobra de válvulas e/ou reduzir seu tempo de fechamento;
2. Modificar o sistema, incluindo a troca do material ou do traçado da tubulação;
3. Incluir dispositivos de proteção contra transitório hidráulico no sistema.

Karney e McInnis (1990) enfatizam que os detalhes de como um sistema hidráulico é modelado ou representado pode ter grande impacto no resultado dos transitórios analisados e ressaltam que, em algumas tubulações, a pressão transitória máxima é bem sensível à velocidade inicial em regime permanente assumida.

Para Almeida (1982), a análise do transitório deve ser feita para as condições normais de operação e ainda para as condições de emergência. São consideradas condições de emergência as que resultam de funcionamento inadequado dos dispositivos de proteção contra o golpe de aríete, a inoperância das ventosas considerada cumulativamente com o funcionamento inadequado de qualquer dos outros dispositivos, rotura localizada de uma tubulação entre outros.

Almeida (1982) recomenda ainda que, para análise do transitório, deve ser considerada como vazão de dimensionamento a vazão máxima previsível. No caso de sistemas elevatórios que possuem mais de um grupo eletrobomba, o projetista deverá selecionar as condições de operação mais desfavoráveis de acordo com as características do sistema.

Como os componentes do sistema estão fortemente relacionados, uma análise econômica detalhada pode ser complexa de se obter. No entanto, esta análise deve ser considerada em conjunto com o ciclo de vida e otimização do sistema porque economizar nos custos de investimento pode fazer com que os custos de operação e manutenção excedam o valor líquido presente dos custos iniciais (POTHOF; KARNEY, 2012).

3.5.2 Principais dificuldades e erros na análise dos transitórios hidráulicos em redes de distribuição

A primeira dificuldade que se apresenta no desenvolvimento dos estudos de transitórios hidráulicos em redes de distribuição, especialmente em sistemas implantados há décadas e que vêm sendo ampliados sem suporte de projetos (situação muito observada em cidades brasileiras), é a ausência de cadastro das

redes ou cadastros precários de baixa confiabilidade. Apesar do cadastro pouco confiável, outra grande dificuldade pode ser conseguir dados de campo para alimentação do modelo.

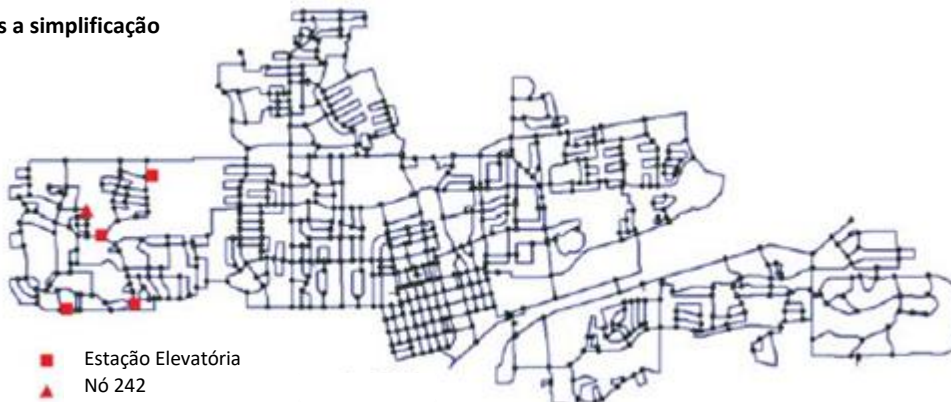
Quando há cadastro do sistema, é usual a simplificação da rede existente, dado o alto custo na construção de modelos de grandes dimensões. Nesse aspecto, Jung, Boulos e Wood (2007) ressaltam as armadilhas que a simplificação de sistemas de distribuição para análise dos transitórios hidráulicos pode significar. O uso de tubulações equivalente para representar duas tubulações em paralelo que, na análise em regime permanente, não comprometeria os resultados, no estudo de transitórios, pode apontar resultados totalmente distintos. O mesmo ocorre com a remoção de trechos considerados de pouca importância, ou concentração de fluxo de saída do nó em apenas uma extremidade. Na Figura 10 está um exemplo do antes e depois da simplificação de uma rede para análise dos transitórios e na Figura 11 os resultados dos transitórios avaliados em ambos os casos no nó 242 após a parada das estações elevatórias, 5 segundos após o início da simulação.

Figura 10 – Rede de distribuição antes e após simplificação

Antes da simplificação

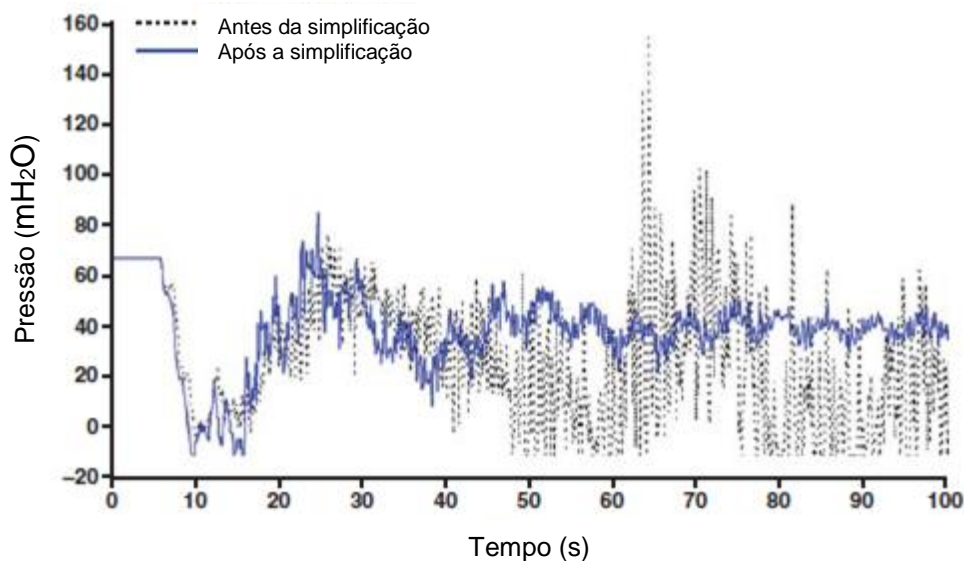


Após a simplificação



Fonte: Jung, Boulos e Wood (2007, p. 94).

Figura 11 – Oscilação de pressão antes e após a simplificação de uma rede de distribuição



Fonte: Jung, Boulos e Wood (2007, p. 96).

Na Figura 11 fica claro que, neste caso, a análise dos transitórios na rede simplificada levou a resultados menos severos. Jung, Boulos e Wood (2007) acrescentam que redes malhadas, como é o exemplo, são geralmente menos suscetíveis aos eventos transitórios de grandes proporções do que as redes ramificadas, mas não é possível afirmar se a simplificação amplificará ou reduzirá os resultados antes de analisá-los e compará-los.

Outra imprecisão associada à modelação convencional para estudo do regime transitório está no uso de uma formulação quase estática para o termo de atrito, a qual é válida somente para escoamento permanente (VIARO, 2001). Entre os parâmetros que precisam ser adotados para a tubulação, a rugosidade, para Rocha (2013), é o de mais difícil determinação, porque se altera com o desgaste da tubulação.

Além da dificuldade em se conseguir os dados e representar toda a rede no modelo, Karney e McInnis (1990) ainda colocam que sistemas de distribuição complexos são difíceis de simular devido à dificuldade de se estabelecer as condições de contorno e do tempo computacional requerido.

Uma rede de distribuição está sujeita a uma infinidade de possibilidades de abastecimento e variações de consumo, possui um número alto de peças que produzem perdas de carga localizadas e que, se fossem todos precisamente contabilizados em um estudo, levaria a uma quantidade de dados e a um tempo impraticável para inserção e tratamento dos dados no *software*.

A análise cuidadosa das informações disponíveis e a inserção dos dados no *software* utilizado são de grande importância para a obtenção de resultados que se aproximem da realidade. A seleção das condições de contorno e as considerações a serem admitidas representam uma dificuldade e necessitam atenção especial.

3.5.3 Pressões admissíveis durante os eventos transitórios em redes de distribuição

As pressões admissíveis durante os eventos transitórios em redes de distribuição têm relação com o material e diâmetro das tubulações e com a manutenção de um sistema seguro e devem determinar as condições de operação.

Denomina-se Pressão Máxima de Serviço (PMS) a pressão interna máxima, incluindo o regime transitório, que um componente pode suportar em serviço e varia com a classe do tubo e diâmetro. Denomina-se Pressão de Serviço Admissível (PSA) a pressão interna, excluindo o transitório hidráulico, que um componente pode suportar com total segurança, de forma contínua, em regime hidráulico permanente (ABNT, 2005).

Segundo Pothof e Karney (2012), alguns códigos e normas internacionais estipulam um fator que estabelece em quanto a PMS pode superar a PSA da tubulação. Os fatores das normas apresentadas estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Pressão máxima aceitável devido a incidentes em diferentes países e em códigos e normas internacionais

| CÓDIGO | PRESSÃO ACIDENTAL MÁXIMA (FATOR) |
|---|---|
| DVGW ¹ W303:1994 (Guia alemão) | 1,00 |
| ASME ² B31.4 (1992), IS ³ 328, BS ⁴ 8010, ISO ⁵ CD 16708:2000 | 1,10 |
| NEN ⁶ 3650-1:2003 | 1,15 |
| BS 806 | 1,20 |
| Publicação Ministerial Italiana | 1,25 – 1,50 |

Nota:¹ Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches; ² American Society of Mechanical Engineers; ³Independent Study; ⁴British Standard; ⁵ International Organization for Standardization; ⁶ Nederlands Normalisatie-instituut.

Fonte: Pothof e Karney (2012).

Observa-se que, segundo o código alemão, o mais rigoroso entre os apresentados, o sistema deve ser projetado para que, mesmo durante os fenômenos transitórios,

nunca se exceda a PSA do tubo. A Publicação Ministerial Italiana, mais flexível, aceita que PMS supere em até 1,5 vezes a PSA do tubo durante eventos transitórios. No Brasil, a NBR 7675/2005 (ABNT, 2005), que dispõe sobre “Tubos e conexões de ferro dúctil e acessórios para sistemas de adução e distribuição de água – Requisitos”, estabelece, para cada diâmetro e classe de tubo de ferro dúctil, os valores que a PMS pode alcançar. A PMS pode superar em 20% a PSA para tubos de ferro dúctil classe K7.

Destaca-se ainda a tendência crescente em se instalar tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) em redes de distribuição especialmente na rede secundária e com menores diâmetros. Segundo Marcondes (2016), essa tendência advém de algumas vantagens que os tubos desse material oferecem, como a possibilidade de ser transportado em bobinas, por apresentar propriedades de resistência à corrosão e por conseguir se conectar através de soldas termoplásticas (eliminando as conexões mecânicas do tipo ponta e bolsa), além de boas garantias contra vazamentos e arrebitamentos. Atualmente, o Brasil tem capacidade de fabricar tubulações de até 3.500 mm. A partir de 2010, o uso de PE foi intensificado e hoje é o mais utilizado no país (MARCONDES, 2016).

Segundo a NBR 15802 (ABNT, 2010), que trata de “Sistemas enterrados para distribuição e adução de água e transporte de esgotos sob pressão — Requisitos para projetos em tubulação de polietileno PE 80 e PE 100 de diâmetro externo nominal entre 63 mm e 1600 mm”, a pressão máxima admitida em ondas de curta duração, decorrentes de transientes hidráulicos, pode superar em 50% a máxima pressão que a tubulação deve suportar em serviço contínuo que, por sua vez, não pode superar a pressão nominal (PN).

Apesar de os tubos plásticos serem mais flexíveis e, conseqüentemente, terem menor celeridade e responderem de formas menos intensas aos transitórios hidráulicos em comparação com os tubos com maior rigidez, de acordo com Shiromoto, Leitão e Tsutiya (2005), as tubulações de PEAD merecem cuidados especiais, pois têm limitada resistência às solicitações cíclicas (fadiga) e por esta razão devem operar com cargas controladas. A análise hidráulica do sistema deverá avaliar se o tubo de PEAD poderá romper por fadiga, após um curto período de operação.

A pressão mínima permitida é raramente explicitada nos códigos existentes. A pressão mínima acidental geralmente aceita em sistemas de distribuição de água

tratada é a pressão atmosférica ou a pressão máxima do solo onde está assentada a tubulação para evitar intrusões em pequenos vazamentos. Se a água não é para consumo direto, pressões negativas podem ser permitidas se a tubulação tem condições de suportar tais pressões (POTHOF; KARNEY, 2012).

Para Almeida (1982), no dimensionamento das tubulações, deve-se considerar que a PMS não ultrapasse 1,5 vezes a PSA. Nas instalações projetadas sem dispositivos de proteção, as pressões internas máximas não devem exceder em 20% a PMS. Nas condições normais de operação, as pressões mínimas motivadas pelo golpe de aríete não devem atingir pressões inferiores à atmosférica nos casos a seguir indicados: tubos muito flexíveis, a menos que sejam apresentados os cálculos justificados da resistência desses tubos ao esmagamento e nos sistemas elevatórios de água tratada.

4 METODOLOGIA

4.1 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para realização deste estudo está inteiramente inserida no município de Salvador – BA, e corresponde a zonas de abastecimento do SIAA de Salvador. O SIAA é operado pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento (Embasa), é responsável pelo abastecimento da sede municipal de Salvador, Simões Filho e Lauro de Freitas e constitui um sistema amplo e complexo que atende a uma população residente e flutuante de mais de três milhões de pessoas (SIHS, 2015).

O Sistema de Distribuição de Água Tratada do SIAA é subdividido em 57 ZA, parte alimentada por Reservatórios Setoriais e parte abastecida diretamente por adutoras de água tratada ou por recalque. As ZA abastecidas pelo mesmo centro de reservação formam, juntas, o Setor de Abastecimento que corresponde à parcela da rede sob influência de determinado Reservatório de Distribuição (SIHS, 2017).

Para realização desse estudo, selecionou-se quatro ZA do SIAA de Salvador abastecidas de formas diversas com o objetivo de avaliar os efeitos dos transitórios hidráulicos nas principais condições de abastecimento vigentes no sistema de distribuição em estudo.

A análise foi realizada com os dados disponibilizados no Plano de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara (Parmis) desenvolvido pela Sihs (2017), iniciado em 2014 e concluído em 2017.

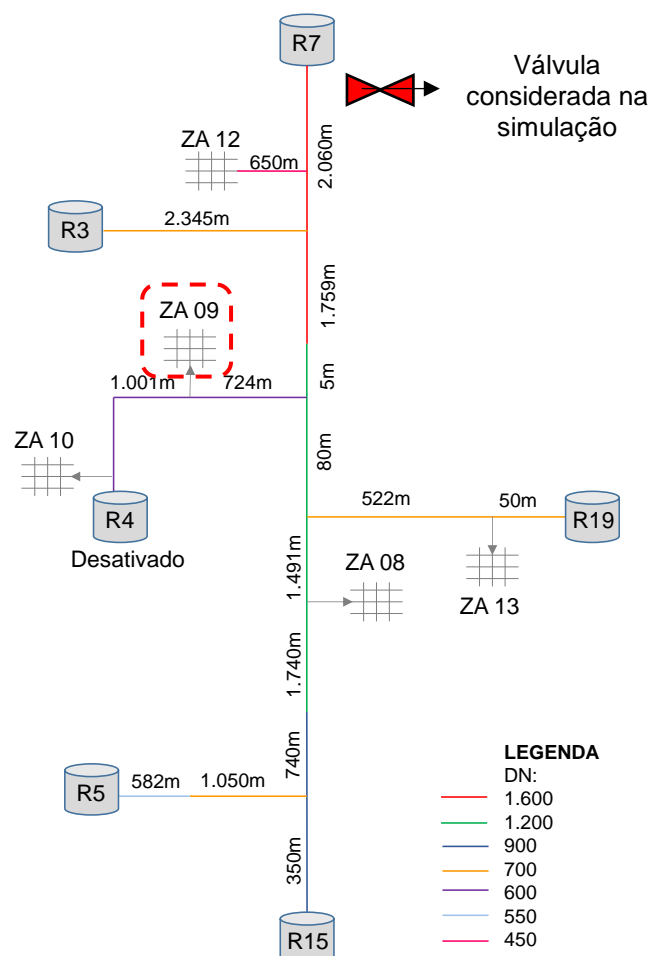
Para a seleção das zonas, excluiu-se as ZA sem cadastro e cuja forma disponibilizada dos dados dificultava a análise. Deu-se preferência às ZA com linhas-tronco mais extensas e que apresentam elevados percentuais de perdas de água. Para projeção da rede secundária selecionou-se uma região densamente ocupada da ZA 23 com topografia acidentada. Essa seleção levou em conta a possibilidade de realizar o dimensionamento da rede secundária com os dados disponíveis e o elevado percentual de perdas de água da ZA. As ZA selecionadas estão descritas na sequência.

4.1.1 Zona de Abastecimento 09

A ZA 09 é uma zona central do SIAA de Salvador e abrange parte da Avenida Bonocô, o populoso bairro de Cosme da Farias e o loteamento Santa Tereza. Esta ZA pertence ao Setor R4, porém, devido a problemas na alimentação dos reservatórios do setor, passou a ser atendida diretamente em sua rede de distribuição pela Subadutora de água tratada R7 – R15 (SIHS, 2017).

A Subadutora R7 – R15 tem início nas câmaras baixas do Setor R7 e se encerra no centro de reservação do Setor R15. Percorre cerca de 7,5 km e, em seu trajeto, alimenta diretamente as redes das ZA 08, ZA 09, ZA 10, ZA 12, ZA 13 além dos centros de reservação dos setores R3, R4 (desativado temporariamente), R5 e R19. O reservatório apoiado de distribuição (RAD) do setor R7 tem nível de água (NA) mínimo na cota 79,8 m, NA máximo, na cota 91,8 m e altura útil de 12 m (SIHS, 2016b; 2017). A configuração da adutora supracitada pode ser observada na Figura 12.

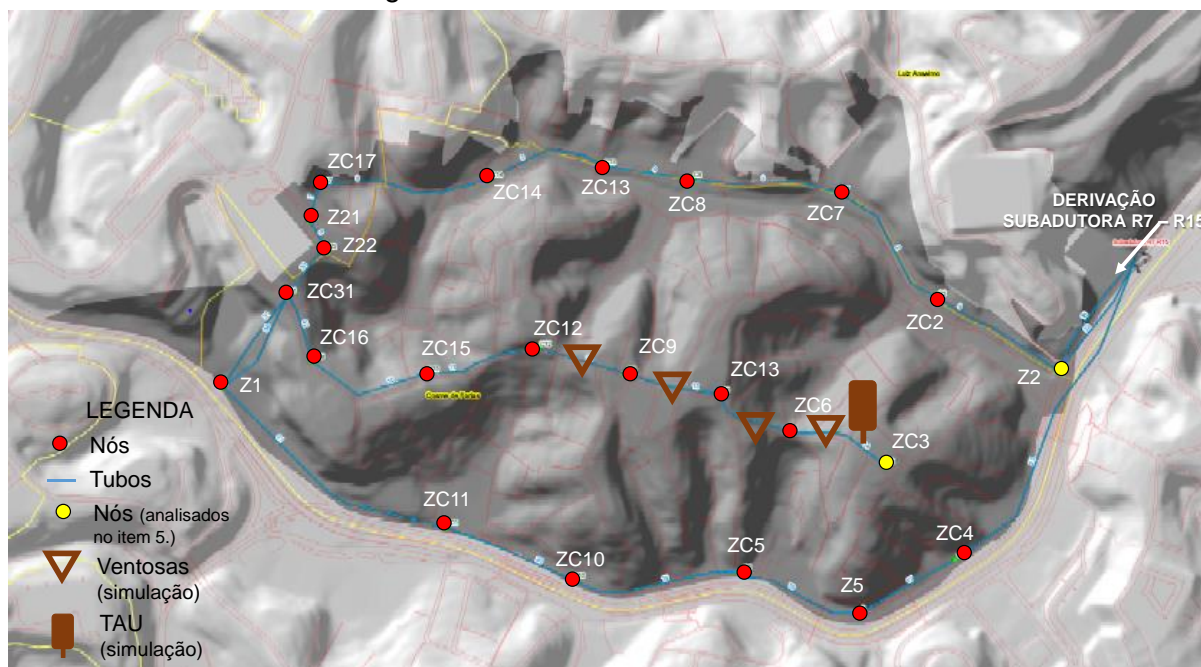
Figura 12 – Croqui da subadutora de água tratada R7-R15



Fonte: adaptado de Sihs (2016b, p. 59).

A maioria dos nós da ZA 09 varia entre as cotas 20 m e 65 m e a linha-tronco avaliada possui tubos com diâmetros nominais (DN) que variam entre 300 e 600 (SIHS, 2017). A configuração da linha-tronco da ZA 09 está apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Zona de Abastecimento 09



Fonte: adaptado de Sihs (2017).

Na Tabela 2, estão expostos os percentuais de água não contabilizada (ANC) da ZA 09, para o período de fevereiro de 2013 a janeiro de 2014, a Demanda Máxima Diária (DMD), a Demanda Máxima Horária (DMH) e população (residente e flutuante) estimada para 2015 pela Sihs (2015; 2017).

Tabela 2 – Percentual de ANC, DMD, DMH e população da ZA 09

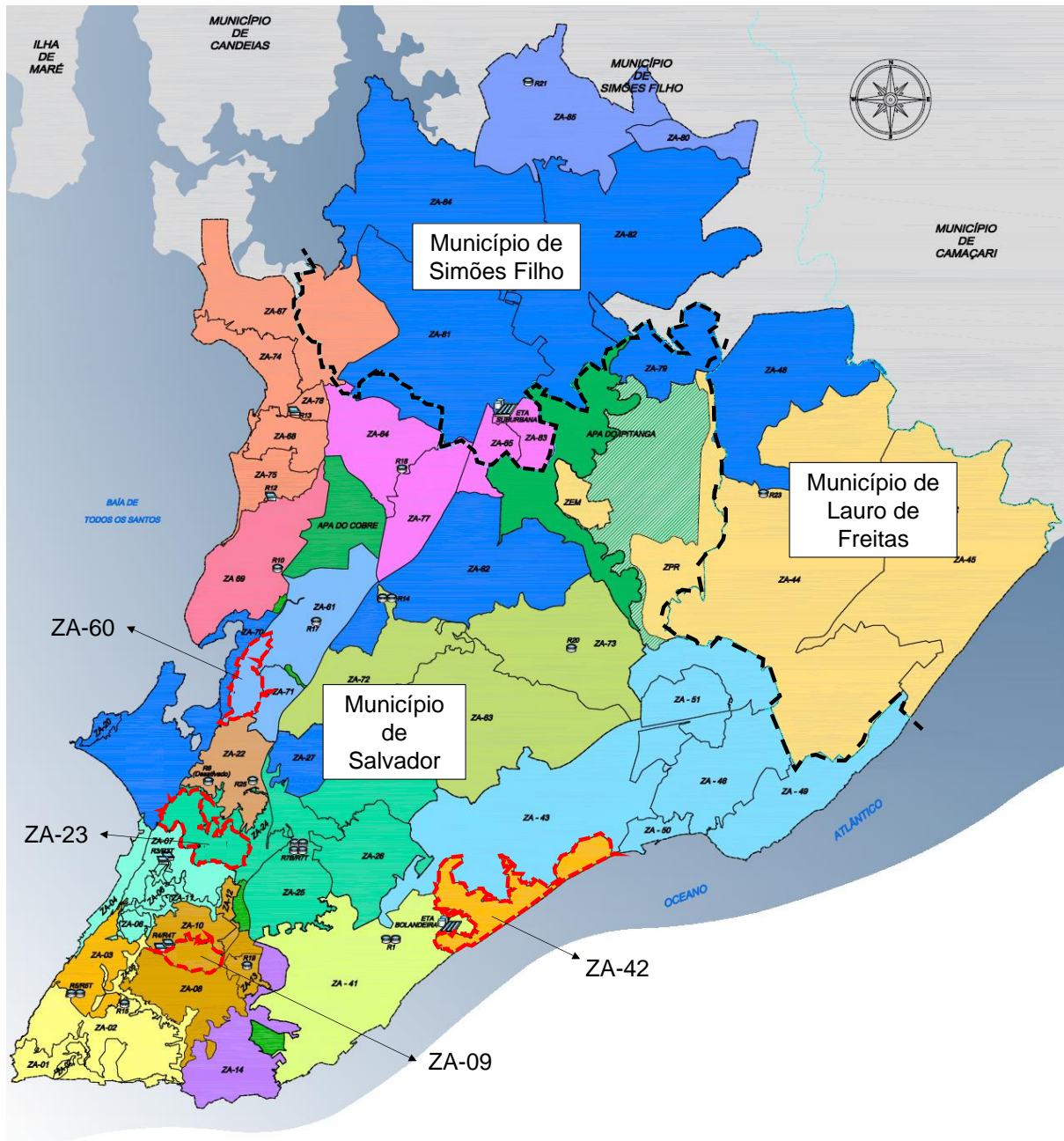
| ZONA | PERDAS ANC (%) | 2015 | | |
|------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | DMD (L/s) | DMH (L/s) | POPULAÇÃO |
| 09 | 56,6% | 136,78 | 205,17 | 39.740 |

Fonte: Sihs (2015).

