Murilo Macane Arima Zorio
Viviane Zorio Peixoto Arima

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR MEIO DA ANÁLISE DO TEMPO DE VIAGEM DE ONDAS DE PRESSÃO

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

MURILO MACANE ARIMA ZORIO
VIVIANE ZORIO PEIXOTO ARIMA

Detecção de Vazamentos em Redes de Distribuição de Água por Meio da Análise do Tempo de Viagem de Ondas de Pressão

1ª ed.

Goiâna-GO
Editora Conhecimento Livre

Copyright© 2026 por Editora Conhecimento Livre

1ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

ZORIO, MURILO MACANE ARIMA
Z37D Detecção de Vazamentos em Redes de Distribuição de Água por Meio da Análise do Tempo de Viagem de Ondas de Pressão
/ MURILO MACANE ARIMA ZORIO. VIVIANE ZORIO PEIXOTO ARIMA. – Goiâna-GO

Editora Conhecimento Livre, 2026

76 f.: il
DOI: 10.37423/2026.edcl1264
ISBN: 978-65-5367-743-2
Modo de acesso: World Wide Web
Incluir Bibliografia

1. transitórios-hidráulicos 2. detecção-de-vazamentos 3. tempo-de-viagem-de-onda-de-pressão I. ZORIO, MURILO MACANE ARIMA II. ARIMA, VIVIANE ZORIO PEIXOTO III. Título

CDU: 627

https://doi.org/10.37423/2026.edcl1264

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Conselho Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

Editora Conhecimento Livre
Goiânia-GO
2026

Detecção de Vazamentos em Redes de Distribuição de Água por Meio da Análise do Tempo de Viagem de Ondas de Pressão

10.37423/2026.edcl1264

RESUMO

As perdas de água em sistemas de abastecimento constituem um dos principais desafios operacionais das companhias de saneamento, sendo grande parte decorrente de vazamentos associados a pressões elevadas e falhas estruturais nas tubulações. Diante desse cenário, torna-se essencial a adoção de métodos que permitam a detecção e a localização rápida dos pontos de vazamento, de modo a reduzir desperdícios e preservar a integridade da rede. Entre as abordagens disponíveis, a análise de escoamentos transitórios destaca-se por fornecer informações detalhadas sobre o comportamento hidráulico do sistema. As ondas de pressão geradas durante o regime transitório interagem com dispositivos, singularidades e eventuais anomalias da tubulação, produzindo respostas características capazes de indicar a presença de vazamentos. Neste trabalho, investiga-se o uso dos transitórios hidráulicos como ferramenta para detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água, utilizando modelos hipotéticos simulados em ambiente computacional e a solução de equações características do fenômeno transitório. Os resultados demonstram que a análise do tempo de viagem das ondas de pressão constitui um método promissor e eficiente para identificar alterações na integridade das canalizações e apoiar a gestão operacional dos sistemas de abastecimento.

Palavras-chave: transitórios hidráulicos, detecção de vazamentos, tempo de viagem de onda de pressão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentuais e tipos de perdas em redes de distribuição....16
Figura.2 – Matriz de determinação de perdas reais em sistemas de abastecimento de água 19
Figura .3 – Esquemática de uma tubulação com vazamento, bem como os sensores vibratório-acústicos são conectados aos pontos de medida, sendo usualmente utilizados em sistemas de hidrantes. 25
Figura 4 – Esquema geral de um nó....34
Figura 5 – Identificação de um elemento de conexão entre nós 34
Figura 6– Linhas Características no plano x-t....41
Figura 7- Malha Regular – Método das Características....41
Figura 8- Representação de um nó genérico....44
Figura 9– Representação de um elemento não-tubo genérico....45
Figura 10– Linhas características nas extremidades de contorno....47
Figura 11– Fluxograma de simulação de transiente hidráulico....54
Figura 12– Pulsos do simulador do tempo de viagem de onda de pressão sem vazamento....57
Figura 13– Determinação do tempo de viagem de onda de pressão – Rede Real....57
Figura 14– Fluxograma do tempo de viagem de onda de pressão....58
Figura 15– Rede exemplo para a verificação dos algoritmos....59
Figura 16– Rede exemplo com vazamentos 60
Figura 17– Rede exemplo para a verificação dos algoritmos....62

LISTA DE TABELA

Tabela 1– Principais origens de perdas reais 17
Tabela 2– Componentes da vazão mínima noturna 20
Tabela 3– Dados das tubulações da rede exemplo 59
Tabela 4– Discretização da malha do método das características da rede com vazamento 61
Tabela 5– Dados das tubulações da simulação de tempo de viagem de onda de pressão 62
Tabela 6– Matriz de viagem de onda de pressão – do instante T = 0 até o T=50 67
Tabela 7– Exemplificação da aplicação do método do tempo de viagem de onda no choque entre ondas – Tubulação 5 – T=181 até T =204 69
Tabela 8– Matriz indicativa de detecção de vazamento na tubulação 4 70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14

2.1 Causas de perdas em sistemas de abastecimento de água 14

2.1.1 Perdas Reais 15

2.1.1.1 Quantificação de perdas reais 18

2.1.2 Perdas aparentes 21

2.2 Técnicas de detecção de vazamentos em redes de distribuição de água 22

2.2.1 Acústico 22

2.2.2 Acústico com correlação cruzada 24

2.2.3 Termografia infravermelha 25

2.2.4 Gás-Tracejante 26

2.2.5 Radar Penetrador do solo 26

2.2.6 Sistema Sahara 26

2.2.7 Smart Ball 26

2.2.8 Método da Observação 27

2.2.9 Variações Inesperadas 27

2.2.10 Gradientes de Pressão 27

2.2.11 Balanço de volume 28

2.2.12 Onda de pressão negativa 28

2.2.13 Redes Neurais Artificiais 29

2.2.14 Modelagem matemática 30

2.2.15 Sensores de ruídos ultrassônicos 31

2.2.16 Sensores ópticos: 31

2.3 Análise Hidráulica no Escoamento Transitório 31

3 METODOLOGIA 38

3.1 Introdução 38

3.2 Modelo de simulação hidráulica: Modelo da Coluna Elástica 39

3.2.1 Equacionamento para simulador hidráulico em redes de distribuição. 43

3.2.2 Condições de contorno 46

3.2.2.1 Válvula a jusante com descarga livre 47

3.2.2.2 Vazamento e demandas dependentes da pressão – Formulação de Orifícios 48

3.2.2.3 Reservatório de nível constante 50

3.2.2.4 Reservatório de nível constante a jusante de válvula ou bomba 50

3.2.3 Considerações sobre o fator de atrito no Escoamento Permanente 50

3.3 Detecção de Vazamentos em Sistemas Hidráulicos 51

3.3.1 Detecção de Vazamentos Utilizando a Reflexão da Onda de Pressão 51

3.3.2 Fluxograma do Modelo de Simulação Hidráulica 52

3.3.3 Fluxograma do tempo de viagem de onda de pressão 55

3.4 Rede hipotética para a utilização do simulador hidráulico 59

3.5 Rede hipotética para a utilização do simulador de tempo de viagem de onda de pressão 61

4 Resultados 63

4.1 Apresentação.....63

4.2 Dados da rede real.....64

4.3 Teste do Modelo de Tempo de Viagem de Onda de Pressão.....65

5 Conclusões.....70

5.1 Sugestão para trabalhos futuros.....71

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....72

1 INTRODUÇÃO

A distribuição de água potável à população é considerada uma das tarefas essenciais a serem desempenhadas pelos municípios de forma geral. No entanto, a distribuição de água em quantidade e qualidade desejadas, constitui um desafio que exige o máximo de eficácia e segurança possível dos sistemas de abastecimento.

Ao longo da década passada, a água foi considerada um dos principais temas de discussão e interesse humano com diversos focos, dos quais são inclusos a sua participação nas questões sustentáveis dos espaços urbanos, bem como as atividades produtivas. Há também a consideração dos aspectos ecológicos, sendo, portanto, beneficiários do uso racional do recurso hidrológico (MAGALHÃES, 2004).

No que diz respeito ao nível internacional, Lai (1991) apud (Colombo et al. 2009) informa que há uma grande variedade nas medias nacionais de perdas, desde valores reduzidos com 9% para a Alemanha, até superiores a 40% para a Malásia, sendo que a faixa mais comum varia de 20 a 30%. De acordo com estudos da Organização das Nações Unidas em 2006, mais de 1,2 bilhões de pessoas carecem de acesso a água limpa e potável.

A nível nacional ressalta-se que o índice de perdas de água no Brasil ainda tem taxas elevadas. Atualmente, as redes concessionárias de saneamento estimam que cerca de 45% do volume produzido é perdido. E que das 27 companhias estaduais de água e esgotamento sanitário, apenas 5 delas conseguiram diminuir suas perdas para valores inferiores à 30%, enquanto em 125 concessionárias municipais, o volume perdido de água se encontra entre 30% e 70%.

Estatisticamente, segundo dados de diagnóstico do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNSA 2010), o valor médio nacional para estas perdas de faturamento foi de 37,4% em 2008, com maiores valores nas regiões Norte (53,4%) e Nordeste (44,8%), e menores no Sul (26,7%) e Centro-oeste (33,7%), sendo o maior valor, na escala de prestadores do serviço, uma perda de faturamento do 80,7%.

No mundo todo a escassez de água potável é assunto de eminente preocupação. Sendo isto devido à crescente demanda deste recurso e a diminuição das fontes exploratórias desse suprimento.

O rápido crescimento da população urbana, associado a crescente escassez de água e ao desgaste infra estrutural das redes urbanas, requer a necessidade de um sistema inteligente de detecção de patologias das canalizações existentes na rede de distribuição de água. A infraestrutura urbana tal como rede de transporte, sistema de distribuição de água potável.

A detecção de vazamentos é uma etapa imprescindível na operação eficiente de tubulações e condutos de pressão. Existem uma diversidade de tipos de vazamentos os quais podem ocorrer em tais sistemas, assim como também é possível utilizar diversas técnicas de capazes de detectar e analisar cada tipologia.

Os vazamentos estão associados a aberturas nos elementos da rede, que constituem também um risco potencial à saúde pública; durante fenômenos transientes podem se apresentar diminuições nas pressões que permitem o ingresso de água presente no meio que pode conter agentes patogênicos ou a ou outros componentes responsáveis à degradação da qualidade da água entregue à população.

No meio urbano, a saturação do solo devido a vazamentos também compromete as condições de estabilidade para as obras de engenharia, modificando as condições do terreno de apoio e influindo sobre as estruturas de pavimentos, edifícios, pontes, etc.

Diversos fatores podem gerar vazamentos como causas naturais, ação de terceiros, falhas operacionais, falhas mecânicas e de manutenção. Dessa forma, monitorar de forma contínua as condições de operação da rede de tubulações é de importância vital para que vazamentos possam ser identificados e localizados o mais rápido possível.

Visando o controle dos vazamentos, diferentes tipos de metodologias têm sido empregadas para sua detecção. Os métodos incluem desde técnicas simplificadas, como por exemplo a inspeção das redes que pode ser desde visual até mesmo a adoção de sensores acústicos (geofones) ou a utilização de gases; ou também, testes de vazões e pressões realizados em trechos isolados da rede e o uso de sensores acústicos automáticos (loggers).

No entanto esses métodos de detecção têm grandes limitações quando aplicados a redes de distribuição de água potável, consoante a subjetividade e a dependência dos resultados às condições dinâmicas de execução, associadas às inspeções, além da sua impossibilidade para fornecer informação atualizada do sistema inteiro e em quantidade suficiente.

Frente às limitações das técnicas tradicionais, uma forma de abordagem a qual visa superar as ditas limitações é o uso da relação que tem um vazamento com as características hidráulicas do sistema. Dessa forma conclui-se que as características do sistema são diferentes quando existe um vazamento do que na ausência deles. Posto isso, então existe a necessidade de desenvolver o controle ativo de vazamentos, entendido como detecção e localização sobre a rede, de forma que as novas metodologias de controle ativo possam ser condizentes com a realidade dos órgãos responsáveis pelas redes de distribuição de águam, o que inclui carência de informações, pessoal altamente qualificado, além claro da limitação orçamentária, dentre outros fatores. (WLTF-IWA 2007)

A grande dificuldade encontrada na detecção de vazamentos diz respeito à generalização das diferentes técnicas propostas. A grande maioria dos trabalhos avalia os vazamentos em tubulações em série e não em redes de distribuição de água, caracterizadas por complexas topologias.

O presente trabalho, visa propor uma técnica de detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água por meio da análise do tempo de viagem de ondas de pressão, abordando o estudo dos fatores variáveis, por intermédio de uso de dados de rede hipotética, e modelagem computacional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Causas de perdas em sistemas de abastecimento de água

Segundo Hunaidi (2000) vazamentos podem ter sua origem de problemas no projeto do sistema de distribuição se dando através da existência de válvulas, ramificações, articulações, conexões entre outros. O autor cita ainda que fatores externos também podem comprometer a integridade, dos quais podem ser citados grandezas climáticas, a corrosão do material em se tratando de canalizações metálica, defeitos de fabricação da tubulação, instalação contendo defeitos, pressão de água excedendo os limites aceitáveis, vibração do solo devido a intenso tráfego nas ruas, entre demais a serem citados.

A quebra de tubulações gera elevadas perdas de água nos sistemas de distribuição de água, o levantamento do volume total perdido, bem como o caráter local e a influência destas no sistema, tem sido alvo de investigações por meio da inclusão de modelos pressão x vazamento nas análises hidráulicas, conforme a constante evolução nos sistemas de monitoramento de pressão. Além disso, é indubitável, o desejo das companhias que a localização de tais vazamentos seja veloz o suficiente para

a minimização das interrupções no abastecimento de água à população e também a diminuição dos danos ao sistema. Assim, a utilização de simulações hidráulicas no escoamento transitório tem se revelado útil a tais propostas. (KEPLER, 2007)

De acordo com a SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO (2004) em sistemas de fornecimento de água, do modo em que é operado, são considerados como perdas de água àquelas as quais são correspondentes a volumes não contabilizados. Esses englobam tanto as perdas reais, que são consideradas a porção não consumida, quanto as perdas aparentes, que correspondem à água consumida e não registrada

As perdas em sistemas de distribuição de água são classificadas em perdas reais ou perdas aparentes. De acordo com a American Water Works Association (AWWA, 2012), perdas aparentes são as perdas não físicas de água, onde são apontadas incompatibilidades na água consumida, mas não propriamente mensurada. Os motivos podem ser consumo não autorizado, deficiências no medidor de água do cliente ou falhas na manipulação das informações por parte da empresa fornecedora de água. Já as perdas reais correspondem às perdas físicas de água no sistema de distribuição, devido a vazamentos na rede distribuidora, transbordamento dos tanques de armazenagem e vazamento no serviço de conexão. Essas perdas afetam diretamente os custos de produção da concessionária provedora do sistema de abastecimento de água e também a exploração desnecessária de recurso hídrico, pois a água é extraída e tratada, porém não chega ao consumidor (AWWA, 2012).

Segundo Alegre et al (1999), as perdas de água são um dos principais indicadores de eficiência das empresas de saneamento em todo mundo. O entendimento básico do conceito considera perdas no sistema de abastecimento de como a diferença entre o volume de água tratada colocada à disposição da distribuição e o volume medido nos hidrômetros dos consumidores finais, em um determinado período de tempo. As perdas podem ser classificadas em perdas reais e aparentes.

2.1.1 Perdas Reais

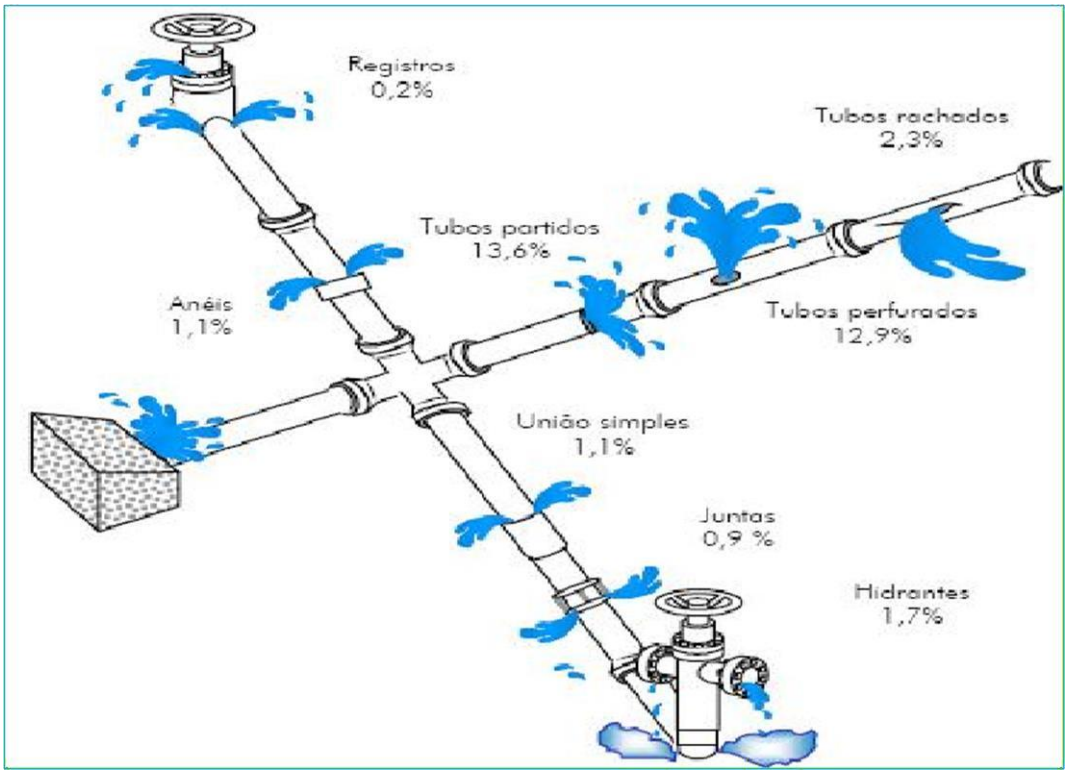
As perdas reais são perdas físicas de água decorrentes de vazamentos na rede de distribuição e extravasamentos em reservatórios, é importante ressaltar que esse tipo de perda impacta a disponibilidade de recurso hídrico superficial e os custos de produção de água.

