UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANITÁRIA

NILTON ZANIBONI

Equipamentos e metodologias para o controle e redução de perdas reais
em sistemas de abastecimento de água

ORIENTADOR: PROF. DR. MILTON TOMOYUKI TSUTIYA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
(Hidráulica e Saneamento)

São Paulo
2009

NILTON ZANIBONI

Equipamentos e metodologias para o controle e redução de perdas reais
em sistemas de abastecimento de água

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Civil

Orientador:
Prof. Dr. Milton Tomoyuki Tsutiya

São Paulo
2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de junho de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Zaniboni, Nilton

Equipamentos e metodologias para o controle e redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água / N.

Zaniboni -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.

155 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Milton, pela orientação, análise acurada e dedicação a este trabalho.

Aos Professores da pós-graduação da Escola Politécnica, que contribuíram, através de seus ensinamentos, para a execução deste trabalho.

Para todos os colegas da Sabesp, onde tenho orgulho e prazer de trabalhar. Agradeço em especial, o pessoal da equipe de detecção de vazamentos da Unidade de Negócios Sul, ao Engº Pierre Ribeiro Siqueira, ao meu colega José Antonio Golfetto, ao Engºs Jairo Tardelli Filho, Marcelo Fornaziero de Medeiros, Edson Almeida Torre, Guaraci Loureiro Sarzedas e também à Superintendente da MP, Regina Aparecida Siqueira, pelo incentivo e paciência que tiveram nessa fase de estudos.

Acima de tudo, agradeço a meus pais, Maria Odette e Ezio, pela força, carinho e apoio durante minha formação escolar e profissional.

A minha esposa Elna e sua família, pelo incentivo aos meus estudos e o carinho e paciência que demonstram ao longo desse período.

A minha filha Gabriela que demonstrou sua capacidade ao ingressar na Faculdade de Direito da Universidade de São Paulo, o que me motivou ainda mais para concluir esse trabalho.

Aos meus familiares, em especial minha irmã Neuris e seu marido Roberto, por estarem presentes em minha vida.

A Deus.

Com vocês e para vocês compartilho e dedico este trabalho.

RESUMO

O conhecimento dos equipamentos e metodologias para o controle e redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água tem assumido um papel importante no setor de saneamento, diante da necessidade de sustentabilidade e conservação ambiental.

Este trabalho apresenta os principais equipamentos utilizados em detecção acústica de vazamentos não visíveis, dentro de suas variáveis, vantagens e desvantagens para cada tipo e possibilidade de aplicação e permite aos gestores a escolha dos equipamentos em função de suas necessidades e possibilidades.

Apresenta os princípios físicos que norteiam o funcionamento dos equipamentos, nos estudos do comportamento do som nos vários ambientes envolvidos, bem como na capacidade humana em discernir esses sons. A metodologia para essa atividade é fortemente influenciada por esses fatores e seu conhecimento é fundamental para o sucesso dos trabalhos de detecção de vazamentos por detecção acústica.

Equipamentos e metodologias de detecção de vazamentos não acústicos têm sido cada vez mais utilizados e são apresentadas as suas principais características e aplicabilidades.

O estudo da VRP e do booster, bem como os procedimentos e padrões para os ramais prediais de ligação de água, podem ser utilizados para o efetivo controle e redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água.

Palavras chave: Perdas reais, equipamentos e metodologias, abastecimento de água.

ABSTRACT

The knowledge and methodologies of the equipments for the control and reduction of real losses in the water supply systems have assumed an important role in the sanitation sector, face to the necessity of sustainability and environmental preservation.

This study presents the main equipments used in the acoustic leakage detection, exploring its variables, advantages and disadvantages for each type and application possibilities, giving to the managers the choice of the equipments considering their necessities and possibilities.

It presents the physical principles that direct the equipments working in the studies of sound behavior in the different environments involved, such as the human capacity to identifying these sounds. The methodology for this activity is strongly influenced by these factors and its knowledge is fundamental for the success of the leakage detection works by acoustic detection.

Equipments and methodologies of non-acoustic leakage detection have been more and more used and its main characteristics and uses are presented in this study.

The RPV and boosters study, such as the procedures and standards to buildings extensions of the water connection, can be used for the effective control and reduction of the real losses in the water supply systems.

Key words: Real losses, equipments and methodologies, water supply.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	3
3	CONCEITOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Controle de perdas no saneamento.....	4
3.2	Definições de perdas reais de água	10
3.3	Detecção de vazamentos por método acústico	11
3.3.1	Física dos sons	13
3.3.2	Limites de audibilidade.....	16
3.3.3	Meios de propagação do som	18
4	EQUIPAMENTOS PARA DETECÇÃO ACÚSTICA DO RUÍDO DE VAZAMENTO	25
4.1	Equipamentos principais.....	28
4.1.1	Hastes de escuta mecânica e eletrônica	28
4.1.2	Geofones eletrônicos e mecânicos	31
4.1.3	Correlacionador de ruídos de vazamentos	35
4.2	Equipamentos auxiliares.....	39

4.2.1 Locador de massa metálica	40
4.2.2 Locador de tubulação metálica	41
4.2.3 Locador de tubulação não metálica	46
4.2.4 Barra de perfuração	49
4.2.5 Trenas ou rodas de medição	50
4.2.6 Manômetros	51

5 METODOLOGIA PARA A UTILIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS BÁSICOS DE PESQUISA ACÚSTICA..... 52

5.1 Procedimentos iniciais para a utilização dos equipamentos básicos de detecção acústica	52
5.2 Avaliação em campo dos dados cadastrais da rede de distribuição de água.....	58
5.3 Pesquisa acústica em válvulas, hidrantes e cavaletes.....	58
5.4 Pesquisa de redes e ramais com geofone.....	60
5.5 Pesquisa de redes e ramais com equipamento correlacionador de ruídos de vazamentos.....	63
5.6 Confirmação em campo da localização de vazamentos	65
5.7 Considerações adicionais	65

6 EQUIPAMENTOS AVANÇADOS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS POR MÉTODO ACÚSTICO..... 66

6.1	Armazenadores de Ruídos – com e sem correlação.....	66
6.1.1	Componentes principais dos Armazenadores de Ruído de vazamentos.....	70
6.2	Metodologia para a utilização dos Armazenadores de Ruídos de Vazamentos.....	72
6.2.1	Procedimentos operacionais.....	72
6.2.2	Pré-definição dos pontos de instalação do A.R.....	72
6.2.3	Obtenção de dados com unidade receptora.....	74
6.3	Equipamentos de inserção em tubulações para pesquisa acústica.....	77
6.3.1	Sahara® Leak Location Sistem (Sahara® Sistema de Locação de vazamentos)	77
6.3.2	Componentes principais do Sistema Sahara.....	77
6.3.3	Parâmetros de funcionamento do Sistema Sahara	79
6.4	Indicador interno de ruídos de vazamentos.....	80
7	TECNOLOGIAS NÃO ACÚSTICAS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	81
7.1	Metodologia de aplicação de gases traçadores para detecção de vazamentos em redes de água.....	85
8	TECNOLOGIAS ESPECIAIS PARA A REDUÇÃO DE PERDAS.....	89
8.1	Válvula Redutora de Pressão	89

8.1.1	Características das Válvulas Redutoras de Pressão	90
8.1.2	Fatores a considerar na definição da área para instalação de uma VRP	97
8.1.3	Levantamento de dados da área para instalação de uma VRP	98
8.1.4	Dimensionamento da VRP	99
8.1.5	Regulagem de uma VRP	100
8.1.6	Diâmetro nominal da VRP	102
8.1.7	Estimativa de perda de carga	103
8.1.8	Verificação do risco de cavitação.....	105
8.2	Controle de pressão com a utilização de booster.....	106
8.3	Padronização dos ramais de ligação de água.....	110
8.4	Proposta de metodologia de análise e aplicação da padronização de ramais de ligação de água.....	113
9	ESTUDO DE CASO.....	121
9.1	Análise dos procedimentos para detecção de vazamentos não visíveis.....	121
9.1.1	Objetivo	121
9.1.2	Metodologia	121
9.1.3	Resultados Obtidos	122
9.1.4	Estimativas de ganhos com os novos procedimentos	127
9.1.5	Desvantagens observadas.....	129
9.1.6	Resultados alcançados	129
9.1.7	Análise do estudo de caso	131

10 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	132
------------------------------------	-----

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
-------------------------------------	-----

LISTA DE SIMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

a.C.....	antes de Cristo
A	Área (L^2)
Ao	Área do orifício do vazamento (L^2)
ABENDE.....	Associação Brasileira de Ensaios Não-Destrutivos
AESBE	Associação das Empresas de Saneamento Básico Estaduais
A.R	Armazenador de Ruído
AWWA.....	<i>American Water Works Association</i>
BABE.....	<i>Background and Bursts Estimates</i>
BNH.....	Banco Nacional de Habitação
Booster	Bomba utilizada em redes de distribuição de água
DTA	Documento Técnico de Apoio
C	Velocidade de propagação do som ($L.T^{-1}$)
Cd	Coeficiente de descarga
Ciclo	Oscilações da onda no tempo
CV	Coeficiente de perda de carga (mca)

d.....	Espessura da parede do tubo (L)
D.....	Diâmetro interno do tubo (L)
dB.....	Decibel (medida adimensional de intensidade sonora)
DS	Variação da intensidade fisiológica (bell)
E	Módulo de elasticidade do tubo (kgf.L^{-2})
Ev	Módulo de elasticidade da massa de água ($2,11 \times 10^6 \text{ kgf.L}^{-2}$)
F.....	Frequência (Hertz)
FAVAD.....	<i>Fixed and Variable Area Discharge Paths</i>
Fm	Frequência media (ciclos.T^{-1})
Fuji Tecom.....	Fabricante de equipamentos
I	Intensidade física (W.L^{-2})
Io	Intensidade física de referência
H	Carga hidráulica (N. m^{-2})
Hz	Hertz
Hertz.....	Unidade de frequência (ciclos. s^{-1})
Intensidade sonora.....	Potência por unidade de área (Watts.L^{-2})
IWA	International Water Association

KPa.....	quilopascal (10^3 pascal)
L	Distância (m)
mca	Metro de coluna de água ($0,1 \times \text{Kgf. L}^{-2}$)
N	Coeficiente que relaciona pressão e vazamento
pascal.....	Unidade de pressão (Newtons. L^{-2})
PECOP.....	Plano Estadual de Controle de Perdas
PEDOP.....	Programa de Controle e Desenvolvimento da Operação
PEAD	Material plástico (Polietileno de alta densidade)
pH	Potencial hidrogeniônico (Nível de concentração de íons de Hidrogênio H^+)
P	Pressão média na tubulação (Kgf. L^{-2})
PLANASA.....	Plano Nacional de Saneamento
PNCDA.....	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água
Potência do som.....	Fonte sonora por unidade de tempo (Watts)
PPMS	Ponto de Pressão Média do Setor
PVC.....	Material plástico (Policloreto de vinila)
Q	Vazão de vazamento na tubulação (L.s^{-1})
r1	Raio interno do tubo (L)

r_2	 Raio externo do tubo (L)
TAP	 Dispositivo para inserção de equipamentos em redes de abastecimento de água
T_d	 <i>Time delay</i> (Tempo de retardo)
S_0	 Intensidade fisiológica de referência
Sabesp	 Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
Sapporo	 Cidade localizada no Japão
SEDU/PR	 Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República
SNIS	 Sistema Nacional de Informações de Saneamento
SNSA	 Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades
UARL	 <i>Unavoidable Annual Real Losses</i>
U.R	 Unidade Receptora
V	 Velocidade ($L.T^{-1}$)
VGO	 Válvula Geradora de Ondas
Watts	 Medida de potência (sistema internacional – $joules.s^{-1}$)
WRC	 <i>Water Research Comission</i>
z	 Cota (L)