Segundo a Sihs (2015), as DMD foram obtidas multiplicando a demanda média oriunda dos estudos de população e demandas pelo coeficiente do dia de maior consumo K_1 igual a 1,2. Para obter as DMH, utilizada nas simulações das redes de distribuição, a DMD foi multiplicada ainda pelo coeficiente da hora de maior consumo K_2 igual a 1,5, como sugere Tsutiya (2006) e a NBR 12218/2017 (ABNT, 2017) quando não há curvas de consumo específicas para a ZA ou município.

As Perdas referentes a ANC para a ZA 09 são ainda superiores à média de ANC de Salvador e reforçam a necessidade de se analisar e reformular o abastecimento desta ZA. A localização desta ZA no SIAA de Salvador pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 – Localização das ZA analisadas



Fonte: adaptado de Sihs (2017, p. 15).

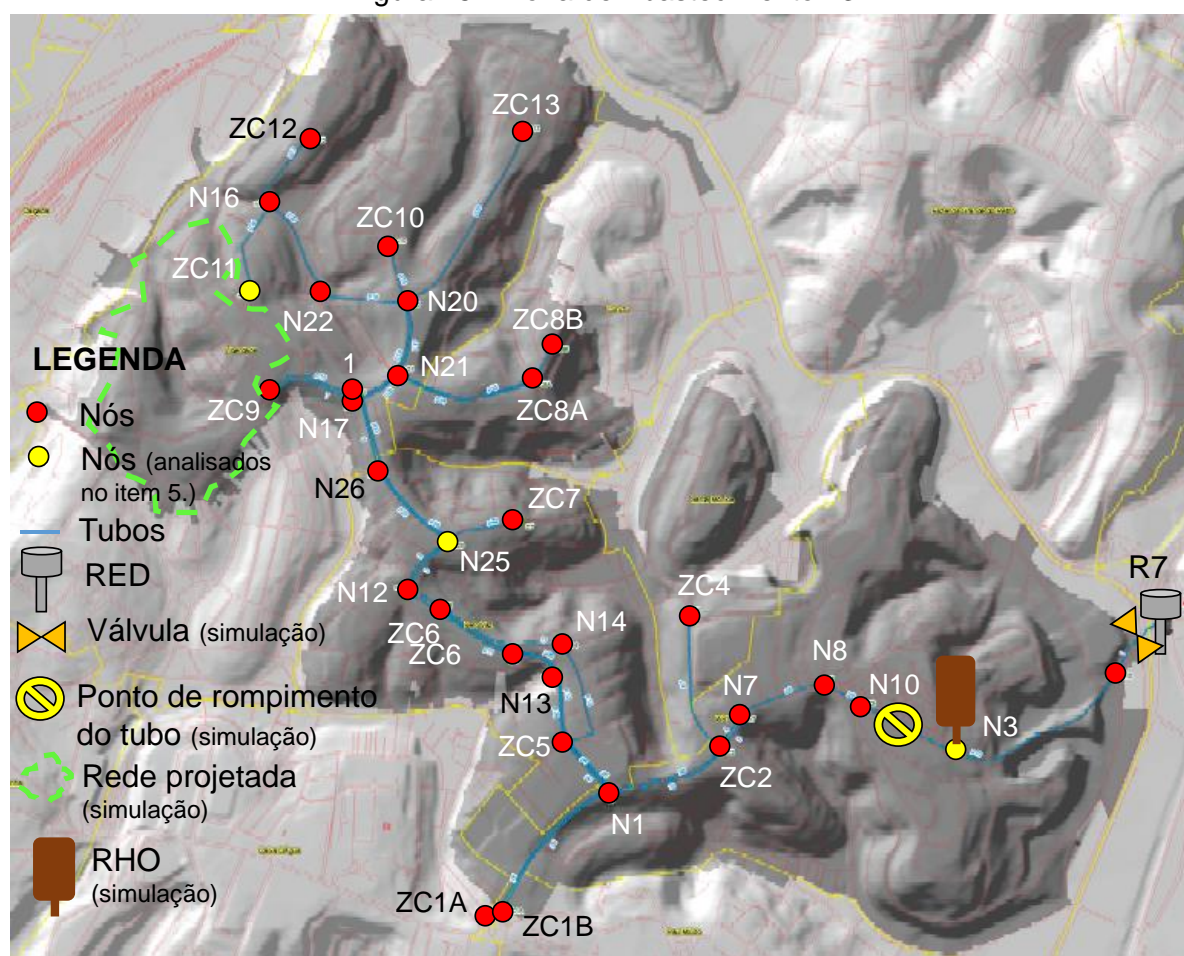
4.1.2 Zona de Abastecimento 23

A ZA 23 abrange bairros antigos do SIAA de Salvador como parte da Liberdade, IAPI, Pero Vaz, Guarany e Curuzu e é atendida pelo Reservatório Elevado de Distribuição

(RED) do Setor R7. Este reservatório atende também outras ZA do seu Setor e a ZA 23 é atendida de forma independente através de uma linha-tronco com início no RED (SIHS, 2017).

O RED do setor R7 tem NA mínimo na cota 102,5 m, NA máximo na cota 107,5 m e altura útil de 5 m. A maioria dos nós da ZA 23 variam entre as cotas 40 m e 75 m e a linha-tronco avaliada possui tubos com DN que variam entre 200 e 600 (SIHS, 2017). A localização da ZA 23 pode ser observada na Figura 14 e sua configuração pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 – Zona de Abastecimento 23



Fonte: adaptado da Sihs (2017).

Na Tabela 3, estão expostos os percentuais de ANC da ZA 23, para o período de fevereiro de 2013 a janeiro de 2014, e a DMD, DMH e população (residente e flutuante) estimada para 2015.

Tabela 3 – Percentual de ANC, DMD, DMH e população da ZA 23

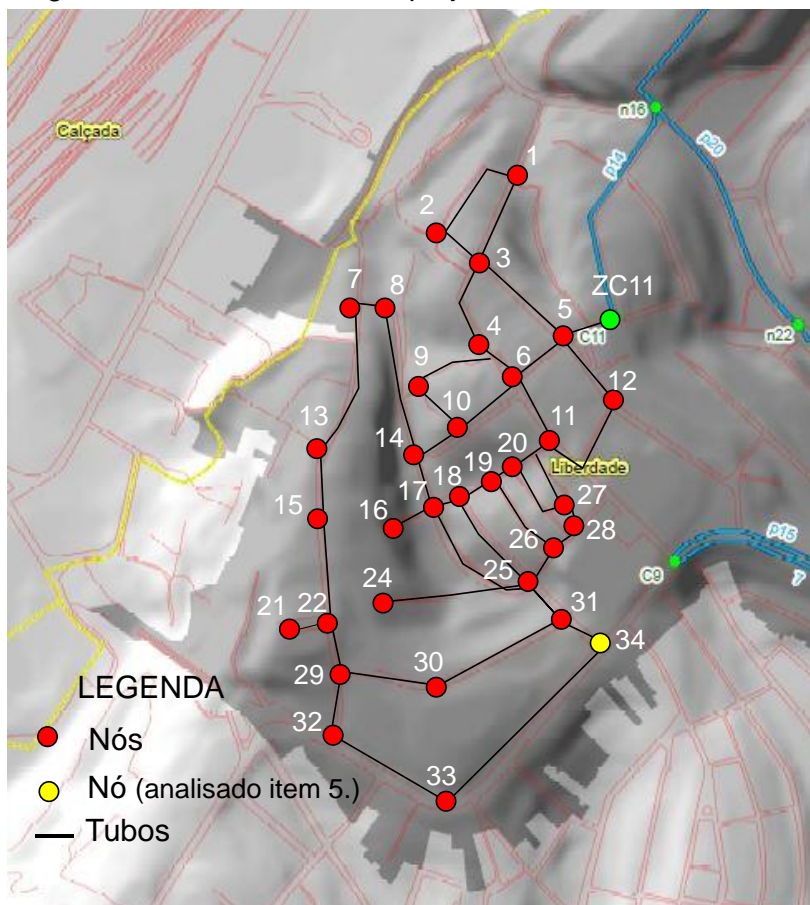
| ZONA | PERDAS ANC (%) | 2015 | | |
|------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | DMD (L/s) | DMH (L/s) | POPULAÇÃO |
| 23 | 59,9% | 315,98 | 473,97 | 77.704 |

Fonte: Sihs (2015).

As Perdas referentes a ANC da ZA 23 reforçam a necessidade de se analisar e reformular o abastecimento desta ZA.

A rede secundária fictícia considerada para análise dos transitórios nas tubulações de menor diâmetro foi projetada em parte do bairro da Liberdade que é atendida pela ZA 23. A rede foi traçada considerando os arruamentos e cotas disponíveis no *software Google Earth Pro*, tem extensão de 2,2 km e cotas que variaram entre 20 m e 75 m. A área abrangida pela rede secundária projetada e seu traçado podem ser visualizados na Figura 15 (apresentada na página anterior) e na Figura 16 respectivamente. A rede foi projetada porque não se teve acesso ao cadastro da rede secundária do SIAA de Salvador.

Figura 16 – Rede secundária projetada – Liberdade – ZA 23



Fonte: elaboração própria (2017) com imagem de base da Sihs (2017).

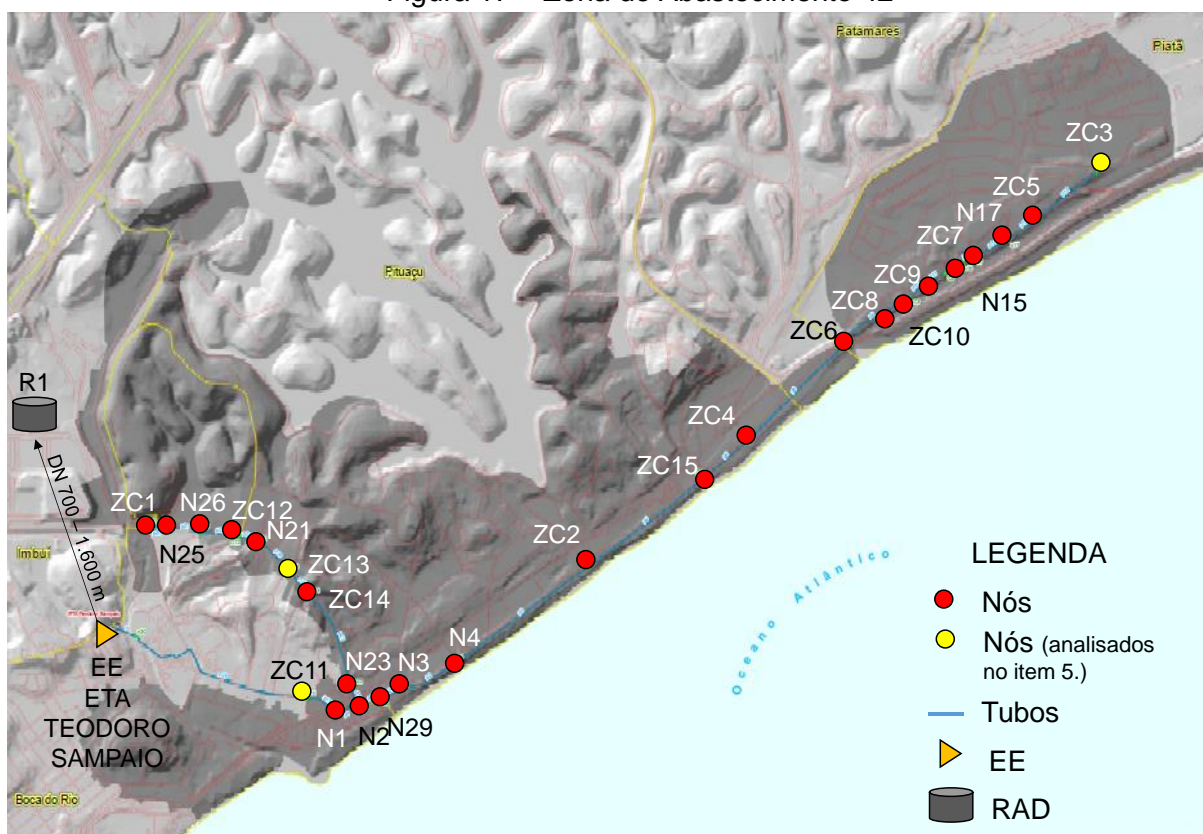
4.1.3 Zona de Abastecimento 42

A ZA 42 abrange bairros de ocupação recente que ainda possuem importantes vetores de crescimento com regiões onde habitam população com baixa renda assim como condomínios de luxo. Pertencem a esta ZA os bairros de Boca do Rio, Alto do São Francisco, Patamares (parte), Jardim Imperial, Jardim Jaguaribe, Cohembasa e Pituaçu (SIHS, 2017).

Esta ZA era atendida pelo centro de reservação do Setor R1, entretanto, face ao crescimento do setor sem as devidas ampliações, ele foi desmembrado. Atualmente, a ZA 42 é abastecida por uma derivação na linha de recalque com DN 700 que conecta o Parque de ETA da Bolandeira ao reservatório do Setor R1, instalada logo na saída da EE da ETA Teodoro Sampaio (SIHS, 2017).

A maioria dos nós da ZA 42 varia entre as cotas 4 m e 20 m e, na linha-tronco avaliada, existem tubos com DN que variam entre 250 e 400. A localização da ZA 42 pode ser observada na Figura 14 (apresentada na página 88) e sua configuração pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Zona de Abastecimento 42



Fonte: adaptado da Sihs (2017).

Na Tabela 4, estão expostos os percentuais de ANC das ZA 42, para o período de fevereiro de 2013 a janeiro de 2014, e a DMD, DMH e população (residente e flutuante) estimada para 2015.

Tabela 4 – Percentual de ANC, DMD, DMH e população da ZA 42

| ZONA | PERDAS ANC (%) | 2015 | | |
|------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | DMD (L/s) | DMH (L/s) | POPULAÇÃO |
| 42 | 61,1% | 187,77 | 281,66 | 34.755 |

Fonte: Sihs (2015).

Esta é a ZA com maior percentual de perdas das ZA selecionadas para este estudo e especial atenção deve ser dada para sua forma de abastecimento.

4.1.4 Zona de Abastecimento 60

A ZA 60 está totalmente inserida em Salvador e abrange os bairros de Lobato (parte), Conjunto Bela Vista do Lobato, Alto da Boa Vista, Alto do Cabrito, Jardim Lobato (parte), Osório Vilas Boas e Conjunto Parque Campinas e é abastecida pelo RAD do Setor R17 que também atende outras ZA do seu Setor e a ZA 60 é alimentada de forma independente, através de uma linha-tronco com início no RAD (SIHS, 2017).

A maioria dos nós desta ZA variam entre as cotas 20 m e 80 m e, na linha-tronco avaliada, existem tubos com DN que variam entre 150 e 600. O RAD do setor R17 está localizado no bairro de Pirajá, possui NA mínimo na cota 104,0 m, NA máximo na cota 111,0 m e altura útil de 7,0 m (SIHS, 2017).

Na Tabela 5 estão expostos os percentuais de ANC da ZA 60 para o período de fevereiro de 2013 a janeiro de 2014 e a DMD, DMH e população (residente e flutuante) estimada para 2015.

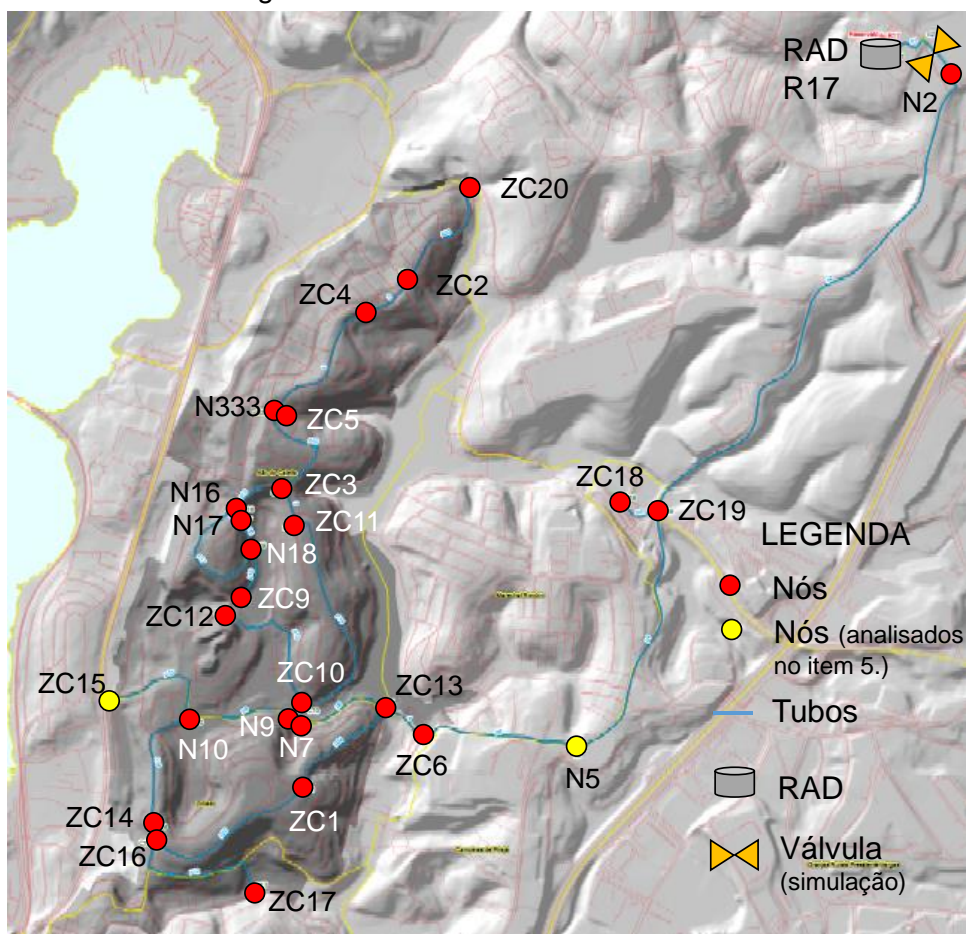
Tabela 5 – Percentual de ANC, DMD, DMH e população da ZA 60

| ZONA | PERDAS ANC (%) | 2015 | | |
|------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | DMD (L/s) | DMH (L/s) | POPULAÇÃO |
| 60 | 52,6% | 114,02 | 171,03 | 33.615 |

Fonte: Sihs (2015).

A localização da ZA 60 pode ser observada na Figura 14 (página 88) e sua configuração pode ser observada na Figura 18.

Figura 18 – Zona de Abastecimento 60



Fonte: adaptado da Sihs (2017).

4.2 PROGRAMA ALLIEVI

Para avaliação hidráulica das redes de distribuição das ZA selecionadas foi utilizado o *software* Allievi versão 2.2.0.0 que é um simulador de escoamentos permanentes e transitórios em condutos forçados e livres desenvolvido pela Universidade de Valência e disponibilizado gratuitamente.

A utilização do programa se deve à facilidade da entrada e configuração dos dados, à possibilidade de analisar o escoamento em redes hidráulicas de condutos forçados malhadas, ramificadas ou mistas, alimentadas por vários reservatórios, estações de bombeamento, com fluxo regulado por estações de válvulas e protegidas por dispositivos contra transitório hidráulico. O programa ainda possui uma interface de apresentação dos resultados das análises em planilhas eletrônicas, gráficos e vídeo de fácil manipulação.

Segundo o Manual do Allievi (ITA, 2010a), para análise dos sistemas de condutos forçados o programa utiliza o Método das Características que foi descrito no subitem 3.4.4 (página 59) desta dissertação. O Allievi é um software proprietário e seu código fonte não pode ser avaliado ou modificado.

Para avaliação do regime transitório, o Allievi realiza, inicialmente, o cálculo do regime permanente que é obtido através do método das características sem admitir a ocorrência de manobras. Com os resultados destes cálculos, essas condições são tomadas como condições iniciais para a simulação do regime transitório para o qual se especificam as manobras a realizar nos elementos do sistema (ITA, 2010a).

Destaca-se que o *software* permite a análise dos transitórios considerando ou não o fenômeno de cavitação. Quando se opta pela análise sem considerar a cavitação, os resultados apresentados para as pressões mínimas poderão ser menores do que a pressão de vapor. Caso a cavitação seja considerada, a pressão mínima será limitada à pressão de vapor da água adotada pelo programa como 0,0324 bar (pressão de vapor para a água a 25° C). Em todas as avaliações realizadas, a opção “cavitação” foi ativada, ainda que a simulação não levasse o sistema a pressões transitórias negativas (inferior à pressão atmosférica).

O programa permite também modificar a configuração de cálculo caso seja necessário realizar alguma alteração dos parâmetros de projeto (intervalo de cálculo, aceleração da gravidade, pressão atmosférica, coeficiente de estabilidade de Courant) necessários para a simulação do transitório. Para este estudo, considerou-se o intervalo de tempo para cálculo do regime transitório de 0,005 segundos, a aceleração da gravidade de 9,81 m/s², a pressão atmosférica de 1,0134 bar e manteve-se o coeficiente de estabilidade de Courant, recomendado pelos desenvolvedores do programa, de 1,3638.

Para avaliação do regime transitório, o Allievi permite a avaliação de diversas condições de contorno. Os tipos de elementos considerados no programa para análise de condutos forçados são os seguintes:

1. Nós;
2. Tubulações:
 - a. Válvulas de ar (ventosas) em tubulações;
 - b. Ruptura de tubulação.

3. Reservatórios:
 - a. Reservatórios de grandes dimensões ou de nível constante (GD);
 - b. Reservatórios de pequenas dimensões ou de nível variável (PD);
 - c. Reservatórios de seção variável (SV);
 - d. Reservatórios com divisão e vertedor (DV).
4. Estações de bombeamento:
 - a. Bombas com curvas características universais;
 - b. Bombas com curvas características por pontos;
5. Estruturas de proteção:
 - a. Chaminés de equilíbrio;
 - b. Tanque unidirecional;
 - c. Reservatório hidropneumático;
 - d. Chaminé diferencial;
 - e. Chaminé de seção variável.
6. Estruturas de controle de vazão:
 - a. Válvula de regulação;
 - b. Válvula de retenção;
 - c. Válvulas de alívio;
 - d. Válvulas de sobrevelocidade;
 - e. Perdas de carga localizadas;
 - i. Válvula redutora de pressão;
 - ii. Válvula sustentadora de pressão;
 - iii. Válvula limitadora de vazão.
 - f. Válvulas compostas;
 - g. Válvulas automáticas.
7. Leis:
 - a. Lei de Vazão:
 - i. Lei de vazão por pressão;
 - ii. Lei de vazão por tabela;
 - iii. Lei de vazão.
 - b. Lei de Carga.

Os resultados da análise em regime transitório podem ser visualizados em gráficos e tabelas. À medida que os recursos do Allievi forem aplicados nas simulações detalhadas na sequência, explicações cabíveis serão acrescentadas.

4.3 SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas com os dados disponibilizados no Parmis que consistem no traçado da linha-tronco da rede de distribuição (definida como toda tubulação com DN igual ou superior a 200), suas extensões, material, rugosidade e diâmetros, cotas dos nós avaliados e DMH estimada para o ano de 2015 nos nós em que há consumo.

Os tubos, segundo a Sihs (2017), são de Ferro Fundido, muitos foram implantados há algumas décadas e, seguindo o mesmo critério do Parmis, de que se trata de tubos antigos, foi adotada a rugosidade absoluta (k) de 3 mm para toda a linha-tronco. Como não foram dadas maiores informações acerca da classe do tubo, considerou-se que são da classe $k7$, usualmente implantada em redes de distribuição.

Para a simulação da rede secundária fictícia foi estabelecida uma pequena rede mista (formada por anéis e ramos) conforme descrita no item 4.1.2 (página 88), com DN 50 em PEAD, distribuindo 41,34 L/s a partir de um nó da linha-tronco da ZA 23. As demandas nos nós da rede secundária foram definidas determinando a área de abrangência de cada nó e feita uma proporção com a demanda estimada do bairro. Foi considerado que os tubos são de PEAD devido à crescente tendência em se implantar novos tubos ou ainda substituir tubos existentes de menores diâmetros por tubos deste material.

Para realizar a simulação, considerou-se o Diâmetro Interno (DI) dos tubos e a celeridade conforme apresentado na Tabela 6. Para obtenção do DI dos tubos de ferro fundido foi observado o que estabelece a NBR 7675/2005 (ABNT, 2005) e a espessura de revestimento apresentada no manual da Saint-Gobain Canalização (2017). A celeridade foi calculada com a Equação 12, considerando que o tubo não possui movimentação axial (enterrado). Na Tabela 6 estão apresentados a PSA e a PMS dos tubos por DN, bem como o DI referente a cada DN e a celeridade.