Perdas reais originam-se de vazamentos no sistema, podendo ocorrer na captação, na adução de água bruta, no tratamento, na reservação, na adução de água tratada e na distribuição, além de procedimentos operacionais como lavagem filtros e descargas na rede, quando estes provocam consumos superiores ao estritamente necessário para operação. As perdas físicas ou reais são representadas pelas águas que efetivamente não chegaram ao consumidor, em função de vazamentos e extravasamentos de reservatórios, e vazamentos e arrebentamentos nas redes de distribuição. (CETRE DO BRASIL, 2002)

Arrebentamentos são acidentes motivados pelo rompimento das tubulações, usualmente ocorrem com enormes vazões de perda e com ameaça ao patrimônio, já os vazamentos representam falhas nas junções dos tubos, trincas ou perfurações, que ocasionam a perda de água através de fluxos contínuos, que podem ou não aflorar à superfície do terreno. (CETRE DO BRASIL, 2002).

Na figura 1 são mostrados os percentuais e tipos de perdas nos diversos pontos da rede de distribuição, respectivamente.

Figura 1 - Percentuais e tipos de perdas em redes de distribuição



Fonte: Programa Nacional de Combate ao desperdício de Água

Tsutiya (2004) ressalta que atrelados às perdas reais estão os custos de tratamento e transporte de água, tais como aqueles relacionados ao consumo de energia elétrica, de produtos químicos entre outros. A tabela 1 abaixo mostra os componentes do sistema de abastecimento de água e as principais causas de perdas reais.

Tabela 1– Principais origens de perdas reais

Componente do Sistema	**Causa da perda**	**Impacto nas perdas reais**
Captação/Adução	Vazamento na adução	A magnitude é função do estado das instalações de captação, sendo de ordem variável
	Ausência de limpeza nos componentes da captação	
Estação de Tratamento	Vazamentos na estrutura da estação de tratamento	A influência nas perdas reais deste componente é significativa em virtude do estado das instalações e da eficiência operacional
	Deficiência na manutenção em filtros de tratamento	
	Descarga de Lodo inadequada	
Reservação	Vazamento na estrutura	Ordem variável, sendo função do estado das tubulações e da eficiência de operação do sistema de reservação
	Extravasamentos nos reservatórios	
	Deficiências na limpeza dos componentes	
Distribuição	Vazamentos na rede	O impacto nas perdas reais é significativo, e função do estado das canalizações e principalmente das pressões atuantes
	Vazamentos em ramais de descarga	

Fonte: Programa Nacional de Combate ao desperdício de água

2.1.1.1 Quantificação de perdas reais

De acordo com Tsutiya (2004), se faz necessário a quantificação de perdas reais para uma eventual avaliação de eficácia. A quantificação desses volumes deve ocorrer por intermédio da obtenção da diferença entre o Volume Disponível ao Sistema, que é aquele referente a quantidade de água, bruta ou tratada, que entra no sistema, e os Volumes Autorizados, os quais se referem a quantidade de água consumida e legalmente cedida pela concessionária de água.

Para quantificação das perdas de água a International Water Association (IWA) propõe dois métodos: balanço hídrico e a adoção do sistema de vazão mínima noturna (Lambert & Thornton, 2002)

- Método do balanço hídrico

Esse método consiste na determinação das perdas reais, calculados a partir dos volumes perdidos obtidos do resultado de macromedições e de micromedição, e de volumes estimados para determinação dos valores não-medidos que integram as variáveis que compõem a determinação de perdas.

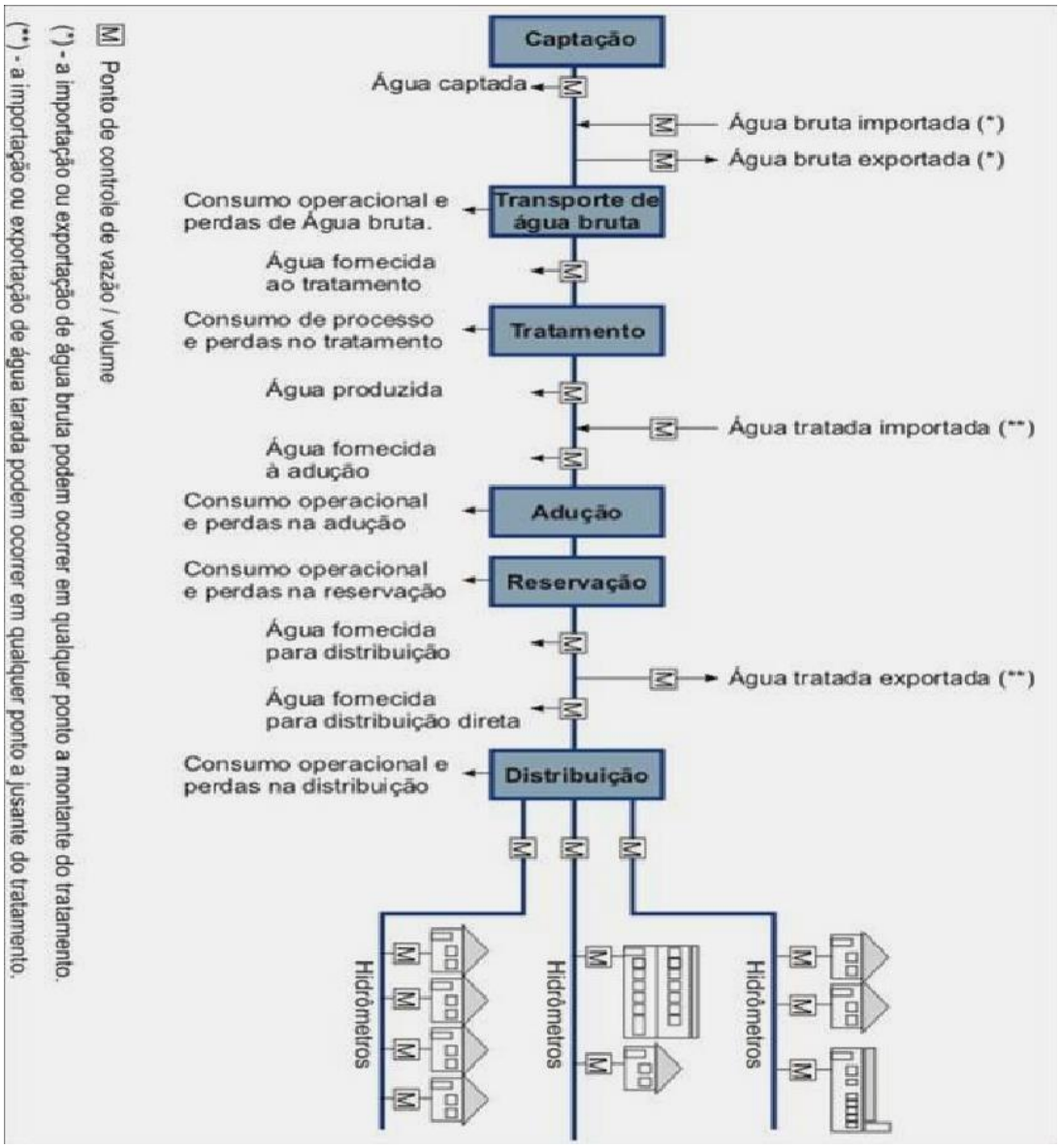
A matriz de balanço hídrico consiste em partir do volume total corrigido disponibilizado para a distribuição, descontando-se os volumes conhecidos até a obtenção dos volumes perdidos.

Essa tecnologia tem uma aplicação mais recomendada para análises mais generalizadas de perdas e é adotada, principalmente, para setores de abastecimento de grande magnitude ou também conjunto de setores de abastecimentos.

Alguns fatores podem afetar a apuração dos volumes, como defasagens sazonais, logo se faz necessário que todos os volumes sejam totalizados no mesmo período de tempo agregando qualidade a entrada de dados na matriz, dada sua sensibilidade.

Então a Figura 2, mostra esquematicamente uma matriz de determinação de perdas reais de água em um sistema de abastecimento.

Figura**Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.**.2 – Matriz de determinação de



perdas reais em sistemas de abastecimento de água

Fonte: Adaptado de Tsutiya (2004)

- Método da vazão mínima noturna (VMN)

Este método é viabilizado pelo conhecimento dos parâmetros hidráulicos obtidos pela medição. Essa metodologia fornece uma medida aproximada da vazão dos vazamentos.

O método se baseia em uma série de ensaios de campo e fornece uma medida bastante realista de perdas reais de água em uma determinada área de estudo. Os componentes principais da VMN referem-se ao consumo legítimo noturno dentro da área de estudo e aos vazamentos que ocorrem antes dos hidrômetros. A tabela abaixo mostra os itens que compõe a VMN bem como se estes fatores são influenciáveis pela pressão.

Tabela 2– Componentes da vazão mínima noturna

Método da Vazão Mínima Noturna				Afetado Pela Pressão
Vazão Mínima Noturna Medida	Vazão Noturna dos Vazamentos	Vazamentos não visíveis detectáveis	Rede	SIM
			Ramais	
		Vazamentos não visíveis não detectáveis	Rede	SIM
			Ramais	
	Consumo Noturno	Vazamentos após o hidrômetro	Do hidrômetro até a caixa d'água, inclusive	SIM
			Boia da caixa d'água	SIM
			Encanamentos internos às economias residenciais	NÃO
			Encanamentos internos às economias não residenciais	NÃO
		Consumo Noturno Normal	Residencial	NÃO
			Não-Residencial	NÃO
		Consumo Noturno Excepcional	Residencial	SIM
			Não-Residencial	SIM

Fonte: Lambert & Thornton, 2002

Um cuidado que deve se observar é que a vazão mínima noturna é medida no momento em que ocorre a maior pressão no sistema e representa a vazão máxima de vazamentos. O problema está relacionado que ao longo do dia que devido ao consumo, as pressões na distribuição diminuem e as vazões de vazamento também se alteram. Dessa forma, expandir a VMN para as 24 horas do dia superestima as quantias de perdas. Então deve-se adotar uma correção denominada "Fator Noite/Dia – FND". (Lambert & Thornton, 2002).

Dessa forma, pode-se exprimir a vazão de perdas através da seguinte equação:

$$Q_{perdas}=(Q_{mín,not}-Q_L)*FND \quad (1)$$

Onde:

- Q_{perdas} é a vazão média das perdas reais diárias, em m³/dia;

- $Q_{mín,not}$ é a vazão mínima noturna média do período estudado, em m³/hora;

- Q_L é vazão de usos ou consumos legítimos médios no horário da mínima noturna, em m³/hora;

- FND = Fator de correção, ou Fator Noite-Dia, que depende das pressões médias do setor e do parâmetro N1, em horas/dias.

O cálculo do FND é dado pela seguinte expressão:

$$FND = \sum \left(\frac{PPMS_i}{PMNS_{3-4}} \right)^{N1} \quad (2)$$

Onde:

$PPMS_i$ é a pressão média horária no setor, durante o período de amostragem, hora "i" do dia;

$PPMS_{3-4}$ é a pressão noturna média no setor, obtida no horário compreendido entre 3 e 4 horas, correspondendo à pressão média de todos os dias no horário da vazão mínima noturna.

Ressalta Lambert & Thornton (2002) que há locais em que a vazões mínimas noturnas não ocorrem entre 3:00h e 4:00h, portanto nestes casos deve-se conhecer o perfil de consumo da área em estudo para que o levantamento das pressões seja feito exatamente no horário da VMN.

2.1.2 Perdas aparentes

Segundo Farley (2008), perdas comerciais ou aparentes incluem a água que é consumida, mas não é paga pelo usuário. Ou seja, a água passou através dos medidores, mas não foi registrado o consumo com precisão, contrastando com vazamentos visíveis ou transbordamento de reservatórios onde a água perdida não é visível.

As perdas aparentes originam-se de ligações clandestinas ou não cadastradas, hidrômetros parados ou que foram fraudados, além de outras perdas de faturamento, uma vez que seu indício se dá pela relação entre o volume mensurado no sistema e o volume faturado (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO, 2004).

As principais causas das perdas aparentes são: submedição, ligações clandestinas, fraudes, By-Pass e deficiência na área comercial (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO. 2004).

Tsutiya (2004) afirma que às perdas aparentes estão diretamente associadas aos recursos financeiros que a empresa deixa de receber por falta de faturamento de volumes de água consumidos. Entretanto,

para o consumidor, a perda é um componente importante na tarifa por ele paga, pois, as companhias incorporam essa perda na sua composição de preços.

2.2 Técnicas de detecção de vazamentos em redes de distribuição de água

Sistemas de detecção de vazamento são classificados em: estático e dinâmico. O sistema estático é útil após a detecção do vazamento, de modo a encontrar a sua localização. Já o modo dinâmico pode ser utilizado enquanto a tubulação está operando. Esses métodos são capazes de detectar pequenos vazamentos e baseiam- se no fato de que em uma linha sem fluxo uma queda de pressão indica vazamento (WIKE, 1986).

A seguir são apresentados alguns métodos de detecção e localização de vazamentos em tubulações encontrados no mundo.

2.2.1 Acústico

A técnica de detecção acústica adota a utilização de varetas ou o aparelho de microfone de solo, e o procedimento se dá pela escuta segundo a direção da tubulação (HUNAIDI, 2000). É um método que podem detectar vazamentos muitos pequenos em um curto espaço de tempo podendo ser aplicado em estruturas em operação, à temperatura ambiente ou elevada.

De acordo com o mesmo autor, esta técnica está limitada à alguns cofatores, como por exemplo a sua real necessidade de ser utilizada sobre a tubulação; a necessidade de operadores experientes; influência de ruídos, tipo de material da canalização e do amortecimento do solo sobre o ensaio; a obrigatoriedade de instalação do equipamento em uma região relativamente próxima ao vazamento; e pôr fim a precisão limitada do modelo.

Cita Macleod et al. (1990) que ondas acústicas podem percorrer através de estruturas e fluidos até sensores remotos, significando que instrumentos acústicos apresentam relativa facilidade de instalação e, com uma quantidade pequena de sensores, permitem uma supervisão abrangente da planta assegurando sua integridade no que diz respeito a sua estrutura. O sucesso na inspeção depende da existência de bons sensores situados em locais adequados e de um sistema satisfatório de amplificação e armazenamento das informações.

A detecção de vazamentos de água em tubulações submersas de distribuição que utilizam métodos acústicos é recorrente em muitos países. Essa tecnologia é utilizada amplamente na detecção de vazamentos em tubulações metálicas. Porém, destaca-se um número de anomalias na tentativa de determinação da localização de vazamentos de água, utilizando o método acústico em tubulações flexíveis (de plásticos) enterradas no solo ou submersas em uma extensão de água, como por exemplo, um rio ou um lago. A energia acústica a qual é gerada por um vazamento de água em uma tubulação submersa propaga frequências relativamente baixas, próximo a 100 Hz, indicando que nenhum sinal de ruído de vazamento seria detectável em nenhum ponto da tubulação submersa. Contudo, a atenuação do sinal de onda gerado pelo vazamento na tubulação enterrada no solo foi relativamente aumentada comparada com aquela observada em uma tubulação imersa em água. Logo conclui- se certa ineficácia em tubulações submersas. (MUGGLETON et al., 2004).

Técnicas de processamento de sinal também são requeridas para extrair as informações importantes dos dados coletados (MACLEOD et al, 1991).

Streicher (1991) apresentou conceitos de um sistema de monitoramento acústico de peças frouxas e de vazamentos com sua possível localização. O sistema permite um reconhecimento adiantado dos desvios de operação normal possibilitando uma rápida ação corretiva impedindo danos ambientais ou danos em equipamentos. Observou-se que o ruído de operação e o ruído gerado por vazamento foram independentes, ou seja, numa operação normal o ruído de fundo é conhecido e qualquer alteração de sinal de amplitude que venha apresentar este ruído significa existência de vazamento. A localização do vazamento é determinada por comparação entre amplitudes dos ruídos gerados em diferentes pontos ao longo da estrutura. Estes ruídos são captados por microfones piezoelétricos presos contra a estrutura.

Foi possível a detecção e localização de vazamentos menores do que 5 litros/h, quando o ambiente externo estava relativamente silencioso, e a magnitude do vazamento foram estimados com uma precisão de ±40 % através da relação entre amplitude do ruído gerado e taxa de vazamento.

Shimanskiy e outros (2003) desenvolveram um método de detecção de pequenos vazamentos baseado em microfones resistentes a altas temperaturas e com capacidade de detectar taxas de fluxos de $1m^3/h$ a $500m^3/h$. Estes microfones foram instalados em um avançado reator térmico na usina nuclear de Fugen, no Japão. Para a detecção foi estabelecida uma relação entre amplitude do ruído emitido pelo vazamento na tubulação de resfriamento do reator e a atenuação que este ruído sofre devido à

caixa de isolamento térmico. Para a localização do vazamento foi utilizada a técnica de aproximação por multicanais que consiste na utilização dos valores de correção cruzada medidos em diferentes posições por diferentes pares de microfones.

Muggleton e outros (2004) apresentaram estudos sobre a detecção de vazamentos de água, em uma tubulação enterrada no solo, utilizando o método acústico. Foi determinada a localização de vazamentos em tubulações plásticas, bem como o que acontece com o som provocado pelo vazamento quando a tubulação está submersa em uma extensão de água, tal como atravessar um rio ou um lago. A energia acústica gerada por um vazamento de água em uma tubulação submersa propaga frequências relativamente baixas geralmente menores do que 200 Hz. Concluiu-se que a atenuação do sinal de onda gerado pelo vazamento na tubulação enterrada no solo foi relativamente aumentada comparada com aquela observada em uma tubulação imersa em água.