ΔP Perda de carga (mca)

ρ Densidade da água (101, 97 kgf. s².m⁻⁴)

λ Comprimento da onda (V.F⁻¹)

φ Coeficiente de perdas em nós de redes de abastecimento

α Expoente de perdas em nós de redes de abastecimento

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Velocidade de propagação e distância de percepção do ruído de vazamento por tipo de tubo - sons conduzidos diretamente nos tubos	21
Tabela 2 - Tendência de propagação do ruído do vazamento nas tubulações	24
Tabela 3 - Relação entre ruído de vazamento e as características da tubulação	26
Tabela 4 - Tabela de verificação para haste de escuta mecânica.....	53
Tabela 5 - Tabela de verificação para geofones eletrônicos	55
Tabela 6 -Tabela de verificação para correlacionadores de ruído de vazamentos ...	57
Tabela 7 - Tabela de verificação para armazenadores de ruído de vazamentos	76
Tabela 8 - Parâmetros de funcionamento do Sistema Sahara®	79
Tabela 9 - Variação da vazão do vazamento em função da pressão e da abertura do ponto de fuga	93
Tabela 10 - Determinação do diâmetro nominal da VRP	102
Tabela 11- Relação entre diâmetro nominal e coeficiente de perda de carga	104
Tabela 12 - Relação entre as pressões de montante e jusante, em função da possibilidade do risco de cavitação	106
Tabela 13 - Relatório anual dos trabalhos de detecção de vazamentos executados na UN Sul.....	130

Tabela 14 - Relatório anual de trabalhos problemas detectados pelas equipas durante os trabalhos de detecção de vazamentos – perdas aparente	131
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos vazamentos.....	11
Figura 2 - Representação esquemática dos sons gerados por um vazamento.....	12
Figura 3 - Propagação de som – pesquisa de vazamentos não visíveis.....	14
Figura 4 - Comprimentos de onda diferentes podem manter a mesma amplitude, mesmo variando a frequência.....	15
Figura 5 - Relação entre velocidade do ruído e material do tubo.....	20
Figura 6 - Influência do solo na transmissão do ruído.....	23
Figura 7 - Influência do material do tubo na transmissão do ruído.....	24
Figura 8 - Faixa de percepção dos equipamentos de detecção de vazamentos e frequências de sons, incluindo ruídos de vazamentos	27
Figura 9 - Haste de escuta mecânica.....	29
Figura 10 - Detalhe do amplificador mecânico	30
Figura 11 - Utilização da haste de escuta mecânica	30
Figura 12 - Haste de escuta eletrônica.....	31
Figura 13 - Geofone mecânico	32
Figura 14 - Modelos de geofones eletrônicos e seus componentes.....	35
Figura 15 - Dados utilizados pelo correlacionador de ruídos de vazamento	38

Figura 16 - Componente do correlacionador de ruídos de vazamento.....	39
Figura 17 - Locador de massa metálica	41
Figura 18 - Locador de massa metálica	44
Figura 19 - Método de locação de tubulação metálica por indução	45
Figura 20 - Método de locação de tubulação metálica por condução	45
Figura 21 - Método de locação de tubulação por bobina de indução	46
Figura 22 - Locador de tubulação não metálica	47
Figura 23 - Válvula geradora de ondas	49
Figura 24 - Barra de perfuração	50
Figura 25 - Roda de medição	50
Figura 26 - Manômetro de Bourdon	51
Figura 27 - Amplificador mecânico	52
Figura 28 - Exemplo de itens a serem verificados nos geofones eletrônicos.....	54
Figura 29 - Exemplo de pico de correlação	56
Figura 30 - Pesquisa acústica com a utilização da haste de escuta	60
Figura 31 - Pesquisa acústica com a utilização de geofones eletrônicos.....	62
Figura 32 - Pesquisa acústica com a utilização de geofone mecânico	62

Figura 33 - Utilização do correlacionador de ruídos	64
Figura 34 - Componentes do armazenador de ruídos	71
Figura 35 - Instalação dos armazenadores de ruídos de vazamentos	73
Figura 36 - Esquema do processo de pesquisa utilizando armazenadores de ruído	74
Figura 37 - Gráficos típicos de pesquisa utilizando armazenadores de ruído	75
Figura 38 - Planta cadastral com a localização dos armazenadores de ruídos	75
Figura 39 - Esquema do Sistema Sahara® de locação de vazamentos	78
Figura 40 - Indicador interno de ruídos de vazamentos - Smart Ball.....	81
Figura 41 - Inserção de gás hidrógeno através de cavaletes domiciliares	85
Figura 42 - Utilização do equipamento de detecção de gases	86
Figura 43 - Relação entre a Pressão e a vazão de vazamento.....	94
Figura 44 - Projeto de VRP com instalação de “by pass”	95
Figura 45 - Esquema de VRP com saída constante.....	96
Figura 46 - Esquema de VRP com saída variável.....	96
Figura 47 - Comportamento de sistema com setorização clássica	107
Figura 48 - Pressão controlada por booster	108

Figura 49 - Variação nas características da bomba pela variação da rotação	109
Figura 50 - Distribuição a frequência de vazamentos num ramal predial	111
Figura 51 - Fissura causada por contaminação do material.....	112
Figura 52 - Corte no tubo causado por ferramenta inadequada.....	112
Figura 53 - Modelo de tê de serviço integrado	114
Figura 54 - Modelo de colar de tomada.....	115
Figura 55 - Cotovelo e adaptador	115
Figura 56 - Padrão de ligação para tubulações rígidas	116
Figura 57 - Utilização de ferramentas inadequadas (capa bode	119
Figura 58 - Metodologia para aplicação de padronização de ramais de água	120

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, têm sido apresentados inúmeros trabalhos sobre perdas de água em sistemas de abastecimento, principalmente focados nos conceitos de controle de pressão, gerenciamento de infraestrutura, bem como, a velocidade e qualidade dos reparos dos vazamentos, mas pouco se tem escrito sobre o controle ativo de vazamentos, fator determinante em qualquer prestadora de serviços de saneamento moderna.

A maior parte das regiões metropolitanas apresenta sistemas de abastecimento de água heterogêneo, com materiais, idades e condições variáveis, nem sempre executadas com planejamento adequado.

Tais condições implicam num constante problema no gerenciamento de seus sistemas, agravado pelo crescimento populacional desordenado, pela ocupação de áreas de mananciais e encostas e pelo aumento das habitações em áreas invadidas, que leva ao aumento dos furtos e fraudes no sistema, bem como colabora de modo direto com o aumento das perdas reais.

Esses fatores acabam impondo uma sobrecarga aos sistemas fornecedores de água, aumentando a demanda sem o respectivo aumento de oferta, aumentando os custos de tratamento pelo aumento da poluição nos mananciais existentes, levando as prestadoras de serviços de saneamento a optar pela aplicação de rodízios e intermitência no fornecimento de água.

Desse modo, o controle e gerenciamento de perdas ganharam uma importância sem paralelo nos últimos anos, levando à busca, criação e aplicação de novas alternativas e métodos para diminuir essas perdas para um patamar aceitável tanto econômico quanto ambiental.

Ressalta-se que, em nível global, procura-se criar indicadores de perdas confiáveis e aplicáveis em diferentes países, com diferentes condições de sistemas de abastecimento, disponibilidade de mananciais e condições socioeconômicas e culturais, com o Brasil e particularmente o Estado de São Paulo participando ativamente na criação e adoção desses indicadores.

Neste ambiente, o controle ativo dos vazamentos e o efetivo controle de pressões são fatores importantes e que mais evoluíram em termos de tecnologia e procedimentos, cabendo destacar a detecção de vazamentos não visíveis, cujo salto evolutivo ainda não é bem conhecido, até pelo fato do pouco tempo da aplicação das novas metodologias. Outro destaque cabe para as válvulas redutoras de pressão e os boosters, que se tornaram equipamentos importantes diante do quadro atual encontrado na maior parte das regiões metropolitanas.

No campo do gerenciamento da infraestrutura, a metodologia da padronização dos ramais de ligação de água promoveu uma melhora significativa na redução das perdas reais, devido à maior qualidade dos materiais e do treinamento da mão-de-obra.

A detecção de vazamentos não visíveis, o gerenciamento de pressões e a redução dos vazamentos em ramais de ligação de água são fatores fundamentais para o controle e gerenciamento de perdas reais, e tem sido recomendado pela maioria dos autores/entidades.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

- Apresentar os principais equipamentos e metodologias no controle de perdas, em suas diferentes configurações e aplicações;
- Avaliar a utilidade e operacionalidade dos vários componentes dos vários tipos de equipamentos e metodologias para o controle e gerenciamento de perdas reais;
- Possibilitar aos gestores das prestadoras de serviços de saneamento o direcionamento de seus recursos em escolhas, tanto em equipamentos quanto de metodologias, que atendam suas reais necessidades.

3 CONCEITOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Controle de perdas no Saneamento

“Chegaram à Mara, mas não podiam beber as águas de Mara porque eram amargas; por isto pôs àquele lugar um nome conveniente chamando-o Mara, isto é, amargura. O povo murmurou contra Moisés, dizendo: Que havemos de beber? Ele, porém, clamou ao Senhor, o qual lhe mostrou uma madeira; e, tendo-a lançado nas águas, elas se tornaram doces”.

Êxodo 15:23-25

A história do saneamento básico remonta a muitos séculos antes da Era Cristã e está sempre relacionada ao surgimento e o crescimento das cidades. No processo de formação das cidades, é sempre possível verificar a presença de um curso de água em sua paisagem. Em suas múltiplas atividades, o homem precisa da água, quer seja para suprir suas necessidades básicas, quer seja, para o afastamento de seus dejetos.

O saneamento, sendo no seu aspecto físico uma luta do homem em relação ao ambiente, existe desde o início da humanidade, ora desenvolvendo-se de acordo com a evolução das diversas civilizações, ora retrocedendo com a queda das mesmas e renascendo com o aparecimento de outras.

O reconhecimento da importância do saneamento e de sua associação com a saúde do homem remonta às mais antigas culturas. Ruínas de uma grande civilização que se desenvolveu ao norte da Índia há cerca de 4000 anos, indicam evidências de hábitos sanitários, incluindo a presença de banheiros e de esgotos nas construções, além de drenagem nas ruas (ROSEN, 1994).