Tabela 6 – DN, DI, PSA, PMS e Celeridade – Ferro Fundido K7

| DN | DI (mm) | PSA (mH ₂ O) | PMS (mH ₂ O) | Celeridade (m/s) |
|------|---------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| 150 | 154,6 | 652,16 | 784,63 | 1120,73 |
| 200 | 206,2 | 540,07 | 641,97 | 1064,55 |
| 250 | 258 | 448,36 | 529,88 | 1014,60 |
| 300 | 309,6 | 387,22 | 468,74 | 977,30 |
| 350 | 357,2 | 346,46 | 417,79 | 948,93 |
| 400 | 407,4 | 305,70 | 366,84 | 931,45 |
| 450 | 457,6 | 295,51 | 356,65 | 916,83 |
| 500 | 509 | 285,32 | 336,27 | 899,95 |
| 600 | 610,6 | 264,94 | 315,89 | 876,42 |
| 700 | 710,2 | 244,56 | 295,51 | 858,93 |
| 800 | 812,8 | 234,37 | 285,32 | 843,91 |
| 900 | 923,4 | 234,37 | 275,13 | 829,26 |
| 1000 | 1016 | 224,18 | 264,94 | 821,97 |
| 1100 | 1118,6 | 224,18 | 264,94 | 813,29 |
| 1200 | 1220,2 | 213,99 | 254,75 | 806,08 |

Fonte: elaboração própria (2017) com base em dados da ABNT (2005) e Saint-Gobain Canalização (2017).

Considerou-se que os trechos da Subadutora R7 – R15 (considerada nas simulações que envolveram a ZA 09) com DN 1.600 são de aço, com espessura de 12,7 mm e o DI e o DN são iguais. Essa consideração foi feita devido à ausência de informações precisas acerca dessa tubulação e por ser comum o uso de aço quando o diâmetro projetado supera 1.200 mm. Foi considerado o módulo de elasticidade do aço de 200 GPa, conforme sugere Chaudhry (2014, p. 51). Os trechos da subadutora com DN igual ou inferior a 1.200 foram considerados de ferro fundido com as características expostas na Tabela 6.

Para os tubos de PEAD da rede secundária considerou-se que a tubulação tem DN 50 e é de PE 80 e possuem PN de 12,5 (máxima pressão a que os tubos, conexões e respectivas juntas podem ser submetidos em serviço contínuo, neste caso, equivalente a 125 mH₂O). Conforme a NTS 189 (SABESP, 2013) e a NBR 15802

(ABNT, 2010), a rugosidade absoluta tem 0,001 mm, DE 63 mm, DI 51,4 mm, espessura 5,8 mm e módulo de elasticidade 800 Mpa o que resulta em uma celeridade de 291,17 m/s. Considerando o que estabelece a NBR 15802 (ABNT, 2010), a sobrepressão máxima decorrente de transitórios hidráulicos admitida em tubos de PEAD com as características descritas é de 187,5 mH₂O.

Para inserção de consumo nos nós, à qual está associada uma demanda, podem ser vinculadas diversas condições de contorno no Allievi que, de alguma forma, representa o consumo ali existente e que, na avaliação dos transitórios, levarão a resultados distintos.

A primeira possibilidade consiste em atribuir ao nó uma “Lei de Vazão por Tabela” na qual se insere a vazão desejada no nó para cada instante e o programa interpola valores intermediários conforme Figura 21 (página 104). Nessa condição o *software* admite a saída da vazão estabelecida para o nó independentemente das condições hidráulicas da tubulação que o alimenta. Se, mesmo em regime permanente, a tubulação a montante do nó não tem condições hidráulicas de o atender, o programa admite essa vazão e, inclusive, apresenta uma pressão negativa para o nó, que, na prática, não é coerente. O que realmente ocorre é o atendimento dos nós com vazões inferiores às estabelecidas na tabela, limitadas às condições hidráulicas do trecho.

Esse recurso é adequado para avaliar redes ou nós em que previamente já se sabe que têm condições hidráulicas adequadas para veicular as demandas a serem inseridas nas tabelas ou simular o impacto de variações de consumo.

Outra possibilidade é considerar que em cada nó de consumo existe uma válvula limitadora de vazão, configurada para limitar a vazão à demanda estabelecida para o nó. Nesta situação, quando a tubulação não tem condições hidráulicas de atender à demanda total estipulada para o nó, o programa admite que apenas a vazão capaz de ser aduzida pela tubulação alcança a válvula. Durante o regime transitório, quando ocorrem ondas de pressões muito altas, a vazão máxima está limitada à vazão limite para a qual a válvula foi configurada e, quando ocorrem pressões negativas, o programa admite a entrada de vazão pela válvula. Esse recurso pode ser utilizado para determinar a capacidade hidráulica do sistema de atender às demandas dos nós.

A terceira possibilidade avaliada neste estudo é o uso da “Lei de vazão por pressão”. Neste caso, se admite que, no nó, existe um elemento que causa perdas de carga, e

a vazão que afluí dele terá relação com a pressão no nó e com a perda de carga existente. O coeficiente de perda de carga será constante durante toda a simulação, e é determinado considerando a vazão inicial imposta pelo usuário do programa e da pressão no nó nas condições de regime permanente (o programa calcula a perda de carga necessária para que o nó, submetido à pressão do regime permanente, possua a vazão determinada pelo usuário). Quando ocorre o regime não permanente, a vazão que flui do nó variará conforme a oscilação de pressão, dado o coeficiente de perda de carga estabelecido inicialmente. Nos instantes em que a pressão no nó resulta negativa, a vazão também será negativa, indicando que, nestas condições, entrará vazão no sistema. Quando a pressão excede a pressão de regime permanente, a vazão que fluirá do nó será superior à inicialmente estabelecida e estão condicionadas à perda de carga singular calculada.

Ressalta-se que, tratando-se de redes de distribuição, as extremidades das tubulações são, na sua maioria, tubos que alimentam reservatórios residenciais pela cota superior. Logo, quando ocorrem pressões negativas nestes pontos, é possível que a vazão que retornará ao sistema seja de ar e não de água, que, provavelmente, será novamente expulso quando ocorrer uma oscilação positiva de pressão. Essa entrada bifásica, de água e ar, é de difícil mensuração e a “Lei de vazão por pressão” considera que, sempre que houver pressões negativas nos nós com essa lei como condição de contorno, ocorrerá entrada de água.

Esse recurso parece coerente para a análise dos transitórios em redes de distribuição uma vez que a oscilação positiva de pressão, de fato, aumentará a vazão que flui aos reservatórios das residências ou, em residências sem reservatórios, às torneiras, chuveiros e descargas.

Os artigos consultados, de Karney (1984), Kwon (2007), Jung, Boulos e Wood (2007), não explicam com detalhes como foi considerada a condição de fronteira para a vazão afluente ao nó em seus estudos. McInnis e Karney (1995) utilizaram duas condições de contorno para os nós em suas análises a que denominaram de “demanda constante” e “orifício equivalente”, que levam a entender que equivalem às condições aqui denominadas de “Lei de vazão por tabela” e “Lei de vazão por pressão” respectivamente. Em suas análises, as duas condições de contorno levaram a resultados próximos.

Indubitavelmente, estudos de campo e monitoramento em tempo real podem contribuir muito para as avaliações dos regimes transitórios, possibilitar a calibração do sistema e levar a resultados mais precisos, porém isso não está no escopo deste trabalho.

Considerar todos os componentes do sistema, especialmente quando se trata de rede de distribuição, requer um elevado número de dados, muitas vezes de difícil aquisição. A simplificação do modelo, muitas vezes, é a única forma de viabilizar o estudo frente à disponibilidade de informações, aos recursos para atividades de campo e ao apoio oriundo das operadoras dos sistemas.

A seleção da condição de contorno para os nós com consumo, em cada simulação realizada, levou em consideração o objetivo da análise e o estudo dos resultados com a adoção de diferentes condições de fronteira e está explanada por zona e por simulação, na sequência.

Em Salvador, o uso de hidrantes é limitado. O combate a incêndios costuma ocorrer através dos caminhões do Corpo de Bombeiros, e não se obteve a localização e as vazões dos hidrantes existentes. Logo, a variação de consumo devido ao uso de hidrantes, apontada por Boulos *et al* (2005) e Kwon (2007) como importante para a análise dos eventos transitórios, não foi avaliado neste estudo.

Os critérios e procedimentos usualmente aplicados para se projetar e avaliar redes de distribuição fundamenta-se na análise do regime permanente para a DMH do horizonte de projeto e a análise das pressões estáticas que são consideradas as pressões máximas a que o sistema será submetido. A primeira análise das ZA ocorreu conforme os critérios suprarreferidos, em regime permanente, com o intuito de se obter os dados que possivelmente seriam utilizados em um projeto, diagnóstico ou para ampliação ou reforço das ZA.

A simulação em regime permanente também objetivou determinar os pontos ou nós de interesse na análise do transitório. Geralmente os pontos de interesse são os pontos que apresentam maior carga, pontos de inflexão, locais com cotas elevadas e locais próximos a origem da perturbação que provocou o transitório. Por vezes pontos com outras características foram selecionados neste estudo, como pontos distantes das perturbações, para avaliar as oscilações de pressões em locais da rede em que se esperava observar menos efeitos dos eventos transitórios. Em seguida foram

realizadas as simulações em regime transitório impondo diferentes condições de contorno.

Para avaliação do uso dos dispositivos de proteção nas redes de distribuição foram estudados os impactos dos dispositivos, ora na rede estudada da ZA 09, ora na rede estudada da ZA 23 que também possui uma rede secundária fictícia associada. Para ambas as redes, considerou-se o cenário em que se estabeleceu um consumo mínimo de água (10% da DMH). Estas foram as redes e cenários que apresentaram respostas transitórias mais intensas para as perturbações impostas e que têm topologia rica em anéis e ramificações.

Os mecanismos de proteção estudados foram: manobra de válvulas de regulação; uso de válvulas de admissão e saída de ar; de RHO e de TAU. Com exceção dos estudos de manobra de válvulas, os outros dispositivos foram avaliados para a condição de fechamento uniforme, em 20 segundos, de uma válvula situada após o reservatório que alimenta as redes. Mais detalhes acerca das simulações estão expostos na sequência.

4.3.1 Zona de Abastecimento 09

A primeira análise da ZA 09 ocorreu em regime permanente considerando a DMH dos nós da ZA e também foram analisadas as pressões estáticas. Na sequência, foram realizadas simulações em regime não permanente. Em todas as avaliações foi considerado o NA máximo do reservatório R7 de onde parte a subadutora.

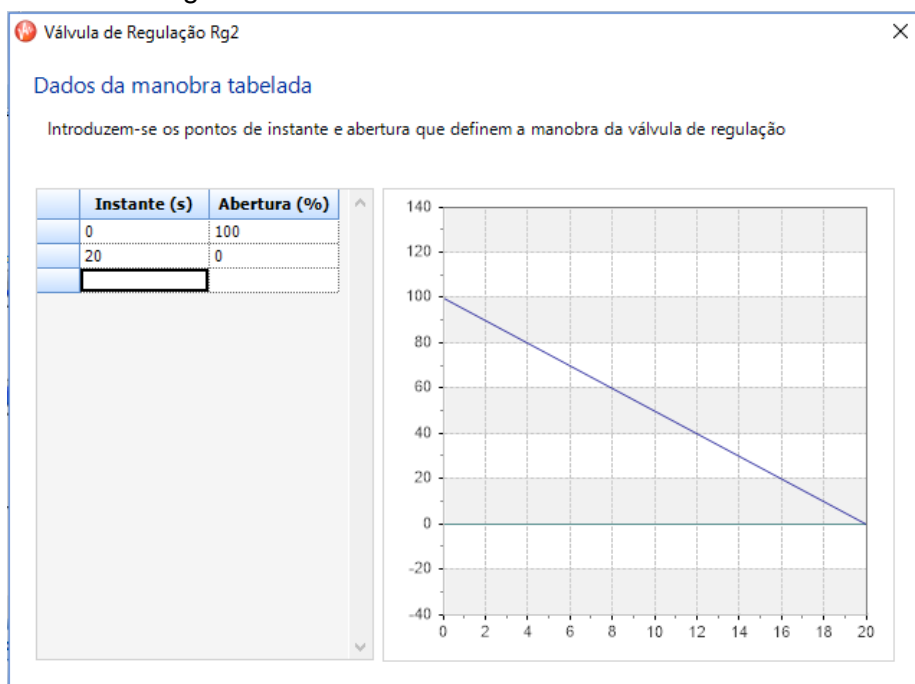
A primeira análise em regime não permanente consistiu em aferir o comportamento hidráulico da ZA 09 após o fechamento de uma válvula logo a jusante do R7, conforme ilustrado na Figura 12 (página 86), com tempo de fechamento de 20 e 40 segundos. Apesar de autores como Kwon (2007) realizarem simulações com tempos de fechamento menores, às válvulas instaladas são de grandes diâmetros e geralmente do tipo gaveta ou borboleta que impõe um fechamento mais lento, ainda quando possuem fechamento motorizado.

A válvula de regulação simulada está próxima e na mesma cota do reservatório R7 e tem o mesmo diâmetro da adutora que parte do reservatório. Não se obteve a informação do posicionamento real da válvula e suas características, porém é usual ter-se, na saída de reservatórios, estruturas de medição e controle dotadas de

equipamentos de hidrometria e válvulas de regulação. Essa mesma consideração foi adotada para as demais ZA analisadas.

A válvula inserida é do tipo borboleta e foi adotada a curva característica típica deste tipo de válvula, que proporciona os valores dos coeficientes de perdas adimensionais em função do grau de abertura, fornecido pelo programa. Admitiu-se que o fechamento ocorreu de forma linear, do início ao fim, e para isso foi inserido no *software* a manobra de fechamento tabelada conforme Figura 19.

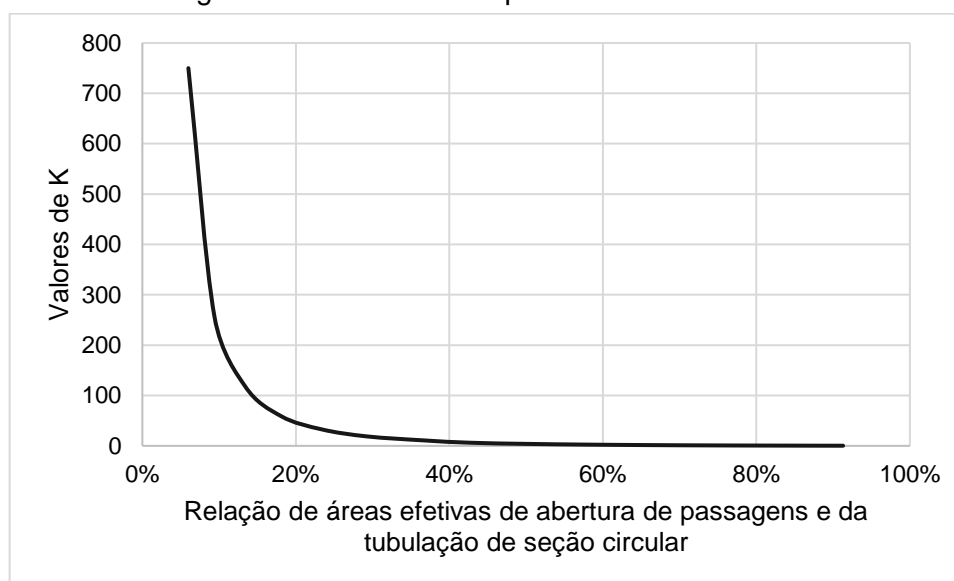
Figura 19 – Manobra de fechamento da válvula



Fonte: ITA (2010b, n.p.).

Ressalta-se que a curva característica típica da válvula do tipo borboleta proporciona uma maior alteração na vazão depois que a válvula já está aproximadamente 70% fechada. Essa variação não linear da vazão advém do valor de K (coeficiente utilizado para calcular perdas de cargas localizadas obtido experimentalmente para cada singularidade) aplicável à válvula, a depender do grau de abertura, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Valores de K para válvulas borboleta



Fonte: elaboração própria (2017) com base em dados de Netto (1998, p. 124).

Em cada nó que representa um consumo pontual (representados na Figura 13 com a nomenclatura “ZC”), para as ZA atendidas diretamente pela subadutora e para os reservatórios existentes ao longo da subadutora, foi inserida a “Lei de vazão por pressão”. A vazão adotada para condição de regime permanente para os nós de consumo ou ZA atendidas diretamente pela subadutora foi as DMH respectivas e, para os reservatórios, as DMD conforme a Sihs (2017). Na simulação, o sistema foi analisado por 200 segundos.

Na sequência, a mesma simulação, com tempo de fechamento de 20 segundos, foi realizada adotando para os nós, ZA e reservatórios a “Lei de vazão por tabela”. A vazão adotada para os nós de consumo ou ZA atendidas diretamente pela subadutora foi as DMH respectivas e, para os reservatórios, as DMD conforme a Sihs (2017). As vazões mantiveram-se constantes durante os 200 segundos que durou a simulação.

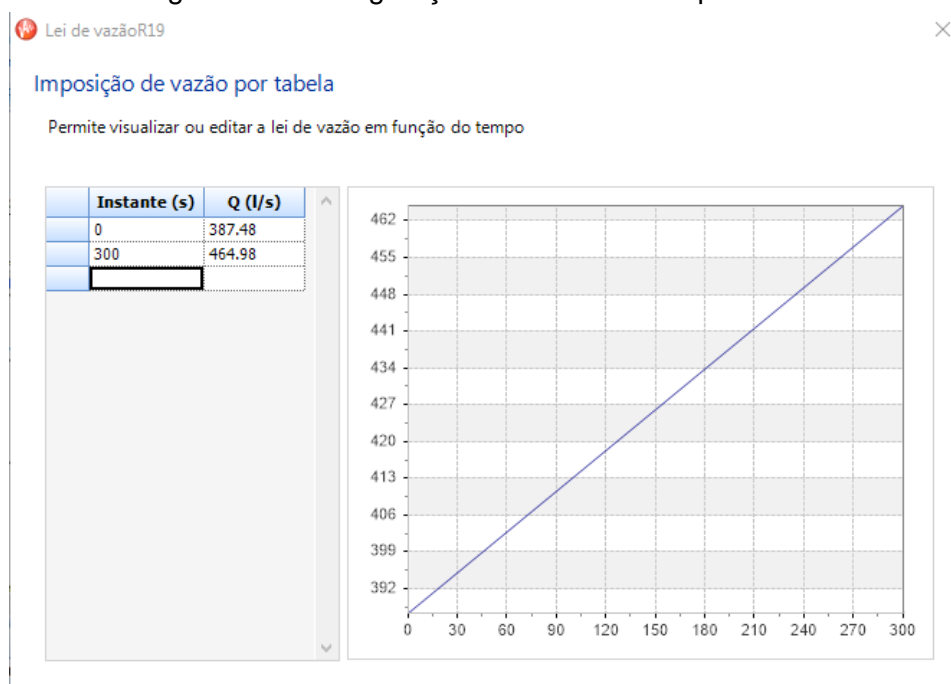
A terceira avaliação consistiu em estudar os transitórios oriundos do fechamento dessa mesma válvula, com tempo de fechamento de 20 segundos, porém, admitindo, com a condição de contorno “Lei de vazão por pressão”, que as vazões que afluem aos nós são muito pequenas, 10% da DMH estabelecida inicialmente, objetivando refletir o cenário noturno de consumo.

A quarta avaliação em regime não permanente consistiu na análise da influência da variação de consumo dos reservatórios e zonas atendidas pela subadutora (exceto a ZA 09) no comportamento hidráulico da ZA 09. Nessa análise os nós da ZA 09

continuaram regidos pela “Lei de Vazão por Pressão” tendo por base a DMH. A variação de consumo foi simulada com o uso da “Lei de vazão por tabela” considerando o aumento progressivo das vazões dos reservatórios e zonas atendidas pela subadutora (exceto a ZA 09) e a vazão máxima correspondeu a DMD para os reservatórios e a DMH para as ZA.

A análise teve início 300 segundos antes do alcance do pico das demandas, considerando um crescimento de 20% da vazão neste intervalo. Por exemplo, para o reservatório R19, a DMD estabelecida pela Sihs (2015) é de 464,98 L/s. Considerou-se então que, no instante inicial da avaliação, a vazão afluyente ao reservatório é 387,48 L/s e, 300 segundos após, a própria DMD, conforme Figura 21. A avaliação perdurou por mais 200 segundos após o alcance do pico da demanda, logo, teve duração total de 500 segundos.

Figura 21 – Configuração da Lei de vazão por tabela



Fonte: ITA (2010b, n.p.).

4.3.2 Zona de Abastecimento 23

A primeira análise da ZA 23 ocorreu em regime permanente para a DMH e avaliação das pressões estáticas considerando o NA máximo do RED do Setor R7. Em seguida, foram analisados os regimes transitórios ocasionados pelo rompimento de uma tubulação. A condição de contorno adotada para os nós foi a “Lei de vazão por

pressão” e a vazão adotada para condição de regime permanente foram as DMH dos nós com consumo, conforme a Sihs (2017).

Para simular, no Allievi, o efeito da ruptura de uma tubulação no sistema é necessário selecionar, no perfil da tubulação que vai sofrer a ruptura, a opção “Tubulação com ruptura” e introduzir os seguintes dados:

- Distância da origem (distância desde a origem da tubulação até o ponto onde se vai produzir a ruptura);
- Instante de início da ruptura;
- Duração da ruptura;
- Kv final (relaciona a vazão descarregada por ruptura Q_{rupt} com a pressão no interior da tubulação no ponto de ruptura P_{tub}) de acordo com a Equação 26:

$$Q_{rupt}(m^3/h) = Kv\sqrt{P_{tub}(bar)}$$

Equação 26

A ruptura foi inserida a 350 m do início do tubo N3 – N10 (Figura 15, página 89). O sistema foi avaliado por 200 segundos e adotou-se o Kv de 140 que para a pressão de 63 mH₂O (pressão aproximada no local da ruptura em regime permanente) resulta em uma vazão perdida no rompimento de 98 L/s que corresponde a 20% da vazão veiculada nesse trecho em regime permanente.

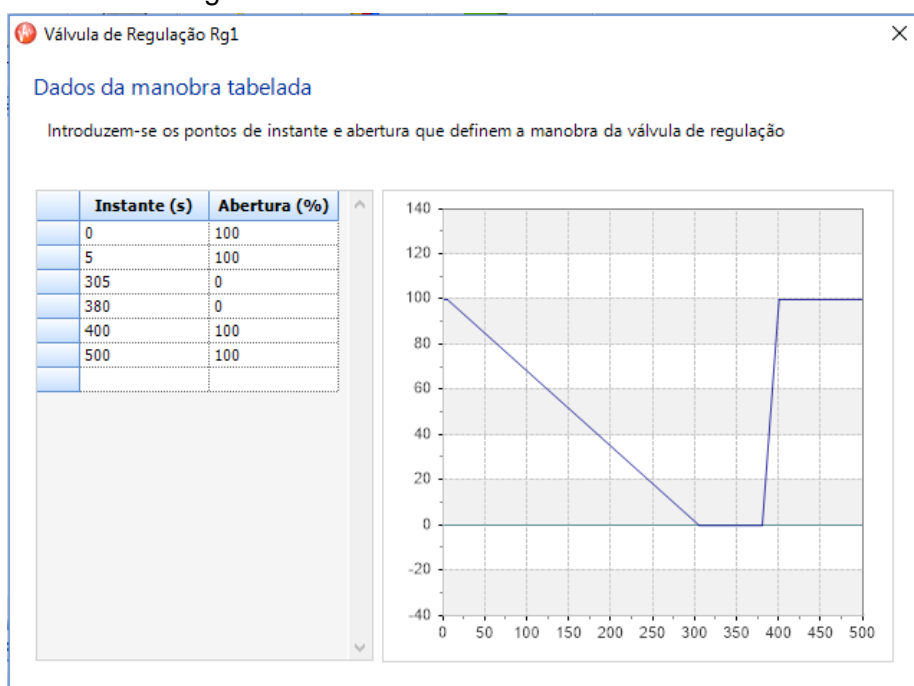
Ainda foram simulados mais dois cenários com ruptura: o primeiro considerando a vazão perdida no rompimento de 50% da vazão veiculada no trecho (estimada para a pressão em regime permanente) e, também, este mesmo cenário de perda no rompimento, porém com a rede submetida a um consumo mínimo (10% da DMH). A ruptura ocorreu 10 segundos após o início da simulação e não foi cessada durante a análise.

A terceira análise realizada nesta ZA considerou a abertura de uma válvula logo a jusante do RED do setor R7, conforme apontado na Figura 15 (página 89), com dois tempos de abertura, de 10 e 20 segundos, considerando a “Lei de vazão por pressão” como condição de contorno dos nós.

Como explanado, para estabelecimento da “Lei de vazão por pressão”, o Allievi realiza os cálculos em regime permanente e estabelece a perda de carga no nó para que, no regime permanente, a vazão de saída do nó seja a vazão imposta (no caso, a DMH).

Logo, não é possível que a simulação se inicie com a válvula fechada. Para contornar a situação, a simulação foi realizada da seguinte forma: no instante inicial, a válvula, do tipo borboleta, está totalmente aberta e, após 5 segundos, começa a ser fechada. O tempo de fechamento adotado foi muito lento (300 segundos) para que se produzisse menores oscilações de pressão. A válvula permaneceu fechada por 75 segundos quando foi totalmente aberta em 10 ou 20 segundos. O comportamento da rede foi observado por mais 110 segundos, quando o tempo de abertura foi de 10 segundos, ou 100 segundos, quando o tempo de abertura foi de 20 segundos. Dessa forma, a simulação durou 500 segundos em ambas as análises. O gráfico do comportamento da válvula para o tempo de abertura de 20 segundos pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 – Fechamento da válvula – ZA 23



Fonte: ITA (2010b, n.p.).