2.2.2 Acústico com correlação cruzada

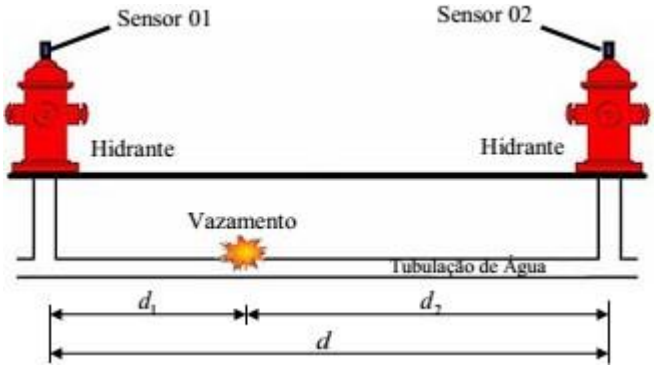
Este sistema utiliza dois sensores posicionados de forma estratégica em pontos opostos ao vazamento. A partir de informações obtidas pelos sensores, então são enviados a um software de correlação o qual calcula o atraso entre os sinais para realizar uma estimativa base de localização do vazamento (HUNAIDI, 2000).

Segundo GAO (2004), a existência de vazamento em uma tubulação gera ruído, o qual pode ser utilizado para detectá-lo e localizá-lo, por intermédio de sensores vibro-acústicos, que tornam real a possibilidade de detecção e estimativa do posicionamento do vazamento ao longo da tubulação.

O sistema descrito, é mostrado abaixo pela figura 3, bem como a disposição dos sensores na tubulação onde se pretende detectar o vazamento utilizando essa técnica, sendo o d1 e d2 as distâncias do vazamento até o ponto da instalação dos sensores 01 e 02, e d é o comprimento da tubulação entre os dois sensores.

HUNAIDI (2000) explica que alguns aspectos interferem na adoção do sistema em redes urbanas, dentre eles o alto custo de operação; a limitação no que diz respeito a espectros de baixa intensidade, uma vez que sua interpretação se torna complicada; além de apresentar entraves quanto ao material da canalização (tubulações plásticas dificultam a interpretação do ensaio) e o diâmetro grandes.

Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.**.3 – Esquemática de uma tubulação com vazamento, bem como os sensores vibratório-acústicos são conectados aos pontos de medida, sendo usualmente



utilizados em sistemas de hidrantes.

Fonte: Lima (2014)

Então seguindo a detecção do ruído, ocasionado pela presença de vazamento por intermédio dos sensores instalados, realiza-se um processo de análise de sinais conhecido como correlação cruzada. Neste procedimento é encontrado um valor referente à diferença de tempo na chegada do ruído de vazamento entre sensores T0. Esta medida então é adotada para o cálculo da posição aproximada da distância entre o vazamento até o ponto de instalação do sensor 01 (d1) pela seguinte fórmula:

Equação (3) – Determinação da distância estimada entre o vazamento é ponto de instalação do sensor 1

$$d_1 = \frac{d - c.T_0}{2} \tag{3}$$

Onde c é a velocidade de propagação do ruído de vazamento, geralmente obtido em tabelas padrões de correlacionadores de sinais (ALMEIDA, 2013). Conforme foi avistado na Eq. (1.1), uma boa estimativa da localização do vazamento é proporcional à qualidade da estimativa da velocidade de propagação do ruído, bem como a estimativa do atraso de sinais (GAO, 2004)

2.2.3 Termografia infravermelha

Este artifício usa detectores de radiação infravermelha a qual utiliza diferenças de temperatura causadas por vazamento de água (HUNAIDI, 2000)

Este sistema tem como principais produtos limitantes o custo de operação, a necessidade do uso de um operador experiente, a precisão não-adequada e além da limitação climática, uma vez que fatores climatológicos interferem nas leituras do detector.

2.2.4 Gás-Tracejante

O modelo consiste nos seguintes passos: drena-se água da seção da tubulação, em seguinte insere-se, neste segmento, um gás não-tóxico mais leve que o ar (comumente adotado Hélio e Hidrogênio). Então, o gás escapa através da abertura causada pelo vazamento, por ser mais leve que o ar, ele se infiltrará até a superfície atravessando o solo.

Por fim, o vazamento é localizado, com a utilização de detector de gás, realizando uma varredura na superfície do solo seguindo o trajeto da tubulação (HUNAIDI, 2000).

Custo, tempo de ensaio, limitação de profundidade e precisão limitada, são os principais aspectos que impõe restrições a este modelo de detecção.

2.2.5 Radar Penetrador do solo

O sistema de Radar Penetrador de Solo se baseia na adoção de um radar, o qual gera imagens, e baseada na reflexão das ondas do radar então realiza-se uma análise que detecta alterações na densidade do solo ou do tubo (HUNAIDI, 2000).

No entanto, este sistema apresenta difícil interpretação na elaboração de seus resultados.

2.2.6 Sistema Sahara

Este modelo se dá pela utilização de sensor acústico acoplado a um cabo que transita dentro da tubulação e sente a presença de vazamento. Uma vez que o sensor localiza um vazamento, um sinal pré-definido usado para localizar a posição é emitido, e utilizando um equipamento de rastreamento sobre a superfície é possível localizar a fissura na tubulação (BEN-MANSOUR; HABIB, 2012).

Assim como outros sistemas apresentados anteriormente este modelo apresenta alto custo e são limitados a tubulações não metálicas de grande diâmetro.

2.2.7 Smart Ball

Este sistema utiliza uma bola a qual contém um circuito eletrônico em seu interior, que emite pulsos elétricos para receptores posicionados ao longo tubulação, sendo assim possível localizar a fissura no tubo. (BEN-MANSOUR; HABIB; 2012).

A esfera é implantada no fluxo de água de uma tubulação e recolhida em um ponto a jusante. Esta continuamente registra informações e emite pulsos, estes pulsos são informações a serem armazenadas e analisadas para identificação de bolsas de ar e vazamentos. Uma análise de frequência é necessária para confirmar que uma anomalia acústica é realmente um vazamento.

Alto custo e limite de utilização em até 300 milímetros de diâmetro, são fatores que restringem sua adoção a algumas patologias.

2.2.8 Método da Observação

É a forma mais simples de detectar vazamentos, técnicos responsáveis pela canalização realizam inspeções visuais ao longo da canalização procurando por condições que fogem o padrão de operação como por exemplo odores e sons, que podem ocorrer devido a vazamentos. Estas inspeções requerem regularidade uma vez que esse método não é tão eficaz e depende de muita experiência das pessoas envolvidas.

2.2.9 Variações Inesperadas

O vazamento é detectado na tubulação em operação por meio da variação de pressão e de fluxo. O vazamento pode provocar uma queda de pressão a montante e um aumento de fluxo também a montante. Este método pode ser aplicado apenas ao escoamento de fluidos incompressíveis em estado estacionário, caso contrário pode levar a alarmes falsos. Somente vazamentos maiores são detectados (WIKE, 1996).

2.2.10 Gradientes de Pressão

Baseia-se no princípio de que um vazamento deve distorcer o perfil de pressão ao longo de uma seção da tubulação. O gradiente médio de pressão ao longo da linha pode ser calculado por meio de medidores de pressão nas extremidades das seções. Um vazamento causa uma diminuição no

gradiente médio, e através de técnicas de ajuste de curvas de interpolação entre medidas de pressão e o vazamento pode ser localizado com razoável precisão (WIKE, 1996). O grande problema dessa técnica está no refinamento de informações, uma vez que exista inúmeras variáveis.

2.2.11 Balanço de volume

É um dos métodos mais utilizados, sendo limitado pela exatidão da medida do volume e das variações associadas a ela. O método essencialmente mede o "volume que entra" e subtrai o "volume que sai", a diferença significa vazamento.

Falsos alarmes podem ocorrer porque a taxa de fluxo depende de parâmetros do fluido (temperatura, pressão, densidade e viscosidade), as variações nos parâmetros podem ser corrigidas por medições regulares das variáveis ao longo da tubulação ou preditas por um modelo de cálculo.

Assim, para evitar alarmes falsos, só será constatado o vazamento quando a diferença de fluxo exceder um valor limite, vazamentos de 2% de líquido e 10% de gases são necessários para a detecção. Vazamentos menores podem ser detectados com métodos não lineares adaptativos baseados na medida do fluxo e pressão na entrada e saída da tubulação. Esta técnica só permite a detecção a localização não é possível por este método (SANDBERG et al, 1989; BLACK, 1992; WIKE, 1996).

2.2.12 Onda de pressão negativa

No instante em que o vazamento ocorre há uma queda de pressão repentina no local originando uma onda de pressão negativa que se propaga à velocidade do som no sentido montante e jusante até que seja alcançado um novo estado estacionário.

Esta pressão negativa percorre longas distâncias apenas com atenuação moderada, providenciando uma detecção rápida para grandes tubulações. Sendo necessário fazer uma filtragem cuidadosa dos dados porque as ondas de pressão negativas podem ser causadas por bombas, fechamento de válvulas e outros procedimentos normais da operação.

O sistema de detecção mostra um bom desempenho na detecção de pequenos vazamentos na ordem de 5% da taxa do fluxo do líquido nominal. A localização do vazamento é obtida com razoável precisão através da instalação de transientes de pressão nas extremidades das seções e ao longo da tubulação

conhecendo-se as distâncias entre os mesmos, e da velocidade da onda de pressão quando ocorre o vazamento (BLACK, 1992; SILVA et al, 1996; WIKE, 1996).

2.2.13 Redes Neurais Artificiais

Belsito e outros (1998) desenvolveram um sistema de detecção e localização de vazamentos em tubulações transportando gás liquefeito baseado em redes neurais artificiais, que tem a capacidade de detectar e localizar vazamentos menores que 1% do valor nominal da vazão de fluxo a um custo aceitável. Os dados para treinamento das redes foram adquiridos através da simulação do escoamento nas tubulações com e sem vazamento, levando em consideração os sinais de ruídos existentes nas tubulações e consequentemente gerando dados que constituiriam padrões de operação. No sistema em estudo foram detectados vazamentos muitos menores que 1% da vazão do fluxo de entrada. O modelo numérico desenvolvido foi baseado em equações de conservação de massa, movimento e energia, as quais foram resolvidas utilizando diferenças finitas.

ZHONG et al. (1997) utilizaram Redes Neurais Artificiais (RNA) para detectar vazamentos em tubulações de caldeiras. A RNA utilizada no experimento foi a Back Propagation (rede com múltiplas camadas) tinha a função de compreender o mapa funcional entre o vazamento e as variáveis do processo que exibiam mudanças significativas quando ocorria o vazamento. A rede neural era composta por uma camada de entrada e uma de saída e duas camadas intermediárias. Foram realizados dois testes para analisar o desempenho da proposta. No primeiro teste foram usados dados de simulação, enquanto que no segundo foram usados dados experimentais.

No primeiro teste, diferentes vazamentos foram simulados em diferentes locais da tubulação. As variáveis sensíveis para cada cenário de vazamento do duto foram introduzidas no sistema e a saída da rede forneceu a taxa de vazamento dos casos particulares de vazamento. Para os dados experimentais, as informações das variáveis sensíveis continham informações do momento em que houve o vazamento e durante o desligamento do mesmo. De acordo com os resultados foi possível a identificação do vazamento.

CAPUTO e PELAGAGGE (2002) propuseram um trabalho para avaliar as condições de pressão e taxa de fluxo de uma rede de tubulação, por meio de simulação, com o objetivo de predizer o estado da rede da tubulação em situações normais e anormais de fluxo para gerar um conjunto de dados para treinar uma Rede Neural Artificial. Através de um modelo matemático, foram gerados dados de pressão e taxa

de fluxo em diferentes condições de funcionamento com ou sem vazamentos. A rede de múltiplas camadas (MLP) foi selecionada como o tipo de rede neural mais susceptível para representar esta aplicação Duas arquiteturas de RNA foram apresentadas, na qual a primeira RNA determina o trecho onde ocorre o vazamento e a segunda RNA foi ativada especificamente em seguida para estimar com precisão a magnitude e localização do vazamento no trecho selecionado. A arquitetura proposta foi satisfatoriamente testada em um caso simplificado, obtendo resultados promissores.

Dando continuidade ao trabalho, CAPUTO e PELAGAGGE (2003), realizaram o treinamento da rede neural com o conjunto de dados obtido através do modelo matemático desenvolvido no trabalho anterior. Este conjunto de dados contém dados de pressão e taxa de fluxo em diferentes condições de funcionamento com ou sem vazamentos. Desta forma, uma forte correlação entre os efeitos de vazamento, quantidade e localização foram definidos. Durante a fase de execução, as RNAs agiram como um classificador para estimar o estado do sistema atual e identificar vazamentos com base em informações disponíveis.

Após a metodologia proposta ser realizada, a técnica foi aplicada a uma situação real. Foi utilizada uma tubulação de 9455 m de extensão e os resultados obtidos também foram promissores. O trecho em que o vazamento ocorreu foi corretamente identificado, a taxa de fluxo apresentou um erro inferior a 3% e a localização do vazamento foi determinada com uma precisão de 50 a 100 m.

GARCIA et al. (2010) utilizaram redes neurais artificiais para detectar vazamentos de ar comprimido em uma seção de duto com 2 m de comprimento e 10 cm de diâmetro interno, com espessura da parede de 5,7 mm. Durante a realização dos experimentos, o duto se encontrou suspenso para um maior isolamento, evitando assim vibrações externas. O treinamento do modelo neural foi realizado através de sinais vibro acústicos captados por um acelerômetro piezoelétrico. O algoritmo de otimização para o treinamento foi o de Levenberg-Marquardt, que permitiu uma rápida convergência de treinamento para a RNA. Através dos resultados obtidos, pôde-se detectar 98 % dos casos de vazamento e 99 % das outras situações com geração de vibrações, mas sem vazamento.

2.2.14 Modelagem matemática

Embora existam diferentes formulações, a essência da maioria dos sistemas de modelagem é a mesma: solução de equações da conservação de massa, momento e energia. Estas equações não representam um sistema fechado e devem ser suplementadas por uma equação de estado e

formulação do fator de fricção. Métodos numéricos são usados para resolver este grupo de equações não lineares, o resultado é uma ferramenta preditiva conhecida como modelo de tempo real, ou on-line. (BLACK, 1992).

O modelo estima variável intermediária ao longo da tubulação através de um conjunto limitado de medições reais da tubulação, como pressão a montante e fluxo a jusante, que são usados como condições de contorno. As discrepâncias entre as variáveis intermediárias calculadas pelo modelo e medições reais são usadas para indicar vazamentos (WIKE,1996).

2.2.15 Sensores de ruídos ultrassônicos

Segundo BLACK (1992) esta metodologia utiliza sensores baseados na detecção de ruído criado pelo vazamento, produzido na faixa de frequência ultrassônica. Segundo o mesmo autor o manuseio do software deve ser cuidadosamente calibrado de forma a filtrar de ruídos externos.

2.2.16 Sensores ópticos:

Este sistema é baseado em fibras ópticas, diferentes sensores ópticos são desenvolvidos para detectar vazamentos de líquidos, onde as fibras ópticas interagem diretamente ou indiretamente com o vazamento do líquido. O sensor é constituído por uma fibra óptica e em paralelo um arame de reforço que são envolvidos por um polímero e este por sua vez é envolvido por um arame helicoidal.

Quando ocorre o vazamento, o líquido ou o gás que são compatíveis com o polímero e com o sensor, são absorvidos pelo polímero e este aumenta o seu diâmetro e consequentemente comprime a fibra óptica contra o arame helicoidal. Este fenômeno de comprimir a fibra aumenta a tensão óptica do sinal que viaja através da fibra permitindo a detecção e a precisão da localização do vazamento, pois o inchaço do polímero é guiado na direção preferencial para concentração da pressão osmótica em direção a fibra óptica. (CARRILO et al, 2001).

2.3 Análise Hidráulica no Escoamento Transitório

Com o avanço das tecnologias computacionais, tornou-se possível a análise de sistema de distribuição de água sob uma diversificada gama de condições de fluxo. A literatura revela que muitos aperfeiçoamentos têm sido realizados no que diz respeito a análise transitória de condutos sob

pressão: o modelo da coluna rígida, o qual admite-se líquido incompressível e conduto rígido, utilizado para análise de fenômenos de oscilação de massa, ou seja, condição transitória lenta com baixa frequência; e o modelo da coluna elástica, que realiza análise considerando os efeitos de elasticidade do fluido e do conduto, modelo o qual é adotado para a análise do golpe de aríete, cujo o efeito transitório é rápido e de alta frequência. (KEPLER, 2007).

O fluxo transitório em conduto sob pressão é regido por equações diferenciais parciais não-lineares, as quais representam as leis da quantidade de movimento na equação (4) e da conservação da massa na equação (5) (CHAUDHRY, 1979; ALMEIDA; KOELLE, 1992; WYLIE; STREETER, 1993).

Segundo COVAS (2003) nesta análise é realizado a admissão das seguintes hipóteses:

i. O fluído é monofásico, homogêneo e compressível (a compressibilidade do fluido é incorporada na velocidade de propagação da onda elástica);

ii. Variações na massa específica do fluido e temperatura durante o escoamento transitório podem ser desprezadas comparada às variações de pressão e vazão;

iii. O escoamento é unidimensional com a suposição de perfil de velocidade uniforme em cada seção transversal do tubo;

iv. As perdas de carga durante os transitórios hidráulicos são calculadas a partir de formulações para o escoamento permanente;

v. O material do tubo possui comportamento reológico elástico linear, isto é, os efeitos do comportamento deformacional e do fluxo de matéria submetido a tensões seguem regime elástico-linear.

vi. Não há movimento axial, dessa forma, a interação fluido-estrutura é desprezada e;

vii. O tubo é retilíneo e uniforme, com uma área da seção transversal constante e sem escoamento lateral (apesar de que variações na área da seção transversal e escoamento lateral possam ser incluído como condições de contorno).

Assim, as equações gerais que regem o escoamento transitório são:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g.\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f.V.|V|}{2.D} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Onde: x é a variável distância, t é a variável tempo, H=H(x,t) a carga piezométrica, variável ao longo do comprimento da tubulação e do tempo, V=V(x,t) a velocidade do fluido, também variável ao longo do comprimento da tubulação e do tempo, D o diâmetro interno da tubulação, a é a velocidade de propagação da onda de pressão(celeridade), g é a aceleração da gravidade e f o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach. Deve se levar em consideração que a velocidade do escoamento no tubo é muito menor que a celeridade (V << a), os termos convectivos da equação (4) e (5) podem ser desprezados.