O primeiro sistema público de abastecimento de água, o aqueduto de Jerwan, foi construído na Assíria em 691 a.C. Os grandes aquedutos romanos foram construídos em várias partes do mundo, a partir de 312 a.C. No ano de 97 da era cristã, Sextus Julius Frontinus foi nomeado Superintendente de Águas de Roma entre outras obras escreveu um tratado sobre abastecimento de água, *De Aquis Urbis Romae* (livro em dois volumes sobre o suprimento de água da cidade de

Roma). À medida que a civilização avançou a necessidade de água pura e as obras para conduzi-la aos centros urbanos se expandiram (ROSEN, 1994).

É igualmente de grande significado histórico a visão de saneamento de outros povos, como o registro da preocupação com o escoamento da água no Egito, os grandes aquedutos e os cuidados com o destino dos dejetos na cultura creto-micênica e as noções de engenharia sanitária dos Quíchuas (povo indígena que habitava extensa região da América do Sul) (ROSEN, 1994).

No Brasil, a história do saneamento básico também se confunde com o aparecimento e formação das cidades. No início do século XIX (período colonial), o abastecimento de água era feito através de coleta em bicas e fontes, nos povoados que então se formavam. Com a chegada da família real no Brasil, deu-se início à implantação de uma infraestrutura mínima, com a execução de obras tais como pontes, estradas e abastecimento de água à população.

No início, não havia preocupação real com controle de perdas, visto que os recursos hídricos atendiam totalmente a demanda existente, quer em qualidade, quer em disponibilidade, e o foco inicial era aumentar a quantidade de pessoas atendidas através do sistema de abastecimento, visando principalmente um maior controle sanitário e uma consequente diminuição de doenças de veiculação hídrica.

Na medida em que as cidades foram se expandindo, a qualidade da água existente começou a sofrer com o aumento do lançamento de esgotos “in natura”, surgindo a necessidade de iniciar-se o tratamento da água para trazê-la novamente à condição que permitisse o consumo humano.

A partir daí, a disponibilidade hídrica de qualidade já foi o fato gerador de conflitos e disputas dos agentes econômicos que competem pelo seu uso, dentre as utilizações possíveis da água, surgindo a necessidade de controlar as perdas de água, mantendo a oferta em níveis aceitáveis, quer com foco na demanda, quer com foco econômico, devido ao aumento de custos dos processos de tratamento.

Cabe ressaltar que até o final do século 19 o controle de perdas tinha o caráter passivo, ou seja, os vazamentos só eram considerados quando afloravam ou quando havia a comunicação e solicitação dos usuários. Não havia, por parte das

empresas prestadoras de serviços de saneamento, qualquer iniciativa no intuito de fazer detecção de vazamentos ou controle de pressão nos sistemas de abastecimento.

O controle ativo iniciou-se com a introdução do tubo pitot em medições de vazão em zonas pré-determinadas, estendendo-se a posterior em áreas denominadas distritos pitométricos. A detecção de vazamentos com geofones teve início na década de 40, com a introdução dos geofones denominados mecânicos e a partir da década de 50, com os eletrônicos (WRC, 1970).

O histórico dos procedimentos de análise de perdas, tanto em nível internacional quanto nacional são apresentados a seguir (LAMBERT, 1998):

- 1800 – medições de vazão com utilização de tubo pitot e pesquisa de vazamentos com utilização de haste acústica produzida em madeira em Chicago;
- Deacon Meter Waste Metering (medição da mínima vazão noturna com hidrômetro Deacon);
- 1940 – pesquisas de vazamentos com utilização de geofone mecânico;
- 1965 - Ground Micro Phones (geofones eletromecânicos);
- 1970-Inglaterra - Pesquisa de vazamentos com utilização de correlacionadores de ruídos computadorizados (WRC - Water Research Commission);
- 1978 - Leak Noise Correlator (correlacionador de ruídos de vazamento);
- 1980 – Inglaterra - Leakage Control Policy and Practice - Relatório 26 - Redução de perdas físicas;
- 1980 - Estados Unidos da América (AWWA) - Manual M36 - Auditoria de perdas;

- 1990 - Sabesp - Geofonamento e Locação de Rede – Conceitos e Aplicação;
- 1991 - Copenhagen – Revisão internacional - International Water Association (IWA);
- 1992-1994 - Inglaterra – Conceito da estimativa de vazamentos inerentes e arreventados (em inglês: Bursts and Background Estimates – BABE);
- 1994 - Inglaterra – Controle de Perdas - informes: Managing Leakage – Reports A to J WRC;
- 1994-1998 - Inglaterra – Seção de descarga constante e variável (em inglês: Fixed and Variable Área Discharge – FAVAD);

Outras Referências cabem ser citadas:

- 1996-2000 - Força Tarefa – Introdução de terminologia padrão e melhores práticas para análise de índices de performance e perdas reais anuais inevitáveis (PRAI) (em inglês: Unavoidable Annual Real Losses – UARL) - IWA;
- 2001 - Alemanha – International Report - IWA;
- 2002 - Princípios para cálculo do nível econômico de perdas: atualização da abordagem apresentada no Report A – Key principles in the economic level of leakage calculation referente aos informes da managing leakage – WRC;
- 2007 - Romênia - Força tarefa perdas de água - Grupo de especialistas em eficiência operacional e gerenciamento - IWA.

Cabe destacar que a National Leakage Initiative, grupo formado na Inglaterra, reuniu-se com as associações prestadoras de serviços para rever e atualizar a metodologia referente ao combate de perdas. Esta iniciativa levou à publicação do

Managing Leakage Reports (1994) constituído de nove relatórios que compõem o modelo para conceituação das perdas e apresentação de técnicas para redução e controle de perdas.

No Brasil, vários programas de redução de perdas foram implantados pelas prestadoras de serviços de saneamento públicas e privadas, sendo que, alguns eventos de importância são relacionados a seguir:

- Em 1969, com a implantação do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) foram investidos recursos financeiros consideráveis, principalmente nos grandes centros urbanos, visando reduzir o déficit de atendimento no setor de saneamento;
- Seminário de macromedição, realizado em 1980, no Rio de Janeiro, com a participação das Companhias Estaduais de Saneamento;
- Em 1981, constituição da Comissão Nacional de Controle de Perdas pelo Banco Nacional de Habitação (BNH), formada por representantes de diversas prestadoras de serviços de saneamento, destinada a assessorar o banco no estabelecimento de diretrizes de âmbito nacional para controle de perdas;
- A campanha para redução de perdas incentivada pelo BNH acabou dando origem ao Plano Estadual de Controle de Perdas (PECOP), implantado em 1981, com o objetivo de reduzir o volume perdido, bem como identificar e eliminar os fatores que ocasionam as perdas;
- Em 1984, o PECOP sofreu reformulações em sua abrangência, dando maior ênfase na ação global de planejamento, controle e desenvolvimento da operação, originando o Programa de Controle e Desenvolvimento da Operação (PEDOP);
- A Associação das Empresas de Saneamento Básico Estaduais (AESBE) possui câmara de desenvolvimento operacional, cuja finalidade é apoiar e incentivar

- programas dirigidos à redução das perdas e otimização operacional dos sistemas de abastecimento de água;
- Em 1995, criação do Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS) pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades (SNSA), por meio do Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS). O SNIS elabora diagnóstico contendo informações coletadas e indicadores de desempenho, referentes a uma amostra de prestadoras de serviços de saneamento. Além do diagnóstico, são também produtos do SNIS: a série visão geral da prestação de serviços de água e esgotos, e o aplicativo da série histórica;
 - Em 1997, o Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA), financiado pela União, foi desenvolvido pela Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República (SEDU/PR), por intermédio de convênio firmado com a Fundação para Pesquisa Ambiental da Universidade de São Paulo. O convênio teve como escopo a realização de estudos especializados e a organização de um conjunto de 16 Documentos Técnicos de Apoio (DTA) as atividades do Programa, nas áreas de planejamento das ações de conservação, de tecnologia dos sistemas públicos de abastecimento de água e de tecnologia dos sistemas prediais de água e de esgoto;
 - Em 1998, a Fase II do PNCDA incluiu a produção de mais 4 DTAs;
 - Em 1999-2000 foi desenvolvido o Programa de Qualificação e Certificação em Detecção de Vazamentos Não Visíveis de Líquidos sob Pressão, pela Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos (ABENDE) e pela Associação das Empresas de Saneamento Básico Estaduais (AESBE);
 - Seminário internacional sobre programas de redução e controle de perdas em sistemas de abastecimento de água, realizado em 2002 no Recife – PE, pela Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano (SEDU/PR) por meio do Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS).

Segundo dados do Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos do Brasil de 2004, elaborado pelo SNIS, o índice médio das perdas de faturamento, que incluem perdas reais e aparentes, medidas pela relação entre os volumes faturados e disponibilizados para distribuição, chegou a 40,5%. Os indicadores demonstram, segundo a análise, uma situação preocupante em nível nacional mantendo-se o mesmo valor em relação ao ano de 2001, haja vista que o indicador sofreu um decréscimo de apenas 0,1 pontos percentuais.

3.2 Definições de perdas reais de água

Alegre et al (2000) define perdas de água como: volume referente à diferença entre a água entregue ao sistema de abastecimento e os consumos autorizados, medidos e não medidos, faturados ou não faturados, fornecidos aos consumidores cadastrados, à própria prestadora de serviços de saneamento e a outros que estejam implícita ou explicitamente autorizados a fazê-lo.

Os estudos da IWA propõem que as perdas sejam classificadas em: perdas reais e perdas aparentes. A razão entre elas indica a condição do gerenciamento do sistema.

As perdas reais (ou físicas) são calculadas com base no balanço hídrico, ou seja, a soma de todos os volumes de água fornecidos ao sistema, mas que não foram efetivamente utilizados.

Esse tipo de perda se deve, principalmente, a vazamentos em adutoras, redes de distribuição, ramais prediais e reservatórios e a extravasamentos em reservatórios. Importante observar que este tipo de perda impacta a disponibilidade de recursos hídricos superficiais e os custos de produção de água tratada.

Os vazamentos podem ser classificados em:

- Vazamentos visíveis: são facilmente notados pela população, que notifica a empresa prestadora de serviços de saneamento. Portanto, o reparo é normalmente feito em um curto espaço de tempo.
- Vazamentos não visíveis: não afloram à superfície, infiltram-se na terra, formando fluxos internos no solo. Portanto, leva-se um longo tempo para localizá-los e consertá-los, visto que são necessárias inspeções especiais através de equipamentos de pesquisa para a sua detecção.

Nem todos os vazamentos não visíveis são detectáveis através dos equipamentos de pesquisa atualmente disponíveis. Aquelas vazões muito baixas, que geralmente ocorrem nas juntas e nos estágios iniciais dos processos de corrosão, representam o que se denomina "vazamentos inerentes" do sistema de distribuição de água (ABENDE, 2005). A Figura 1 apresenta os critérios de classificação dos vazamentos

Figura 1 – Classificação dos vazamentos (Sabesp, 2005).