A avaliação com tempo de abertura de 20 segundos também foi realizada para demanda mínima no sistema, estabelecida como a demanda equivalente a 10% da DMH estimada pela Sihs (2017).

Para avaliação do evento transitório na rede secundária da ZA 23 foi considerada a situação de mínimo consumo em que as demandas dos nós (tanto da linha-tronco quanto da rede secundária) correspondem a 10% das respectivas DMH. Neste cenário, avaliou-se o fechamento de uma válvula logo a jusante do RED do setor R7,

conforme apontado na Figura 15 (página 89), com tempo de fechamento de 20 segundos, considerando a “Lei de vazão por pressão” como condição de contorno dos nós (inclusive os nós da linha-tronco). A simulação perdurou por 200 segundos.

4.3.3 Zona de Abastecimento 42

Esta ZA é a única entre as avaliadas que tem seu abastecimento garantido por um bombeamento diretamente na rede, através de uma derivação na linha de recalque com DN 700 que liga a EE Theodoro Sampaio, no Parque de ETA da Bolandeira, aos reservatórios do Setor R1. A derivação está instalada logo na saída da EE (SIHS, 2017).

Segundo Sobrinho (2012), a Embasa, através do convênio ECV-017/2004, executou um projeto para otimização operacional dessa EE. Entre outras medidas, neste projeto executou-se a recuperação de três bombas marca *Flowserve*, modelo 12LN26.

Devido à ausência de informações precisas, para efeito de simulação, admitiu-se que esta bomba é a que atualmente está em operação na EE em estudo e que dois conjuntos operam em paralelo, sendo que um deles compõe o esquema rodízio/reserva. Os dados da bomba foram obtidos no catálogo da *Worthington* (atualmente denominada *Flowserve*). Na ausência de informação acerca da rotação da bomba, foi selecionada a bomba de maior rotação (1.175 rpm), cuja curva é compatível com as condições admitidas e considerou-se que existem válvulas de retenção na saída das bombas. A curva da Bomba considerada está apresentada na Figura 23.

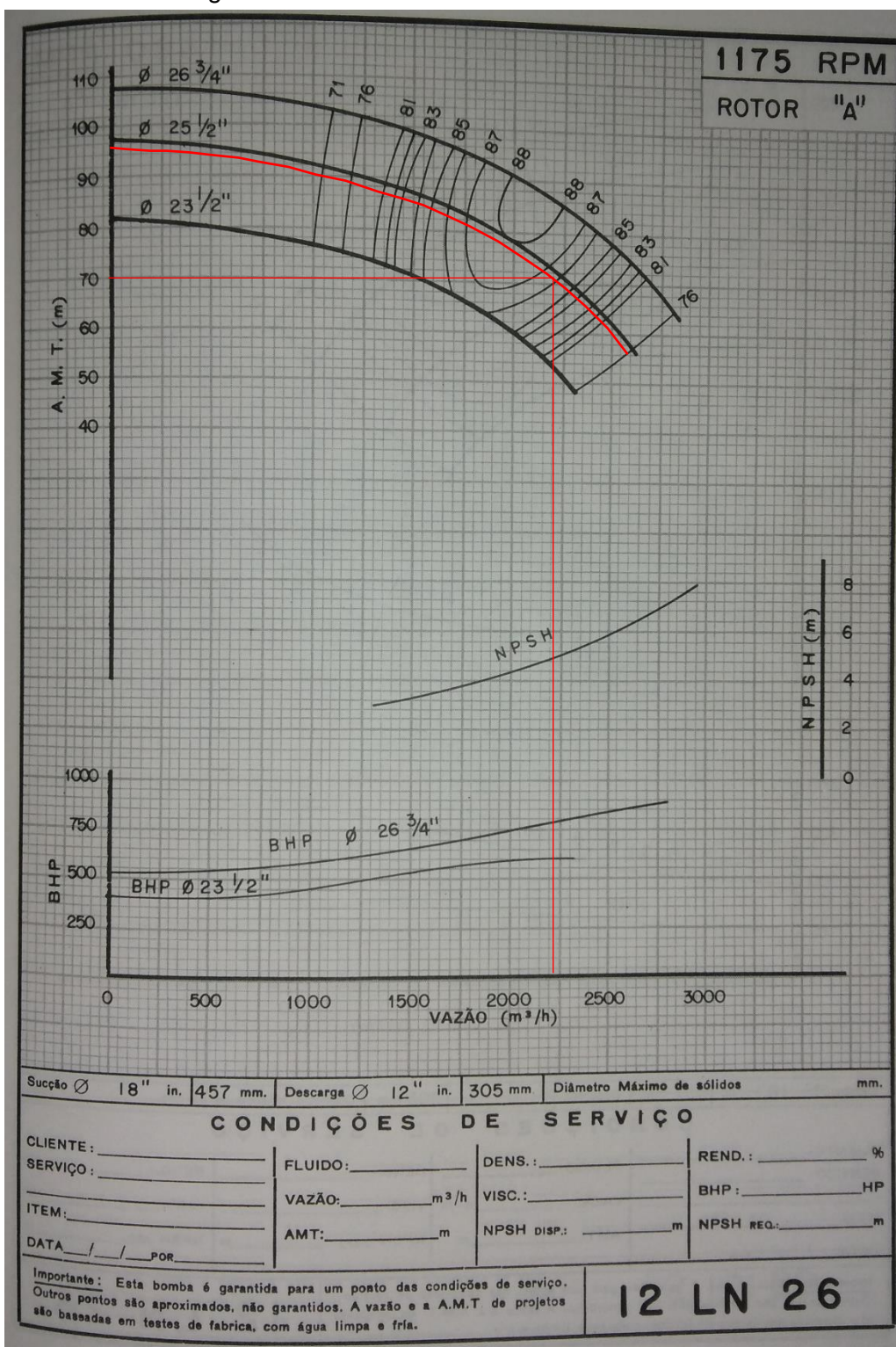
A vazão da bomba foi calculada admitindo o atendimento do reservatório R1 com a DMD da ZA 41, estimada para o ano de 2015, de 959,49 L/s e atendimento da ZA 42 com sua DMH de 281,66 L/s que resultou numa vazão total de 1.241,15 L/s ou 4.468,14 m³/h. Cada bomba deverá ser responsável pela adução de metade da vazão total. A altura manométrica total (AMT) foi calculada com auxílio do *software* Epanet 2.0 que é um modelo automatizado que permite simular o comportamento hidráulico estático e dinâmico de sistemas de distribuição de água pressurizados sujeitos a diversas condições operacionais e foi criado pela *United States Environmental Protection Agency*. A AMT correspondeu à altura necessária para superar os desníveis geométricos e as perdas de carga e atender ao reservatório R1 (elemento

de maior cota e mais distante entre os pontos a serem atendidos pela EE) com uma pressão residual de, pelo menos, 2 metros, que corresponde às possíveis perdas de cargas localizadas nas estruturas de chegada do reservatório.

A AMT estimada foi de 70 m e, para a vazão de 2.234,07 m³/h corresponde a um rotor com diâmetro entre 23,5 e 25,5 polegadas, eficiência de aproximadamente 86% e potência de 673 cv por bomba. Para seleção do motor, considerou-se o rendimento de 80% por se tratar de um conjunto instalado há muitos anos e também se acrescentou um coeficiente de segurança de 10% para seleção da potência. A potência total admitida para o conjunto motor-bomba foi de 925 cv ou 680 kW.

Para análise considerou-se que o motor é da marca Siemens, modelo *H-compact* 1LA4, 6 polos, momento de inércia de 27,3 kg.m², rotação de 1.200 rpm. Outras características do motor estão expostas na Figura 24.

Figura 23 – Curva da bomba 12 LN 26 – ZA 42



Fonte: Worthington (1988, n.p.).

Figura 24 – Características do motor admitido

© Siemens AG 2009

Motors for line operation
Air-cooled motors

H-compact 1LA4

Selection and ordering data (continued)

| Rated power IEC kW | High voltage motor H-compact Order No. | Speed rpm | Rated current | | Efficiency | | Power factor | | Torque Nm | Break-down torque T_{β}/T_{rated} | Locked-rotor torque $T_{L,\beta}/T_{rated}$ | Locked-rotor current $I_{L,\beta}/I_{rated}$ | Moment of inertia | |
|------------------------------|--|--------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------|--------------|--|--|---|--|--|
| | | | I_{rated} at 4.16 kV A | 4/4 load % | 3/4 load % | 4/4 load % | 3/4 load % | Motor kgm ² | | | | | External, max. ¹⁾ kgm ² | |
| 2.0 ... 6.6 kV, 60 Hz | | | | | | | | | | | | | | |
| 4-pole (continued) | | | | | | | | | | | | | | |
| 1000 | 1LA4 452-4AN | 1790 | 168.0 | 95.6 | 95.3 | 0.86 | 0.84 | 5335 | 2.40 | 1.00 | 5.5 | 24.0 | 366 | |
| 1100 | 1LA4 454-4AN | 1790 | 186.0 | 95.8 | 95.5 | 0.86 | 0.84 | 5868 | 2.40 | 1.00 | 5.5 | 27.0 | 443 | |
| 1350 | 1LA4 500-4AN | 1792 | 230.0 | 96.1 | 95.8 | 0.85 | 0.83 | 7194 | 2.40 | 0.90 | 5.5 | 33.0 | 277 | |
| 1450 | 1LA4 502-4AN | 1792 | 245.0 | 96.2 | 95.9 | 0.86 | 0.84 | 7727 | 2.40 | 0.90 | 5.5 | 37.0 | 348 | |
| 1600 | 1LA4 504-4AN | 1792 | 260.0 | 96.3 | 96.2 | 0.88 | 0.86 | 8526 | 2.40 | 0.90 | 5.5 | 42.0 | 413 | |
| 1870 | 1LA4 560-4CN | 1794 | 315.0 | 96.4 | 96.0 | 0.86 | 0.84 | 9954 | 2.50 | 0.55 | 5.5 | 79.0 | 356 | |
| 2090 | 1LA4 562-4CN | 1794 | 345.0 | 96.6 | 96.3 | 0.87 | 0.84 | 11125 | 2.60 | 0.60 | 5.6 | 92.0 | 458 | |
| 2350 | 1LA4 564-4CN | 1794 | 385.0 | 96.8 | 96.6 | 0.88 | 0.85 | 12508 | 2.60 | 0.60 | 5.6 | 104.0 | 540 | |
| 2640 ²⁾ | 1LA4 632-4CN | 1793 | 425.0 | 96.9 | 96.7 | 0.89 | 0.87 | 14068 | 2.3 | 0.55 | 5.5 | 157.0 | O.R. ³⁾ | |
| 2970 ¹²⁾ | 1LA4 634-4CN | 1794 | 475 | 97.1 | 96.9 | 0.89 | 0.87 | 15758 | 2.3 | 0.55 | 5.5 | 171.0 | O.R. ³⁾ | |
| 3300 ²⁾ | 1LA4 636-4CN | 1794 | 530 | 97.3 | 97.1 | 0.89 | 0.87 | 17573 | 2.3 | 0.55 | 5.5 | 186.2 | O.R. ³⁾ | |
| 6-pole | | | | | | | | | | | | | | |
| 275 | 1LA4 314-6AN | 1184 | 49.0 | 94.3 | 94.5 | 0.83 | 0.80 | 2218 | 2.40 | 1.20 | 5.2 | 5.3 | 247 | |
| 325 | 1LA4 316-6AN | 1185 | 58.0 | 94.7 | 95.0 | 0.82 | 0.80 | 2619 | 2.40 | 1.20 | 5.5 | 6.4 | 360 | |
| 380 | 1LA4 350-6AN | 1190 | 68.0 | 95.1 | 95.1 | 0.82 | 0.79 | 3049 | 2.40 | 1.15 | 5.3 | 10.8 | 498 | |
| 430 | 1LA4 352-6AN | 1190 | 75.0 | 95.3 | 95.4 | 0.83 | 0.80 | 3450 | 2.20 | 1.10 | 5.5 | 12.7 | 615 | |
| 510 | 1LA4 354-6AN | 1189 | 90.0 | 95.5 | 95.6 | 0.82 | 0.80 | 4096 | 2.30 | 1.15 | 5.5 | 15.0 | 689 | |
| 560 | 1LA4 400-6AN | 1192 | 98.0 | 95.6 | 95.5 | 0.83 | 0.80 | 4486 | 2.50 | 1.10 | 5.5 | 21.2 | 740 | |
| 670 | 1LA4 402-6AN | 1192 | 116.0 | 95.8 | 95.8 | 0.83 | 0.81 | 5367 | 2.40 | 1.10 | 5.5 | 24.2 | 780 | |
| 690 | 1LA4 404-6AN | 1191 | 120.0 | 95.8 | 95.8 | 0.83 | 0.82 | 5532 | 2.30 | 1.10 | 5.5 | 27.3 | 925 | |
| 800 | 1LA4 450-6AN | 1192 | 138.0 | 95.8 | 95.7 | 0.84 | 0.81 | 6409 | 2.30 | 1.10 | 5.4 | 33.0 | 947 | |
| 850 | 1LA4 452-6AN | 1192 | 144.0 | 95.9 | 95.9 | 0.85 | 0.83 | 6809 | 2.30 | 1.10 | 5.4 | 37.0 | 1083 | |
| 900 | 1LA4 454-6AN | 1192 | 154.0 | 96.0 | 96.0 | 0.85 | 0.83 | 7210 | 2.30 | 1.10 | 5.4 | 41.0 | 1489 | |
| 1120 | 1LA4 500-6CN | 1195 | 186.0 | 96.5 | 96.6 | 0.87 | 0.86 | 8950 | 2.20 | 0.75 | 5.5 | 82.0 | 1168 | |
| 1250 | 1LA4 502-6CN | 1195 | 205.0 | 96.7 | 96.7 | 0.88 | 0.86 | 9988 | 2.20 | 0.75 | 5.5 | 92.0 | 1308 | |
| 1360 | 1LA4 504-6CN | 1195 | 220.0 | 96.8 | 96.8 | 0.88 | 0.86 | 10867 | 2.20 | 0.75 | 5.5 | 102.0 | 1598 | |
| 1500 | 1LA4 560-6CN | 1195 | 245.0 | 96.7 | 96.7 | 0.87 | 0.86 | 11986 | 2.30 | 0.60 | 5.4 | 138.0 | 1425 | |
| 1800 | 1LA4 562-6CN | 1195 | 295.0 | 96.9 | 96.8 | 0.87 | 0.85 | 14383 | 2.35 | 0.65 | 5.5 | 158.0 | 1640 | |
| 2000 | 1LA4 564-6CN | 1195 | 325.0 | 97.1 | 97.0 | 0.88 | 0.86 | 15982 | 2.30 | 0.60 | 5.4 | 183.0 | 1980 | |
| 2255 ²⁾ | 1LA4 632-6CN | 1194 | 360 | 96.8 | 96.6 | 0.89 | 0.87 | 18043 | 2.3 | 0.50 | 5.5 | 269.1 | O.R. ³⁾ | |
| 2530 ²⁾ | 1LA4 634-6CN | 1194 | 400 | 96.9 | 96.7 | 0.90 | 0.88 | 20243 | 2.3 | 0.50 | 5.5 | 297.4 | O.R. ³⁾ | |
| 2750 ²⁾ | 1LA4 636-6CN | 1194 | 435 | 97.0 | 96.9 | 0.90 | 0.88 | 22003 | 2.3 | 0.50 | 5.5 | 323.0 | O.R. ³⁾ | |

| | |
|------------------------------|---|
| Voltage code: | |
| 4 kV, 60 Hz | 4 |
| 6.6 kV, 60 Hz | 1 |
| Other voltage | 9 |
| Type of construction: | |
| IM B3 | 0 |
| IM V1 (with canopy) | 4 |
| IM V1 (without canopy) | 8 |

Note:
Efficiencies according to IEC 60034-2-1:2007; load-dependent supplementary losses determined by statistically evaluated measurements.

¹⁾ Max. permissible external moment of inertia for three starts from cold or two starts from warm under the conditions described on page 2/2.

²⁾ Not available for ≤ 3.3 kV.

³⁾ On request.

2

Para avaliar estações de bombeamento, no Allievi, é necessário fornecer os seguintes dados:

- Número de bombas em paralelo: 2;
- Forma da curva característica das bombas: neste caso ajustadas por pontos lidos na curva da bomba (Figura 23);
- Tipo de válvula de grupo: válvula de retenção;
- Inércia de cada grupo: é o momento de inércia das massas girantes de cada grupo, e inclui o rotor da bomba, o eixo, o acoplamento e o rotor do motor de acionamento. No caso, como não se dispõe destes dados, o programa proporciona uma estimativa do momento de inércia do grupo utilizando a fórmula de Thorley onde I é o momento de inércia do grupo em kg.m^2 , P a potência nominal do grupo em kW, e N a velocidade de rotação nominal em mil rpm conforme a Equação 27.

$$I = 0,03768 \left(\frac{P}{N^3} \right)^{0,9556} + 0,0043 \left(\frac{P}{N} \right)^{1,48}$$

Equação 27

- Velocidade de rotação de regime permanente: adotou-se a mesma velocidade da rotação nominal, 1.175 rpm;
- Velocidade de rotação nominal: 1.175 rpm; e
- Funcionamento inicial das bombas: ligadas.

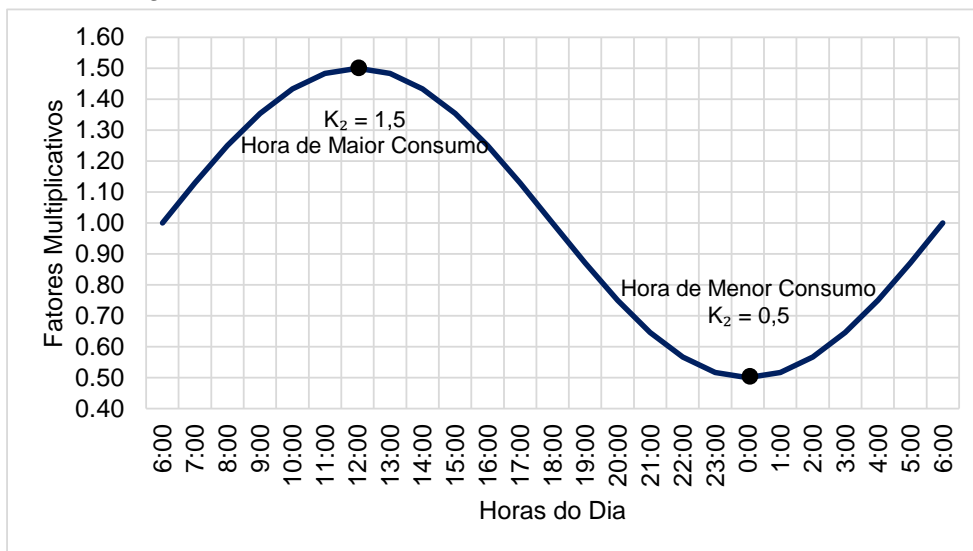
Foi simulada a hipótese de queda de energia e interrupção do funcionamento dos dois conjuntos. A queda de energia ocorreu 5 segundos após o início da simulação que teve duração total de 300 segundos. Foi considerada a “Lei de vazão por pressão” como condição de contorno para os nós e a vazão adotada para condição de regime permanente foram as DMH dos nós com consumo conforme Sihs (2017).

4.3.4 Zona de Abastecimento 60

A primeira análise da ZA 60 ocorreu em regime permanente para a DMH e avaliação das pressões estáticas. Em seguida a rede foi avaliada levando em consideração a oscilação de consumo esperada ao longo do dia dentro da própria ZA. Como não se dispõe da curva de consumo da zona, foi feita uma hipótese de variação da curva, admitindo-se a forma senoidal, como recomenda Tsutiya (2006, p. 359). Para isso, a

demanda do dia de maior consumo (DMD) foi multiplicada por fatores que variam ao longo do dia (respeitando a forma senoidal) de modo que o maior fator multiplicativo, que equivale ao coeficiente da hora de maior consumo (K_2), seja igual a 1,5, alcançado às 12:00 horas como ilustra a Figura 25.

Figura 25 – Curva de consumo assimilada a uma senóide



Fonte: elaboração própria (2017).

Para análise desse cenário, no Allievi, foi utilizada a “Lei de Vazão por tabela” como condição de contorno dos nós. Devido ao custo computacional de realizar a análise para as 24 horas, em apenas uma simulação, avaliou-se os 3.600 segundos que antecedem o pico de demanda (momento em que ocorre a DMH).

A terceira análise consistiu no fechamento de uma válvula logo a jusante do reservatório que a alimenta a ZA, durante a hora de maior consumo. Considerou-se que no instante inicial a válvula está totalmente aberta e, passados 10 segundos, totalmente fechada. Ressalta-se, mais uma vez que, apesar de autores como Kwon (2007) realizarem simulações com tempos de fechamento menores, as válvulas instaladas são de grandes diâmetros e geralmente do tipo gaveta ou borboleta que impõe um fechamento mais lento.

A análise dos transitórios, devido à manobra de fechamento da válvula, foi realizada considerando a “Lei de vazão por pressão” como condição de contorno para os nós e a simulação perdurou por 200 segundos. Na sequência, a mesma simulação foi realizada considerando um cenário de consumo mínimo na ZA (10% da DMH).

Como se verá no item 5 (página 121), em regime permanente, a rede da ZA 60 não tem condições de ser totalmente atendida com a DMH estipulada pelo Parns (SIHS, 2017). Nestes casos em que o sistema não tem capacidade hidráulica para atender determinada vazão de um nó, também não é possível impor a “Lei de vazão por pressão” para este nó com essa vazão uma vez que não será possível definir a perda de carga necessária para atingi-la em regime permanente.

Desse modo, a solução encontrada foi estabelecer que, nos nós das regiões da ZA 60, precariamente abastecidas, a “Lei de vazão por pressão” está configurada para atender à vazão máxima que o sistema pode aduzir àquele nó (vazão inferior a DMH do nó). Assim sendo, a perda de carga localizada, calculada pelo sistema para regime permanente para a “Lei de vazão por pressão”, é zero.

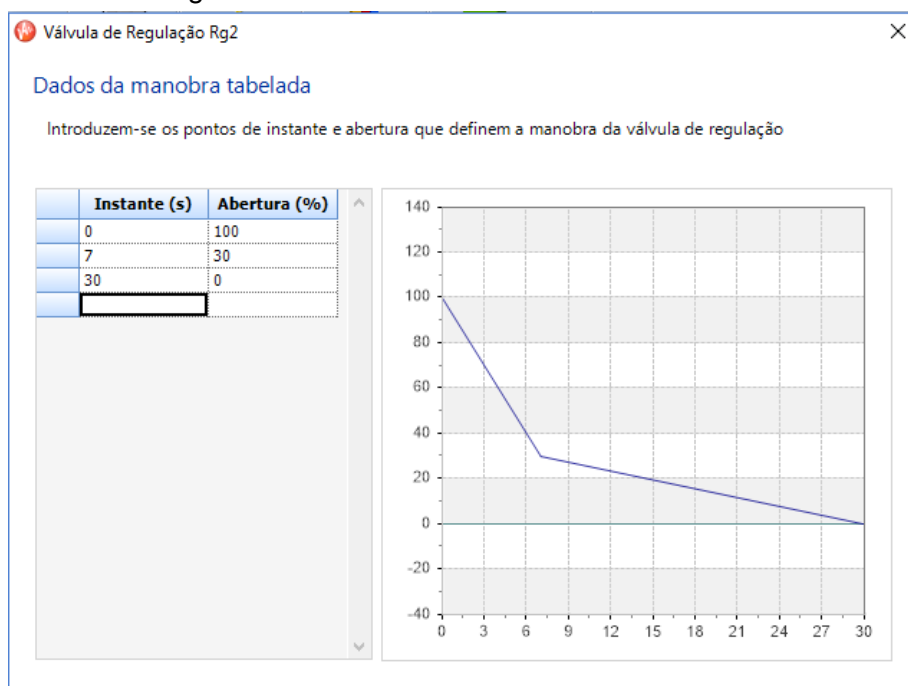
4.3.5 Mecanismos de proteção contra transitórios hidráulicos

4.3.5.1 Manobra de fechamento de válvulas de regulação

A simulação da ZA 09, considerando o consumo dos nós iguais a 10% da DMH e a “Lei de vazão por pressão” como condição de contorno para os nós, foi reavaliada utilizando diferentes condições de fechamento da válvula.

Avaliou-se, inicialmente, os tempos de fechamento uniformes, com duração de 20, 40 e 60 segundos, de forma semelhante ao apresentado na Figura 19 (página 102). Em seguida, foi realizada a simulação do fechamento, com duração total de 30 segundos, porém mais rápido até o fechamento de 70% da abertura da válvula e mais lento no terço final do fechamento, conforme Figura 26. Esse fechamento, mais rápido no começo e mais lento no fim, tem o intuito de modificar a vazão do sistema de forma mais lenta, dada a curva típica de uma válvula borboleta apresentada na Figura 20 (página 103).