Para a resolução do sistema de equações diferenciais parciais, diversos métodos numéricos são apresentados na literatura, pois, em geral, não há uma solução analítica simples para esse conjunto de equações.

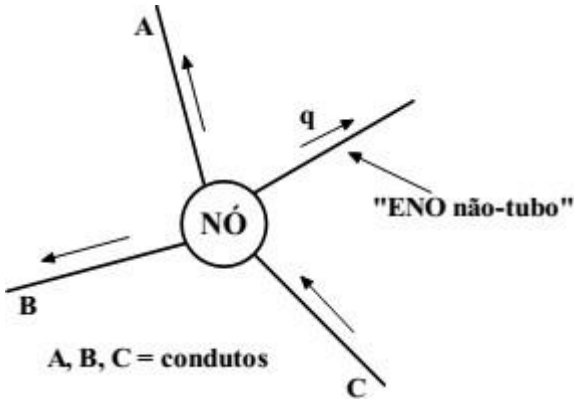
O desenvolvimento de uma formulação geral para a interpolação linear utilizada em conjunto com o método das características com malha regular fixa é proposto por Wiggert e Sundquist (1977). Nela é realizada uma análise da atenuação e da dispersão provocadas pelos efeitos da malha adotada. Além disso, os autores demonstram soluções numéricas nas condições de celeridades constantes e variáveis modificando parâmetros de interpolação e da malha, resultando em diferentes valores para os parâmetros do critério de estabilidade de Courant-Lewy-Friedrichs. Esse critério, nada mais é que uma limitação numérica requerida para estabilidade do método das características, sendo definido pela relação entre a celeridade real (v ± a) e a celeridade numérica (Δx/Δt), sendo que Δx está relacionado a discretização espacial, isto é, ao longo do eixo axial da canalização, e Δt é correlacionado a variação temporal (passo de tempo). Então os autores sugerem que para evitar dispersão e amortecimento numérico, tal relação deve ser tratada como uma igualdade (v ± a = Δx/Δt)

Um estudo da interpolação temporal em substituição à interpolação espacial no método das características é realizado por Goldberg e Wylie (1983). Resultados são demonstrados através da avaliação de dois tipos de interpolação temporal: um esquema explícito (de segunda, terceira e quarta

ordens) e um esquema implícito. No caso da utilização do esquema explícito, menos atenuação é provocada no método devido ao emprego da informação de dois, três ou até quatro pontos anteriores na malha. Este procedimento, no entanto, requer mais memória computacional e uma malha com refinamento maior. A vantagem do esquema implícito é a flexibilidade da discretização temporal, embora erros apresentados nas simulações atentem para a necessidade de estudos mais aprofundados nessa direção.

Koelle (1983) apresenta uma generalização do modelo elástico que facilita a sua aplicação a sistemas com topologia mais complexa. O autor utiliza uma notação em que a instalação hidráulica é constituída de “NÓs” e de “Elementos de conexão entre os “NÓs", chamados “ENOs”. NÓ é a denominação dada ao ponto de encontro de vários ENOs, e os vários condutos e dispositivos hidromecânicos, tais como bombas, válvulas, reservatórios, tanques alimentadores, reservatórios hidropneumáticos, chaminés de equilíbrio e outros, são genericamente denominados “ENOs não-tubos”. A generalização do equacionamento para a formulação do programa computacional exige que a cada NÓ seja vinculado, no máximo, um ENO não-tubo com uma vazão q, conforme representado na Figura 4

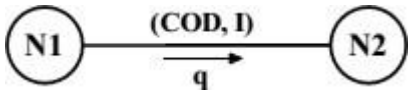
Figura 4 – Esquema geral de um nó



Fonte: Koelle (1983)

Além disso, cada elemento (ENO) recebe uma palavra-chave (COD) que o identifica como reservatório, tubo, bomba, válvula ou outro; um código de identificação I, representado por um número natural que permite a contagem de ENOs do mesmo tipo; e os nós de montante (N1) e jusante (N2) de cada elemento. A nomenclatura adotada permite a fácil identificação do sistema e tendo, cada ENO, um conjunto de quatro caracteres alfanuméricos (COD, I, N1, N2), conforme Figura 5

Figura 5 – Identificação de um elemento de conexão entre nós



Fonte: Koelle (1983)

Este modelo caracteriza-se pela facilidade de codificação do sistema, rápida identificação dos componentes e por permitir um tratamento bastante simples do modelo elástico. O autor utiliza o método das características para a resolução das equações diferenciais parciais e propõe, ainda, equações gerais para os nós e elementos não-tubos. Neste mesmo trabalho, Koelle apresenta o conceito de "celeridade fictícia" que possibilita a obtenção de equações integradas para o modelo rígido semelhantes às do modelo elástico no método das características, e de manobra ótima de válvulas, sendo indicados os critérios para a sua determinação visando o controle das pressões extremas e da duração total do transitório. Dois novos métodos para o cálculo de transitórios hidráulicos em tubulações foram propostos por Shimada e Okushima (1984): um novo método explícito (método de solução em série) e uma modificação do método de Newton-Raphson. Ambos são baseados em aproximações de segunda ordem e apresentaram melhores resultados em relação aos modelos de primeira ordem. Embora os modelos de segunda ordem sejam mais utilizados em sistemas com atrito elevado, os métodos propostos pelos autores também são aplicáveis a sistemas com moderadas perdas de carga. A desvantagem dos métodos é o erro apresentado na solução do escoamento permanente, sendo necessários ajustes em alguns parâmetros do modelo devido ao erro de truncamento nas equações. Lessa (1984) desenvolve um modelo matemático computacional, baseado no Método das Características (MOC), destinado à análise de fenômenos transitórios em sistemas complexos de adução de água. O autor aplicou tal modelo para as análises do comportamento de ventosas, conjunto moto-bomba, válvula de retenção, válvula de alívio e reservatório hidropneumático. O mesmo modelo foi aplicado por Lessa (1990) a sistemas de laboratório operando por gravidade e por recalque, com e sem a presença de acessórios de proteção. Problemas relacionados com o atrito e escoamento bifásico foram relatados, bem como a falta de amortecimento nas variações de pressão obtidas nas simulações numéricas. De maneira geral, o modelo apresentou resultados satisfatórios, principalmente pelo fato da melhor caracterização dos parâmetros dos acessórios (condições de contorno) empregados nos ensaios.

Um método para análise hidráulica de redes de distribuição de água baseado na teoria da coluna rígida para transitórios lentos e escoamento em regime permanente é proposto por Onizuka (1986). Segundo

o autor, a maior contribuição do método é a proposição, com o auxílio da teoria dos grafos, de um sistema de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem para a análise hidráulica em escoamento não-permanente, associada a uma função quadrática de Liapunov para a garantia da estabilidade assintótica da simulação, além de fornecer um critério único e preciso para o regime estacionário. Para a integração numérica, foi utilizado o método de Runge-Kutta de quarta ordem e, portanto, sem nenhum procedimento iterativo. Além disso, uma técnica de relaxação dinâmica foi utilizada para a solução do estado permanente, sem a necessidade de atendimento à continuidade no sistema. Posteriormente, Shimada (1989) propôs um método também para a análise de transitórios lentos formulado a partir de matrizes de incidência, daí a denominação de método de incidência. Este foi considerado de mais fácil implementação em computadores, tratando de sistemas mais complexos com maior refinamento, além de ser mais vantajoso do que o método dos circuitos proposto por Onizuka (1986) na avaliação hidráulica de sistemas com presença de válvulas.

A formulação baseada na teoria dos grafos usando matrizes de incidência foi realçada por Shimada (1992) pela notação de espaços de estados e pela teoria de controle ótimo para uma análise mais refinada dos transitórios lentos. Assim, operações adequadas de válvulas de controle presentes no sistema durante o evento transitório são obtidas pela aplicação do método de espaços de estados com a teoria do regulador ótimo discreto. Um sistema de pequenas dimensões foi utilizado e apresentou alguns problemas numéricos. O autor recomenda o uso de outras teorias de controle ou a utilização de técnicas para tratamento de matrizes esparsas para sistemas de maiores dimensões e complexidade.

Suo e Wylie (1989) apresentam uma variação do Método da Resposta Impulso, o qual incorpora a técnica da Transformada de Fourier, para análises de transitórios hidráulicos no domínio da frequência. Os autores avaliaram as perdas por atrito dependentes da freqüência, embora a velocidade de propagação da onda elástica também possa ser avaliada no domínio da freqüência.

Segundo Karney e McInnis (1990), os estudos sobre transitórios em sistemas mais complexos como redes de distribuição são freqüentemente negligenciados. Isto se deve ao fato de simplificações tais como a de que os efeitos do fluxo transitório em redes sejam menores do que os efeitos produzidos num sistema reservatório-tubo- válvula. Na realidade, os autores demonstram através de exemplos que as pressões máximas geradas pelos eventos transitórios em redes ramificadas e malhadas podem ser maiores do que as pressões em um sistema de tubulações em série. Além disso, os autores atentam

para o fato de que maior atenção vem sendo dada para os problemas de precisão, estabilidade e esforço computacional dos métodos numéricos empregados para a análise transitória, do que propriamente para o sistema físico que estava sendo modelado. Por fim, os autores questionam três "máximas" do escoamento transitório: máximas velocidades no escoamento permanente produzem as máximas pressões durante os eventos transitórios; redes ramificadas ou malhadas aliviam os efeitos transitórios; se um dispositivo de proteção é bom, então dois ou mais são melhores ainda.

Karney (1990) desenvolve uma interpretação alternativa das condições transitórias numa tubulação. A nova aproximação é desenvolvida baseada nas tradicionais equações diferenciais parciais (quantidade de movimento e conservação de massa), mas simplifica a apresentação da informação transitória, na qual o ponto central é uma "expressão de energia" que resume as condições transitórias numa tubulação. A expressão resultante fornece a energia cinética do fluido, a energia interna associada com os efeitos de compressibilidade do fluido e a elasticidade da tubulação, a energia dissipada pelo atrito, e o trabalho realizado no início e no final do conduto. A energia aproximada fornece uma visão geral das condições transitórias na tubulação e é uma simples, eficiente, e lógica maneira de comparação entre os diferentes sistemas e técnicas de solução. Em particular, efeitos de compressibilidade são desprezados quando a razão entre a energia interna e a energia cinética é muito pequena. Estas relações de energia ajudam a distinguir o modelo da coluna rígida para escoamentos transitórios da mais complexa teoria do golpe de aríete.

O uso de uma discretização fixa da malha de cálculo, tanto no tempo quanto no espaço, é uma condição sempre desejada na análise hidráulica do escoamento transitório. No entanto, se a celeridade é variável para diferentes comprimentos das tubulações no sistema, a condição de estabilidade de Courant pode ser modificada e exigir interpolações na malha de cálculo quando é utilizado o método das características. Interpolações no tempo podem provocar efeitos de atenuação e dispersão (WIGGERT; SUNDQUIST, 1977; GOLDBERG; WYLIE, 1983), e esquemas de diferenças finitas de segunda ordem, embora sejam mais precisos que os esquemas que utilizam interpolações lineares, ainda provocam erros, especialmente quando o número de Courant é pequeno. Sendo assim, Sibetheros, Holley e Branski (1991) investigaram o método das características com interpolações polinomiais aplicado a um sistema reservatório-tubo-válvula sem a consideração do atrito. Três diferentes funções polinomiais (splines) foram avaliadas e comparadas com os esquemas de interpolação linear e com o esquema polinomial de Hermite de quarta ordem e dois pontos (esquema de Holly-Preissmann). Segundo Maliska (1995), a dificuldade que aparece com o polinômio de Hermite são as oscilações

apresentadas quando se aumenta o número de pontos pelos quais o polinômio deverá passar. Tal fato impõe a adoção de apenas dois pontos na malha. Sibetheros, Holley e Branski concluíram que a precisão do método com o novo tipo de interpolação aumentou em relação ao método das características com interpolações lineares e às técnicas explícitas de diferenças finitas de segunda ordem, embora tal procedimento implique em aumento no esforço computacional. Além disso, o método proposto apresentou a mesma precisão do esquema de Hermite, com a vantagem de ser incondicionalmente estável. No entanto, as condições de contorno devem ser avaliadas cuidadosamente para estes dois últimos métodos.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Nesta seção, são apresentadas as bases da formulação do problema de detecção de vazamentos em sistemas de distribuição de água. Para a resolução do modelo implementado realizou-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para solução do modelo de transiente hidráulico e conversão de dados da solução de energia para pulsos, os quais são números inteiros, utilizados para representação de mudança de estado do escoamento, que neste trabalho é a passagem da onda de pressão por um transdutor de pressão. A dificuldade de simulação de uma rede real, está no fato que não se consegue simular as rugosidades de cada canalização devido à idade e qualidade dos materiais. Bem como não se consegue simular os coeficientes de descarga dos orifícios (vazamentos), pois não se sabe sequer a sua localização, entre outros fatores de difícil simulação, uma vez que para o tratamento de dados reais, se faz necessário a utilização da calibração da rede, para a aquisição de informações, ou seja, para que se tenha uma rede que tenha um comportamento em termos de pressão e vazão que corresponda a rede real é necessário a realização da calibração do modelo, ou seja, o ajuste dos parâmetros hidráulicos citados anteriormente. Tal situação tem inviabilizado as metodologias que utilizam simuladores hidráulicos para a detecção de vazamento. Devido a esse fato, utilizaremos a metodologia de pulsos, independendo assim das intensidades de pressão que necessitariam de uma prévia calibração.

Tal metodologia é dependente apenas do tempo de viagem da onda de pressão, obtida pela celeridade da onda (velocidade) e do espaço a ser percorrido (comprimento dos trechos). A celeridade da onda

de pressão pode ser obtida a partir dos próprios dados experimentais dos transdutores de pressão no caso de uma rede real.

Os dados de entrada do modelo são compostos pelos dados observados de pressões em alguns nós de vazões em certos trechos da rede e dos níveis dos reservatórios. Também fazem parte dos dados de entrada do modelo os dados da rede propriamente dita, como comprimento, diâmetro e rugosidade absoluta das tubulações, cota topográfica, além do conhecimento das condições de contorno da rede, como operação de válvulas e demandas nos nós.

Neste trabalho, os dados iniciais são compostos dos valores de pressão e vazão obtidos via simulação da rede exemplo. E para o simulador hidráulico da rede os dados de entrada são obtidos pelo software do EPANET.

No presente trabalho, o software EPANET 2 (ROSSMAN, 2000) é utilizado com o intuito de gerar valores de vazões e cargas piezométricas no regime permanente.

3.2 Modelo de simulação hidráulica: Modelo da Coluna Elástica

As equações da quantidade de movimento e de conservação de massa regem um composto de equações diferenciais parciais não-lineares hiperbólicas em função de duas variáveis dependentes, a velocidade e a carga piezométrica, e duas variáveis independentes, a distância ao longo da tubulação e a variável tempo. No entanto, não há uma solução analítica simples para esse conjunto de equações, e a única forma de solução é por intermédio da adoção de métodos numéricos. Faz-se então necessário a transformação destas em equações em modelos simplificados de equações ordinárias lineares e especificar as condições de contorno e valores iniciais para as variáveis de estado. O método das características foi escolhido para discretização dos termos diferenciais das equações, cuja vantagem é a obtenção de equações explícitas para o cálculo das cargas hidráulicas e vazões. Além disso, de acordo com este método, o fenômeno transitório segue uma lei de propagação de ondas, dada pela celeridade, associada ao tempo e espaço ao longo da tubulação

Assim as equações podem ser reescritas na forma:

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + g.\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f.V.|V|}{2.D} = 0 \qquad (6)$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

Tais equações combinadas linearmente, utilizando um multiplicador λ desconhecido, produzem:

$$L = L_1 + \lambda . L_2 = 0 \quad (8)$$

ou

$$L = \lambda . \left(\frac{g}{\lambda} . \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t}\right) + \left(\frac{\lambda . a^2}{g} . \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t}\right) + \frac{f . V . |V|}{2 . D} = 0 \quad (9)$$

Note que as duas variáveis V e H são funções de x e t, e, se a variável independente, x é função de t, então as derivadas totais podem ser escritas da seguinte maneira:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} . \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (10)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} . \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (11)$$

Assim, de acordo com as equações (9), (10) e (11), podemos notar que:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \frac{\lambda . a^2}{g} \quad (12)$$

cuja solução é:

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad (13)$$

Substituindo a equação (13) em (12), obtemos uma relação entre x e t:

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (14)$$

Considerando que a variável independente x seja função do tempo e rearranjando as equações (10), (11) e (12), chegamos a um par de equações descritas como característica positiva C+ e característica C-, dadas por:

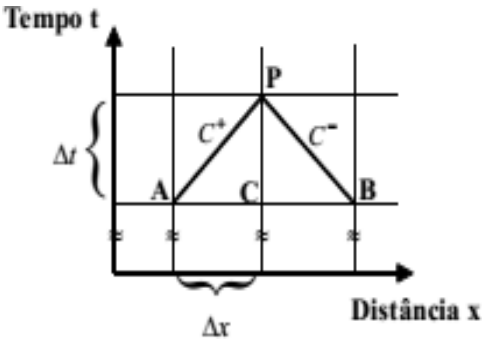
$$C^{+}: \frac{dV}{dt} + \frac{g}{a}.\frac{dH}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \qquad \text{se} \qquad \frac{dx}{dt} = +a \tag{15}$$

$$C^{-}: \frac{dV}{dt} - \frac{g}{a}.\frac{dH}{dt} + \frac{f.V.|V|}{2D} = 0 \qquad \text{se} \qquad \frac{dx}{dt} = -a \tag{16}$$

Assim, impondo as relações dx/dt = ±a, as equações diferenciais parciais (4) e (5) são convertidas em equações diferenciais ordinárias na variável independente t. No plano x-t estas relações representam duas linhas retas, chamadas linhas características, com declividades ±1/a. A figura 6 apresenta as linhas características positiva C+ e negativa C- no plano x-t

Para a resolução das equações (15) e (16), um esquema de diferenças finitas de primeira ordem pode ser aplicado.