3.3 Detecção de vazamentos por método acústico

Para um melhor conhecimento da pesquisa acústica, é imprescindível o conhecimento dos princípios físicos que estão envolvidos no processo. A pesquisa acústica é baseada na capacidade humana em escutar certos níveis de ruídos e interpretá-los como sons diferenciados.

O som é o fenômeno acústico que consiste na propagação de ondas sonoras produzidas por um corpo que vibra em um meio material elástico, portanto, o som é

uma oscilação na pressão do ar (ou de outro meio elástico) capaz de ser percebida pelo ouvido humano. O número de oscilações da pressão do ar por unidade de tempo define sua frequência, enquanto que a magnitude da pressão média define a potência e a intensidade sonora. A frequência é expressa em hertz (ou ciclos/segundo) e a pressão em Pascal (ou Newton/m^2), enquanto que a potência é a energia emitida pela fonte sonora por unidade de tempo, expressa em joules/s ou Watts (sistema internacional). A intensidade sonora pode ser definida como potência por unidade de área, expressa em Watt/m^2 . Essas escalas para medida de pressão, potência e intensidade das ondas sonoras são escalas lineares.

Quando há um vazamento em uma tubulação que opera com líquidos sob pressão, como é o caso das redes de distribuição de água, um som contínuo, porém de intensidade irregular, é emitido pela abertura existente no tubo. A água proveniente do vazamento é o elemento gerador desse som, que se propaga não apenas através da água, mas também através dos sólidos. O som, propagado internamente pela água e pelas paredes da tubulação através de ondas longitudinais e transversais, é produzido no exato momento em que a água sai da tubulação (com a pressão existente naquela seção do tubo) para o exterior, que está sob pressão atmosférica (ABENDE, 2005).

O som do vazamento é composto por diversos sons diferentes (Figura 2), tais como o som do fluxo de água que passa pela abertura existente, do impacto entre o fluxo de água e o solo que circunda a tubulação, da fricção das partículas de água com as paredes do tubo e, finalmente, o som da vibração produzida no tubo. A este conjunto de sons denomina-se genericamente de “ruído de vazamento”

Figura 2 - Representação esquemática dos sons gerados por um vazamento (Sapporo/Japão, 1994).

3.3.1 Física dos sons

Esse comportamento dos sons dos vazamentos se dá em função dos seguintes fatores:

- Física das ondas: o som é resultado das vibrações dos corpos elásticos, quando essas vibrações se verificam em determinados limites de frequências (vibrações sonoras). Tais vibrações se transmitem ao meio que circunda o corpo sonoro (fonte sonora), produzindo compressões e distensões sucessivas (deformações transitórias), que se propagam com velocidade uniforme em todas as direções se a propriedade elástica do meio é igual em todos os seus pontos (meio isótropo).

Como todo movimento material, o som possui certa energia que ao encontrar resistência ao seu deslocamento é restituída ao meio circundante (resistência resultante da viscosidade, obstáculos, por exemplo). A restituição pode acontecer de duas formas, seja a onda passando parte de sua quantidade de movimento para o obstáculo, o qual passa a entrar em vibração; seja transformando parte de sua energia cinética em calor.

- Ondas sonoras: a parte da física que estuda o som denomina-se acústica; nela são descritos os fenômenos relacionados com as oscilações mecânicas (vibrações) que originam as ondas sonoras ocorrentes, bem como a propagação dessas ondas nos sólidos, líquidos e gases.

As ondas sonoras são ondas periódicas; classificadas em audíveis e inaudíveis, dependendo do número de períodos (ciclo completo de uma oscilação de uma onda), que ocorram na unidade de tempo.

Fato importante a ser mencionado é que a onda sonora é uma onda mecânica longitudinal com propagação esférica, difundindo-se em todas as direções a partir do seu ponto de emissão.

A Figura 3 representa, de forma esquemática, a propagação dos sons de um vazamento em variados tipos de materiais existentes. Observar que, quanto mais próximo do ponto de fuga, maior a intensidade percebida.

Figura 3 - Propagação de som – pesquisa de vazamentos não visíveis (Sabesp, 2005).

- Ondas mecânicas: são aquelas originadas pela deformação de uma região de um meio elástico e que, para se propagarem, necessitam de um meio material. Daí decorre que as ondas mecânicas não se propagam no vácuo.

Quando transmitidas ao nosso sentido da audição, são por ele captados como uma impressão fisiológica denominada som.

- Ondas periódicas: as ondas são periódicas quando se repetem identicamente, em intervalos de tempo iguais.
- Comprimento da Onda (λ): é a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos ou duas zonas de compressão e diluição, sempre dependendo da frequência(F) e da velocidade(V) da onda. Desse modo, a equação (1) da periodicidade da onda é $\lambda = \frac{V}{F}$ (1)

A Figura 4 mostra que ondas podem ter a mesma amplitude, mas o comprimento da onda está diretamente relacionado à frequência.

Figura 4 - Comprimentos de onda diferentes podem manter a mesma amplitude, mesmo variando a frequência.

- Período (T): é o menor intervalo de tempo de repetição do fenômeno periódico. Pode ser definido também, como o tempo que uma onda completa gasta para percorrer a distância (λ);
- Frequência (F): é o número de períodos por segundo; sendo o inverso do período: $F = 1/T$. A unidade de frequência é o Hertz (Hz) que significa "um ciclo por segundo". A frequência depende somente do período e não varia ao passar por meios diferentes.

Quanto maior a frequência (F), maior será o número de oscilações (ciclos) por segundo, menor será a distância entre as cristas ou vales, ou zonas de compressão e diluição (λ).

A relação entre velocidade de propagação do som c em m/s e a frequência F em ciclos/segundos nos dá o comprimento de onda λ , conforme demonstra a equação (2):

$$\lambda = \frac{c}{F_{\text{m/ciclo}}} \quad (2)$$

Sendo:

λ = comprimento de onda;

c = velocidade da propagação do som;

F_{m} = frequência média (ciclos/s)

- Amplitude (A): é a elongação máxima, isto é, um ponto de máximo no eixo das ordenadas.

O som é responsável pela forma de comunicação mais eficiente conhecida e se comporta como uma onda. As ondas possuem uma propriedade muito conhecida: elas são capazes de transportar energia sem transportar matéria. Em outras palavras, em sua propagação, as ondas transportam energia sem carregar os objetos por onde passam. Quando se recebe uma informação de origem sonora, simplesmente sente-se que a energia sonora ressoa nos ouvidos. As ondas sonoras são originadas por vibrações no meio material em que vão se propagar.

3.3.2 Limites de audibilidade

O som é produzido por corpos que vibram, mas nem toda vibração é capaz gerar um som que vá excitar o tímpano. Para que se tenha a sensação auditiva é necessário que a onda sonora esteja numa uma faixa de frequência bem definida.

Quando as ondas sonoras têm frequência entre 20 Hz e 20.000 Hz, são audíveis pelo ouvido humano.

Fora desses limites, o ouvido humano não é capaz de perceber a onda como som.

Quando as ondas sonoras têm frequências inferiores a 20 Hz são inaudíveis (infra-som).

Para frequências superiores a 20.000 Hz também são inaudíveis (ultrasom).

Os ruídos de vazamento são, portanto compostos por ondas transversais e longitudinais que se propagam como ondas no interior dos tubos. A velocidade de propagação do ruído do vazamento varia de acordo com material, diâmetro, espessura e demais características dos tubos.

O nível de variação da intensidade fisiológica (DS) cuja unidade é o bell (b) e a intensidade física (I) cuja unidade é o W/m² relacionam-se mediante uma lei experimental ou lei de Weber-Fechner. A variação da intensidade fisiológica, na zona central do campo de audibilidade é proporcional à variação dos logaritmos das intensidades físicas correspondentes.

Assim, seja S_0 uma intensidade fisiológica de referência e I_0 a correspondente intensidade física. Se S é outra intensidade fisiológica qualquer e I a intensidade física correspondente, a lei de Weber-Fechner permite escrever:

adotando-se $S_0 \Rightarrow I_0$ e $S \Rightarrow I$; vem $S - S_0 = \log(I/I_0)$, em bell (b).

Comumente, usa-se o decibel, como demonstrado na equação (3).

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 10 \cdot \log_{10}(I_2/I_1) \text{ (db)} \quad (3)$$

Por convenção internacional, definiu-se $S_0 = 0$, para $I_0 = 10^{-12}$ W/m² como sendo a intensidade auditiva de referência, relativa a um som simples de frequência 1000 Hz. Essa intensidade corresponde ao limiar de audição.

No método de cálculo da velocidade de propagação do ruído do vazamento, as equações que demonstram tal velocidade são as mesmas equações utilizadas para o cálculo do “golpe de aríete”, que são adotadas devido a sua precisão.

A equação (4) de “Jaeger” é adotada para tubos relativamente espessos em relação ao diâmetro, como os de chumbo e plástico (PVC, PEAD).

$$C = \sqrt{\frac{Ev/\rho}{1 + \frac{2Ev(r_2^2 + r_1^2)}{Ev(r_2^2 + r_1^2)}}} \quad (4)$$

A equação (5) de “Allievi” é adotada para tubos de ferro fundido e aço, que possuem paredes mais finas quando relacionadas ao diâmetro.

$$C = \sqrt{\frac{E_v / \rho}{1 + \frac{E_v}{E} \cdot \frac{D}{d}}} \quad (5)$$

Onde:

C = Velocidade de propagação do som no interior da tubulação (m/s);

E_v = Módulo de elasticidade da massa de água ($2,11 \times 10^6$ kgf/m²);

E = Módulo de elasticidade do tubo (kgf/m²);

ρ = Densidade da água (101,97 kgf. s²/m⁴);

D = Diâmetro interno do tubo (m);

d = Espessura da parede do tubo (m);

r_1 = Raio interno do tubo (m);

r_2 = Raio externo do tubo (m).

Como as redes podem ser executadas com diferentes tipos de tubos, a velocidade de propagação poderá variar ao longo do trecho de acordo com o tubo assentado.

Quando os tubos possuem camadas oxidadas formando tubérculos de ferrugem (incrustações) no interior da tubulação, a velocidade de propagação real é menor que a teórica. Este fenômeno ocorre devido à diminuição do módulo de elasticidade (E) aparente do tubo.

3.3.3 Meios de propagação do som

O som é uma onda mecânica, e por isso não pode se propagar no vácuo. Ou seja, a propagação do som ocorre somente nos meios materiais. No dia a dia é mais comum presenciar o som se propagando no ar, mas nada impede que existam ondas sonoras nos líquidos e nos sólidos. Aliás, o ar não é um bom meio de propagação do som. Apesar de fazer com que o som se desloque a uma velocidade relativamente alta de aproximadamente 340 m/s, os líquidos permitem que as ondas

se propaguem de forma mais rápida. Pode-se perceber isso quando se coloca a cabeça dentro da água e ouve-se o ruído do motor de um barco com extrema nitidez. Na água, o som se propaga com uma velocidade de aproximadamente 1450 m/s. Os sólidos também são meios de propagação eficientes. Cabe salientar que nesses meios, além da propagação longitudinal, responsável pela sensação auditiva, existe também um componente transversal de propagação sonora. Nos sólidos, o som se propaga de maneira mais veloz do que nos líquidos. Para se ter uma ideia, a velocidade do som no ferro é de aproximadamente 5130 m/s.