Figura 26 – Fechamento controlado da válvula



Fonte: ITA (2010b, n.p.).

4.3.5.2 Válvulas de admissão e saída de ar

Também foi avaliado o uso de quatro válvulas de admissão e saída de ar nos pontos altos da rede da ZA 09, onde foram observadas pressões negativas durante os eventos transitórios provocados pelo fechamento de uma válvula, a jusante do reservatório R7, em 20 segundos. A proposição de válvulas de admissão e saída de ar na rede de distribuição está prevista na NBR 12218 e tem o objetivo de proteger o sistema durante o enchimento e esvaziamento da rede (ABNT, 2017). Os pontos altos de um sistema são também muito sensíveis às depressões provocadas por transitórios hidráulicos, neste caso então, com função de dispositivo de proteção contra o transitório hidráulico, também se poderá recorrer às válvulas de admissão e saída de ar.

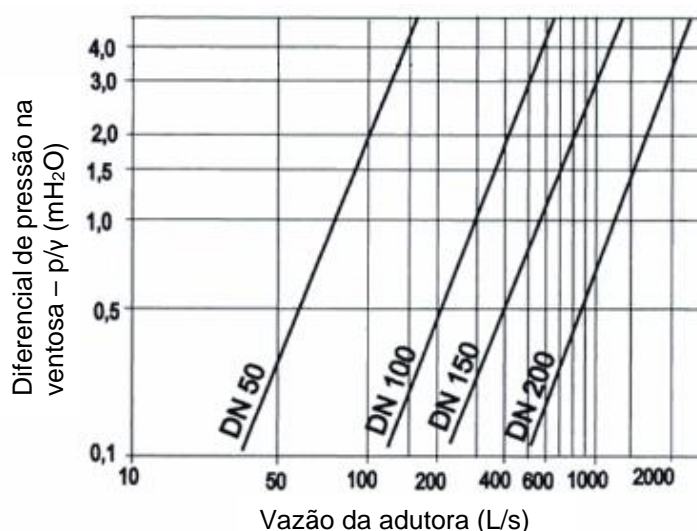
A ventosa de duplo efeito simulada é capaz de realizar as duas funções, evacuar grandes quantidades de ar durante o processo de enchimento e admitir grandes quantidades de ar no processo de esvaziamento do tubo. Caso ocorra qualquer fenômeno capaz de gerar depressões no sistema, a ventosa admitirá ar em grandes quantidades, como resposta ao desequilíbrio de pressões.

O cadastro da rede de distribuição disponibilizado para o estudo não possui elevado número de cotas ao longo das tubulações, sendo que alguns trechos são considerados retilíneos com cotas apenas nos nós apresentados nas figuras das zonas (Figura 13 (página 87), Figura 15 (página 89), (página 91) e Figura 18 (página 93)). Não se sabe também se há ventosas na rede apesar de que não era uma prática, especialmente em projetos mais antigos, o uso de ventosas em sistemas distribuidores de água.

Como na ZA 09 as pressões negativas foram observadas apenas no ramo central e de topografia mais elevada da rede (Figura 13, ramo que inicia no nó ZC16 e termina no nó ZC3), apenas para esse trecho foi estudado o uso de quatro ventosas. As válvulas de admissão e saída de ar têm outras funções além de proteger o sistema contra os transitórios hidráulicos, porém, considerando os objetivos deste estudo e a disponibilidade de dados, as válvulas foram lotadas e avaliadas com o objetivo de amenizar a intensidade do golpe de aríete.

A NBR 12218 (ABNT, 2017) não traz indicações do dimensionamento de válvulas de admissão e saída de ar para redes de distribuição. Para a simulação foi, inicialmente, selecionada uma válvula utilizando o gráfico fornecido por um fabricante de ventosa exposto na Figura 27, como recomendado por Heller e Pádua (2006). Segundo esse gráfico, o dimensionamento pode ser realizado considerando a vazão da adutora e um diferencial de pressão entre a atmosfera e o interior da ventosa recomendado de 3,5 mH₂O.

Figura 27 – Gráfico para tamanho de ventosa de tríplice função

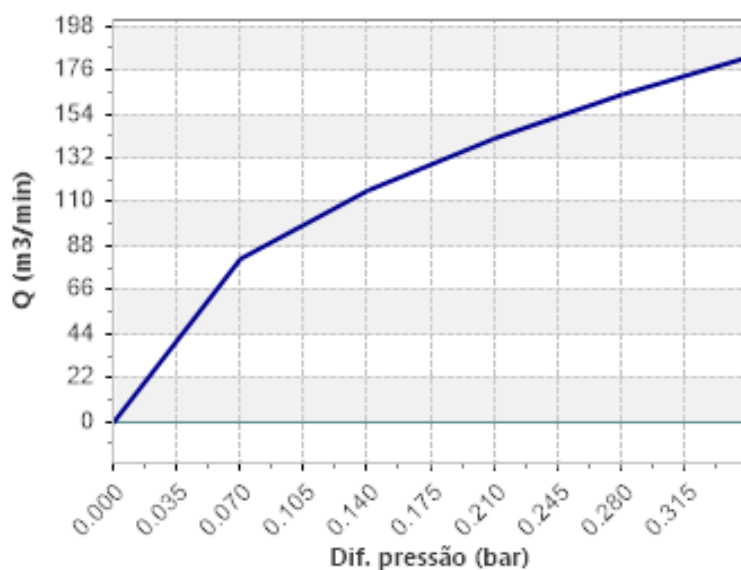


Fonte: adaptado de Heller e Pádua (2006, p. 449).

Baseando-se no gráfico exposto, considerando-se a vazão em regime permanente das linhas onde será avaliado o uso das válvulas, o DN das ventosas deverá ser 50. Esse resultado coincide com o indicado na NTS 021 que, tratando de Conduitos Forçados – Elaboração de Projetos (SABESP, 2017), diz que o diâmetro padronizado para ventosa de duplo efeito, para adutoras, é 50 mm para tubos de diâmetro menor ou igual a 600 mm. Foram utilizadas recomendações direcionadas para projetos de adutoras devido à não identificação de recomendações de locação e dimensionamento de ventosas em redes de distribuição.

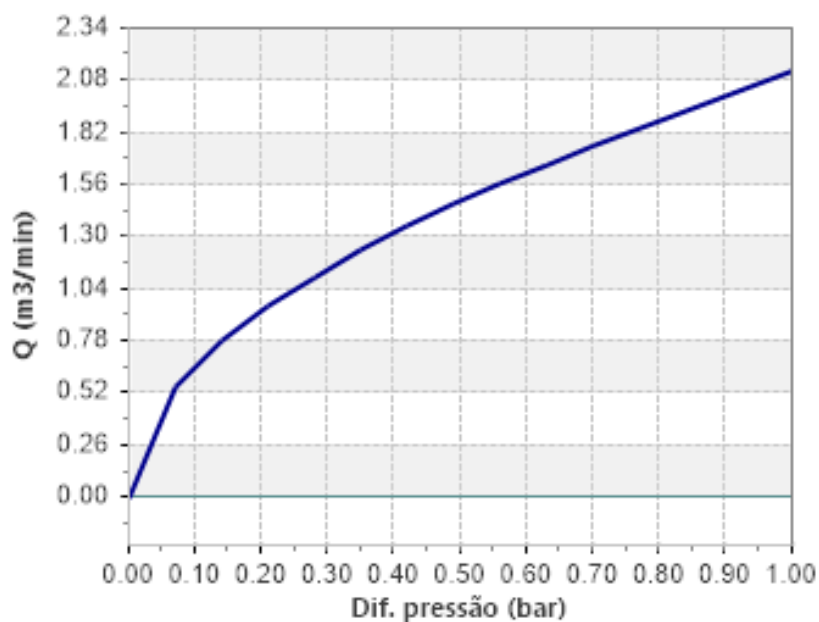
Com as simulações percebeu-se que, nas condições estabelecidas, as válvulas de DN 50 não eram suficientes para evitar que a rede fosse submetida a pressões negativas durante os eventos transitórios estudados. Sucessivas simulações foram realizadas com diâmetros progressivamente maiores e, por fim, foram consideradas quatro válvulas com DN de admissão de ar de 200 e de expulsão de ar de 15. Foram adotadas válvulas com DN de expulsão de ar menor do que de admissão para evitar elevadas velocidades na expulsão que poderiam ocasionar sobrepressões importantes quando ocorresse o reencontro da coluna líquida. A curva de admissão e expulsão considerada foi a proposta na base de dados do *software* para válvulas com esses DN. As curvas baseiam-se em curvas fornecidas por catálogos de válvulas comerciais e estão apresentadas na Figura 28 e na Figura 29.

Figura 28 – Curva de admissão de ar – Ventosa com DN de admissão 200 e de expulsão 15



Fonte: ITA (2010b, n.p.).

Figura 29 – Curva de expulsão de ar – Ventosa com DN de admissão 200 e de expulsão 15



Fonte: ITA (2010b, n.p.).

4.3.5.3 Reservatório hidropneumático

Para análise do uso do RHO foi avaliada a ZA 23, com sua rede secundária fictícia. Foi inserido um RHO 155 m a jusante da válvula que é manobrada, no nó N3 (Figura 15). Este nó possui cota de 14,65 m enquanto a válvula possui cota de 102,5 m. Simulações foram realizadas lotando o RHO em cotas mais altas e mais próximas da válvula, porém, seria necessário que o dispositivo tivesse volumes maiores e, por isso, o RHO foi lotado no nó de menor cota mais próximo da válvula e que, conseqüentemente, tem maior cota piezométrica em regime permanente, utilizada para dimensionamento do dispositivo.

Os ábacos para pré-dimensionamento dos RHO são, na quase totalidade, referentes a um tubo que alimenta um reservatório de grande dimensão através de estações elevatórias equipadas com válvulas de retenção que se fecham, instantaneamente, imediatamente após a interrupção do fornecimento de energia ao motor do conjunto motor-bomba.

A literatura consultada não traz métodos para dimensionamento de RHO instalados em redes com múltiplos anéis e derivações. Apesar de Jung e Karney (2009) trazerem o RHO como dispositivo que pode ser usado para proteção de redes de distribuição, não especificam como deve ser o dimensionamento. A rede em análise totaliza 12.283

m de rede com onze anéis, 13 ramos e diversas tubulações em paralelo, logo, os ábacos serão utilizados para um pré-dimensionamento, mas não são recomendados para dimensionamento final do dispositivo para redes de distribuição.

Para a simulação fez-se uma estimativa inicial para as dimensões do RHO através da solução gráfica para o dimensionamento de tais dispositivos, proposta por Parmakian (1963). Esta solução é recomendada para sistemas compostos por tubos que alimentam um reservatório de grande dimensão através de estações elevatórias.

Para uso desse método na ZA 23 considerou-se que toda a extensão de rede é um tubo retilíneo, usou-se o diâmetro, a rugosidade e a velocidade média nos trechos, a vazão total do sistema e a carga piezométrica em regime permanente no RHO. Esse dimensionamento resultou em um volume aproximado de 55 m³ para o dispositivo que correspondeu ao primeiro volume simulado. Na sequência, foram realizadas sucessivas simulações com volumes cada vez menores para, então, encontrar uma dimensão para o RHO que atenuasse as ondas de pressão e fosse também um volume comercial e mais econômico.

Optou-se, então, por inserir um RHO vertical com membrana, volume de 30 m³, perdas de carga na entrada dez vezes superior às perdas de cargas na saída (k igual a 20 na entrada e igual a 2 na saída) e expoente politrópico de 1,2 que conduz a valores próximos à realidade (DARZÉ, 1988). O volume do gás no dispositivo ocupa um terço do seu volume total.

4.3.5.4 *Tanque alimentador unidirecional*

Também foi avaliado o cenário com instalação de um TAU na região de cota mais alta da ZA 09, onde foram observadas pressões negativas após o fechamento de uma válvula, entre os nós ZC6 e ZC3 (Figura 13, página 87).

O dimensionamento preliminar do volume útil mínimo do TAU foi determinado, de uma forma aproximada, com a Equação 28 apresentada por Almeida (1982) que se baseia no modelo rígido sem perdas de carga e é válida para uma linha de recalque contínua, sem derivações e sem anéis, que alimenta um reservatório de grande dimensão. Esse método foi utilizado, com as considerações apresentadas na sequência, por não ter sido localizado, na literatura consultada, um método para dimensionamento de TAU para redes de distribuição formada por anéis e

ramificações. Depois de obtido o volume mínimo com a Equação 28, foram realizadas sucessivas simulações com volumes superiores e inferiores para se obter um volume adequado para o sistema.

$$V_{TAU} = \frac{L \cdot Q_0^2}{2 \cdot g \cdot S \cdot H_{gu}}$$

Equação 28

Sendo

V_{TAU} – volume útil mínimo do TAU (m^3);

L – comprimento da tubulação de recalque a jusante do TAU (m) (considerou-se a extensão da rede entre os nós ZC16 e ZC3);

Q_0 – vazão de regime permanente inicial (m^3/s) (a vazão variará ao longo dos trechos, foi considerada a vazão total do sistema);

S – seção interna do tubo (m^2) (considerou-se a seção média das tubulações);

H_{gu} – desnível entre o plano de água no TAU e a superfície livre no reservatório de jusante (m) (considerou-se o desnível entre o plano de água no TAU e a cota do nó de jusante do ramo da rede em que o TAU foi instalado).

O volume obtido através da Equação 28 foi de aproximadamente $2 m^3$, porém as simulações indicaram que, no local em que o TAU foi posicionado, o volume de $5,3 m^3$ foi mais adequado para evitar pressões negativas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na sequência, serão apresentados os resultados observados para cada ZA analisada conforme descrito no item 4.

5.1 ZONA DE ABASTECIMENTO 09

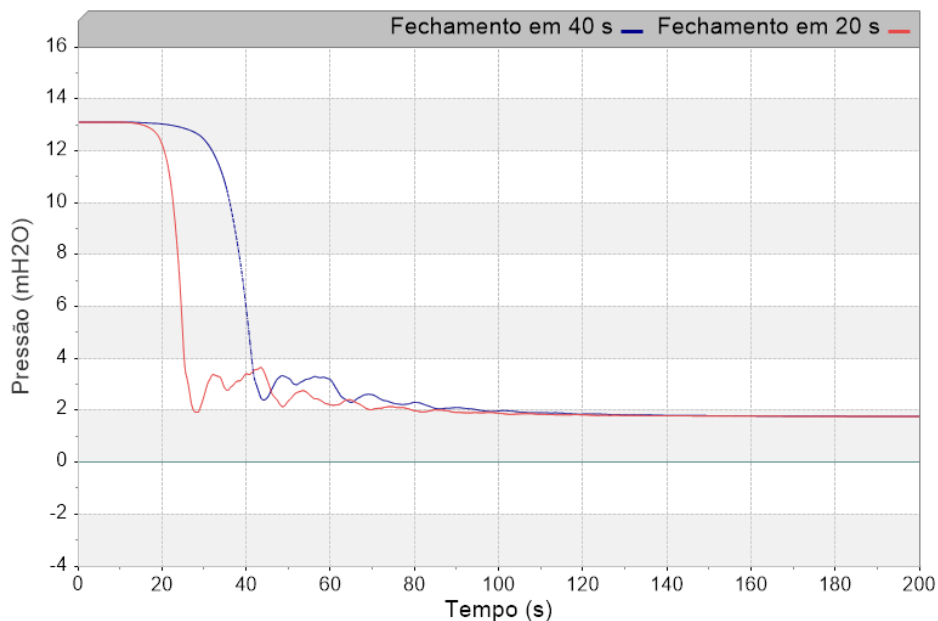
A avaliação das pressões estáticas da ZA 09, considerando o NA máximo do RAD do Setor R7, apontaram pressões superiores a 50 mH₂O, limite estabelecido pela NBR 12218 (ABNT, 2017), em 50% dos nós avaliados, e, em alguns pontos, ultrapassou 60 mH₂O.

Na avaliação em regime permanente, as pressões dinâmicas em todos os nós foram maiores do que 10 mH₂O e, em parte deles, superiores a 50 mH₂O, o que permite inferir que a ZA não tem demanda reprimida e todas as regiões são bem abastecidas independentemente do horário. Porém, essas pressões elevadas mantidas ao longo de todo o dia já podem justificar o elevado percentual de perdas da ZA.

Na avaliação do regime transitório, o fechamento de uma válvula a jusante do reservatório R7, considerando a “Lei de vazão por pressão” como condição de contorno para os nós com demandas, resultou em uma redução brusca de pressão que, no entanto, não atingiu a pressão atmosférica em nenhum nó.

Nos nós com cotas mais altas, como no nó ZC3 (de maior cota da ZA), que é também o nó cuja água percorre maiores distâncias (*vide* Figura 12, página 86), foram observadas as menores pressões, da ordem de 2 mH₂O, para ambos os tempos de fechamento da válvula (20 e 40 segundos). Esta é a mesma pressão observada no regime permanente estabelecido após a manobra. O tempo de fechamento mais lento, neste caso, apenas reduziu um pouco a magnitude da oscilação de pressão inicial. A oscilação de pressão com os dois tempos de fechamento para o nó ZC3 pode ser observado na Figura 30. Nos demais nós da rede foram observados resultados semelhantes.

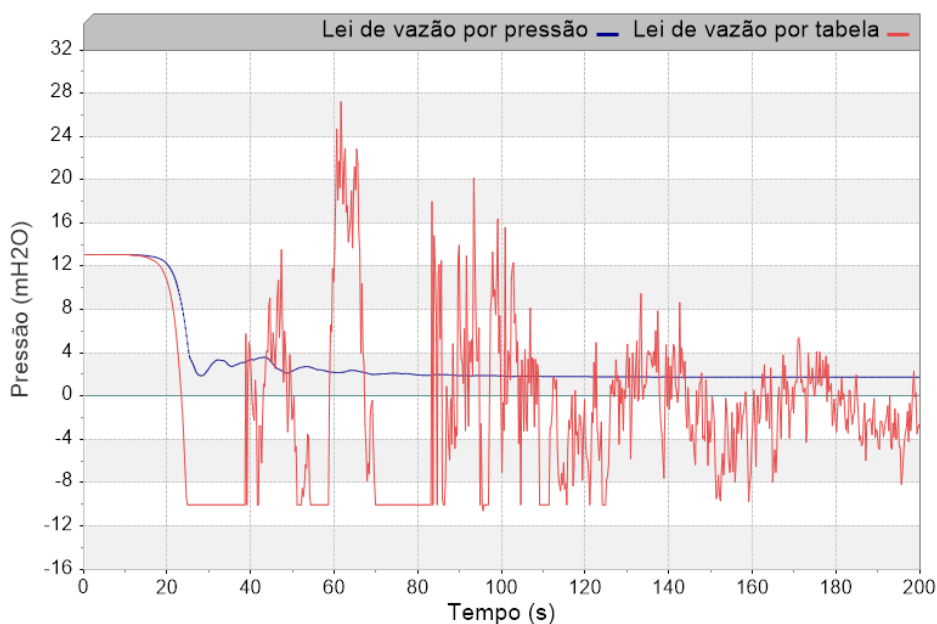
Figura 30 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula (20 e 40 s) – ZA 09 – nó ZC3



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no software Allievi (ITA, 2010b).

A simulação do fechamento de válvula, adotando como condição de contorno para os nós com demanda a “Lei de vazão por tabela”, levou a resultados que se distinguiram muito do observado quando utilizada a “Lei de vazão por pressão”. A Figura 31 apresenta os resultados, tanto da avaliação que considerou a “Lei de vazão por pressão” quanto da que considerou a “Lei de vazão por tabela”, para o nó ZC3, para o tempo de fechamento de 20 segundos.

Figura 31 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula – Lei de vazão por pressão e por tabela – ZA 09 – nó ZC3

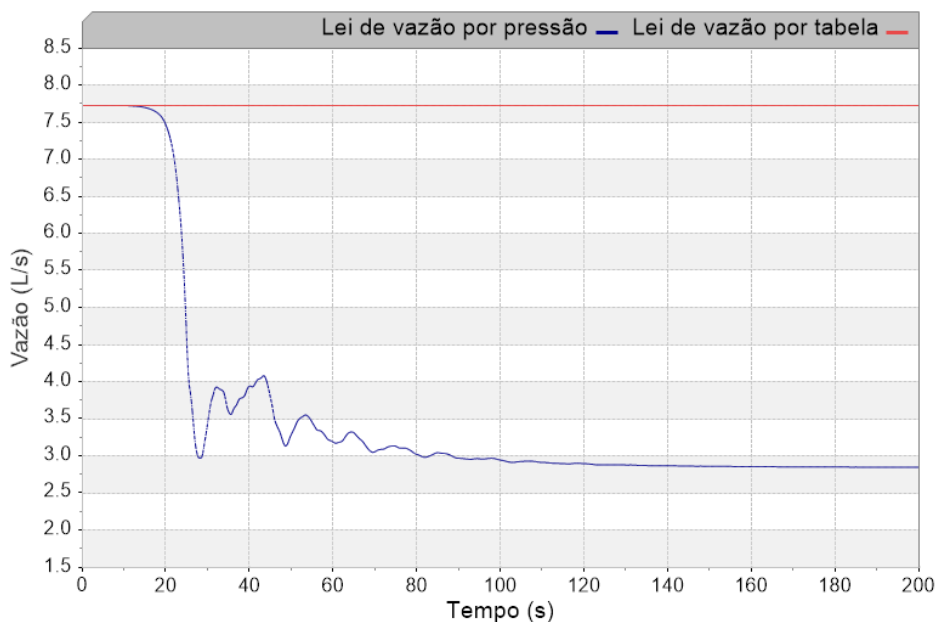


Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

Quando utilizada a condição de contorno, “Lei de vazão por tabela”, o sistema ficou submetido a pressões mínimas possíveis (pressão do vapor), enquanto, quando estabelecida a “Lei de vazão por pressão”, as oscilações não significaram ameaças para a segurança hídrica ou integridade do sistema.

Hidraulicamente, quando se considera a “Lei de vazão por pressão”, o nó opera como um orifício que, quando as pressões excedem, há uma descarga para a atmosfera e quando as pressões são negativas permite a entrada de vazão, reduzindo a intensidade das oscilações de pressão. A variação da vazão com o tempo, no nó ZC3, para o tempo de fechamento da válvula de 20 segundos, para ambas as condições de contorno impostas pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 – Variação de vazão – fechamento de válvula - Lei de vazão por pressão e por tabela – ZA 09 - nó ZC3



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

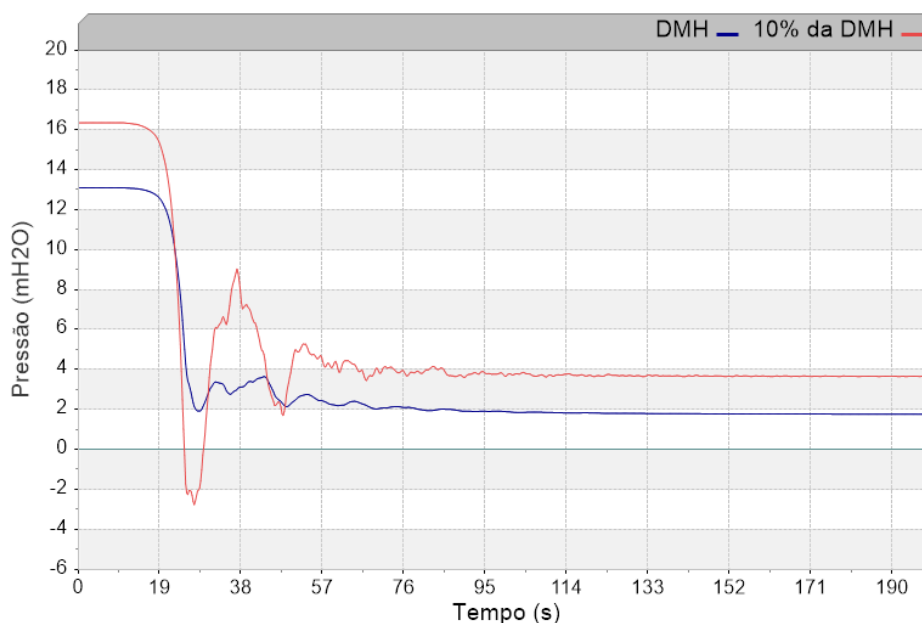
A variação da vazão no nó ZC3, quando avaliado com a “Lei de vazão por pressão”, como era de se esperar, acompanha a variação da pressão no nó enquanto, quando avaliado com a “Lei de vazão por tabela”, a vazão permanece constante. Considerando que nas extremidades das redes existem tubos, com saídas livres para a atmosfera, sem nenhum outro tipo de controle que não seja a total obstrução ou abertura da tubulação (proporcionado com auxílio de uma boia) a não variação da vazão quando o sistema é submetido a ondas de pressão não está correta. Por isso, nas condições estudadas, considerou-se a “Lei de vazão por pressão” mais coerente para a análise dos transitórios em redes de distribuição no Allievi.

Destaca-se também que, a capacidade de a saída das tubulações, ligadas aos reservatórios, funcionarem de forma semelhante a uma válvula de alívio só ocorre enquanto os reservatórios residenciais estão enchendo e, a partir do instante em que a boia fecha a saída de água para o reservatório, este efeito é interrompido. Este fato motivou a análise do sistema considerando uma vazão mínima, simulando uma condição noturna de consumo de água.