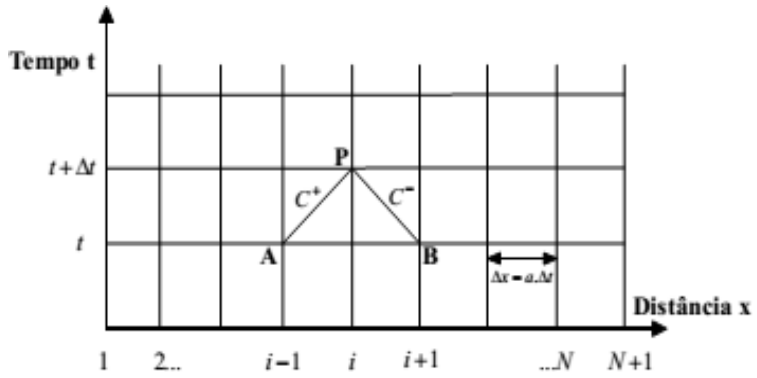
Figura 6– Linhas Características no plano x-t



Fonte: Karney e McInnis (1992)

A malha formada no plano x-t para o cálculo de valores de V e H é mostrada na Figura 7.

Figura 7- Malha Regular – Método das Características



Fonte: Karney e McInnis (1992)

Note que, ao longo da distância x, a tubulação é seccionada em N seções de comprimento Δx. O intervalo de tempo é determinado pela razão, Δt= Δx/a, dessa forma, a equação dx/dt= +a é satisfeita ao longo do segmento de reta AP. Então, se as variáveis dependentes V e H são conhecidas em A, então a equação (15), a qual tem sua validade ao longo da linha característica positiva, pode ser integrada entre os limites de A e P, então, dessa forma, pode-se escrever em termo das variáveis desconhecidas V e H em P.

Assim temos, multiplicando (15) por a.dt/g = dx/g, e introduzindo-se a relação V=Q/A, a integração ao longo de C+ é dada por:

$$\int_{Ha}^{Hp} dH + \left(\frac{a}{g.A}\right) \int_{Q_A}^{Q_p} dQ + \frac{f}{2g.D.A^2} . \int_{x_A}^{x_p} Q.|Q|.dx = 0 \qquad (17)$$

Assim, adota-se uma aproximação mista para a integração do termo Q|Q|, ou seja, com informação de Q em P e A. De maneira análoga a integração da equação (16) característica C- é feita entre B e P. Então, obtém-se as seguintes equações para a resolução de Hp.

$$C^{+}: H_p = H_A - B.(Q_P - Q_A) - R.Q_p.|Q_A| \qquad (18)$$

$$C^{-}: H_p = H_A + B.(Q_P - Q_B) + R.Q_p.|Q_B| \qquad (19)$$

Em que B é função das propriedades físicas do fluido e do tubo, frequentemente chamado de impedância característica, dada por:

$$B = \frac{a}{g.A} \qquad (20)$$

e R é o coeficiente da resistência, dado por:

$$R = \frac{f.\Delta x}{(2.g.D.A^2)} \quad (21)$$

O fator de atrito f pode apresentar linearidade constante ou variação pois este depende do número de Reynolds para cada intervalo de tempo da simulação.

Dessa forma a resolução da problemática transitória normalmente se inicia em virtude do conhecimento do regime permanente no instante zero. Dessa forma, se H e Q são valores iniciais conhecidos em cada intervalo, os valores de H e Q para uma seção genérica podem ser determinados para cada seção i. Assim, as equações (18) e (19) podem ser escritas da seguinte forma:

$$C^+: H_{pi} = C_A - B_A.Q_{Pi} \quad (22)$$

$$C^+: H_{pi} = C_A + B_B.Q_{Pi} \quad (23)$$

Onde as constantes C_A, C_B,B_A e B_B são determinadas em função dos valores conhecidos de Q e H obtidos para o instante imediatamente anterior ao cálculo:

$$C_A = H_{i-1} + B.Q_{i-1} \quad (24)$$

$$C_B = H_{i+1} - B.Q_{i+1} \quad (25)$$

$$B_A = B + R.|Q_{i-1}| \quad (26)$$

$$B_B = B - R.|Q_{i-1}| \quad (27)$$

Promovendo a eliminação do termo Q_{pi} das equações (22) e (23), temos

$$H_{Pi} = \frac{C_A.B_B + C_B.B_A}{B_A + B_B} \quad (28)$$

E por meio da igualdade das equações (22) e (23), obtém-se:

$$Q_{Pi} = \frac{C_A - C_B}{B_A + B_B} \quad (29)$$

Dessa forma os equacionamentos apresentados para a malha regular permitem a determinação de H e Q nas seções interiores da malha de cálculo, então, de 2 a N. Com efeito, para os pontos extremos, 1 e N+1, são requeridas equações complementares em termos de H e Q para a obtenção da solução nos contornos, pois se dispõe de uma reta característica em cada ponto extremo.

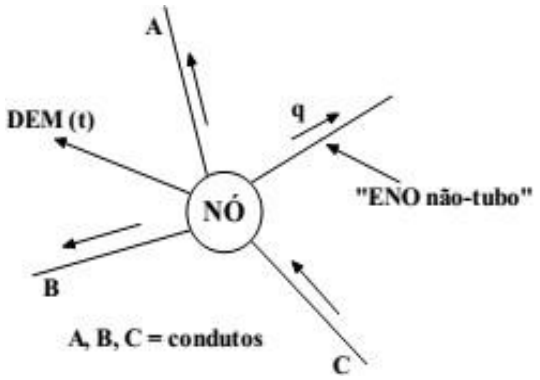
3.2.1 Equacionamento para simulador hidráulico em redes de distribuição.

Kepler (2007) afirma que quando um sistema de distribuição contém mais de uma tubulação, as seções de cálculo de cada tubo devem ser tratadas independentemente de outras partes do sistema em cada instante do tempo. Dessa forma as seções extremas de cada tubulação devem obrigatoriamente coincidir com outras tubulações ou com elementos os quais contornam essas seções extremas. Logo, assim como dito anteriormente, cada condição de contorno deve ser tratada, também, de forma independente de outras partes do sistema. Porém, em uma conexão de várias tubulações das mais variadas propriedades, é conveniente elaborar um equacionamento geral para a obtenção da carga piezométrica no nó e das vazões em cada tubo. Deve-se adicionar a isso, os componentes hidráulicos e outros elementos de diferentes naturezas, como vazamentos e demandas variáveis com a pressão, os quais devem constar nos equacionamentos desenvolvidos.

Neste trabalho foi utilizado as hipóteses de equacionamento proposto por Koelle (1983) e Luvizotto Jr (1995), os quais utilizam uma representação denominada de Equação do Nó. Esta formulação também é mostrada, de maneira semelhante, nos trabalhos de Chaudhry (1987), Almeida e Koelle (1992) e Righetto (1994).

De acordo com Luvizotto Jr (1995), um nó genérico pode ser representado conforme indicado na Figura 8. As vazões dos condutos as quais convergem em MC são convencionadas com sinal positivo, já para os MD nos quais os condutos divergem, sinal negativo.

Figura 8- Representação de um nó genérico



Fonte: Koelle (1983)

Além disso convencionou-se que nos nós, as vazões (“q”) vinculadas à elementos não tubos, são positivas quando partem do nó e negativa cheguem ao nó. E também, é mostrado na figura acima que

DEM (t) é a demanda, seja ela fixa ou variável, associada a este nó e tem convenção análoga à adotada para as vazões nos tubos. (Koelle,1983; Luvizotto Jr, 1995)

Com a aplicação da equação da continuidade uma relação entre as vazões nos tubos, a demanda e a vazão no elemento não-tubo, é dada pela seguinte equação:

$$\sum_{j=1}^{MC} Q_p(j) - \sum_{k=1}^{MD} Q_p(k) - q - DEM(t) = 0 \quad (30)$$

A Equação do Nó é obtida com base na relação entre as equações (29) e (30), sendo dada por:

$$q_i = E_{Ni} - B_{Ni}.H_{Pi} \quad (31)$$

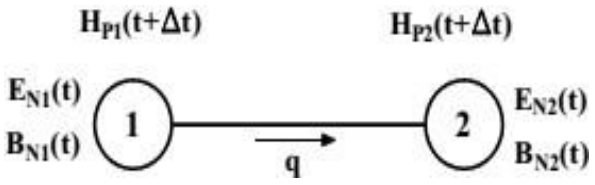
Onde H_{pi} é a carga piezométrica do nó i e E_{Ni} e B_{Ni} são coeficientes calculados com base nas retas características dos extremos de cada canalização, sendo determinados por:

$$E_{Ni} = \sum_{j=1}^{MC} \frac{C_a(j)}{B_{a}(j)} + \sum_{k=1}^{MD} \frac{C_b(k)}{B_{b}(k)} - DEM_i(t) \quad (32)$$

$$B_{Ni} = \sum_{j=1}^{MC} \frac{1}{B_{a}(j)} + \sum_{k=1}^{MD} \frac{1}{B_{b}(k)} \quad (33)$$

Uma equação genérica para o elemento não-tubo, mostrado na Figura 9, é desenvolvida a partir das equações obtidas para os nós de montante (1) e jusante (2)

Figura 9– Representação de um elemento não-tubo genérico



Fonte: Koelle(1983)

Dessa forma:

$$\underline{E_{N1} - q} \quad (34)$$

$$q = E_{N1} - B_{N1}.H_{P1} \rightarrow H_{P1} = \frac{E_{N2} + q}{B_{N1}}$$

$$-q = E_{N2} - B_{N2}.H_{P2} \rightarrow H_{P2} = \frac{E_{N2} + q}{B_{N2}} \quad (35)$$

Realizando a combinação das equações (34) e (35), tem-se a Equação Geral dos ENOs não-tubos, indicada por:

$$H_{P1} - H_{p2} = E_E - B_E.q \quad (36)$$

sendo

$$E_E = \left(\frac{E_{N1}}{B_{N1}} - \frac{E_{N2}}{B_{N2}}\right) \quad (37)$$

$$B_E = \left(\frac{1}{B_{N1}} + \frac{1}{B_{N2}}\right) \quad (38)$$

Os valores desconhecidos desta equação são H_{P1}, H_{P2} e q, e apenas serão determinadas caso as características do elemento não-tubo forem previamente conhecidas. Então, a variação da carga piezométrica entre os nós de montante e jusante deve ser estabelecida.

Com efeito, caso não exista elemento não-tubo (bombas, válvulas, reservatórios, vazamentos e outros) vinculado ao nó (q=0), considerando então este apenas uma intersecção de tubulações a carga piezométrica neste nó será estabelecida por:

$$H_{Pi} = \frac{E_{Ni}}{B_{Ni}} \quad (39)$$

Então determina-se a vazão nas seções extremas de cada tubulação, onde utiliza-se a equação (40) para os MC tubos que convergem para o nó e para os MD tubos que divergem a fórmula (41). Então portanto, sendo definido da seguinte forma:

$$Q_{P(N+1)}(j) = \frac{C_A(j) - H_{Pi}}{B\ (j)} \quad (40)$$

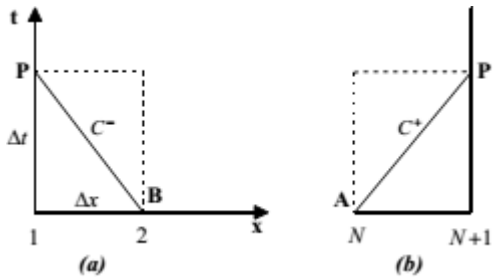
a

$$Q_{P(1)}(k) = \frac{H_{Pi} - C_B(k)}{B_B(k)} \quad (41)$$

3.2.2 Condições de contorno

O método das características provê equações lineares, com características positivas e negativas, para o cálculo da carga piezométrica e da vazão em cada divisão da canalização. Porém, nos pontos extremos de uma tubulação ou em quaisquer particularidades do sistema, apenas uma das linhas características é verdadeira. Pode-se citar como exemplo, a montante de um tubo, onde apenas a característica negativa é válida (figura 10 a), ou também, o ponto a jusante uma vez que apenas a característica positiva é real (figura 10 b).

Figura 10– Linhas características nas extremidades de contorno



Deste modo, em cada ponto extremo do tubo, tem-se uma equação e duas incógnitas, carga piezométrica e vazão. Assim, faz-se necessário outra relação na forma de equação para a solução das variáveis H e Q. Essas relações dependem do tipo de contorno apresentado, seja este um reservatório, uma válvula, bomba ou outro similar, de forma que represente o comportamento físico de tal componente no sistema.

Diferentes condições de contorno para o problema são apresentadas por Chaudhry (1979), Almeida e Koelle (1992), Wylie e Streeter (1993), Luvizotto Jr (1995) e Righetto e Porto (1997).

Nas seções a seguir, são apresentadas as condições contornos que são utilizados no presente trabalho, como reservatórios de nível constante, vazamentos e demandas dependentes da pressão.

3.2.2.1 Válvula a jusante com descarga livre

A variação da vazão e da carga piezométrica para o Elemento NÓ (ENO) válvula é apresentada segundo a formulação de orifícios. Em escoamento permanente, a literatura diz que:

$$Q_0 = (Cd_0.A_0) * \sqrt{2g.H_0} \quad (42)$$

Onde: Q_0 é a vazão, Cd_0 é o coeficiente de vazão, A_0 é área do orifício e H_0 a pressão, sendo todas essas variáveis no estado de escoamento permanente.

Considerando a mesma equação para um instante genérico tem-se que:

$$Q_p = (Cd.A) * \sqrt{2g.H_p} \quad (43)$$

em que QP é a vazão no ponto P, HP a pressão no ponto P, Cd o coeficientes de vazão e A a área do orifício para um instante genérico da simulação.

Promovendo a igualdade entre as equações (42) e (43), vem que:

$$\frac{Q_p}{Q_0} = \left(\frac{Cd.A}{Cd_0.A_0}\right) * \sqrt{\frac{H_p}{H_0}} \quad (44)$$

que desenvolvida em função de H_P, resulta em:

$$H_P = \left(\frac{H_0}{Q_0^2 * \tau^2}\right) * Q_p^2 \quad (45)$$

sendo τ o coeficiente de abertura ou fechamento relativo da válvula:

$$\tau = \left(\frac{Cd.A}{Cd_0.A_0}\right) \quad (46)$$

Utilizando as equações (45) e (22), o valor da vazão é determinado pela seguinte expressão:

$$Q_p = q = -B_A.C_v + \sqrt{(B_A.C_V)^2 + 2.C_V.C_A} \quad (47)$$

Onde:

$$C_v = \frac{(Q_0.\tau)^2}{2.H_0} \quad (48)$$

O valor de H_{Pt} pode ser obtido pela equação (45), ou pela equação (22), e $H_{P2}=z_2$, sendo z_2 a cota topográfica da válvula

3.2.2.2 Vazamento e demandas dependentes da pressão – Formulação de Orifícios

Em se tratando de vazamentos e demandas dependentes da pressão, pode se adotar a formulação de orifícios descrita neste item. Pois, diferentes metodologias têm sido propostas para a consideração de vazamentos e demandas dependentes da pressão. A consideração de tais fluxos pode ser baseada na formulação de descarga através de orifícios. Neste caso, o mesmo equacionamento para válvula com descarga livre pode ser adotado, com τ =1.

No entanto uma formulação geral, tem requisitado uma investigação do coeficiente de vazão e da potência à qual o termo da vazão é submetido é alvo de pesquisa através do procedimento de calibração. Desta forma, o valor do expoente poderá ser uma fração, o que de certa maneira acaba inviabilizando a adoção de um equacionamento explícito. Assim, uma forma generalizada da equação pode ser dada da seguinte maneira:

$$q = C_d.A_0.(2.g)^{exp}H^{exp} \quad (49)$$

em que exp é o expoente do modelo do vazamento e/ou demanda dirigida pela pressão.

Então, a equação (56) torna-se:

$$\mathrm{H} = \frac{1}{(\mathrm{C_d}.\mathrm{A_0})^{1/\mathrm{exp}}.(2\mathrm{g})}.\mathrm{q}^{1/\mathrm{exp}} \quad (50)$$

Realizando a substituição de 1/exp por β, obtém-se:

$$\mathrm{H} = \frac{1}{(\mathrm{C_d}.\mathrm{A_0})^{\beta}.(2\mathrm{g})}.\mathrm{q}^{\beta} \quad (51)$$

Como C_d e A_0 são características inerentes ao orifício, e o valor da equação é constante a equação (51) pode ser reescrita de forma simplificada em função da vazão da seguinte maneira:

$$H = \theta . q^{\beta} \tag{52}$$

sendo:

$$\theta = \frac{1}{(C_d . A_0)^{\beta} . (2g)} \tag{53}$$

Então a determinação da energia é determinada pelas equações abaixo:

$$H_{P1} = \frac{E_{N1} - q}{B_{N1}} \tag{54}$$

$$H_{P2} = z_2 \tag{55}$$

No entanto, nesta modelagem, um método numérico, é necessário para solução matemática do contorno durante as simulações. Neste trabalho, são utilizadas duas técnicas: Método Iterativo Linear, seguido do método Newton- Raphson. Este fato se deve a necessidade de estimativa inicial requerida pele método Newton-Raphson para a convergência, a qual é atingida de maneira veloz. Já o método Iterativo Linear não requer estimativa inicial, porém apresenta variações nas proximidades da solução. Com efeito, os métodos são empregados nas equações (52), (54) e (55)

3.2.2.3 Reservatório de nível constante

Neste caso, a variação da carga hidráulica entre os nós de montante e de jusante do ENO é nula. Portanto, a vazão que escoa através dele também é nula, e o nível do reservatório é conhecido. Assim:

$$q = 0 \tag{56}$$

$$H_{P1} = H_{P2} = H_R \tag{57}$$

sendo HR o nível do reservatório.