O efeito da compressibilidade (A), (equação 6), ou elasticidade (E), (equação 7), de um corpo é a característica pela qual o mesmo sofre variações de volume sobre a ação de variações da pressão externa.

$$A = \frac{1}{v} \times \frac{dv}{dp} \quad (6)$$

$$E = -v \frac{dv}{dp} \quad (7)$$

onde:

A = compressibilidade em Kgf/cm²;

V = massa específica em kg/m³;

p = pressão em N/m²;

E = elasticidade do material em Pascal.

Nos casos de tubulações que estejam transportando líquidos sob pressão, essa velocidade sofre influência das diferenças das densidades entre o material do tubo e do líquido transportado. Nesses casos, a velocidade de propagação do ruído será calculada pela média dos fatores que estão envolvidos no processo, seguindo a seguinte equação (8)

$$C = \sqrt{E.v} \quad (8)$$

onde:

C = velocidade média de propagação do ruído em m/s;

E = elasticidade do material em Pascal;

v = velocidade do som em m/s.

A Figura 5 mostra a relação de velocidades do ruído em função do material do tubo e Tabela 1, a velocidade de propagação e distância de percepção do ruído de vazamento por tipo de tubo.

Figura 5 – Relação entre velocidade do ruído e material do tubo (Seba KMT, 2007).

Tabela 1 - Velocidade de propagação e distância de percepção do ruído de vazamento por tipo de tubo - sons conduzidos diretamente nos tubos (Sapporo/Japão, 1994).

Tipo de tubo		Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	Distância de Percepção (m)	Área do orifício do vazamento (mm ²)
Chumbo		13	1130	43 – 58	3,2 – 28
Plástico (PVC)		13	640	29 – 32	3,2 – 28
Ferro fundido	Ponta e bolsa	100	1330	14 – 26	12,3 – 300
	Junta mecânica	100	1320	6 – 12	12,3 – 300
Fibrocimento		100	1110	5 - 11	12,3 - 300

Na maior parte dos casos, os vazamentos estão envolvidos pelo solo circundante, o que acrescenta mais fatores a considerar, que são o tipo de solo, profundidade da rede, tipo de pavimentação, presença de água no solo, entre outros.

Todos esses fatores levam a uma refração do som, que obedece às leis da refração ondulatória, cujo fenômeno que caracteriza o desvio sofrido pela frente de onda, que geralmente ocorre, quando ela passa de um campo ondulatório (por exemplo, tubos metálicos ou plásticos) a outro de elasticidade diferente, (por exemplo, solo, pavimento).

Para a detecção de vazamentos, ao passar de um campo (meio) para outro, a característica do som que se mantém é a sua altura ou frequência (F); assim, tanto o comprimento de onda (λ) como sua velocidade de propagação (v) são diferentes em cada campo ondulatório (equação 9).

$$F = v_1/\lambda_1 = v_2/\lambda_2 = v_3/\lambda_3 = \dots v_n/\lambda_n \quad (9)$$

Outro efeito importante dos sons dos vazamentos é o efeito Doppler, pois durante a utilização dos geofones, esse efeito é utilizado na determinação do vazamento. Tal fenômeno se dá em função da variação da frequência de som recebido por um

observador quando há um movimento relativo entre o mesmo e a fonte do som ou quando o meio se desloca sem que haja movimento relativo observador-fonte.

No caso mais geral, as direções de movimento fonte-observador são oblíquas entre si, mas pode-se verificar facilmente que somente as componentes relativas (aquelas que estão na direção fonte-observador) entram no cálculo.

Levando-se em consideração as seguintes variáveis:

U = velocidade do som em relação à fonte = constante (m/s);

V_{ar} = velocidade do ar em relação à fonte = constante (m/s);

V_{ob} = velocidade do observador em relação à fonte (m/s);

V_f = velocidade da fonte em relação ao observador (m/s);

F_{ap} = frequência aparente do som, percebida pelo observador (Hz);

F_{real} = frequência real do som emitido pela fonte (Hz).

Em qualquer caso, será utilizada a equação (10):

$$V_x = u \cdot \sin p \quad (10)$$

No caso dos sons do vazamento, a fonte do som se mantém em repouso e a movimentação é feita em sua direção com o observador movimentando-se com uma velocidade V_{ob} em relação ao meio. Para tal observador, a velocidade aparente é definida pela equação (11).

$$V = (u - V_{ob}) \quad (11)$$

e a frequência terá o valor relativo dado pela equação (12):

$$F_{ap} = F_{real} \cdot (u - V_{ob}) / u \quad (12)$$

Os ruídos na faixa de frequência de 0 a 800 Hz são pouco absorvidos pelo solo, mas ruídos com faixas de frequência superiores a 800 Hz são bastante absorvidos.

Os ruídos são absorvidos aproximadamente na proporção inversa do quadrado da profundidade, ou seja, para o mesmo ruído de vazamento, a intensidade que atinge

a superfície será quatro vezes menor se a profundidade for duplicada. Na Figura 6, pode ser observada em detalhes e em diferentes tipos de materiais a influência do solo na propagação do som do vazamento até a superfície.

Figura 6 - Influência do solo na transmissão do ruído (Seba KMT, 2007).

A taxa de amortecimento do ruído de vazamento varia de tubo para tubo aproximadamente na proporção inversa da distância entre o ponto do vazamento e o ponto da detecção. Em geral um tubo com módulo de elasticidade (E) alto implica numa menor taxa de amortecimento.

Um tubo com diâmetro grande tem uma alta taxa de amortecimento. Em particular o ruído de vazamentos em tubos com diâmetro de 1000 mm ou mais é rapidamente absorvido. A taxa de amortecimento na parte curva dos “tês” e curvas de 90° dos tubos é ligeiramente mais alta do que nos trechos retos. A taxa de amortecimento nas partes curvas dos cruzamentos de tubos (cruzetas) é bastante alta em relação aos trechos retos.

A Figura 7 exemplifica a influência do tipo material na propagação do som em função de sua frequência.

Figura 7 - Influência do material do tubo na transmissão do ruído (Seba KMT, 2007).

A Tabela 2 apresenta a tendência de propagação do ruído de vazamento em função das características das tubulações e da distância de propagação.

Tabela 2 – Tendência de propagação do ruído do vazamento nas tubulações (Sapporo/Japão, 1994).

Características da tubulação	Distância de propagação	
	Longa	Curta
Diâmetro	Pequeno	Grande
Tipo de material	Ferro fundido, aço, fibrocimento, Chumbo, aço inoxidável	Polietileno e plásticos (PVC)
Idade	Tubos novos (sem incrustação)	Tubos velhos (com bastante incrustação e alto grau de corrosão)
Juntas	Soldada e junta de chumbo	Junta de borracha
Ruído do vazamento	Faixa de baixa frequência	Faixa de alta frequência

4 EQUIPAMENTOS PARA DETECÇÃO ACÚSTICA DO RUÍDO DE VAZAMENTO

A metodologia para a detecção acústica foi introduzida no Brasil na década de 70, quando se iniciou a utilização dos primeiros equipamentos denominados geofones na detecção de vazamentos não visíveis.

Inicialmente foram utilizados geofones mecânicos, com os trabalhos de detecção efetuados no período noturno, onde os ruídos urbanos apresentam menor intensidade as pressões das redes são maiores, possibilitando então uma melhor percepção dos ruídos dos vazamentos por parte dos operadores. Entretanto por ser um trabalho noturno, inviabilizava o acesso aos cavaletes dificultando a visualização de possíveis vazamentos, violações e irregularidades nos mesmos, bem como em caixas de válvulas, etc.

Houve significativa evolução dos equipamentos, principalmente eletrônica, com a incorporação das mais recentes inovações tecnológicas, além de uma grande soma de estudos no seu projeto e construção, permitindo assim que os trabalhos possam ser efetuados no período diurno, o que agrega valor aos trabalhos de pesquisa acústica.

Os equipamentos normalmente utilizados nas pesquisas acústicas de vazamento detectam sons na faixa de frequência de 80 Hz a 5000 Hz, com exceções que atingem níveis maiores de detecção, em torno de 6000 Hz.

Os ruídos de vazamentos detectados nas pesquisas são classificados em três grupos: os sons de alta frequência (superiores a 1000 Hz), média frequência (entre 500 Hz a 1000 Hz) e baixa frequência (até 500 Hz). Essas relações são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação entre ruído de vazamento e as características da tubulação (Sapporo/Japão, 1994).

Parâmetros	Alta frequência	Média frequência	Baixa frequência
Faixa de frequência	Acima de 1000 Hz	500 – 1000 Hz	Abaixo de 500 Hz
Tamanho do orifício do vazamento	Pequeno	Grande	Muito grande
Configuração do orifício de vazamento	Complexo	Simples	Simples
Velocidade de escoamento no interior do tubo com vazamentos	Muito alta	Baixa	Muito baixa
Diâmetro do tubo	Pequeno	Médio	Grande
Material do tubo	Aço inoxidável e aço	Ferro fundido, fibrocimento, plástico (PVC) e polietileno.	
Distância	Próxima	Longe	Muito longe
Pressão da água	Alta	Baixa	Muito baixa

Nas faixas de frequência em que os equipamentos para detecção acústica de vazamentos não visíveis são utilizados, além dos sons do vazamento, outros sons são percebidos e influenciam nos trabalhos de pesquisa.

Esses sons não necessariamente são confundidos com sons de vazamentos, mas podem, em muitos casos, dificultar sobremaneira o discernimento, por parte dos operadores dos equipamentos, na confirmação ou não de um ponto suspeito.

A Figura 8 mostra como essas influências são caracterizadas, indicando as capacidades dos equipamentos básicos utilizados na pesquisa acústica e as frequências dos vazamentos em diversos tipos de materiais geralmente utilizados em redes de abastecimento de água, bem como as de vários ruídos comuns encontrados durante os trabalhos. Nota-se que grande parte dos ruídos mais comuns está bem dentro da faixa de frequências dos ruídos dos vazamentos,

podendo dificultar os trabalhos de detecção de vazamentos com os equipamentos básicos, mas não necessariamente esses ruídos podem ser confundidos com vazamentos.

Figura 8 – Faixa de percepção dos equipamentos de detecção de vazamentos e frequências de sons, incluindo ruídos de vazamentos (Sapporo/Japão, 1994).

Os equipamentos básicos para a detecção de vazamentos por método acústico são divididos em duas categorias:

- Principais;
- Auxiliares;

Os equipamentos serão apresentados na ordem de sua utilização em campo.

4.1 Equipamentos principais

Os equipamentos são considerados como principais quando utilizados diretamente no apontamento do vazamento (ABENDE, 2005).