A análise considerando a redução do consumo para 10% da DMH para a “Lei de vazão por pressão” resultou em maior e, conseqüentemente, mais danosa oscilação de pressão. A comparação da análise para o tempo de fechamento da válvula de 20

segundos para a DMH e para 10% da DMH para o nó ZC3 pode ser observado na Figura 33.

Figura 33 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula - DMH e 10% da DMH – ZA 09 – nó ZC3

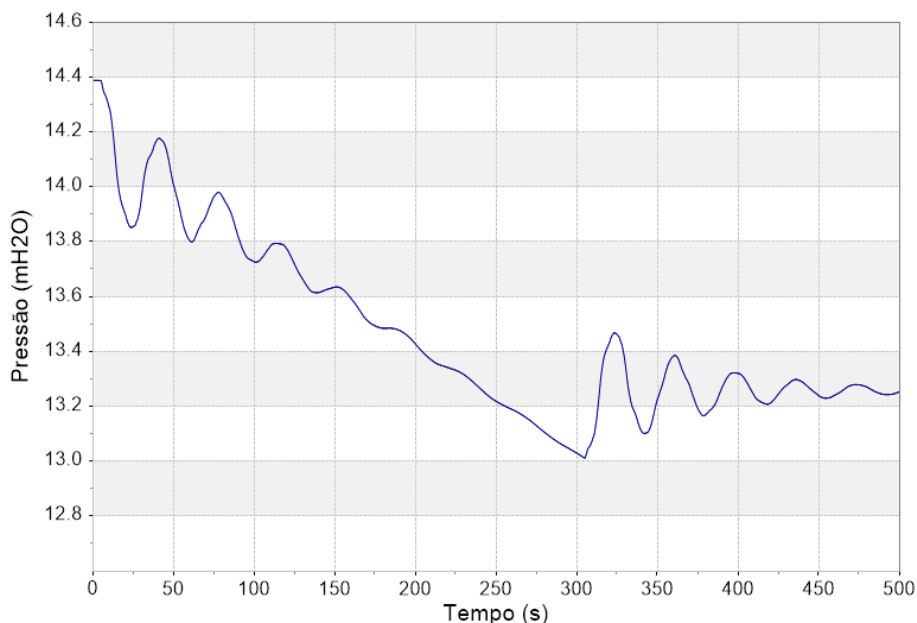


Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

Quando ocorre a vazão mínima, apesar de a velocidade no sistema, no momento em que inicia o regime transitório, ser menor, a função semelhante a uma válvula de alívio que a condição de contorno “Lei de vazão por pressão” impõe é reduzida significativamente e as oscilações de pressão resultantes são superiores. Os horários de menores vazões parecem ser os horários em que as perturbações no sistema levam a eventos transitórios mais intensos.

A avaliação do regime transitório, ocasionado pela variação de consumo na subadutora, não afetou significativamente as pressões na rede de distribuição da ZA 09. Conforme relata Sharp (1981 *apud* KARNEY, 1984) quando as mudanças nas condições de vazão ocorrem lentamente, é possível ir, gradualmente, de uma condição de regime permanente para outro regime permanente, conforme foi observado nesta análise. A maior oscilação aconteceu nas tubulações e nós inseridos nas áreas mais altas. Na Figura 34 observa-se a oscilação de pressão no nó ZC3 que variou entre 14,38 mH₂O e 13,01 mH₂O.

Figura 34 – Oscilação de pressão – variação de consumo na subadutora – ZA 09 – nó ZC3



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

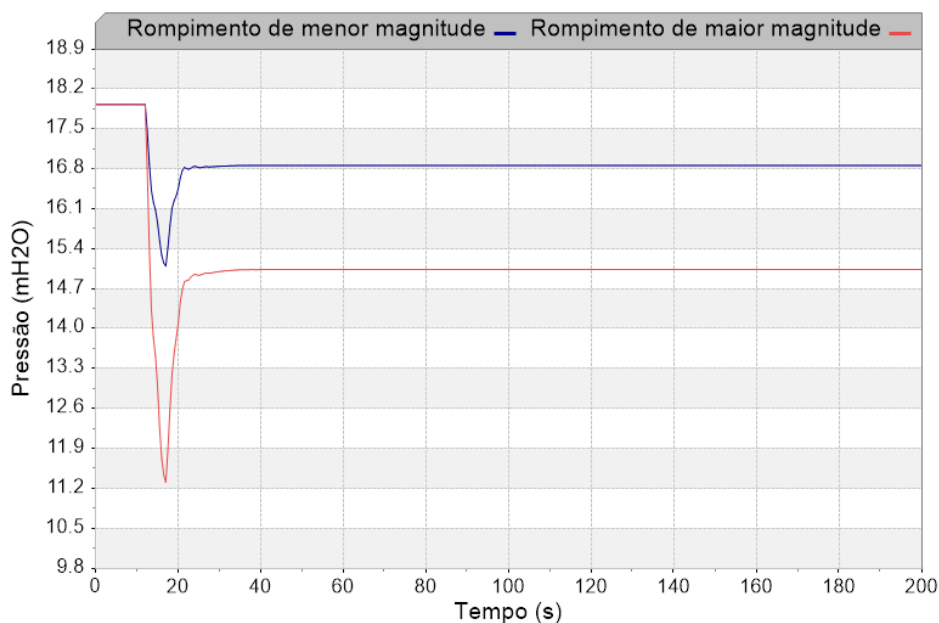
Neste caso, as pressões na rede não superaram a pressão em regime permanente e tiveram pequenas oscilações tendendo à redução da pressão, resultante da queda da linha piezométrica, devido ao aumento da perda de carga distribuída em consequência do aumento da vazão.

5.2 ZONA DE ABASTECIMENTO 23

As avaliações em regime permanente apontaram para a ZA 23 pressões dinâmicas e estáticas superiores a 10 mH₂O e inferiores a 50 mH₂O, para a maior parte da rede, devendo não serem as pressões em regime permanente a razão do elevado percentual de perdas de água desta ZA.

O rompimento repentino da tubulação de dimensões intermediárias (20% da vazão veiculada em regime permanente) e de dimensões maiores (50% da vazão veiculada em regime permanente), considerando um cenário de máximo consumo, provocou uma queda inicial de pressão no sistema que rapidamente se estabilizou em um novo regime permanente. A redução brusca da pressão foi mais intensa no rompimento de maior magnitude. Na Figura 35 está apresentada a oscilação de pressão para as duas considerações no nó de maior cota do sistema, nó N25, onde foram observadas as maiores oscilações. Nessas condições não foram produzidas pressões superiores às pressões em regime permanente em nenhum nó da rede.

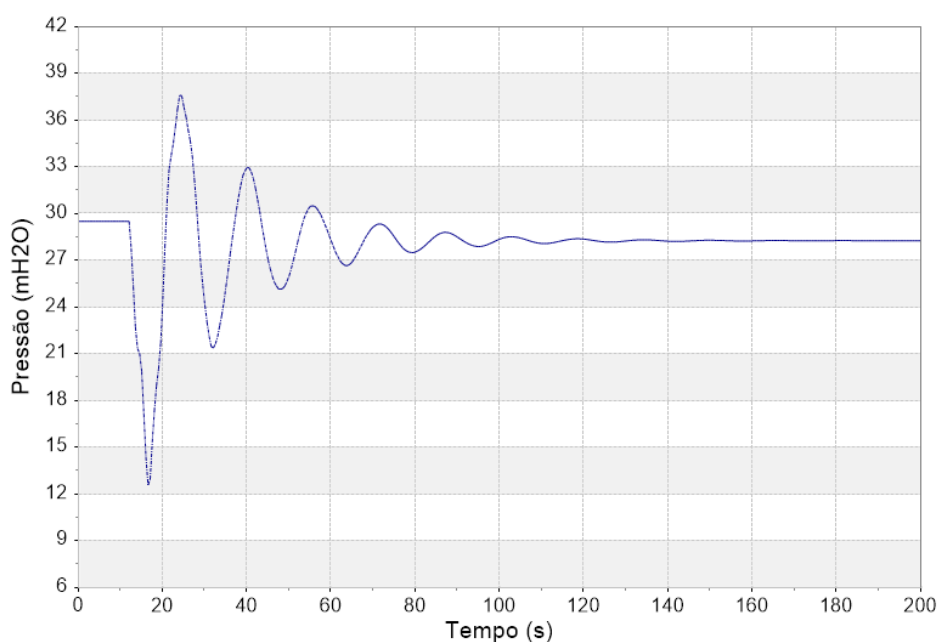
Figura 35 – Oscilação de pressão – rompimento de tubulação – ZA 23 – nó N25



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

O rompimento da tubulação com dimensões maiores (50% da vazão veiculada em regime permanente), considerando uma situação de mínimo consumo (10% da DMH), submeteu o sistema a oscilações de pressão bem mais intensas, apesar de não ter chegado a alcançar pressões negativas ou ultrapassado a PSA dos tubos. Na Figura 36, está apresentada a oscilação de pressão no nó de maior cota do sistema, nó N25.

Figura 36 – Oscilação de pressão – rompimento de tubulação (consumo mínimo) – ZA 23 – nó N25

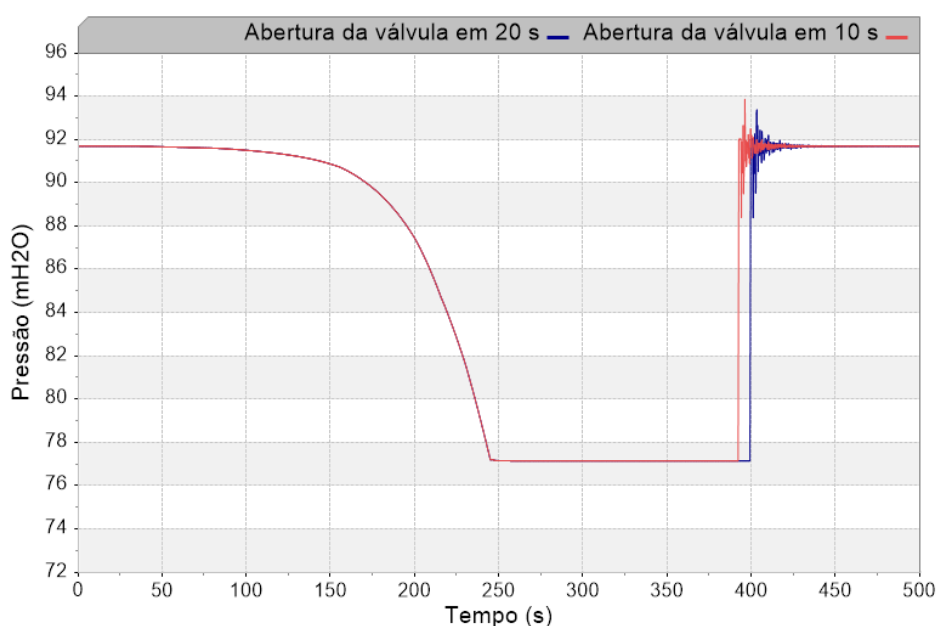


Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

Ressalta-se que a configuração desta ZA permitiu que os nós a jusante do rompimento permanecessem sendo abastecidos (com vazão inferior à presente antes do rompimento) durante toda a análise. Porém, a depender da localização da ruptura e da configuração do sistema, após um rompimento de grande proporção, parte da rede poderá não ter mais condições de ser abastecida e poderá ser parcialmente esvaziada. Os processos de enchimento e esvaziamento de redes devem ser realizados com cautela, especialmente quando o sistema não é dotado de válvulas de admissão e saída de ar.

A abertura de válvula, nos dois tempos avaliados (10 e 20 segundos), provocou, em todos os nós, comportamento semelhante. Após a abertura, houve um aumento brusco da pressão que, porém, não excedeu significativamente a pressão em regime permanente, calculada no início da simulação. Nos nós próximos à válvula, como no N3, que é também o nó de cota mais baixa (14,65 m), houve uma maior oscilação de pressão até se atingir o regime permanente, como pode ser observado na Figura 37.

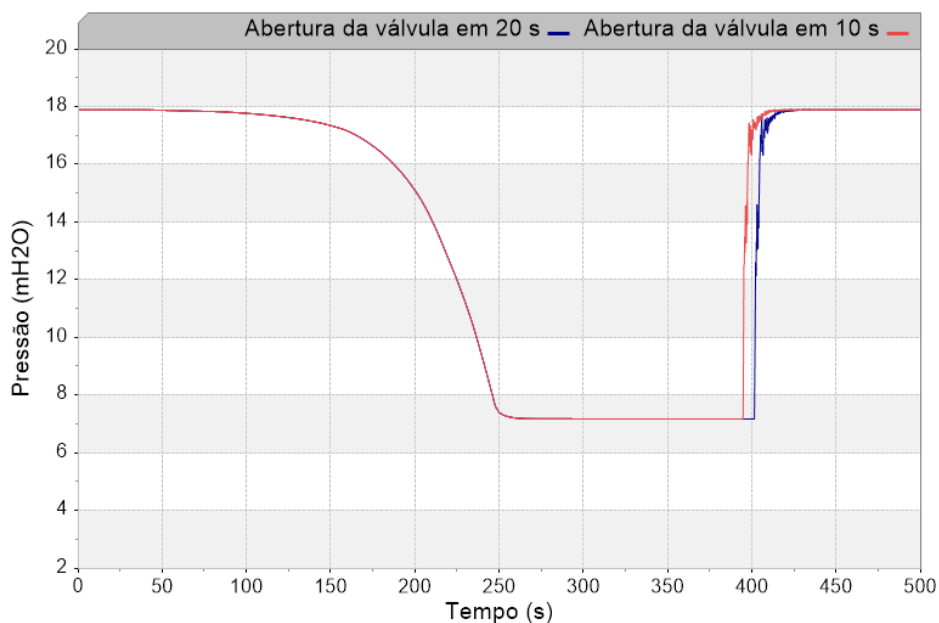
Figura 37 – Oscilação de pressão – abertura de válvula – ZA 23 – nó N3



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

No nó de cota mais alta, N25, não foram observadas pressões negativas, conforme Figura 38. Em relação aos tempos de abertura de 10 e 20 segundos, a abertura mais rápida antecipou o aumento da pressão e provocou oscilações um pouco superiores.

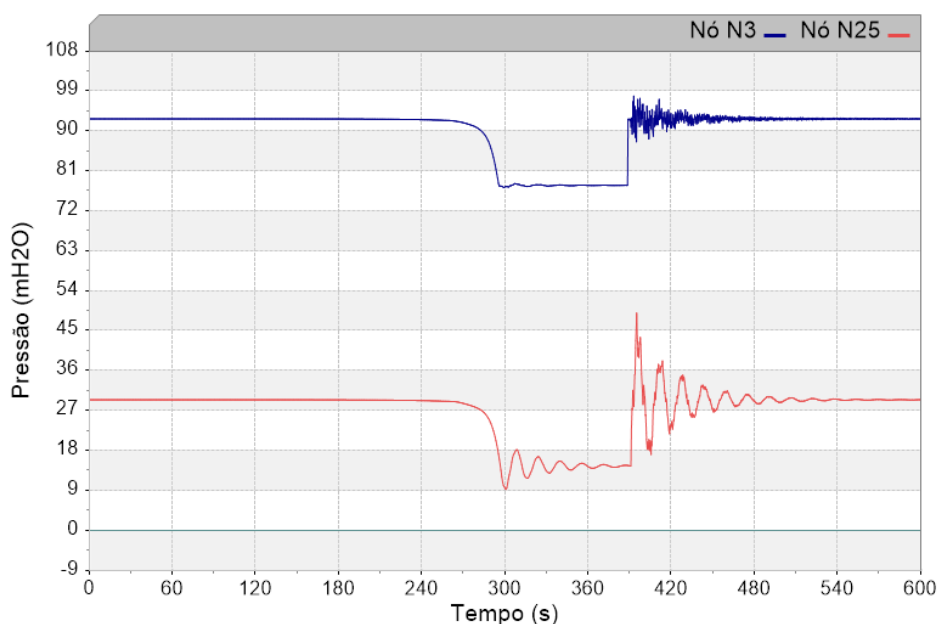
Figura 38 – Oscilação de pressão – abertura de válvula – ZA 23 – nó N25



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

A abertura de válvula em 20 segundos, considerando uma demanda mínima no sistema, resultou em pressões transitórias mais intensas, porém também não submeteu o sistema a pressões negativas ou superou a PSA dos tubos. Na Figura 39 está apresentada a oscilação de pressão nos nós N3 e N25.

Figura 39 – Oscilação de pressão – abertura de válvula (consumo mínimo) – ZA 23 – nó N3 e nó N25

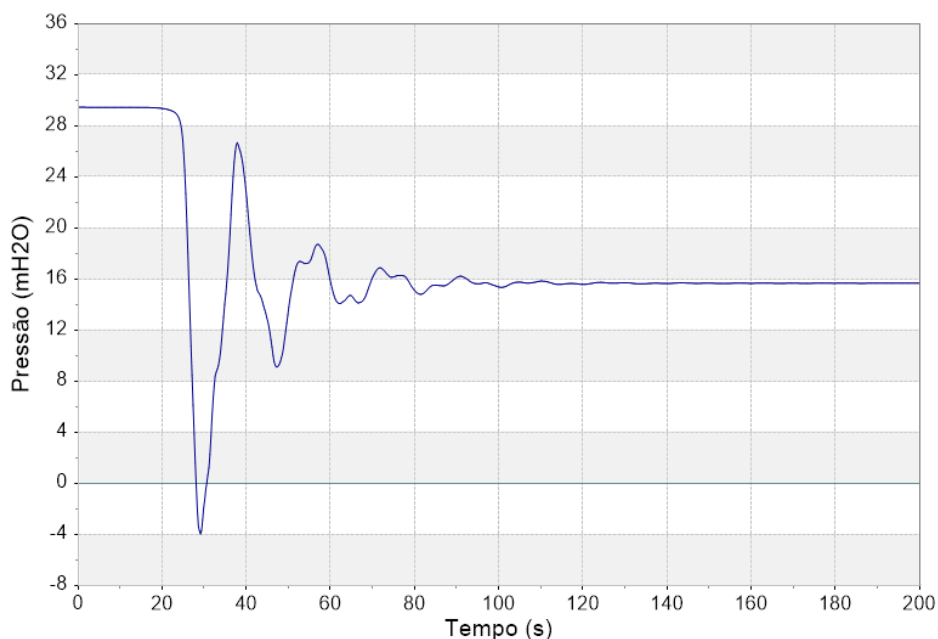


Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

Rompimento de tubulação e abertura de válvulas, nas condições avaliadas para a ZA 23, preocupa mais quanto à possibilidade de aumento de fissuras pré-existentes nos tubos, desencaixe de conexões e fadiga do material, pois as pressões observadas não ultrapassam as pressões máximas e mínimas que devem ser mantidas na rede.

A simulação hidráulica da rede secundária, após o fechamento da válvula a montante do reservatório do setor, submeteu os nós de cotas mais altas a pressões negativas, a exemplo das variações de pressão do nó 34, expostas na Figura 40.

Figura 40 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula (consumo mínimo) – rede secundária – nó 34



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

O maior trajeto que a água percorreu para chegar aos nós da rede secundária e os múltiplos anéis presentes não influenciaram os resultados de modo que não se observassem pressões danosas ao sistema. As pressões negativas, que representam uma ameaça à segurança do abastecimento devido ao risco de infiltração de patógenos, foram observadas na região alta da rede e devem ser especialmente evitadas.

As sobrepressões produzidas superaram pouco a pressão em regime permanente para a rede e não representou uma ameaça para o sistema, quando avaliadas isoladamente. Sabe-se que os tubos de polietileno são susceptíveis à redução de resistência por efeitos térmicos e dinâmicos (fadiga) e, ainda que a sobrepressão não

represente um risco isoladamente, as oscilações podem reduzir a vida útil do tubo devido à fadiga e aumentar as chances de rompimentos.

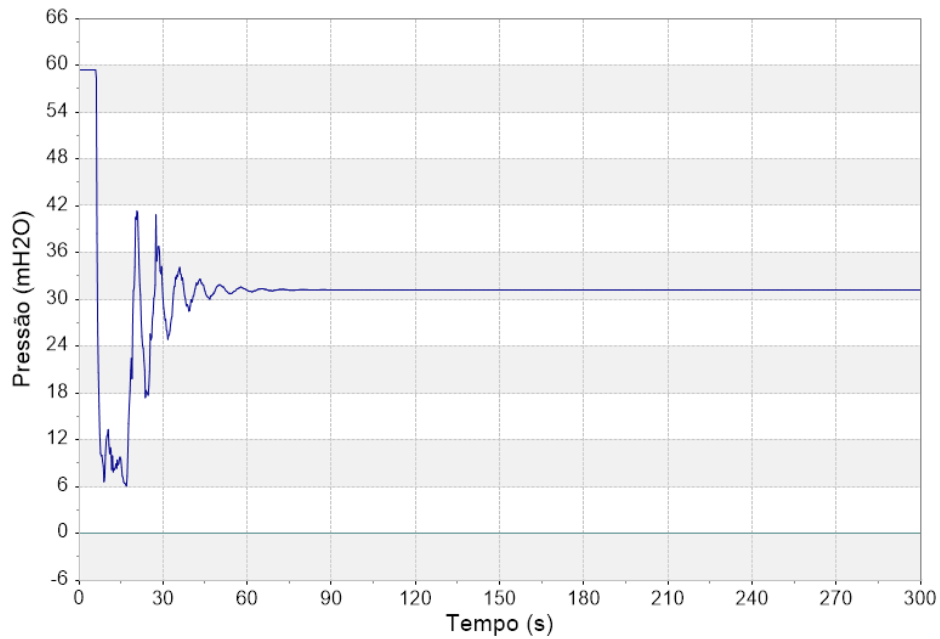
5.3 ZONA DE ABASTECIMENTO 42

A primeira análise em regime permanente para a DMH apontou, para a maior parte da rede, pressões entre os limites estabelecidos pela NBR 12218 (ABNT, 2017), com exceção apenas dos nós mais próximos à EE que apresentaram pressões superiores a 50 mH₂O. No entanto, não são nós com consumo e não ultrapassam a PSA ou PMS de tubos de ferro fundido classe K7 para os diâmetros implantados.

A análise em regime permanente limitou-se à DMH e, caso a EE não possua conversores de frequência ou faça uso de outros recursos como manobra de válvulas na saída da EE ou *by pass* de parte da vazão (medidas desfavoráveis à eficiência energética do sistema), quando ocorrerem vazões inferiores à DMH, a rede poderá ficar submetida a pressões muito superiores.

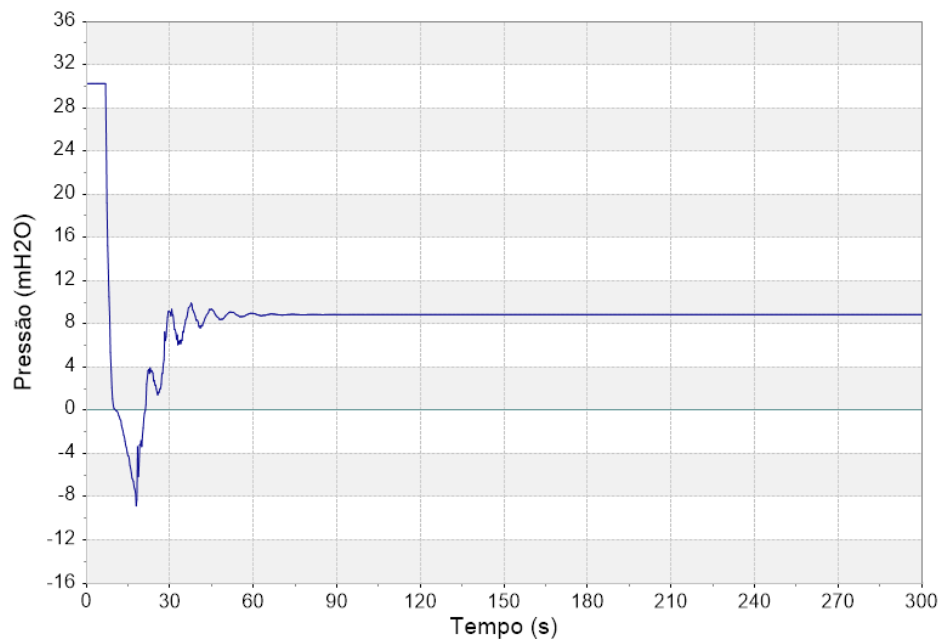
A análise dos transitórios devido a interrupção do funcionamento das duas bombas, levou o sistema a pressões negativas, especialmente nos nós de maiores cotas, ainda que mais distantes da EE. As oscilações de pressão para o nó de cota menos elevada, próximo a EE (ZC11), para o nó de maior cota (ZC13), e para o mais distante (ZC3) podem ser observados na Figura 41, na Figura 42 e na Figura 43 respectivamente.