3.2.2.4 Reservatório de nível constante a jusante de válvula ou bomba

De forma análoga ao item anterior, porém supondo que o nó de montante do reservatório corresponde ao nó de jusante da válvula ou bomba, então admite-se que:

$$H_{P2} = H_R \tag{58}$$

$$E_E = \frac{E_{N1}}{B_{N1}} - H_R \tag{59}$$

$$B_E = \frac{1}{B_{N1}} \tag{60}$$

3.2.3 Considerações sobre o fator de atrito no Escoamento Permanente

No escoamento não-permanente, as vazões nos tubos não apresentam valores constantes ao longo do tempo. Dessa forma, o fator de atrito tende a sofrer oscilações devido a alterações nas vazões, através do número de Reynolds. Um conjunto de equações o qual contempla a variação do fator de atrito em relação ao número de Reynolds e das propriedades do tubo, como rugosidade absoluta e diâmetro, é proposta por Swamee (1993). Esta equação é válida para os escoamentos laminar, de transição e turbulento, sendo dada por:

$$f = \left(\left(\frac{64}{Rey}\right)^8 + 9{,}5.\left(\ln\left(\left(\frac{\varepsilon_0}{3{,}7.D} + \frac{5{,}74}{Re^{0{,}9}}\right) - \left(\frac{2500}{Re}\right)^6\right)\right)^{-16}\right)^{-0.125} \tag{61}$$

em que ε_0 é a rugosidade absoluta e Re é o número de Reynolds, dado por:

$$Re = \frac{4.Q}{\pi D.v} \tag{62}$$

onde v é a viscosidade cinemática do fluido.

3.3 Detecção de Vazamentos em Sistemas Hidráulicos

3.3.1 Detecção de Vazamentos Utilizando a Reflexão da Onda de Pressão

Quando uma válvula é fechada em condutos em rede, há o impacto de partículas de fluido com a barreira imposta pela válvula, e a constante colisão entre as partículas iniciais e a válvula, e entre essas e as partículas adjacentes, geram uma perturbação do fluido no interior da canalização, a este fenômeno atribuímos a nomenclatura de onda de pressão.

O estudo de onda de pressão é de extrema importância pois ela apresenta informações que facilitam a detecção de vazamentos, uma vez que há diferenças nítidas no seu comportamento físico-hidráulico em redes que contém vazamentos e redes as quais não apresentam vazamentos em sua extensão. Dessa forma, uma análise da viagem de onda de pressão representa uma técnica apurada da detecção de vazamentos.

Então quando uma onda de pressão é provocada por uma alteração nas condições de escoamento se propaga em um tubo, forças de atrito causam um progressivo amortecimento dos picos de pressão. Além disso, dispositivos de proteção, mudanças nas características do tubo, sedimentos ou ar acumulado, e vazamentos também afetam a caracterização da onda de pressão. Citam Brunone, Ferrante e Ubertini (2000) que os vazamentos interferem a forma da onda de pressão de três maneiras. A primeira mudança ocorre quando a onda de pressão atinge o ponto do vazamento, a reflexão. A reflexão produzida pode ser analisada através da observação da variação da pressão em determinada seção do tubo. O tempo decorrido entre o instante em que a onda de pressão foi produzida e o instante em que a onda é refletida pode ser observado, e a localização do vazamento determinada pela seguinte expressão:

$$x_L = \frac{\Delta t_l}{2} . a \qquad (63)$$

em que x_L é a distância do ponto do vazamento até a seção onde a onda de pressão é produzida, Δt_L o tempo entre a onda de pressão inicial e a onda refletida e “a” a velocidade de propagação da onda.

O segundo efeito é a distorção nos picos de pressão depois do pico inicial e o terceiro efeito, e último, é a redução na amplitude da variação de pressão depois que o pico de pressão inicial tenha ocorrido. Portanto, a presença de um vazamento pode ser detectada através da análise do primeiro sinal de pressão em determinado ponto do sistema, comparando-se as variações de pressão do conduto intacto e do mesmo conduto na presença de vazamento. Assim, quanto maior e mais rápida a mudança no estado do escoamento do sistema, mais abruptos serão os efeitos da onda de pressão e melhor será a detecção do vazamento.

3.3.2 Fluxograma do Modelo de Simulação Hidráulica

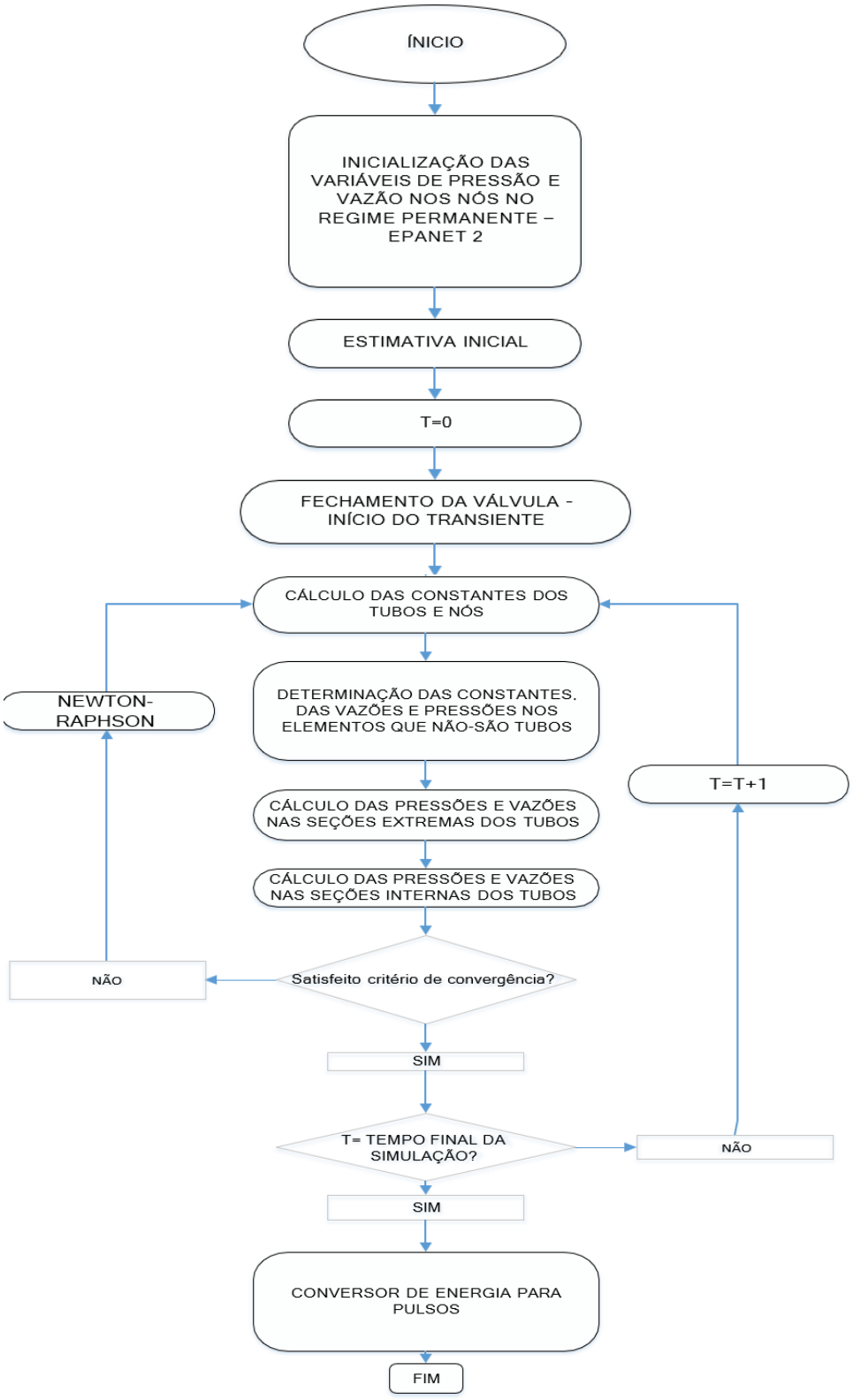
O simulador desenvolvido para análise hidráulica em regime transitório de escoamento foi codificado em linguagem MATLAB R2016A®. A rotina computacional implementada utiliza o simulador hidráulico

de domínio público EPANET 2 (ROSSMAN, 2000) — versão Toolkit — desenvolvido pela "U.S. Environemntal Protection Agency" — EPA. O EPANET 2 atua no sentido de proporcionar economia de esforço computacional e praticidade, relativa à forma do arquivo de dados da rede hidráulica, de maneira que permite ao usuário, a projeção da rede e a portabilidade dos dados pelas ferramentas disponíveis do software. É importante ressaltar que o EPANET 2 fomenta uma estimativa inicial dos valores de vazões na canalização e cargas piezométricas e seções internas no escoamento permanente.

Na Figura 11 é apresentado o fluxograma do modelo para análise hidráulica de redes de distribuição de água implementado para desenvolvimento deste trabalho.

O procedimento tem sua inicialização com a determinação das pressões nos nós e vazões nos tubos no regime permanente com a utilização do EPANET 2. Tais valores são, então, aplicados no Método das Características, na forma de estimativa inicial da malha característica. Em seguida, é realizada a análise hidráulica em escoamento transitório, caso o critério de convergência estabelecido não seja atendido, utiliza-se a solução de Newton-Raphson, para convergência do cálculo de energias no trecho em questão do escoamento transitório. Então, armazena-se o valor em uma matriz que leva em consideração o tempo, o tubo e o trecho em questão. O programa então percorre tubo-a-tubo, trecho-a-trecho e por fim o tempo total da simulação. A partir dessa análise, as informações de energia são enviadas a outro algoritmo, que realiza a conversão destas no formato de pulsos, na qual atribui a passagem de onda de pressão um valor numérico, e zero aos demais valores em trechos na qual a onda não está ocorrendo.

Figura 11– Fluxograma de simulação de transiente hidráulico



3.3.3 Fluxograma do tempo de viagem de onda de pressão

O simulador desenvolvido para análise do tempo de viagem de onda de pressão foi codificado em linguagem MATLAB R2016A®.

O programa é inicializado com a importação dos pulsos de nós contidos na rede real simulada no item 3.3.2. A partir dessa importação é realizada uma reconstrução de sinais de rede real, uma vez que dados são perdidos na conversão de energias da rede real para pulsos. Essa reconstrução se dá pela reanálise das condições limítrofes de conversão de determinado pico de energia para pulso. Dessa forma, valores que anteriormente foram suprimidos na matriz inicial, são introduzidos em uma nova matriz a qual contém os pulsos iniciais da rede, já convertidos anteriormente, e os novos pulsos que foram omitidos na primeira conversão.

Então, com esses sinais reconstituídos, é realizado o procedimento de cálculo das distâncias relativas entre nós, essas distâncias relativas são necessárias para o posicionamento de vazamentos hipotéticos na rede, cuja veracidade será testada ao longo do método.

Então é realizada uma análise da quantidade de dados existentes na matriz de pulsos da rede real, baseada nesta análise é determinado o critério de parada para a finalização do algoritmo.

Definidos os critérios de finalização de algoritmo o simulador de tempo de viagem de pressão é então inicializado, no tempo inicial T=1, onde é realizado o fechamento da válvula para início de transiente e consequentemente a viagem da onda de pressão da rede sem vazamentos. A passagem da onda de pressão é gerada trecho a trecho registrada por meio de pulsos de forma análoga aos picos de energia conforme descrito no item anterior

Então é feita a comparação, nó-a-nó, entre os dados da rede real e os dados no método de tempo de viagem, sendo realizada até o número de análises totais possíveis ser atingido, para o intervalo de tempo considerado.

Caso na comparação o pulso do nó da rede real seja idêntico ao do tempo de viagem de onda de pressão, a análise é realizada para o próximo nó. Caso contrário, o software realiza identifica o ponto tratado e localiza os possíveis locais de vazamento hipotético por meio do tempo de viagem da onda pressão baseado na média diferencial entre o pulso anterior emitido e o pulso incompatível com a rede sem vazamento. As figuras abaixo, exemplificam como se dá a determinação do tempo de viagem.

Com efeitos didáticos, utilizou-se uma matriz genérica de pulsos. A determinação se inicia pela realização do comparativo de pulsos trecho a trecho nos intervalos de tempo considerados, note que no trecho 31 (considerado como nó, na discretização dos dados), há valores diferentes no valor de pulsos em T=8, uma vez no simulador de onda não há pulsos ocorrendo naquele trecho para aquele determinado intervalo de tempo e na rede real é mostrado um valor numérico diferente de zero, indicando passagem de onda. Então o software, determina a diferença de intervalos de tempo entre a emissão do pulso anterior para aquele trecho e o pulso incompatível, ambos da rede real, para a determinação da distância relativa entre o nó de referência e o vazamento hipotético e por fim a atribuição do coeficiente sinalizador de vazamento. Após essa atribuição o intervalo de tempo é reinicializado e nova análise é feita até o critério de parada estabelecido.

No entanto o inverso também é possível, isto é, o simulador de viagem de onda de pressão aponte pulso, que inexiste na matriz da rede real, isto significa que um falso vazamento é falso, neste caso, o procedimento é determinar as distâncias do possível falso vazamento, e eliminar os vazamentos hipotéticos na rede. E então reinicializar a análise temporal.

Note que, a medida que os dados são analisados e reanalisados nó a nó, trecho a trecho, tempo a tempo as matrizes vão se equiparando uma vez que as análises são refeitas, eliminando falsos vazamentos e armazenando informações de vazamentos reais, até que a quantidade de dados comparados seja equivalente em ambas as matrizes, ou seja, há o ajuste e armazenamento das informações relativas a cada iteração das matrizes temporais e de nós.

Figura 12– Pulsos do simulador do tempo de viagem de onda de pressão sem vazamento

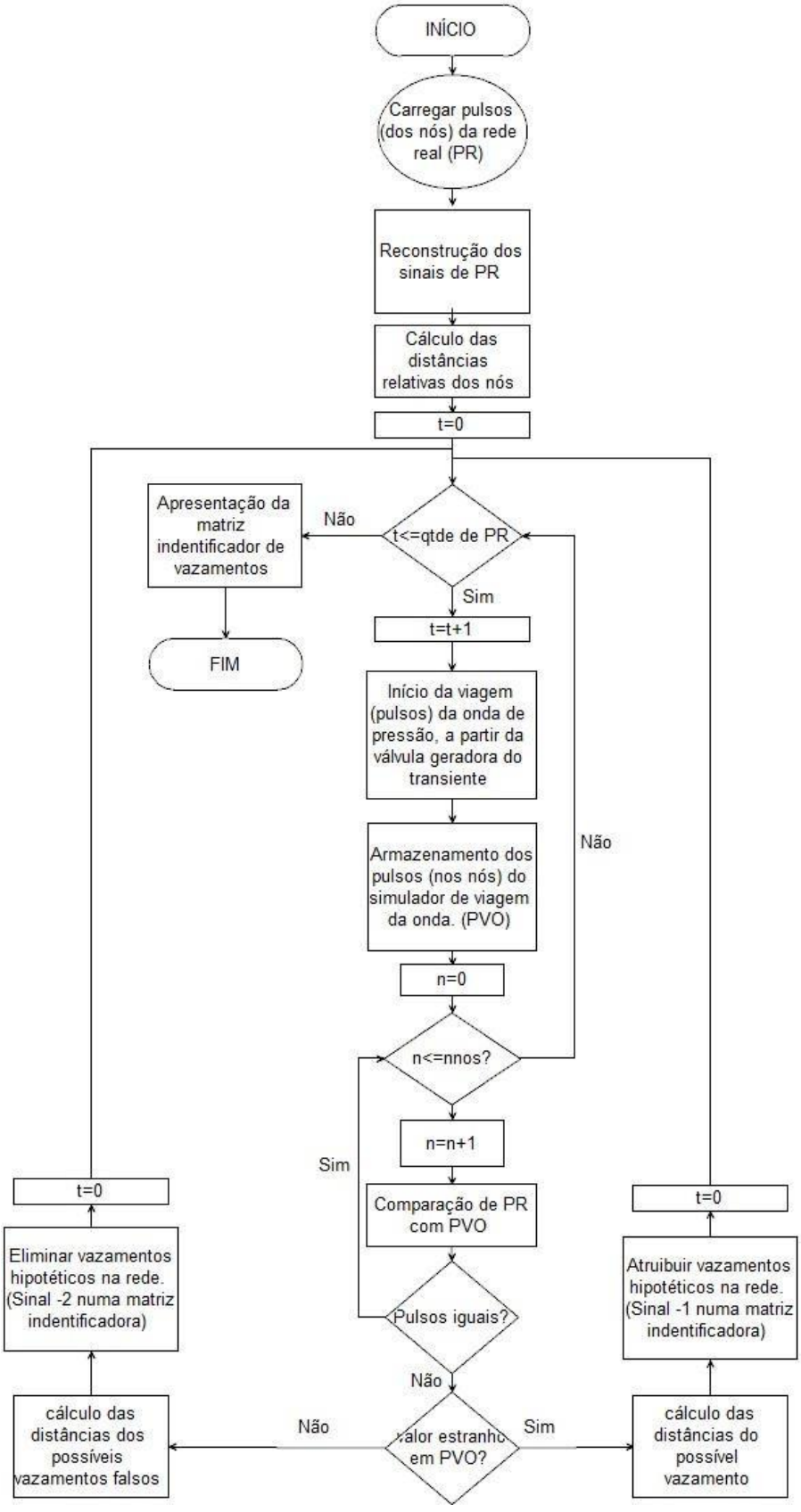
	TRECHO - GENÉRICO							
T	24	25	26	27	28	29	30	31
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	1	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 13– Determinação do tempo de viagem de onda de pressão – Rede Real

	TRECHO - GENÉRICO							
T	24	25	26	27	28	29	30	31
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	3	0	2	0	0
7	0	0	3	0	0	0	2	0
8	0	3	0	0	0	0	0	2
9	3	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0

t= dt / 2
t= dt / 2
dt

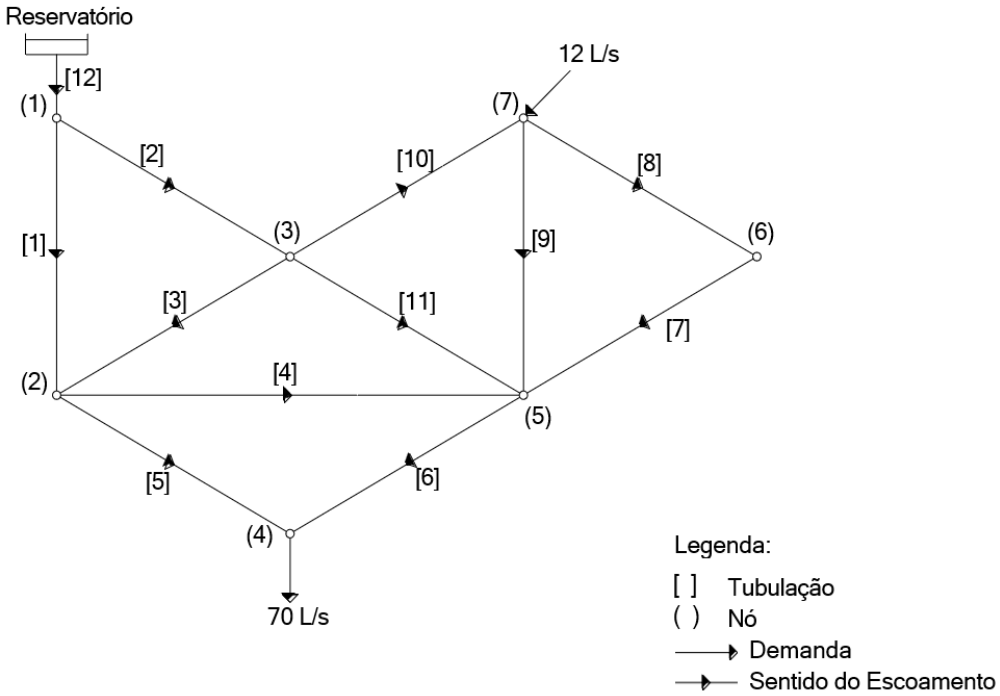
Figura 14– Fluxograma do tempo de viagem de onda de pressão



3.4 Rede hipotética para a utilização do simulador hidráulico

Com vistas às análises iniciais do algoritmo implementada, é empregada a rede hipotética estudada por Ligget e Chen (1994), Araújo (2003) e Kepler (2007), mostrada na Figura 15, cujos dados das tubulações constam na Tabela 3. Trata-se de uma rede avaliada por diversos autores, porém com diferentes dados referentes à topologia e condições de contorno em cada estudo.