4.1.1 Hastes de escuta mecânica e eletrônica

A haste de escuta é uma importante ferramenta na detecção de vazamentos não visíveis, pois permite agilizar de modo significativo o trabalho de prospecção dos mesmos. É utilizada para se obter um primeiro mapeamento indicativo de ocorrência de vazamentos, que serão confirmados posteriormente através do uso de geofone, correlacionador de ruídos e barra de perfuração. A sua faixa de operação situa-se entre as frequências de sons de 200 a 1500 Hz. Em geral, detecta com mais facilidade vazamentos na faixa de 600 a 800 Hz.

Seu princípio de funcionamento baseia-se no contato direto de uma barra metálica com pontos das redes de abastecimento, como por exemplo, cavaletes, registros hidrantes, ventosas, etc., captando o som e vibrações produzidas pelos vazamentos e transportando-os a um amplificador existente na outra extremidade da barra metálica, permitindo ao operador a percepção da existência de vazamentos numa determinada área.

Esses amplificadores podem ser mecânicos, com membrana vibratória, ou eletrônicos, onde a membrana é substituída por um amplificador eletrônico e fones de ouvido. Algumas das hastes eletrônicas possuem mostradores digitais e filtros de frequência, ampliando sua capacidade de captação.

As principais vantagens das hastes mecânicas são seu baixo custo de aquisição, manutenção e facilidade de operação. Sua desvantagem é a menor faixa de frequência de operação. As hastes eletrônicas têm como vantagem uma melhor capacidade de captação dos ruídos dos vazamentos, e tem como desvantagem um

custo alto de aquisição e manutenção, bem como manuseio mais complexo (ABENDE, 2005).

A Figura 9 apresenta os principais componentes de uma haste de escuta mecânica, com destaque para o amplificador mecânico.

Figura 9 – Haste de escuta mecânica (Sapporo/Japão, 1994).

A Figura 10 apresenta a haste de escuta, com detalhes do acabamento do amplificador, que possui uma almofada de borracha para melhor adaptação equipamento ao ouvido.

Figura 10 - Detalhe do amplificador mecânico (ZANIBONI, 2001).

A Figura 11 apresenta o modo de utilização da haste de escuta, neste caso sendo aplicada a um cavalete.

Figura 11 - Utilização da haste de escuta mecânica (ZANIBONI, 2001).

A Figura 12 apresenta um modelo de haste de escuta eletrônica. Neste caso a barra metálica tem comprimento menor, que dificulta sua utilização em áreas que possuam pontos de contato distante do alinhamento predial (ex. cavaletes).

Figura 12 - Haste de escuta eletrônica (ABENDE, 2005).

4.1.2 Geofones eletrônicos e mecânicos

Os geofones têm como princípio básico de funcionamento a amplificação dos ruídos produzidos pelos vazamentos, captando-os nas várias frequências possíveis e tornando-os perceptíveis aos seres humanos, possibilitando dessa maneira a facilitação da localização dos vazamentos existentes. Observa-se que a designação “geofone” dada a este equipamento no Brasil não é a mais correta, sendo que esse equipamento é conhecido internacionalmente como *leak detector* (detector de vazamentos) ou *ground micro phones* para designá-lo.

Os geofones mecânicos (Figura 13) são equipamentos simples, tendo como princípio de funcionamento a ampliação do som dos ruídos dos vazamentos através de um par de amplificadores mecânicos usados como sensores no contato com o solo, consistindo de uma base metálica, uma membrana vibratória, condutores plásticos e de auriculares, muito semelhante a estetoscópios. Como a haste de escuta, sua faixa de operação situa-se entre as frequências de sons de 200 a 1.500 Hz. Em geral, detecta com mais facilidade vazamentos na faixa de 600 a 800 Hz.

Acima: maleta e geofone mecânico

Ao lado: detalhe das sapatas - amplificadores mecânicos

Figura 13 – Geofone mecânico (ZANIBONI, 2001).

Sua principal vantagem, quando comparado ao geofone eletrônico, é o custo de aquisição baixo, permitindo que pequenos municípios e empresas prestadoras de serviços possam executar um trabalho simples de detecção de vazamentos.

Suas desvantagens são: a dificuldade de manuseio, devido ao peso elevado, não possuir controle de volume, que permite que os ruídos alcancem níveis que levam a fadiga dos operadores após algum tempo de utilização, que varia de acordo com a capacidade de cada um, além da pequena faixa de frequências capaz de captar, exigindo operadores com muitos anos de experiência para a obtenção de resultados confiáveis.

Os geofones eletrônicos são equipamentos que se baseiam no mesmo princípio, porém bem mais sofisticados, possuindo um sensor (transdutor) tipo microfone para contato com o solo, protegido para suportar até algum contato direto com água, um cabo de ligação para um amplificador e fones de ouvido.

Um transdutor é um dispositivo que transforma um tipo de energia em outro tipo de energia, utilizando para isso um elemento sensor que recebe os dados e os

transforma. Por exemplo, o sensor pode traduzir informação não elétrica (velocidade, posição, temperatura, pH) em informação elétrica (corrente, tensão, resistência). O transdutor tipo microfone é um dispositivo que converte vibrações na gama audível (20Hz-20kHz), seja no ar, água ou num material sólido, numa forma de onda elétrica.

Na maioria dos microfones em uso as ondas sonoras são convertidas em vibrações mecânicas através de um diafragma fino e flexível e em seguida convertidas em sinal elétrico através de bobina móvel ou por carga e descarga de um condensador.

No caso de microfones de condensador estes necessitam de uma tensão de alimentação contínua, chamada de *phantom power*, que é de fato uma tensão de polarização. Os sensores ou transdutores estão sujeitos a diversos fenômenos acústicos, do qual se destaca, para efeito de detecção de vazamentos, o efeito de onda sonora.

A passagem de uma onda sonora por um meio fluido origina flutuações da pressão e da velocidade das partículas. É de notar que a intensidade sonora é a potência por unidade de área e pode ser definida como, por exemplo, a potência elétrica, que é o produto da tensão pela corrente. Outras características que são necessárias conhecer desse equipamento são:

Impedância: representa de certo modo a sua resistência interna. Na aproximação mais simples deste conceito percebe-se que nos sensores de baixa impedância, inferior a 600 Ohm, permite a montagem de cabos de grande comprimento (como 100m ou mais) sem perdas de sinal significativo enquanto nos sensores de alta impedância com valores na ordem de 5000 Ohm, em cabos com mais de 3 metros já ocorrem perdas significativas.

Sensibilidade: é a relação entre o nível elétrico de saída do microfone e a pressão sonora incidente. A sensibilidade mede a voltagem que o microfone produz, caracterizando a sua eficiência.

Ruído de fundo: provocado pela resistência da bobina ou da fita, no caso dos sensores dinâmicos; no caso dos sensores de condensador, resulta do ruído térmico das resistências e do ruído eletrônico do pré-amplificador.

Nível máximo de pressão sonora: é o nível de pressão sonora que o sensor admite correspondente a uma distorção harmônica total de 0,5% a 1000Hz.

Os geofones eletrônicos (Figura 14) têm como principal vantagem a possibilidade de trabalharem com uma faixa bem maior de frequências do que os mecânicos, permitindo ampliar de modo significativo a possibilidade de detectar os vazamentos, inclusive com maior precisão de localização do local do vazamento. Alguns desses equipamentos possuem filtros, que permitem adequar a pesquisa nas faixas de frequências mais adequadas às condições existentes.

A capacidade de filtragem desses equipamentos baseia-se no aumento da sensibilidade do equipamento à intensidade das frequências a serem utilizadas e da diminuição das frequências que podem interferir na escuta do vazamento, em função das informações relativas ao material, diâmetro e profundidade da rede a ser geofonada (termo utilizado quando do uso do equipamento).

Outras vantagens são o menor peso e facilidade de manuseio, contribuindo com maior conforto dos operadores e maior rapidez no treinamento de pessoal.

Suas desvantagens são um custo de aquisição e manutenção mais elevado, pois praticamente todos os equipamentos existentes no mercado são importados, além de exigir operadores com um grau de escolaridade maior e manuseio mais cuidadoso (ABENDE, 2005).

Figura 14 – Modelos de geofones eletrônicos e seus componentes (ZANIBONI, 2001).

4.1.3 Correlacionador de ruídos de vazamentos

Este é o equipamento para detecção acústica em operação mais desenvolvido tecnologicamente. Seu princípio de funcionamento é a correlação entre o tempo em que um som de vazamento atinge dois sensores colocados em pontos de contato com componentes das redes (cavaletes, registros, ventosas, hidrantes, etc.), desde que esses pontos de contato apresentem ambos, um ruído do vazamento previamente detectado pelas hastes de escuta, ou seja, o vazamento tem de estar numa área entre os sensores. Consiste basicamente de um conjunto de dois sensores eletrônicos, (transdutores), conectados a dois pré-amplificadores e uma unidade de processamento (processador ou unidade principal), sendo que estes dois últimos podem operar através de rádio transmissão ou por cabos.

Na unidade principal são realizados os processamentos que permitem a determinação do ponto de vazamento, a partir de informações providas dos sensores e de dados de entrada levantados no local na seguinte ordem: material, diâmetro do tubo e distância entre os sensores. São comparados os sinais recebidos

dos sensores, filtradas as frequências e analisada a parte do ruído que é comum aos dois sensores.

A unidade principal incorpora as seguintes características:

- Possibilidade de uso de 2 ou mais pré-amplificadores;
- Transmissão: rádio ou cabo;
- Frequência UHF;
- Faixas de filtros variadas (alta e baixa) que permitem a eliminação de ruídos externos indesejáveis;
- Faixa de tempo de retardo (em milisegundos: ms);
- Materiais dos tubos (mais comuns) na memória;
- Variação de tubos na mesma correlação: diversos tipos de materiais e/ou tamanhos por teste.

A energia é proveniente de baterias ou pilhas.

Pré-amplificador é o estágio de um amplificador de áudio que recebe o sinal da fonte sonora de baixo nível, tal como o sensor ou transdutor e corrige-o, entregando em sua saída um sinal suficientemente elevado para excitar o amplificador de potência.

Amplificador de potência é o estágio de um amplificador de áudio que eleva o sinal de áudio fornecido pelo pré-amplificador a um nível de tensão e impedância adequados para permitir o funcionamento dos equipamentos.

Fones de ouvido ou auscultadores (chamados ainda de auriculares e headphones) são pequenos alto-falantes para audição direta na cabeça do ouvinte. A finalidade é proporcionar uma audição privada, quando não se puder ouvir sem por outros

meios, ou ainda minimizando as interferências de outras fontes sonoras que estejam sendo reproduzidas simultaneamente no mesmo recinto ou local .

A teoria que envolve este aparelho baseia-se no princípio físico da diferença de velocidade de propagação dos sons através dos materiais que constituem as redes de abastecimento, bem como de seu diâmetro, permitindo inclusive que nos trechos de rede onde está sendo aplicado possa existir tubulações com materiais, diâmetros e extensões variadas.