Figura 41 – Oscilação de pressão – parada de bombas – ZA 42 – nó ZC11



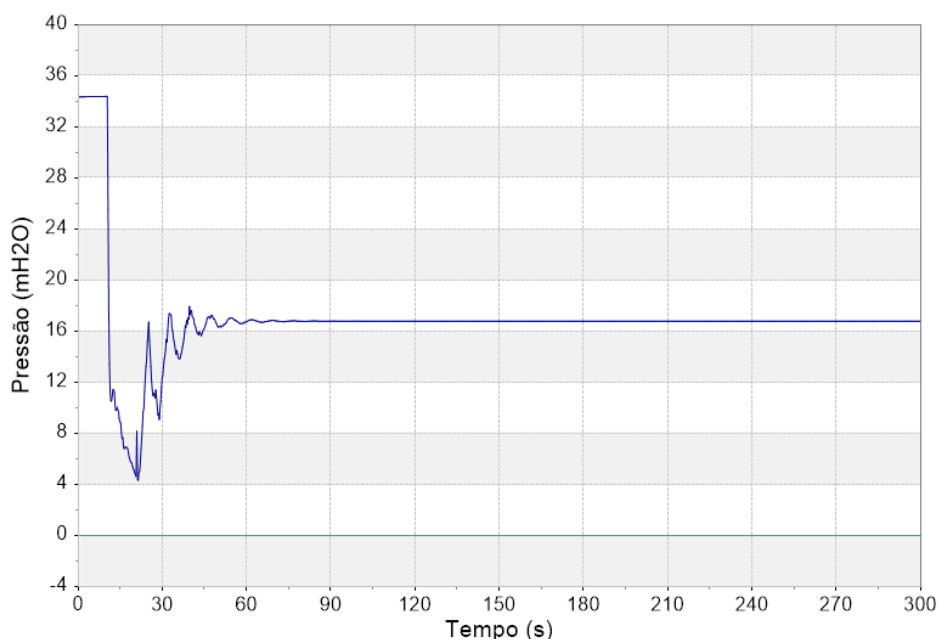
Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

Figura 42 – Oscilação de pressão – parada de bombas – ZA 42 – nó ZC13



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

Figura 43 – Oscilação de pressão – parada de bombas – ZA 42 – nó ZC3



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

A parada dos dois conjuntos motor-bomba resultou em pressões negativas em vários pontos da rede. Os picos de pressão não ultrapassaram o PSA ou PMS de tubos de ferro fundido, porém, em alguns pontos da rede, como na região próxima ao nó ZC13, as pressões negativas observadas podem provocar intrusão de contaminantes e comprometer a qualidade de água, além de facilitar o desencaixe de conexões e o surgimento de vazamentos.

5.4 ZONA DE ABASTECIMENTO 60

A primeira análise, em regime permanente para a DMH, apontou pressões muito elevadas em parte da rede (nos nós mais próximos do reservatório e em cotas mais baixas). Verificaram-se pressões acima do limite (50 mH₂O) estabelecido pela NBR 12218 (ABNT, 2017), bem como deficiência no abastecimento de regiões mais distantes do reservatório (nós ZC2, ZC5 e ZC4) onde o sistema não tem condições hidráulicas de atender adequadamente a DMH estipulada. As pressões estáticas excedem 50 mH₂O em 32% dos nós estudados, superando 70 mH₂O em algumas regiões.

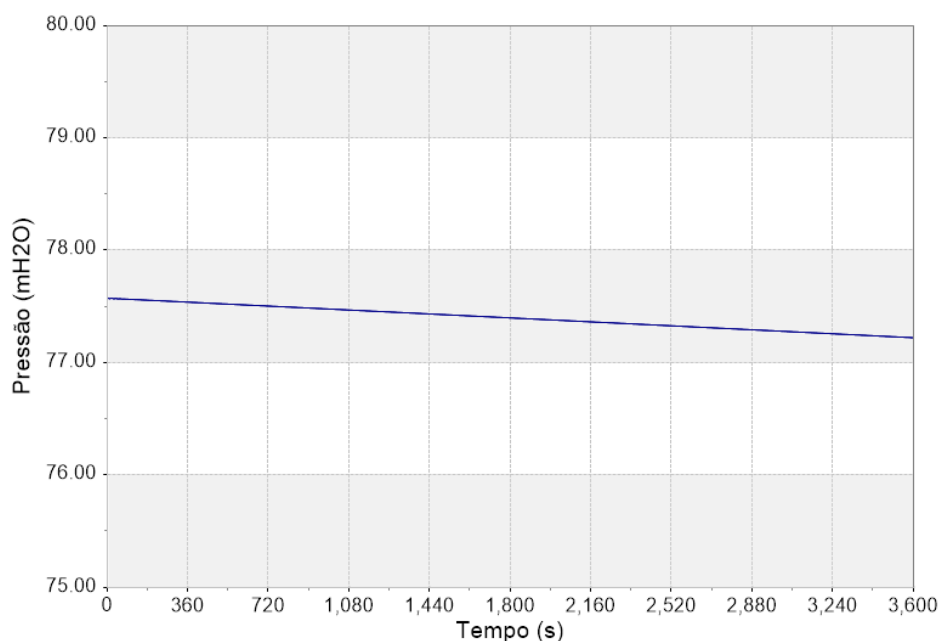
Possivelmente, a incoerência observada entre a forma atual de funcionamento da rede (pressões muito elevadas em algumas áreas e atendimento precário em outras) e os

preceitos do bom dimensionamento e combate às perdas tenha origem em expansões de regiões da cidade sem o prévio planejamento.

Apesar de, conforme apresentado na Tabela 6 (página 97), os tubos de ferro fundido classe K7 serem capazes de suportar pressões superiores à estabelecida pela NBR 12218, grande parte das perdas ocorre nas uniões, juntas, registros e anéis e essas pressões demasiadamente elevadas já podem justificar o elevado percentual de perdas da ZA. Além disso, como já colocado, é comum a instalação de tubos de plástico que suportam pressões menores do que o ferro fundido, especialmente na rede de menor diâmetro.

A análise que levou em consideração a variação horária de consumo apresentou resultados que em pouco diferiram dos resultados da primeira análise, em regime permanente para a DMH. As pressões já elevadas que foram detectadas na primeira avaliação também foram observadas nesta e os transitórios hidráulicos, devido à variação de consumo, não impuseram ao sistema pressões significativamente diferentes das já observadas em regime permanente. Na Figura 44 está a oscilação de pressão para o nó ZC15 que se assemelha ao comportamento da oscilação de pressão observado nos demais nós.

Figura 44 – Oscilação de pressão – variação de consumo – ZA 60 – nó ZC15



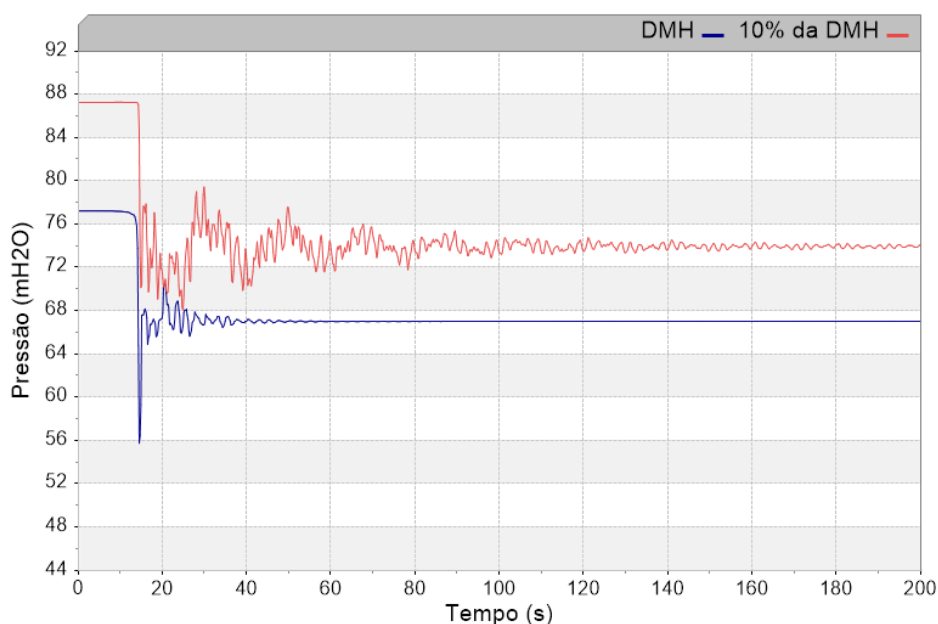
Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

A oscilação tênue de consumo das demandas não demonstrou ser elemento importante para justificar os estudos dos eventos transitórios.

A terceira análise desta ZA, que consistiu no fechamento de uma válvula imediatamente a jusante do reservatório, considerando um cenário de maiores demandas, resultou em oscilações de pressão com amplitude máxima de cerca de 10 mH₂O no nó ZC15. A mesma manobra de válvula, considerando um cenário de mínimo consumo, apresentou amplitudes de oscilações superiores, porém, diferentemente das simulações em que também foram considerados dois cenários de consumo, as pressões transitórias mínimas tiveram maior magnitude no cenário com maior consumo.

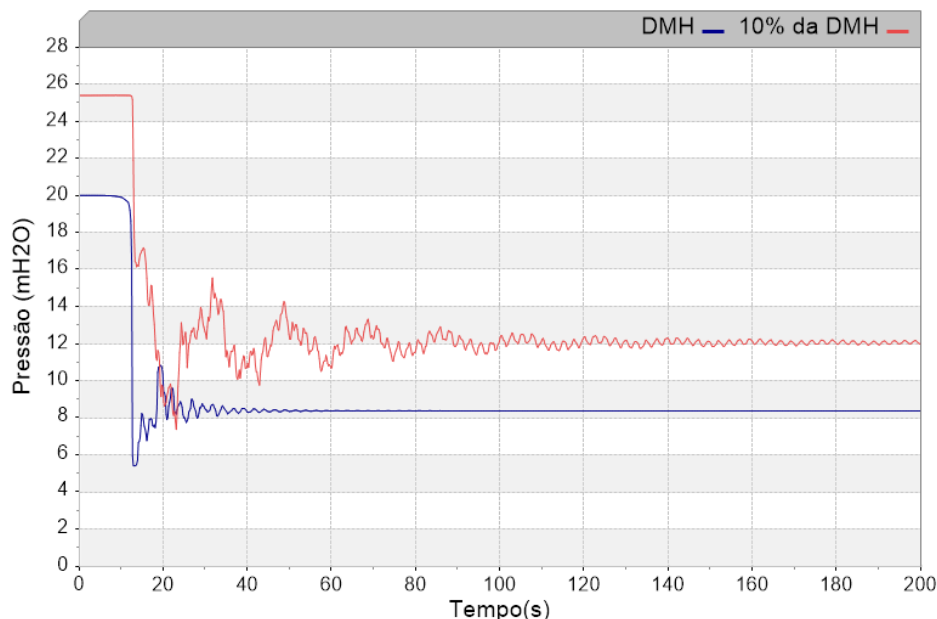
A oscilação de pressão no nó ZC15, de menor cota e no nó N5, de maior cota, para os dois cenários de demandas, pode ser observado na Figura 45 e na Figura 46 respectivamente. Não foram observadas pressões negativas na ZA 60 em nenhuma das análises de fechamento de válvula.

Figura 45 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula – ZA 60 – nó ZC15



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

Figura 46 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula – ZA 60 – nó N5



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

As simulações de fechamento de válvula nesta ZA resultaram em oscilações de pressão bem distintas do observado nas simulações de fechamento de válvula da ZA 09. Além da configuração da rede diferente, destaca-se que a válvula manobrada da ZA 09 localiza-se na subadutora que alimenta a ZA 09, que veicula uma grande vazão, e alimenta também outras ZA e reservatórios. Enquanto a válvula manobrada para estudo da ZA 60 localiza-se na linha que deriva do reservatório e alimenta exclusivamente a ZA 60.

Os resultados distintos reforçam que não deve haver generalização das medidas a serem implementadas para proteção do sistema contra transitórios já que as redes guardam peculiaridades que interagem entre si durante o fenômeno e é difícil prever seu comportamento frente a uma perturbação.

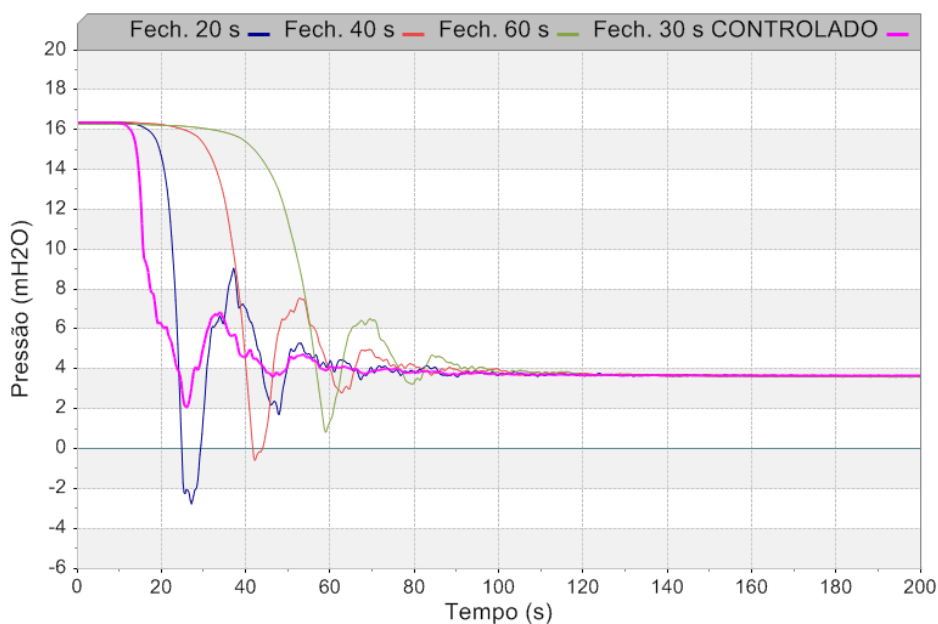
5.5 MECANISMOS DE PROTEÇÃO CONTRA TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

5.5.1 Manobra de fechamento de válvula

O tempo de fechamento da válvula exerceu grande influência no comportamento do evento transitório nas condições pré-estabelecidas. Para o fechamento uniforme da válvula, quanto mais devagar o fechamento, menos intensas as ondas de pressão como pode ser observado na Figura 47. Porém, o fechamento controlado da válvula,

mais rápido nos primeiros dois terços do fechamento e mais acelerado no terço final proporcionou um fechamento em intervalo de tempo curto e não submeteu o sistema a pressões negativas conforme Figura 47.

Figura 47 – Oscilação de pressão – fechamento de válvula com 20, 40 e 60 segundos e controlado – ZA 09 – nó ZC3



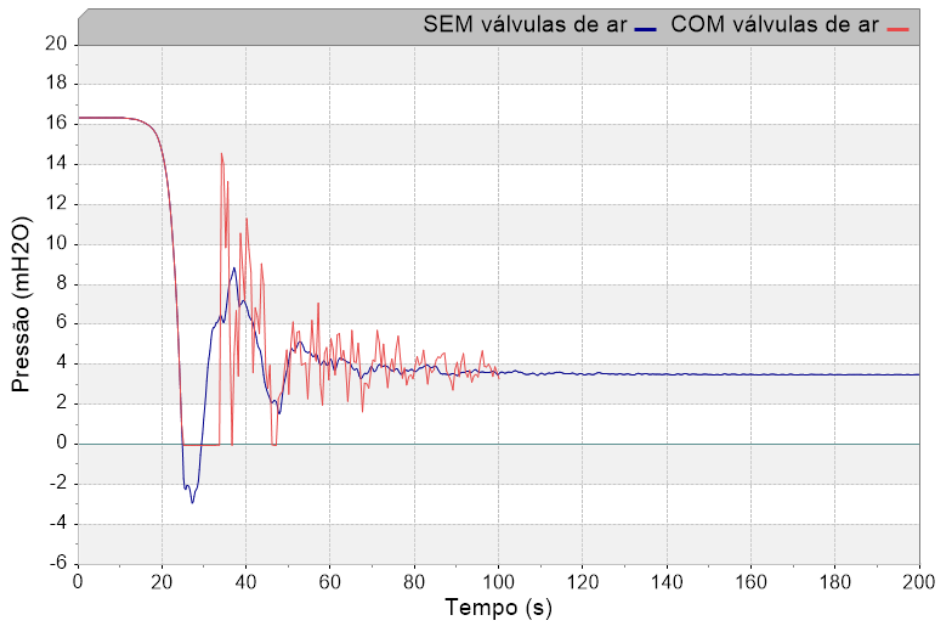
Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

Não apenas o tempo de fechamento, mas o protocolo de manobra da válvula são elementos importantes para determinação dos procedimentos de operação do sistema. Cabe ressaltar que cada sistema e cada válvula, com sua respectiva curva característica, deve ser avaliada individualmente.

5.5.2 Válvula de admissão e saída de ar

O comportamento das ondas de pressão, após o fechamento da válvula no nó mais crítico (ZC3), com e sem o uso das válvulas de ar, pode ser observado na Figura 48. Destaca-se que o uso das válvulas de admissão e saída de ar conseguiu limitar as pressões mínimas à pressão atmosférica, porém as pressões máximas não foram alteradas, pelo contrário, a oscilação de pressão até o estabelecimento do novo regime permanente foi mais intensa mesmo utilizando ventosas com diâmetro de expulsão de ar bem diminuto em relação ao diâmetro de admissão. O aumento dos picos de pressão pode ter ocorrido devido ao reencontro das colunas líquidas.

Figura 48 – Oscilação de pressão – uso de válvulas de ar – ZA 09 – nó ZC3



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

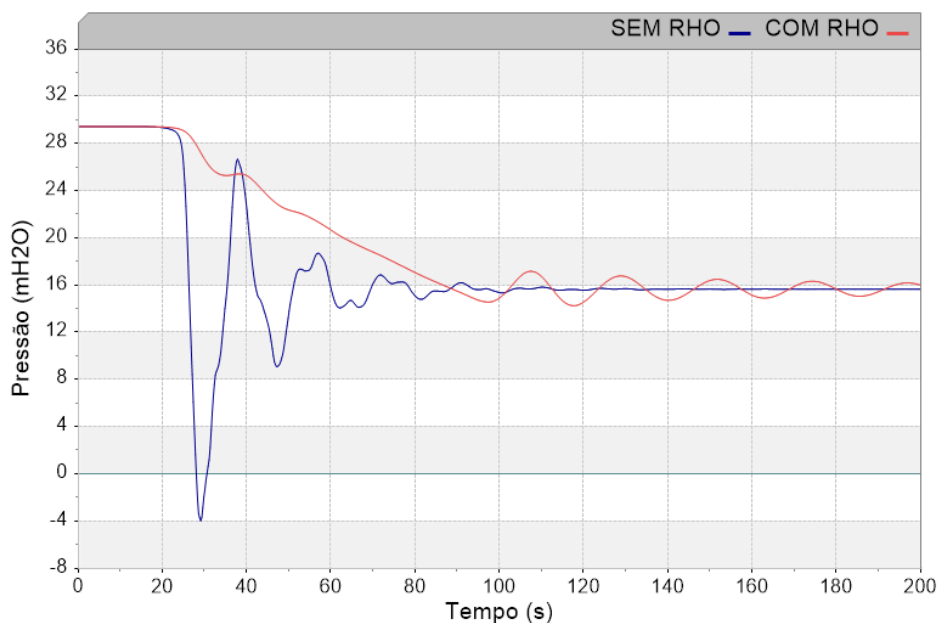
Foram realizadas simulações com válvulas com diversos diâmetros de expulsão, mas os resultados não diferiram muito do apresentado. A modelagem e o uso ótimo de válvulas de admissão e expulsão de ar, em redes de distribuição, pode ser um tema para pesquisas futuras.

Destaca-se que é necessário ter especial cuidado no dimensionamento e locação das válvulas de admissão e saída de ar para evitar que contaminações ocorram por meio do dispositivo.

5.5.3 Reservatório hidropneumático

A instalação do RHO na ZA 23, considerando a perturbação imposta ao sistema, foi suficiente para atenuar as oscilações de pressão em toda a ZA 23, inclusive na rede secundária fictícia. As variações de pressão no nó 34 com e sem o RHO podem ser observadas na Figura 49.

Figura 49 – Oscilação de pressão – uso de RHO – ZA 23 – nó 34



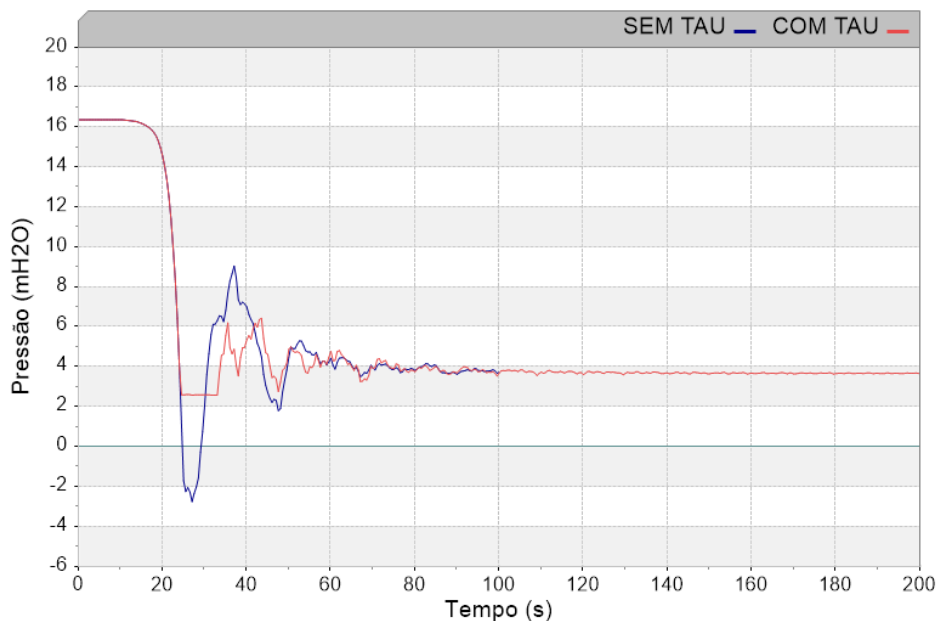
Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

Ressalta-se que, caso ocorra o fechamento de uma válvula a jusante do RHO, toda a região a jusante da válvula não estará protegida. Como as redes devem ser dimensionadas com diversos distritos de medição e controle isoláveis e, geralmente, regulados por válvulas, caso estas válvulas sejam manobradas a jusante do RHO, o distrito não estará protegido contra o transitório provocado.

5.5.4 Tanque alimentador unidirecional

O TAU, instalado conforme descrito anteriormente, na ZA 09, foi adequado para evitar que pressões negativas fossem observadas na rede. As sobrepressões máximas também foram reduzidas, provavelmente, devido ao efeito indireto da redução da depressão máxima. O comportamento das ondas de pressão, após o fechamento da válvula no nó mais crítico (ZC3) com e sem TAU, pode ser observado na Figura 50.

Figura 50 – Oscilação de pressão – uso de TAU – ZA 09 – nó ZC3



Fonte: elaboração própria (2017) (simulação realizada no *software* Allievi (ITA, 2010b)).

O TAU foi suficiente para evitar pressões negativas nos nós adjacentes ao ZC3 onde, nas análises sem dispositivos de proteção, houve pressões inferiores à atmosférica.

No caso da ZA 09, as pressões negativas foram observadas apenas em uma região da rede e, por isso, o uso de um TAU foi adequado para atenuar as depressões. Caso houvesse mais regiões suscetíveis a pressões negativas, possivelmente seriam necessários outros TAU, mais próximos das regiões.

Tratando-se de distribuição de água tratada, ainda deve-se destacar que os dispositivos implantados não podem comprometer a potabilidade da água.

5.6 RESUMO DOS RESULTADOS

Os resultados observados nas simulações estão resumidos nos quadros que seguem. No Quadro 2 estão os resultados da análise das pressões estáticas e dinâmicas nas ZA estudadas. Nota-se que apenas na ZA 23 observaram-se pressões estáticas e dinâmicas dentro da faixa recomendada pela NBR 12218/2017 (ABNT, 2017) e que a ZA 60, ao mesmo tempo em que possui pressões estáticas elevadas, não tem condições hidráulicas de atender a toda a rede com a DMH.

Quadro 2 – Regime permanente – resumo dos resultados

| ZA | ESTÁTICAS | DINÂMICAS (DMH) |
|-----------|--|--|
| 09 | Pressões superiores a 50 mH ₂ O a parte da rede. | Pressões superiores a 50 mH ₂ O em parte da rede. |
| 23 | Pressões superiores a 10 mH ₂ O e inferiores a 50 mH ₂ O | Pressões superiores a 10 mH ₂ O e inferiores a 50 mH ₂ O |
| 42 | - | Pressões superiores a 10 mH ₂ O e inferiores a 50 mH ₂ O |
| 60 | Pressões superiores a 50 mH ₂ O a parte da rede. | Pressões superiores a 50 mH ₂ O em parte da rede e inferiores a 10 mH ₂ O em outra parte, havendo regiões em que o abastecimento com a DMH não é possível. |

Fonte: elaboração própria (2017).

As pressões elevadas, em regime permanente, refletem a necessidade imediata de reformular o abastecimento do sistema e estão elencadas entre as causas principais para os elevados índices de perdas em sistemas de distribuição de água.

No Quadro 3, estão os resultados das simulações do regime transitório sem dispositivos de proteção.