Figura 15– Rede exemplo para a verificação dos algoritmos



Fonte: Ligget e Chen (1994)

Tabela 3– Dados das tubulações da rede exemplo

Tubulação	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade Absoluta (mm)	Número de trechos
1	1300	250	0,3	60
2	650	250	0,3	30
3	650	200	0,3	30
4	1300	200	0,3	60
5	650	250	0,3	30
6	650	250	0,3	30
7	650	200	0,3	30
8	1250	150	0,3	60
9	1250	250	0,3	60
10	650	150	0,3	30
11	650	250	0,3	30
12	1	1000	0,3	

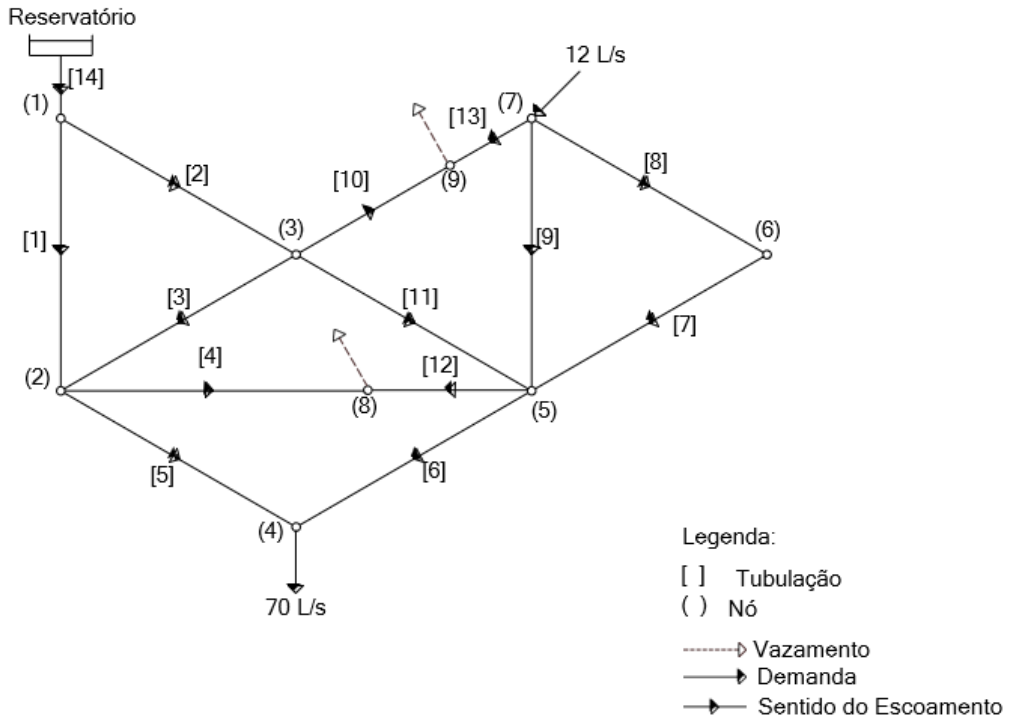
Fonte: Ligget e Chen (1994)

Todos os nós da rede foram assentados na cota zero e o reservatório apresenta nível constante igual a 30,0 metros, o nó de “7” apresenta vazão injetora conhecida igual a 12,0 L/s; o nó “4” apresenta valor de demanda equivalente a 70 L/s. Adotou-se tais valores para simular situações reais de redes de distribuição onde há pontos de consumo de água, e a existência de elementos que auxiliam o reservatório no abastecimento da rede.

O nó “4” possui uma válvula de descarga livre a qual pode ser controlada e pode estabelecer condições transitórias no sistema.

Para o desenvolvimento da tecnologia de detecção de vazamentos foram implementados dois orifícios (vazamentos) na rede ao longo dos tubos [4] e [10] e para a implementação no EPANET foram a eles atribuídos os nomes de nó (8) e (9) e aos novos trechos criados as nomenclaturas de [12] e [13]. Essa atribuição se faz necessária, pois a rede original apresentada anteriormente apresentava, orifícios nos nós, e o objeto de estudo nesta metodologia é realizar análises para a extensão da canalização e não apenas seus extremos. Os orifícios adotados “nó 8” e “nó 9”, foram os mesmos implementados pela rede original, os quais se atribuíram os coeficientes de descarga x área (Cd.A) iguais a 0,000445 m² e 0,000675 m² para a simulação do comportamento do vazamento. A quantidade de trechos do método das características foi redimensionada. A rede contendo vazamento é apresentada na abaixo

Figura 16– Rede exemplo com vazamentos



Fonte: Elaborado pelo autor

Essa rede com vazamentos em tais locais foi utilizada para a simulação hidráulica para obter a variação de pressão nos nós, e sua caracterização pode ser substituída dados de transdutores de pressões reais. A Tabela 4 fornece os dados da discretização da rede contendo os ajustes para a implementação dos vazamentos na rede original.

Tabela 4– Discretização da malha do método das características da rede com vazamento

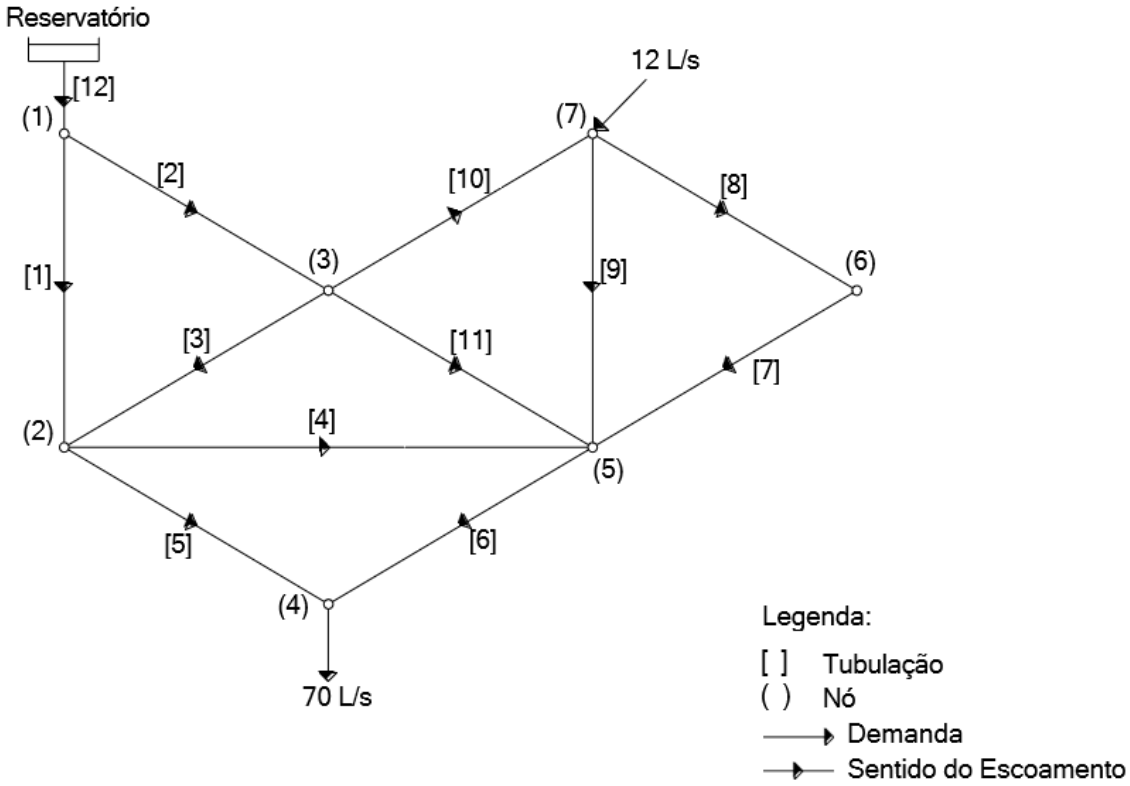
Tubulação	Comprimento	Diâmetro (mm)	Número de trechos	Rugosidade Absoluta(mm)
1	1300	250	60	0,3
2	650	250	30	
3	650	200	30	0,3
4	866,67	200	40	
5	650	250	30	
6	650	250	30	0,3
7	650	200	30	
8	1250	150	60	
9	1250	250	60	0,3
10	433,33	150	20	0,3
11	650	250	30	
12	433,33	200	20	
13	216,67	150	10	0,3

Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Rede hipotética para a utilização do simulador de tempo de viagem de onda de pressão

A rede hipotética estudada por Ligget e Chen (1994), Araújo (2003) e Kepler (2007), é adotada para aplicação do simulador de tempo de viagem de onda pressão é mostrada na Figura 15, cujos dados das tubulações constam na Tabela 3. É importante ressaltar que essa rede não contém vazamentos.

Figura 17– Rede exemplo para a verificação dos algoritmos



Fonte: Ligget e Chen (1994)

Tabela 5– Dados das tubulações da simulação de tempo de viagem de onda de pressão

Tubulação	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Número de trechos
1	1300	250	60
2	650	250	30
3	650	200	30
4	1300	200	60
5	650	250	30
6	650	250	30
7	650	200	30
8	1250	150	60
9	1250	250	60
10	650	150	30
11	650	250	30
12	1	1000	-

Fonte: Ligget e Chen (1994)

4 RESULTADOS

4.1 Apresentação

Os procedimentos apresentados no Capítulo 3 são empregados aqui para a avaliação dos modelos de simulação hidráulica e detecção de vazamentos em modelos de sistema de distribuição de água.

A primeira rede amostral é a rede hipotética estudada por Ligget e Chen (1994), Araújo (2003) e Kepler (2007), mostrada na Figura 15, ela é composta por tubos de comportamento visco-elástico, cujo dados desta tubulação são mostrados na Tabela 3. Na segunda rede, contida na abaixo

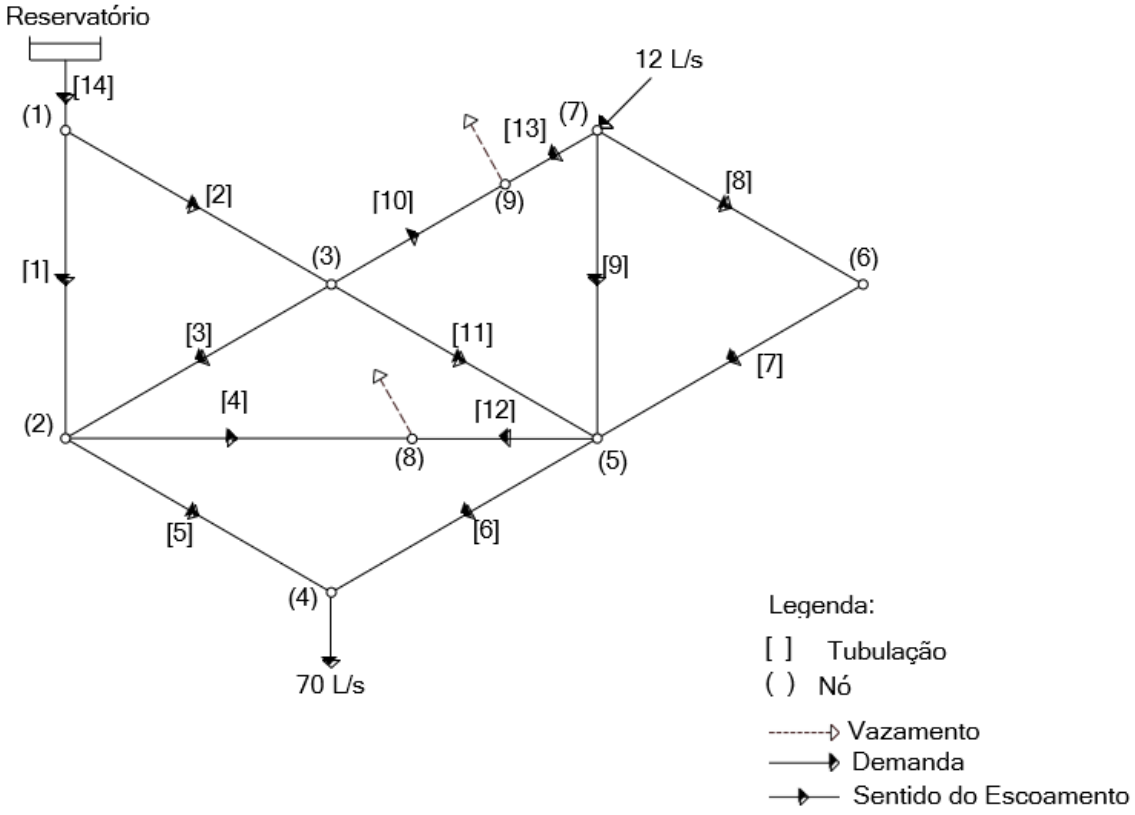


Figura 16, são mostrados a implementação de dois orifícios, assumindo o comportamento destes, como o de um vazamento. A adoção destas redes se deve a técnica do método de detecção de vazamento, o qual realiza análise de dados de uma rede e a compara com o comportamento da onda de pressão da outra, permitindo assim a avaliação da existência de possíveis vazamentos na rede.

O modelo da Coluna Elástica é utilizado para os testes do simulador hidráulico e do algoritmo para detecção de vazamentos sobre rede hipotética da literatura apresentado a seguir. O método de

detecção de vazamentos via análise do tempo de viagem de onda de pressão é aplicado para um sistema hipotético mostrado na seção 4.3.

4.2 Dados da rede real

A partir dos dados descritos no item 3.4, e com a simulação do software EPANET 2.0 — obteve-se as seguintes vazões para o regime permanente

Tubulação	Vazão(l/s)
1	36,06
2	47,37
3	10,65
4	8,99
5	37,73
6	32,27
7	1,16
8	1,16
9	4,92
10	9,4
11	27,32
12	1,13
13	5,92

E também foram obtidos os seguintes valores para a carga piezométrica nos nós no regime permanente:

Nós	Carga piezométrica (m)
1	30
2	26,8433
3	27,3151
4	25,1204
5	26,3929
6	26,4009
7	26,4635
8	26,3929
9	26,2422

Assim foram inseridos esses valores no simulador hidráulico na plataforma MATLAB R2016A. Onde inicialmente, se determinou o tamanho do trecho Δx, pela razão entre a extensão da tubulação pelo número de trechos de estudo da rede real.

Tubulação	Δx
1	21,66666667
2	21,66666667
3	21,66666667
4	21,66675
5	21,66666667
6	21,66666667
7	21,66666667
8	20,83333333
9	20,83333333
10	21,6665
11	21,66666667
12	21,6665
13	21,667

A celeridade da onda de pressão então foi calculada pela razão Δx/Δt — onde Δt é o intervalo de tempo analisado, no qual o modelo utilizou o intervalo de tempo de 0,02s.

Feito o cálculo inicial das constantes, realizou-se o fechamento da válvula contida no nó 4, provocando o fenômeno de transiente hidráulico, então tendo em base esses dados iniciais gerados e as formulações apresentadas na seção 3.2, foram determinadas, as energias a cada intervalo de tempo DT, para cada nó e para cada trecho, constituindo uma matriz de energia e picos da onda de pressão. A partir dos valores obtidos nessa matriz, realizou-se a conversão dos dados para pulsos por intermédio do uso de um filtro de análise numérica que indica os picos de energia, provocados pelo transiente. Então esses dados, são enviados ao simulador de tempo de viagem de onda de pressão, cujo uma análise será mostrada nas seções que seguem.

4.3 Teste do Modelo de Tempo de Viagem de Onda de Pressão

Para exemplificar a metodologia, propõe-se mostrar a matriz do simulador de viagem de onda de pressão a qual é mostrada pela Tabela 6 para a tubulação 5, descrita anteriormente.