Quando se assume a situação mais simples de um único tipo de material e um único diâmetro no trecho pesquisado, no tempo necessário para ser captada por um dos sensores, a vibração ou som do vazamento terá percorrido a mesma extensão (L), em ambas as direções.

Uma característica importante dos correlacionadores de ruídos é a possibilidade de executar sua operação em trechos onde existem vários tipos de materiais e/ou diâmetros entre os sensores. Essa característica fica evidente quando é feita uma correlação, por exemplo, utilizando-se como ponto de contato um cavalete de um imóvel, o trecho de rede entre esse ramal e outro ramal, com seu respectivo cavalete.

Nesse caso, pode existir até três (ou mais) tipos de materiais e diâmetros diferentes. O equipamento irá, através do processador, calcular um “tubo médio”, que servirá de parâmetro para os cálculos das distâncias.

A partir do momento em que o sinal atingiu o sensor mais próximo, o correlacionador determina o intervalo de tempo (T_d) até o mesmo ruído atingir o sensor oposto (tempo de retardo ou “Time delay”).

Para o cálculo da posição do vazamento (equação 13), a distância “D” entre os dois sensores deve ser conhecida, pois será a base de referência de cálculo para o correlacionador. Essa medida é obtida a partir de medições em campo. Também deve ser conhecida a velocidade (v) da propagação do som através do tubo.

Essa é uma característica que varia, entre outras coisas, de acordo com os materiais e diâmetros das tubulações, sendo que os correlacionadores já possuem esses dados armazenados na memória, para os materiais e diâmetros mais frequentemente encontrados. A Figura 15 exemplifica esse cálculo básico e o modo de operação do correlacionador de ruídos de vazamento.

Figura 15 – Dados utilizados pelo correlacionador de ruídos de vazamento.

(SUMAN, 1996).

Observa-se pela figura 15 que:

$D = N + L + L$ e a distância $L = (D - N) / 2$. Como a distância é o produto da velocidade pelo tempo, obtêm-se: $N = v \times Td$, resultando na equação (13), que resume o cálculo básico operado pelo Correlacionador.

$$L = D - \{(v \times Td)\} / 2 \quad (13)$$

As principais vantagens desse equipamento são: O alto grau de precisão alcançado na locação dos vazamentos, a possibilidade de utilização em ambientes onde os ruídos externos interferem na detecção por outros métodos acústicos, a não influência da profundidade na locação do vazamento, pois para a operação do equipamento é necessário que os sensores estejam em contato direto com algum elemento do sistema de abastecimento, eliminando esse parâmetro, além de maior sensibilidade e versatilidade.

Suas desvantagens são: alto custo de aquisição e manutenção, necessidade de um cadastro de redes bastante detalhado e correto, que contenham as informações necessárias de posição, diâmetro e composição das redes, nem sempre existentes ou disponíveis, principalmente nas pequenas empresas municipais e mesmo estaduais, técnicos altamente especializados em seu manuseio, tempo de instalação e tempo de operação relativamente longo e trabalhoso, diminuindo a quantidade de áreas que podem ser percorridas pelas equipes de pesquisa e detecção de vazamentos não visíveis (ABENDE, 2005).

Existem diversos modelos de correlacionadores de ruídos de vazamento, inclusive modelos que apresentam vários sensores e que, na teoria, podem realizar vários conjuntos de operações simultâneas. Esses modelos ainda não atingiram o estado de funcionalidade que permita uma boa confiabilidade, quer no seu manuseio, muito complexo, quer na confiabilidade de seus resultados. A Figura 16 demonstra o modelo tipo, com sua constituição básica, comum a todos os correlacionadores de ruídos.

- Componentes:**
- 1- Unidade Principal ou Processador;
 - 2- Pré-amplificadores;
 - 3- Sensores ou transdutores;

Figura 16 – Componentes do correlacionador de ruídos de vazamento (ZANIBONI, 2001).

4.2 Equipamentos auxiliares

Os equipamentos auxiliares não são utilizados diretamente na localização propriamente dita, mas são imprescindíveis nos trabalhos de detecção de vazamentos não visíveis, em função das peculiaridades existentes em cada trabalho (ABENDE, 2005).

Serão apresentados na provável ordem de aplicação, visto que nem sempre existe a necessidade da utilização de todos os equipamentos na realização dos trabalhos de detecção de vazamentos não visíveis.

4.2.1 Locador de massa metálica

Este instrumento é utilizado para localização de tubulações metálicas enterradas, por meio da aplicação da variação do excesso de corrente elétrica. Seu princípio de funcionamento baseia-se na passagem de um fluxo de corrente alternada por uma bobina, gerando um campo magnético. Simultaneamente, quando uma peça metálica enterrada encontra o mesmo campo magnético, um excesso de corrente é gerado na mesma e muda a resistência da bobina. A variação deste circuito é detectada pelo circuito construído neste instrumento e amplificado, de modo a permitir a localização de peças metálicas.

Esse princípio é aplicado pelo locador de massas metálicas, que normalmente compõem-se de um conjunto de medição e controle e uma antena ou detector.

Os detectores de metais utilizam campos eletromagnéticos para realizar a detecção de metais, ferrosos e até mesmo os não ferrosos. Tais equipamentos geralmente possuem ajustes de níveis de sensibilidade, para determinar o volume de metal a ser detectado e alguns possuem até mesmo a capacidade de selecionar o tipo do metal.

Entre as principais aplicações dos detectores de metais, estão as de uso bélico, para detecção de minas, tubulações e outros.

A Figura 17 ilustra os componentes de um modelo de locador de massa metálica mais comumente usado nos trabalhos de detecção de vazamentos não visíveis.

Figura 17 – Locador de massa metálica (ZANIBONI, 2001).

As peças metálicas que usualmente requerem sua aplicação são tampões cobertos por pavimentação ou terra, caixas de registros, ferramentas perdidas ou enterradas, metais ou marcos de propriedades e encanamentos, ou seja, todo objeto cuja condutibilidade seja maior que o meio em que se encontra (ABENDE, 2005).

Sua principal vantagem é possibilitar a locação de peças que em inúmeros casos estão cobertas, evitando uma procura desnecessária e na maioria das vezes com alto custo, agilizando assim o trabalho de detecção de vazamentos. Não requer muita especialização do operador, bastando um rápido treinamento para conseguir-se uma boa operação do mesmo.

Suas desvantagens são: alto custo de aquisição, indicação de locação errônea em locais com grande quantidade de resíduos metálicos.

4.2.2 Locador de tubulação metálica

Devido ao sério problema existente quanto aos cadastros de redes de distribuição, nem sempre é possível ter sua posição com a exatidão necessária para a execução da detecção de vazamentos não visíveis. Para tanto, pode ser utilizado em

tubulações metálicas um locador apropriado, que tem como princípio de funcionamento a geração de uma corrente elétrica com voltagem conhecida, gerando um campo magnético na tubulação e posterior captação por uma unidade receptora. Do mesmo modo que o locador de massa metálica, esse equipamento consegue superar obstáculos, tais como, camadas de terra e pavimento onde a tubulação esteja enterrada, gerar campo magnético na tubulação e seu receptor consegue captá-lo.

Os principais métodos de locação de tubulações metálicas são:

Por indução

Nos locadores de tubulação metálica, é utilizada a indução eletrostática, que ocorre quando um corpo eletrizado redistribui cargas de um condutor neutro, no caso as tubulações de aço ou ferro fundido. O corpo eletrizado, o indutor, é colocado próximo ao corpo neutro, o induzido, e isso permite que as cargas do indutor atraiam ou repelem as cargas negativas do corpo neutro, devido a atração e repulsão entre as cargas elétricas. A distribuição de cargas no corpo induzido mantêm-se apenas na presença do corpo indutor. Para eletrizar o induzido deve-se colocá-lo em contato com outro corpo neutro e de dimensões maiores, antes de afastá-lo do indutor. A indução eletrostática é o processo de carregar eletricamente um objeto colocando-o no campo elétrico de outro objeto carregado, às vezes também é chamada de indução elétrica.

Um campo elétrico E é o campo de força provocado por cargas elétricas (elétrons, prótons ou íons) ou por um sistema de cargas. Cargas elétricas num campo elétrico estão sujeitas a uma força elétrica.

A relação entre a força elétrica F e a carga de prova Q é dada pela equação (14)

$$E = \frac{F}{|q|} \quad (14)$$

O campo elétrico é uma grandeza vetorial, portanto é representado por um vetor. Para determinar a sua presença, coloca-se uma carga de prova no meio. Se esta ficar sujeita a uma força, diz-se que a região em que a carga se encontra, está sujeita a um campo elétrico.

O vetor campo elétrico tem sempre a mesma direção da força a que a carga está sujeita, e o sentido é o mesmo da força, se a carga de prova estiver carregada positivamente ($Q > 0$), ou contrária à força, se a carga for negativa ($Q < 0$). O módulo é calculado, utilizando a equação (15) da seguinte forma:

$$E = \frac{F}{|q|} \quad \text{onde} \quad |F| = \frac{K|Q||q|}{d^2} \quad (\text{Lei de Coulomb})$$

Substituindo $F \Rightarrow E = \frac{K \cdot |Q|}{d^2}$ (15) (K é a constante dielétrica do meio)

Nota-se, que o campo elétrico gerado por uma carga é diretamente proporcional ao seu valor, e inversamente proporcional ao quadrado da distância.

Por condução

O princípio utilizado nesse modo de locação de tubulações metálicas é baseado na condutividade elétrica. A condutividade elétrica é usada para especificar o caráter elétrico de um material. Ela é simplesmente o recíproco da resistividade, ou seja, inversamente proporcionais e é indicativa da facilidade com a qual um material é capaz de conduzir uma corrente elétrica.

Outros métodos aplicáveis são os de bobina de indução e o de detecção de cabo energizado

Através do método por indução, o transmissor vai sendo posicionado perpendicularmente à tubulação enquanto a unidade receptora é também deslocada lentamente na direção mais provável da perpendicular ao caminhamento da

tubulação. Em outras palavras, a eficiência é maior quando o transmissor e o receptor estão posicionados paralelamente e sobre a posição da tubulação. O operador faz as leituras de intensidade do campo magnético que será máxima no ponto exato sobre a tubulação. Nesse método não há necessidade de ponto de contato exposto. Alguns equipamentos dispõem de recursos técnicos para a leitura da profundidade da tubulação pesquisada, contribuindo para a atualização ou até a confecção de cadastros dos sistemas de distribuição de água.

Para o método de locação por condução, (também chamado método direto), o transmissor é conectado diretamente ao objeto metálico a ser locado ou a alguma peça ligada a ele (desde que seja metálica, tais como torneiras ligadas a ramais de ferro, registro, ventosas, válvulas de incêndio ou a própria tubulação). Este método reduz as interferências causadas por cercas metálicas e é indicado para a locação a grandes distâncias. (ABENDE, 2005)

Principais desvantagens: alto custo de aquisição e manutenção, perda de sinal em algumas situações, principalmente quando utilizado o método da indução e interferências de cabos de alta tensão em postes.