Quadro 3 – Regime transitório – resumo dos resultados

| ZA | PERTURBAÇÃO | CONSUMO NA REDE | RESULTADO |
|-------------------------|---|------------------------|---|
| 09 | Fechamento de válvula | DMH | Ausência de oscilações de pressão importantes. |
| 09 | Fechamento de válvula | 10% da DMH | Oscilações de pressão de maior magnitude, inclusive pressões negativas. |
| 09 | Variação de consumo na subadutora | DMH | Ausência de oscilações de pressão importantes. |
| 23 | Rompimento de tubulação (dimensão média) | DMH | Ausência de oscilações de pressão importantes. |
| 23 | Rompimento de tubulação (dimensão grande) | DMH | Ausência de oscilações de pressão importantes. |
| 23 | Rompimento de tubulação (dimensão grande) | 10% da DMH | Oscilações de pressão de maior magnitude, sem pressões negativas. |
| 23 | Abertura de Válvula | DMH | Ausência de oscilações de pressão importantes. |
| 23 | Abertura de Válvula | 10% da DMH | Oscilações de pressão de maior magnitude, sem pressões negativas. |
| Rede secundária (ZA 23) | Fechamento de válvula | 10% da DMH | Oscilações de pressão de maior magnitude, inclusive pressões negativas. |
| 42 | Interrupção do funcionamento da bomba | DMH | Oscilações de pressão de maior magnitude, inclusive pressões negativas. |
| 60 | Fechamento de válvula | DMH | Ausência de oscilações de pressão importantes. |
| 60 | Fechamento de válvula | 10% da DMH | Oscilações de pressão de maior magnitude, sem pressões negativas. |
| 60 | Oscilação de consumo | DMH | Ausência de oscilações de pressão importantes. |

Fonte: elaboração própria (2017).

Com exceção da simulação que considerou a interrupção do funcionamento do conjunto elevatório, as análises realizadas com as demandas nos nós iguais às DMH, não resultaram em oscilações de pressão significativas. Enquanto o consumo na rede é mais elevado, as tubulações que alimentam os reservatórios residenciais estão recebendo água da rede e funcionam como um orifício com saída livre capaz de amortecer as pressões transitórias.

Nos cenários em que foi considerado um mínimo consumo (10% da DMH), representando as demandas noturnas, foram observadas as maiores oscilações de pressão, inclusive pressões negativas que representam uma ameaça à saúde pública. Durante as horas de menor consumo, a capacidade das extremidades da rede de amortecer as variações de pressão é reduzida uma vez que muitos reservatórios já estão cheios e a extremidade das tubulações está fechada.

No Quadro 4 estão sintetizados os resultados das simulações com uso de mecanismos de proteção.

Quadro 4 – Regime transitório – dispositivos de proteção – resumo dos resultados

| ZA | DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO | CONSUMO NO NÓ | RESULTADO |
|-------------------------|------------------------------------|----------------------|--|
| 09 | Manobra de válvula | 10% da DMH | Adequado para prevenção do surgimento de eventos transitórios de grandes proporções oriundos de fechamento de válvula. |
| 09 | Válvulas de admissão e saída de ar | 10% da DMH | Adequado para evitar pressões negativas. |
| Rede secundária (ZA 23) | RHO | 10% da DMH | Adequado para proteção do sistema. |
| 09 | TAU | 10% da DMH | Adequado para evitar pressões negativas. |

Fonte: elaboração própria (2017).

A manobra controlada de válvula conseguiu reduzir as oscilações de pressão na rede oriundas do fechamento da válvula. O RHO foi adequado para evitar oscilações de pressão e o TAU e as válvulas de ar para evitar pressões negativas. Logo, para as condições estabelecidas, os mecanismos testados foram adequados para atender aos objetivos almejados.

6 CONCLUSÕES

Há muitas décadas, o cenário de elevados índices de perdas nos sistemas de distribuição de água está instalado na maior parte dos sistemas de abastecimento brasileiros. Muitos esforços são despendidos em estudos e medidas para mudança desse quadro, porém, as ações parecem ser descontínuas e isoladas e não têm a abrangência necessária para reverter o panorama atual.

Apesar de não ser recente a preocupação da comunidade científica internacional com os transitórios hidráulicos em redes de distribuição, dada a ameaça que esses eventos representam para a segurança hídrica e integridade das tubulações, este conhecimento ainda não alcançou a prática dos projetistas no Brasil. A NBR 12218 de 1994, em vigor até abril de 2017, que trata de projetos de rede de distribuição de água para abastecimento público, nem sequer fazia referência aos transitórios hidráulicos. Ainda mais alarmante é a existência de estudos específicos sobre combate a perdas que nem mesmo citam a sobrepressão oriunda dos transitórios hidráulicos como um fator a ser analisado, refletindo o desconhecimento da questão até mesmo em parte do meio acadêmico.

No entanto, o cenário de desconhecimento ou desvalorização dos transitórios hidráulicos em redes de distribuição apresenta nuances de mudanças, a começar pela segunda edição da NBR 12218/2017, que entrou em vigor em maio de 2017, e traz em seu texto a necessidade de se realizar estudos de transitórios hidráulicos em rede de distribuição, o que será um grande avanço para a área.

Algumas dificuldades são frequentes para análise de transitórios hidráulicos em redes de distribuição como: a ausência de cadastro das redes ou cadastros precários de baixa confiabilidade; a necessidade de se realizar simplificações; a definição da rugosidade dos tubos e a determinação das condições de contorno.

A análise das redes de distribuição do SIAA de Salvador, nesta pesquisa, foi simplificada dada a limitada disponibilidade de dados, sendo, inclusive, muitas vezes, realizadas considerações acerca da localização de válvulas e outras informações ausentes. As considerações adotadas se embasaram no que seria lógico e na prática dos projetistas, porém, certamente, essas considerações, somadas às simplificações da rede, impossibilitam a obtenção de resultados que precisamente correspondam à realidade. No entanto, os resultados permanecem válidos no que tange ao estudo da

dimensão das oscilações transitórias de pressão e fornecem a precisão necessária para a tomada de decisões.

Uma dificuldade encontrada para a realização das simulações foi a determinação da condição de contorno para os nós em que há consumo. O software utilizado permite e adoção de algumas condições que implicarão em resultados bem distintos. A “Lei de vazão por tabela” não conseguiu refletir a capacidade do sistema de distribuição de aumentar a vazão aduzida pelos nós frente ao aumento da pressão, resultando em oscilações de pressão mais intensas e se mostrou adequada apenas como um recurso para estudo da influência da variação de consumo na rede.

A condição de contorno “Lei de vazão por pressão” se mostrou mais apropriada para representar os nós em que há consumo por conseguir refletir a capacidade do sistema de aumentar a vazão para o meio externo (reservatórios residenciais) devido ao aumento da pressão. Porém, esta condição admite a entrada da água para a rede quando ocorrem pressões negativas, enquanto, na realidade, quando houver pressões negativas nas tubulações que alimentam os reservatórios residenciais, haverá entrada de ar uma vez que estes são, geralmente, alimentados por cima e abertos para a atmosfera.

Em relação aos resultados analisados, a avaliação em regime permanente já apontou para algumas ZA a presença de pressões elevadas. Apesar das pressões acima de 70 mH₂O, observada em alguns nós, não superarem a pressão de serviço admissível de tubos de ferro fundido, aumentam os vazamentos em fissuras ou peças mal encaixadas, e, quando se trata de tubos de plástico, existe uma correlação entre pressão e perdas. As elevadas pressões em regime permanente já podem justificar, em algumas ZA, os altos índices de perdas reais de água.

Os estudos dos transitórios hidráulicos em zonas de abastecimento do SIAA de Salvador levaram a resultados distintos a depender da condição de consumo admitida e da perturbação provocada no sistema. As análises realizadas com as demandas máximas nos nós (DMH), incluindo as que consideraram a variação de consumo, rompimento de tubulação de menor ou maior magnitude e abertura e fechamento de válvulas, não resultaram em oscilações de pressão significativas e o sistema foi de um regime permanente para outro de forma lenta e gradual. Exceção feita ao transitório provocado pela parada das bombas, que mesmo considerando maiores demandas na rede, resultou em oscilações de pressão expressivas.

Enquanto o consumo na rede é mais elevado, a capacidade dos nós com saída para atmosfera (tubulações que alimentam os reservatórios residenciais) de aliviar as pressões com o aumento da descarga da vazão, modelada com o uso da condição de contorno “Lei de vazão por pressão”, foi suficiente para amortecer as ondas de pressão oriundas das perturbações impostas.

Quando considerada uma condição de vazão mínima (10% da demanda máxima horária estimada para cada nó), as perturbações resultaram em pressões transitórias de maiores magnitudes em comparação com o cenário com maior demanda, e apesar de não superarem a pressão de serviço admissível dos tubos, por vezes submeteu o sistema a pressões negativas.

O fechamento de válvulas no cenário de menores demandas, em especial, submeteu a rede a oscilações de pressão importantes, mesmo na rede secundária e em pontos distantes do local da perturbação, chegando a apresentar pressões negativas. As oscilações de pressão oriundas da abertura de válvulas e rompimento de maior magnitude da tubulação, neste mesmo cenário, apesar de não ter resultado em pressões negativas ou superado a pressão nominal dos tubos, podem resultar em desencaixe de conexões, vazamentos e fadiga da tubulação.

Resultados mais intensos durante o cenário de demandas noturnas, quando os consumos são reduzidos, estão justificados na redução da capacidade de aumento da vazão do sistema frente a uma onda de pressão positiva, diminuindo também a capacidade da rede de amortecer as pressões transitórias.

A parada de bombas levou a eventos transitórios significativos e, quando o abastecimento ocorre através de bombeamento direto na rede, a situação requer mais cuidado. A hipótese de queda de energia, com a interrupção simultânea das bombas, submeteu o sistema a pressões negativas importantes, mesmo considerando o cenário de maior consumo. O bombeamento direto na rede, sem conversores de frequência, pode ainda, nas horas de menor consumo, submeter os sistemas a pressões elevadas que vão contribuir, também, para os altos índices de perdas.

As pressões negativas mostraram-se mais frequentes e intensas do que as pressões positivas. As pressões máximas observadas, quando analisadas de forma pontual, não representaram um risco para o sistema, especialmente porque se considerou que os tubos são de ferro fundido e toleram elevadas pressões. Contudo, levando em

conta que parte da rede pode ser de plástico, mais vulnerável a oscilações de pressão e que as oscilações bruscas de pressão, ainda que não excedam a capacidade nominal das tubulações, podem levar ao desencaixe dos tubos e vazamento entre conexões, as sobrepressões devem ser consideradas.

Pressões negativas representam um grande risco à saúde pública, especialmente em Salvador onde o sistema de coleta e transporte de águas residuárias ocorre de forma precária em parte da cidade. A manutenção de pressões positivas é essencial para a não infiltração de poluentes e garantia de um abastecimento seguro.

Os mecanismos de proteção contra transitórios em redes de distribuição simulados no estudo foram adequados para atenuar ou evitar oscilações de pressão nas condições impostas. Como mecanismo direto, para evitar a surgimento de oscilações de pressão mais significativas, a manobra controlada de válvulas foi adequada e destaca-se por ser um mecanismo que requer, basicamente, a modelagem do sistema para determinação da melhor manobra e capacitação dos operadores ou ajuste dos mecanismos automatizados de controle das válvulas.

Na condição imposta, o reservatório hidropneumático conseguiu proteger toda a rede dos efeitos transitórios, porém, caso ocorra um fechamento rápido de válvula em um distrito de medição e controle a jusante do RHO, por exemplo, o distrito não estará protegido pelo dispositivo e a eficácia do equipamento está limitada a situações específicas. O tanque alimentador unidirecional foi adequado para proteger a região do sistema em que foi simulado contra pressões negativas assim como as válvulas de admissão e saída de ar. Cuidados especiais devem ser dedicados a esses dispositivos quanto ao risco de comprometer a potabilidade da água.

Cabe a ressalva de que não deve haver generalização das medidas a serem implementadas para proteção da rede contra transitórios já que os sistemas guardam peculiaridades que interagem entre si e é difícil prever seu comportamento frente a uma perturbação sem a realização de uma análise mais detalhada.

O objetivo de projetar um sistema mais seguro e com condições de operação adequadas pode ser obtido com a utilização de recursos atualmente disponíveis como: a disponibilidade de diversos *softwares*, inclusive gratuitos, de análise hidráulica em regime transitório; muitas opções de equipamentos destinados a proteger o sistema contra transitórios hidráulicos; mecanismos de operação que

podem atenuar as variações de pressão a níveis aceitáveis sem uso de dispositivos específicos. Esses recursos reforçam que não devem ser poupados esforços para atingir o objetivo em questão.

Como proposta para pesquisas futuras, sugere-se o estudo e desenvolvimento de um modelo matemático para a condição de contorno dos nós que leve em consideração, por exemplo, a possibilidade do incremento da vazão de saída dos nós submetidos a ondas positivas de pressão e a entrada de ar quando submetidos a pressões negativas, além de outras peculiaridades.

Sugere-se também o estudo do uso otimizado e dimensionamento de dispositivos de proteção contra transitórios hidráulicos em redes de distribuição uma vez que as normas e procedimentos usuais tratam sobre o uso desses dispositivos para sistemas de recalque simples. Recomenda-se o estudo da influência dos transitórios hidráulicos nos ramais prediais, onde se detecta o maior número de vazamentos.

Frente ao cenário de escassez hídrica e ao alarmante percentual de perdas de água que existe, nenhum esforço deve ser dispensado no que tange ao desafio de reduzir o desperdício desse recurso cuja falta tem levado numerosos municípios a situações de emergência em todo país. A literatura consultada e os estudos desenvolvidos nesta pesquisa mostram que os transitórios hidráulicos podem submeter a rede de distribuição a pressões negativas, que consiste em uma ameaça à saúde pública e a integridade das tubulações e conexões, e a pressões elevadas que também favorecem vazamentos e perdas de água e devem ser considerados nos projetos de redes de distribuição.

REFERÊNCIAS

- ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água:** posicionamento e contribuições técnicas da ABES. 2015.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218:** Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626:** Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7675:** Tubos e conexões de ferro dúctil e acessórios para sistemas de adução e distribuição de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15802:** Sistemas enterrados para distribuição e adução de água e transporte de esgotos sob pressão - Requisitos para projetos em tubulação de polietileno PE 80 e PE 100 de diâmetro externo nominal entre 63 mm e 1600 mm. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218:** Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro, 2017.
- ADAMKOWSKI, A.; LEWANDOWSKI, M. Investigation of Hydraulic Transients in a Pipeline with Column Separation. **Journal of Hydraulic Engineering.** p. 935-944. 2012.
- ALEGRE, H.; COVAS, D. **Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água:** Uma abordagem centrada na reabilitação. Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos; Laboratório Nacional de Engenharia Civil; Instituto Superior Técnico: Lisboa, 2010.
- ALMEIDA, A. B. **Manual de proteção contra o golpe de aríete em condutas elevatórias.** Ministério da Habitação, Obras Públicas e Transportes: Lisboa, 1982.
- AMOA, S. O. K.; ELBASHIR, M. A. M. **Hydraulic transient in a pipeline using computer model to calculate and simulate transient.** 2007. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Ciências, Universidade de Lund, Lund, 2007.
- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente.** 2003. Tese de doutorado. Doutorado em Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- BERIBEAU, H. et al. **Impact of Distribution System Water Quality on Disinfection Efficacy.** Denver: Awwa Research Foundation e American Water Works Association, 2005.

BERMAD. **Soluções para proteção contra golpes de aríete**. 2016. Disponível em: <http://www.bermad.com/wp-content/uploads/2016/05/WW_Water-Surge_Brochure_Portuguese_11-2016.pdf>. Acesso em: 22 de julho de 2017.

BLACKBURN, B. G. et al. Surveillance for Waterborne-Disease Outbreaks Associated with Drinking Water - United States, 2001 - 2002. **MMWR**. Atlanta, p. 23-45. out. 2004.

BOULOS, P. F. et al. Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. **American Water Works Association**, Denver, p. 111-124, 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2011.

CHAUDHRY, M. **Applied Hydraulic Transients**.3. ed. Columbia: Springer, 2014.

DARZÉ, M. S. **Golpe de aríete em condutas elevatórias**: reanálise do dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos. 1988. Dissertação. Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1988.

EINSTEIN, A. **Afirmção de Einstein para William Miller**, como citada na revista LIFE (2 de Maio de 1955) Old Man's Advice to Youth: "Never Lose a Holy Curiosity", paginas 61-64. Disponível em: <<http://www.frasesdepensadores.com.br/frase/o-importante-e-nao-parar-de-questionar/>>. Acesso em: 2 mar. 2017.

EUROPEAN COMMISSION. **EU Reference document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM**: Case Study document. 2015.

FARLEY, M.; TROW, S. **Losses in Water Distribution Networks**. London: IWA, 2003.

FRANÇA, F. V. P. **Verificação da adequação do esquema numérico de MacCormack na solução de transientes hidráulicos em condutos forçados**. 2006. 108 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária -Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

HELLER, L.; PADUA, V. L. **Abastecimento de Água para Consumo Humano**. Belo Horizonte, UFMG. 2006.

ITA – UNIVERSIDADE DE VALÊNCIA. **Allievi**: Manual Técnico. Valência: 2010a.

ITA – UNIVERSIDADE DE VALÊNCIA. **Software Allievi versão 2.2.0.0**. Valência: 2010b.

JUNG, B. S.; BOULOS, P. F; WOOD, D. J. Pitfalls of watter distribution model skeletonization for surge analysis. **Journal AWWA**, dezembro de 2007.

JUNG, B. S.; KARNEY, B. W. Systematic surge protection for worst-case transient loadings in water distribution systems. **Journal of Hydraulic Engineering**. v. 3, n. 135, p. 218 – 223, março de 2009.

KARNEY, B. W. **Analysis of fluid transientes in large distribution networks**. Tese de Doutorado. Doutorado em Filosofia, Universidade da Colúmbia Britânica, Vancouver, 1984.

KARNEY, B. W.; McINNIS, D. Transients analysis of water distribution systems. **Journal AWWA**. 1990.

KWON, J. H. Computer simulations of transient flow in a real city water distribution system. **KSCE Journal of Civil Engineering**, Seul, v. 11, n. 1, p. 43 – 49, janeiro de 2007.

LOPES, R. B. V. **Análise do fenómeno do choque hidráulico numa estação elevatória de águas residuais**. Modelação e análise de funcionamento. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016.

MAGALHÃES, A. S. **Metodologia para Diagnóstico e Controle de Perdas**. Salvador. 2001. 175 p.

MARCONDES, R. A. de C. **Estudo do uso das tubulações de PEAD em sistemas de distribuição de água no Brasil**. 2016. 105f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

McINNIS, D; KARNEY, B. W. Transients in distribution networks: Field tests and demand models. **Journal of Hydraulic Engeneering**. p. 218-231. 1995.

MELLO, E. J.; FARIAS, R. L. **O ar e sua influência na medição do consumo de água**. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa, 2001.

MENDES, L. F. M. **Métodos clássicos de protecção de sistemas elevatórios contra o golpe de aríete**. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Situação de emergência ou estado de calamidade pública, reconhecimentos realizados em 2014**. 2015. Disponível em: <<http://www.mi.gov.br/reconhecimentos-em-2014>>. Acesso em: mai. 2017.

NETTO, A. J. M. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Blücher, 1998. 669p.

PARMAKIAN, J. **Water hammer analysis**. Dover, New York, USA, 1963.

PÉREZ, A. M. E. A. **Estudo ótimo da localização de válvulas redutoras de pressão em sistemas de distribuição de água considerando objetivos múltiplos**. Dissertação de Mestrado. 2008. Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campo Grande, 2008.

PIRES, E. E.; NAKAGAWA, L. Y.; ALVARES, J. de F. V. T. Quantificação das parcelas de perdas real e aparente em um sistema de abastecimento de água. **Revista Eletrônica Multidisciplinar FACEAR**, Curitiba, set. 2014.

PNCDA - PROGRAMA NACIONAL DE COMBATE AO DESPERDÍCIO DE ÁGUA. **Documento Técnico de Apoio** - DTA A2. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Indicadores de Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Água. Brasília - DF, 2003. 80p.

POTHOF, I; KARNEY, B. Guidelines for Transient Analysis in Water Transmission and Distribution Systems. In: OSTFELD, A. **Water Supply System Analysis - Selected Topics**. Capítulo 1. 2012.

ROCHA, M. S. **Influência do fator de atrito no cálculo do transitório hidráulico**. Dissertação de mestrado, 1998. Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

ROCHA, V. A. D. M. **Avaliação de calibração de redes hidráulicas usando o método iterativo do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA) aplicado a escoamento transiente**. 2013. Tese de Doutorado. Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, 2013.

ROSA, H. M. P. **Nova solução para o problema da dissolução de ar em reservatório Hidropneumático**. 2009. Tese de Doutorado. Doutorado em Engenharia, Universidade de São Paulo, 2009.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica Sabesp – NTS 189**: Projeto de redes de distribuição em PE 80, adutoras e linhas de esgotos em polietileno PE 80 ou PE 100. São Paulo: SABESP, 2013.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Crise Hídrica, Estratégia e Soluções da SABESP**. São Paulo: SABESP, 2015. 95 p.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica Sabesp – NTS 021**: Conduitos Forçados – Elaboração de Projetos. São Paulo: SABESP, 2017.

SAINT-GOBAIN CANALIZAÇÃO. **Tubos e conexões para água bruta e tratada**. Tubo classe K7. 2017. Disponível em: <<http://www.sgpam.com.br/saneamento/produtos/tubo-classe-k7>>. Acesso em: 2 mar. 2017.

SANTOS, J. R. A. **Análise de critérios de dimensionamento de ventosas em sistemas adutores**. 2014. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra (FCTUC), Coimbra, 2014.

SCHIMIDT, M. J. A. **Simulação de transiente hidráulico e combinação econômica da adutora para abastecimento público do município de Torrinha – SP**. 2016. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

SHARP, B. B; SHARP, D. B. **Water Hammer – Practical Solutions**. London: Butterworth-Heinemann, 1996.

SHIROMOTO, J.; LEITÃO, J. C.; TSUTIYA, M. T. Operação do Sistema de Taquacetuba para a transferência de água do reservatório Billings para a represa Guarapiranga – Região Metropolitana da São Paulo. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais**. Campo Grande, 2005.

SIEMENS. Catalog D 84.1 – 2009: Motors. 2009.

SIHS - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA E SANEAMENTO. **Plano de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara**. Salvador: SIHS, 2015. (Fase 1 - Tomo II - Estudos Básicos; Vol. 01 - Estudo Populacional e Demandas; Cap. 01 – Estudo Populacional e Demandas do Município de Salvador; Revisão - 03).

SIHS - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA E SANEAMENTO. **Plano de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara**. Salvador: SIHS, 2016a. (Relatório Parcial; Fase 1 - Tomo II – Estudos Básicos; Vol. 02 – Diagnóstico dos SAA – Mananciais, Barragens e Captações; Cap. 01 - Municípios de Salvador, Simões Filho, Lauro de Freitas, Candeias, Madre de Deus, São Francisco do Conde, Santo Amaro e Saubara; Revisão - 01).

SIHS - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA E SANEAMENTO. **Plano de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara**. Salvador: SIHS, 2016b. (Relatório Parcial; Fase 1 - Tomo II – Estudos Básicos; Vol. 03 – Diagnóstico dos SAA – Adutoras, Estações Elevatórias e Estações de Tratamento de Água; Cap. 01 - Municípios de Salvador, Simões Filho, Lauro de Freitas, Candeias, Madre de Deus, São Francisco do Conde, Santo Amaro e Saubara; Revisão - 02).

SIHS - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA E SANEAMENTO. **Plano de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara**. Salvador: SIHS, 2017. (Relatório Parcial; Fase 1 - Tomo II – Estudos Básicos; Vol. 04 – Diagnóstico dos SAA – Reservatórios, Redes de Distribuição, Avaliação de Perdas Físicas e Eficiência Energética; Cap. 01 - Municípios de Salvador, Lauro de Freitas e Simões Filho; Revisão - 03).

SILVA, P. A. **Amortecimento da celeridade de onda em condutos forçados**. 2006. Dissertação. Mestrado em Engenharia Hidráulica, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2006.

SINES, J. Determine the characteristic curve of an installed control valve. **Application Engineer for Engineered Software, Inc**, Lacey, 2009.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2015**. Brasília: Ministério das Cidades/SNSA/PMSS, 2017.

SOBRINHO, R. A. **Gestão das perdas de água e energia em sistemas de abastecimento de água da Embasa: um estudo dos fatores intervenientes na RMS**. 2012. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

THORLEY, A. R. D. **Fluid Transients in Pipeline Systems - A Guide to the Control and Suppression of Fluid Transients in Liquids in Closed Conduits**. 2. ed. New York: ASME Press, 2004.

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

VIARO, V. L. **Influência do fator de atrito variável na avaliação do escoamento transitório em sistemas hidráulicos**. 2001. Dissertação de mestrado. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

WORTHINGTON. **Catálogo de Bombas**: LN. 1988.

WYLIE, E. B; STREETER, V. L. **Fluid transients**. New York: Editora McGraw-Hill Book Company, 1979. 562p.