A tubulação 5, apresenta 30 trechos de análise, e contém a válvula de fechamento, para emissão da onda de pressão, isso facilita a apresentação do método, uma vez que a onda inicial é instantaneamente registrada após o fechamento do registro, já que os efeitos iniciais do fenômeno transitório se manifestam inicialmente nos locais próximos a válvula fechada.

A Tabela 6 mostra em sua composição a viagem de onda de pressão na forma composta de pulsos, isto é, sua viagem é registrada com um valor numérico registrado, em cada trecho em que ocorre. A tabela é composta pelos instantes de tempo (T), no eixo vertical, e pelos trechos (N) que foram discretizados para aplicação do método, no eixo horizontal.

Note que que no instante T=0, não há perturbações na rede, logo não há indicação de pulso, indicando o valor ZERO, na linha equivalente ao tempo inicial da matriz.

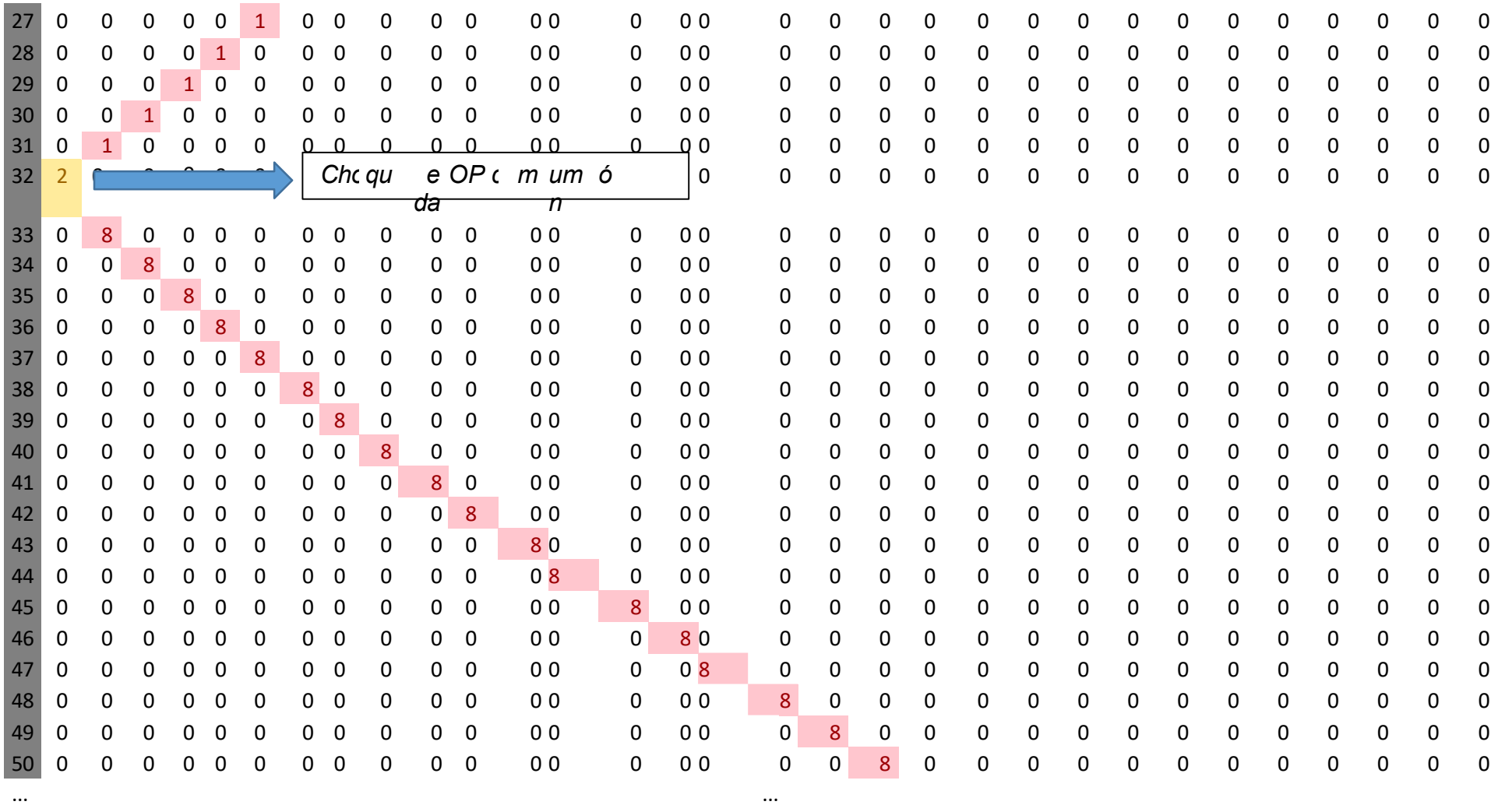
Quando se inicia o processo de fechamento da válvula, há a formação de uma onda de pressão ao longo da canalização. Dessa forma, o trecho 31, identificado como nó final da tubulação 5, recebe um pulso unitário, e então, percorre o caminho ao longo da rede. Como consequência do efeito transitório esta onda é transferida trecho a trecho da análise.

Então após sucessivas transferências até a onda chegar ao trecho 1, caracterizado como nó inicial da tubulação 5, a onda de pressão se choca contra o nó, então conforme explicado anteriormente, há a reflexão da onda em direção oposta ao sentido inicialmente percorrido, no entanto, é evidente que as energias sofrem os efeitos do choque mecânico, para tanto, foi emitido um fator indexador que incrementa um valor unitário a cada mudança de estado da onda de pressão.

Perceba que o retorno da onda de pressão não se reflete e percorre a canalização com o valor de pulso “2” e sim como “8” – isso se deve a propagação das demais tubulações que também exercem efeito sobre a tubulação “5” – uma vez que a distribuição ocorre de forma gradativa e interdependente das demais canalizações.

Tabela 6– Matriz de viagem de onda de pressão – do instante T = 0 até o T=50

														TRE	CHO																	
T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*Emissão da onda de pressão*							0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0


Cho qu e OP c m um ó
da n

Também se faz necessário mostrar o choque de ondas de exemplificação do método, note que há a geração de um terceiro coeficiente que representa a resultante entre o choque das ondas vindas da esquerda para a direita e da direita pra esquerda:

Tabela 7– Exemplificação da aplicação do método do tempo de viagem de onda no choque entre ondas – Tubulação 5 – T=181 até T =204

	TRECHOS																														
T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
181	102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	106
182	0	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	0
183	0	0	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	0	0
184	0	0	0	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	0	0	0
185	0	0	0	0	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0
186	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0	0	0						0	0	0	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0	0
187	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0	0						0	0	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0	0	0
188	0	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0						0	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0
189	0	0	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0						0	0	0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	0
190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119	0	0						0	0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0
191	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
192	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
193	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
194	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119	0	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
196	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
197	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
198	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
199	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
201	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0
203	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0
204	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139	0	0	0	0	0	0	0

Então a partir dos pulsos resultantes da rede real encontrados, e confrontando estas informações no simulador de análise do tempo de viagem de onda de pressão, foi possível detectar o vazamento. O resultado é expresso pela matriz identificadora mostrada abaixo e representada pelo valor de -1, o qual é a indicação de que certamente há um vazamento nas adjacências do trecho. Para a tubulação 4, é mostra a indicação do trecho em que ocorre o vazamento.

Tabela 8– Matriz indicativa de detecção de vazamento na tubulação 4

Trecho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
É vazamento?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trecho	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
É vazamento?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trecho	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
É vazamento?	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trecho	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
É vazamento?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trecho	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
É vazamento?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trecho	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
É vazamento?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LEGENDA										
0 - Não										
-1 - Sim										

5 CONCLUSÕES

O simulador hidráulico desenvolvido foi objeto de testes sobre redes hipotéticas. Neste caso, um estudo sobre as propriedades de convergência e estimativa inicial é realizado, considerando comportamento reológico elástico linear das paredes dos tubos. O simulador hidráulico EPANET 2, versão Toolkit, é empregado para a inicialização das variáveis de estado (pressão e vazão) na estimativa inicial, realizada pelo método das características. Uma análise de duas formulações para a consideração de vazamentos é realizada sobre rede hipotética, indicando uma melhor estabilidade

computacional para a fórmula de orifícios, embora os resultados finais sejam satisfatórios para os dois equacionamentos.

Também foi possível concluir que para uma maior precisão da análise computacional e aprimoramento da aplicabilidade do método das características se faz necessário o aumento da discretização espacial da rede, com número maior de trechos.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Recomenda-se aplicar a metodologia de tempo de viagem de onda de pressão para redes de distribuição de água com ruídos, sendo ruídos tratados como demandas variáveis, fato que ocorre em redes reais, uma vez que o consumo de água não é constante em diversas condições do dia.

Também é sugerido a aplicação da metodologia para monitoramento de rede “on-line” visando detectar vazamentos no momento de seu surgimento, utilizando por base o transiente hidráulico que é gerado pelo próprio vazamento no instante em que este surge.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ALEGRE, H. et al. Performance Indicators for Water Supply Services, IWA- Operations & Maintenance Commitee, International Water Association, 188p.London, 1999.

ALMEIDA, A. B.; KOELLE, E. (1992). Fluid Transients in Pipe Networks. Computational Mechanics Publications, Glasgow.

AWWA (American Water Works Association). Water Loss Control Terms Defined. Why the terms 'unacconted-for' water and 'unaccounted-for percentage' just don't work!. Disponível em: <http://www.awwa.org/Resources/WaterLossControl.cfm?ItemNumber=47866> Acesso em: 31 jan. 2017.

BELSITO, S., Banerjee, S. Leak detection in pipelines based on neural networks. The First European Congress on Chemical Engineering, v.1, p. 771-774, 1997,Florence,Italy.

BELSITO, S., Lombardi, P., Andreussi, P., Banerjee, S. Leak detection in liquefied gas pipeline by artificial neural networks. AICHE Journal, v.44, n.12, p.2675- 2688,1998.

BLACK, P. A review of pipeline leak detection technology. Pipeline System, v.7, Fluid Mechanics and its Applications, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.p. 287- 298, 1992.

BRUNONE, B. (1999). Transient Test-Based Technique for Leak Detection in Outfall Pipes. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 125, n. 5, p. 302-306, Sept/Oct.

BRUNONE, B.; FERRANTE, M. (2001). Detecting Leaks in Pressurised Pipes by Means of Transients. Journal of Hydraulic Research, v. 39, n. 4, p. 55-62.

BRUNONE, B.; FERRANTE, M. (2004). Pressure Waves as a Tool for Leak Detection in Closed Conduits. Urban Water Journal, v. 1, n. 2, p. 145-155, June.

BRUNONE, B.; FERRANTE, M.; CACCIAMANI, M. (2004). Decay of Pressure and Energy Dissipation in Laminar Transient Flow. Journal of Fluids Engineering, v. 126, n. 6, p. 928-934, Nov. BRUNONE, B.; FERRANTE, M.; UBERTINI, L. (2000).

Leak Analysis in Pipes Using Transients. Proceedings of the Second Annual Seminar on Comparative Urban Projects, Roma, Italy.

CETRE DO BRASIL. Curso de detecção de vazamentos não visíveis – Métodos Acústicos - Nivel. 1. São Paulo, 2002. 80p.

CHAUDHRY, M. H. (1979). Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company, New York. CHAUDHRY, M. H. (1987). Applied Hydraulic Transients. Van Nostrand Reinhold Company, 2nd Ed., New York.

CHEUNG, P. B. (2004). Análise de Reabilitação de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Através de Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. São Carlos, 2004. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CHEONG, L. C. Unaccounted for water and the economics of leak detection. In: INTERNATIONAL WATER SUPPLY CONGRESS AND EXHIBITION, 18., 1991, Copenhagen. Anais… Copenhagen: Dinamarca, 1991. p. 1 – 19.

COVAS, D.; RAMOS, H. (1999). Leakage Detection in Single Pipelines Using Pressure Wave Behaviour. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications, vol. 1, p. 287-299.

COVAS, D.; RAMOS, H.; YOUNG, A.; GRAHAM, I. N.; MAKSIMOVIC, C. (2005b). Uncertainties of Leak Detection by Means of Hydraulic Transients: From the Lab to the Field. In: Proceedings of the Eighth International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI 2005), University of Exeter, UK.

FERRANTE, M.; BRUNONE, B. (2003a). Pipe System Diagnosis and Leak Detection by Unsteady-State Tests. 1. Harmonic Analysis. Advances in Water Resources, v. 26, n. 1, p. 95-105.

FERRANTE, M.; BRUNONE, B. (2003b). Pipe System Diagnosis and Leak Detection by Unsteady-State Tests. 2. Wavelet Analysis. Advances in Water Resources, v. 26, n. 1, p. 107-116.

FUKUSHIMA, K., Maeshima, R., Kinoshita, A., Shiraishi, H., Koshijima, I. Gas pipeline leak detection system using the online simulation method. Computers and Chemical Engineering, v. 24, n.2-7, p.453-456, 2000. Gas Engineer´s Handbook.

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; MUGGLETON, J. M.; Hunaidi, O.

On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes. Journal of Sound and Vibration, Londres, v. 283, p. 927-941, 2005 HUNAIDI, O. Detecting leaks in water-distribution pipes: construction technology update. Ottawa: National Research Council of Canada. n. 40, 2000.

HUNAIDI, O.; CHU, W. T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. Applied Acoustics, Oxford, v. 58, p. 235 – 254, 1999.

HUNAIDI, O.; CHU, W.; WANG, A.; GUAN, W. Detecting leaks in plastic pipes. Journal of the American Water Works Association, Denver, v. 92, p. 82 – 94, 2000.

IWA/BLUE PAGES. Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. London: IWA Publishing, 2000

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2004). Incorporation of Prior Information on Parameters in Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Roughness Calibration. Urban Water Journal, v. 1, n. 2, p. 129-143, June.

KARNEY, B. W. (1990). Energy Relations in Transient Closed-Conduit Flow. Journal of Hydraulic Engineering, v. 116, n. 10, p. 1180-1196, Oct.

LAMBERT, A.O.; THORNTON, J. Avaliação de Perdas Reais. Consultoria Técnica apresentada à Vice-Presidência Metropolitana de Distribuição – M. Sabesp. São Paulo, 2002.

LIMA, Fábio Kroll de. Desenvolvimento de um simulador virtual de vazamento para testar correlacionadores acústicos comerciais / Fábio Kroll de Lima. – Ilha Solteira [s.n.], 2014

LUVIZOTTO JR, E. (1995). Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador. São Paulo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica,Universidade de São Paulo.

MACLEOD, I.D.; ROWLEY, R.; BEESLEY, M.J.; OLLEY, P. Acoustic monitoring techniques for structural integrity. Nuclear Engineering and Design, p.191-200, 1991

MAGALHÃES, P. C. O custo da água gratuita. Ciência Hoje, São Paulo, v. 36 n. 211. p. 45-49, dez. 2004.
MUKAI, T.Concessões, permissões e privatizações de serviços públicos.3.ed. São Paulo: Saraiva, 1998.126 p

MUGGLETON, J.M., Brennan, M.J. Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes. Institute of Sound and Vibration Research, Southampton University, Highfield, Southampton SO17 1BJ, UK, 2003

RIGHETTO, A. M. (1994). Cálculo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água a partir de Condições Transitórias: Adequação e Estudo de Casos. São Carlos. 118p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. RIGHETTO, A. M.; PORTO, R. M. (1997). Analysis of a Large Urban Water Distribution Network by the Method of Characteristics. In: Water Pipeline Systems, BHR Group, vol. 1, p. 231-244.

RIGHETTO, A. M.; PORTO, R. M. (1997). Analysis of a Large Urban Water Distribution Network by the Method of Characteristics. In: Water Pipeline Systems, BHR Group, vol.1, p. 231-244.

SANDBERG, C., Holmes, J., Mccoy, K., E Koppitsch, H. The application of a continuous leak detection system to pipelines and associated equipment. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 25, n. 5, p. 906-909, 1989.

SHIMADA, M. (1989). Graph-Theoretical Model for Slow Transient Analysis of Pipe Networks. Journal of Hydraulic Engineering, v. 114, n. 11, p. 1301-1320, Nov.

SHIMADA, M. (1992). State-Space Analysis and Control of Slow Transients in Pipes.Journal of Hydraulic Engineering, v. 118, n. 9, p. 1287-1304, Sept.

SHIMADA, M.; OKUSHIMA, S. (1984). New Numerical Model and Technique for Waterhammer. Journal of Hydraulic Engineering, v. 110, n. 6, p. 736-748, June.

SHIMADA, M.; VARDY, A. (2000). Towards Automatic Error Limitation in MOC Analyses. In: ANDERSON, A. (ed.): VIII International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems, The Hague, The Netherlands. BHR Group 2000 Pressure Surges, Publications n. 39, v. 1, p. 183-204.

SHIMANSKIY, S., IIJIMA, T., NAOI, Y. Development Of Microphone Leak Detection Technology on Fugen Npp. Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), Fugen Nuclear Power Plant 3, Japan, 2003.

SNSA, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (2010). "Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2008." Ministério das Cidades, Brasil

SOARES, A. K. (2003). "Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão" Universidade de São Paulo, Brasil

SOARES, A. K. (2007). "Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório" Universidade de São Paulo, Brasil

SWAMEE, P. K. (1993). Design of a Submarine Pipeline. Journal of Transportation Engineering, v. 119, n. 1, p. 159-170.

VERDE, C. Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. Control Engineering Practice, v. 9, p. 673-682, 2001.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. (1993). Fluid transients in Systems. Prentice- Hall, New Jersey.

WIKE, A. Liquid pipelines can use many varieties of SCADA-based leak detection systems. Pipeline & Gas Journal, v.213, n. 6, p.16-20, 1986.

WLTF-IWA, Water loss task force (2007). "District Metered Areas Guidance Notes." International Water Asociation.

Murilo Macane Arima Zorio
Viviane Zorio Peixoto Arima

DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR MEIO DA ANÁLISE DO TEMPO DE VIAGEM DE ONDAS DE PRESSÃO

conhecimentolivre.org/home
contato@conhecimentolivre.org
editoraconhecimentolivre

EDITORA CONHECIMENTO LIVRE