Suas vantagens são: a possibilidade de locar redes metálicas com relativa facilidade, contribuindo com a correção e confecção de cadastros a um custo baixo e facilidade de manuseio, constitui sua principal vantagem.

A Figura 18 ilustra os principais componentes de um locador de tubulação metálica.

Figura 18 – Locador de massa metálica (ZANIBONI, 2001).

Na Figura 19, pode ser observado como é utilizado um locador de tubulação metálica para locação de tubulação metálica por indução.

Figura 19 - Método de locação de tubulação metálica por indução
(Sapporo/Japão, 1994).

Na Figura 20, o mesmo equipamento é utilizado para local tubulações metálicas através do método por condução (ou método direto).

Figura 20 – Método de locação de tubulação metálica por condução
(Sapporo/Japão, 1994).

Na Figura 21, o mesmo equipamento é utilizado para aplicar o método da bobina de indução.

Figura 21 - Método de locação de tubulação por bobina de indução
(Sapporo/Japão, 1994).

4.2.3 Locador de tubulação não metálica

Para tubulações não metálicas, o método de localização a ser utilizado baseia-se no princípio da capacidade da água sob pressão transmitir vibrações sonoras. As frequências de ressonância das tubulações dependem do tipo de material e do tamanho do tubo.

Ressonância é o fenômeno físico em que se registra a transferência de energia de um sistema oscilante para outro, quando a frequência do primeiro coincide com uma das frequências próprias do segundo.

Os equipamentos normalmente são constituídos de elementos transmissores, receptores e acessórios, onde um oscilador gera um sinal que é transmitido à água sob pressão, por um vibrador instalado sobre uma peça metálica do sistema de abastecimento de água (hidrante, por exemplo).

Um sensor de solo capta este sinal que é passado para um amplificador que registra a sua intensidade através de sons (fones de ouvido) ou através de indicadores visuais. Sobre a tubulação a ser localizada a intensidade do som deverá ser máxima. Este equipamento pode ser utilizado também para tubulações metálicas (ABENDE, 2005).

Seu alto custo de aquisição, manutenção e complexidade de operação são suas principais desvantagens, além de ser volumoso e requerer muito tempo para sua instalação e reposicionamento. Ao observá-lo em detalhes (Figura 22), nota-se que esse equipamento é constituído basicamente de uma unidade de geração de vibrações e um geofone para a localização das tubulações.

Ao gerar vibrações, estas se propagam pela tubulação não metálica (e também metálica), permitindo que, com a utilização do geofone eletrônico possa ser localizada a tubulação a ser localizada pelo som da vibração do tubo.

Uma característica interessante é a possibilidade de variar a frequência dessas vibrações à distância, podendo o operador confirmar se o som escutado é aquele produzido pelo equipamento.

Figura 22 – Localizador de tubulação não metálica (Fuji Tecom, 2000).

Em função de seu alto custo desse equipamento, criou-se um equipamento com tecnologia e manuseio simples, mas que permite um trabalho relativamente preciso. Trata-se da VGO (Válvula Geradora de Ondas), que utiliza a pressão da água para criar um pulso ou golpe, denominado golpe de aríete, que é como se denominam as variações de pressão decorrentes de variações da vazão, causadas por alguma perturbação, voluntária ou involuntária, que se imponha ao fluxo de líquidos em condutos, sendo a intensidade do golpe proporcional à variação da vazão, gerando então um sinal que pode ser detectado com os geofones comuns.

É normalmente instalado nas torneiras dos ramais domiciliares, de modo muito simples (através do rosqueamento do mesmo à torneira), seu tamanho e peso são pequenos e não precisa de ferramentas especiais.

Seu princípio de funcionamento é o de abertura e fechamento de uma válvula de esfera, com mola de tensão variável, que se abre quando a pressão da água atinge seu ponto de máxima tensão, escoando pelo aparelho permitindo a diminuição da pressão que conseqüentemente leva ao fechamento novamente da válvula.

Essa variação é o que cria os golpes na tubulação, que é transmitida a grande distância, permitindo a localização das tubulações pelo ruído produzido. Em alguns casos, tal ruído é tão forte que se torna audível até sem equipamentos especiais.

As vantagens desse equipamento são: baixo custo de aquisição, manutenção e operação, além de pequeno tamanho e peso.

Sua desvantagem são os fortes golpes aplicados nas tubulações, que em alguns casos podem ser danificadas, possibilidade de entupimentos das passagens da água pelos canais internos da válvula, impedindo seu funcionamento e perda de água que passa pela válvula durante sua aplicação. Também permite a localização de tubulações metálicas.

A Figura 23 apresenta um modelo de válvula geradora de ondas, onde é possível notar a simplicidade de sua tecnologia, não envolvendo nenhum componente eletrônico em sua fabricação.

Figura 23 – Válvula geradora de ondas (ZANIBONI, 2001).

4.2.4 Barra de perfuração

Este equipamento (Figura 24) é utilizado na confirmação da existência do vazamento, uma vez locado com os equipamentos de detecção, permitindo uma localização bastante precisa do ponto do vazamento, evitando a abertura de áreas desnecessárias no momento de reparo do mesmo. Podem ser utilizadas em qualquer tipo de pavimento.

Podem ser do tipo perfuratrizes mecânicas ou manuais, quando são feitos pequenos furos na região onde o vazamento foi detectado. Quando a haste é retirada, a umidade que se apresenta na mesma, bem como do material que vem grudado confirma ou não a presença do vazamento na região do furo (ABENDE, 2005).

Suas vantagens são permitir a confirmação da existência do vazamento no ponto detectado sem a necessidade de maiores intervenções, facilidade de manuseio e baixo custo, quando manuais. Quando mecânicas, seu custo, bem como seu manuseio torna-se bem mais complexos, exigindo equipamentos de apoio. Além disso, pode ocorrer que ao serem utilizadas, as mesmas acabem causando um vazamento ao perfurarem a tubulação que estão pesquisando.

Figura 24 – Barra de perfuração (ZANIBONI, 2001).

4.2.5 Trens ou rodas de medição

As trenas ou rodas de medição (Figura 25), são utilizadas para medições de comprimento, amarrações de peças e de posição de vazamentos quando não houver possibilidade de marcação dos mesmos através de outro modo (marcas de tinta, por exemplo). Além disso, são utilizados quando se usa o correlacionador de ruídos.

Figura 25 – Roda de medição (Fuji Tecom, 2000).

4.2.6 Manômetros

Os manômetros são equipamentos utilizados para a medição de pressão.

O mais comum é o Manômetro de Bourdon (Figura 26), que tem como princípio de funcionamento a expansão ou retração de seu mecanismo através da ação pressão da água sobre um tubo arqueado, que movimenta um ponteiro sobre uma escala graduada. É muito utilizado para médias e altas pressões (erros da ordem de 0,5 a 1 %). Sua principal vantagem é o baixo custo de aquisição e manutenção e a facilidade de manuseio. Sua maior desvantagem é a vulnerabilidade às variações de temperatura.

Os manômetros eletrônicos são equipamentos com precisão bem maior, permitindo a variação de escalas de leitura. São de fácil manuseio, mas tem como desvantagem seu alto custo, e a fragilidade de manuseio.

Figura 26 – Manômetro de Bourdon (ZANIBONI, 2001).

5 METODOLOGIA PARA A UTILIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS BÁSICOS DE PESQUISA ACÚSTICA

5.1 Procedimentos iniciais para a utilização dos equipamentos básicos de detecção acústica

A utilização dos equipamentos acústicos inicia-se na área de concentração das equipes de campo, com a inspeção de todos os equipamentos, para a verificação de carga de baterias, (quando cabível), funcionalidade e limpeza.

Para inspeção da haste de escuta mecânica devem ser providenciadas:

Exame da barra metálica, a procura de fissuras ou trincas, bem como a verificação do alinhamento da mesma. Uma barra metálica com problema de alinhamento pode criar dificuldade de operação e dificultar a escuta dos ruídos de vazamentos. Essa operação também é feita para as hastes de escuta eletrônicas.

Verificação do amplificador mecânico, checando a integridade e limpeza da borracha acolchoada que serve de apoio ao ouvido.

Verificação do parafuso de fixação da membrana vibratória (Figura 27), através de chave de fenda. A constatação de folga no aperto do parafuso inviabiliza a utilização do equipamento, pois a membrana perderá a calibração necessária para o melhor desempenho do equipamento, pois esse equipamento não pode ser reapertado de modo aleatório. Caso necessário esse equipamento o equipamento deve ser enviado ao fabricante para a recalibração.

Figura 27 – Amplificador mecânico (ZANIBONI, 2001).

A Tabela 4 apresenta um modelo de checagem para haste de escuta mecânica, apresentando o que deve ser verificado e qual a ação corretiva adequada.

Tabela 4 – Tabela de verificação para haste de escuta mecânica.

Condição de operação	Checagem	Ação corretiva
Barra metálica	Verificar visualmente a limpeza e a existência de fissuras ou trincas	Limpar com pano úmido. Enviar para fabricante para reparo ou troca da barra metálica se constatar fissuras ou trincas
Amplificador mecânico	Escutar em ponto conhecido	Verificar integridade e limpeza da caixa do amplificador mecânico e da borracha acolchoada
Membrana metálica	Verificar aperto do parafuso de fixação	Remeter ao fabricante para reaperto e recalibração

Para inspeção do geofone eletrônico:

Verificar a carga de baterias ou pilhas, ligando o equipamento. Uma observação importante é que os geofones eletrônicos, independentemente do fabricante, só ligam quando se conectam os fones de ouvido. Alguns equipamentos possuem mostrador de nível de carga, permitindo uma avaliação imediata da carga disponível. No caso de equipamentos que não possuam esse acessório, instala-se o sensor e o coloca sobre o solo, acionando o gatilho, para constatar a possibilidade de auscultar do equipamento.

Nesse caso é necessário verificar qual a capacidade de carga de operação do equipamento consultando o manual do fabricante e manter uma ficha de horas de utilização.

Ao constatar que a carga não esteja adequada, recarregar as baterias ou trocar as pilhas.

- Acionar o botão de volume e acionar e manter acionado o gatilho que aciona a capacidade de escuta do equipamento, aumentando ou diminuindo até alcançar o nível de conforto. Esse nível possui caráter individual.
- Ajustar os fones de ouvido, de modo a cobrir totalmente o pavilhão auricular e diminuir a intensidade de ruídos externos.
- Nos equipamentos que possuem capacidade de filtragem de frequências, acionar o dispositivo que efetua essa mudança, abrangendo a gama total dos filtros, visando verificar o seu funcionamento.

A Figura 28 apresenta alguns itens a serem verificados em geofones eletrônicos.

Figura 28 – Exemplo de itens a serem verificados nos geofones eletrônicos (ZANIBONI, 2001).

A Tabela 5 apresenta um modelo de verificação para geofones eletrônicos, apresentando o que deve ser verificado e qual a ação corretiva adequada.

Tabela 5 – Tabela de verificação para geofones eletrônicos (ABENDE, 2005).

Condição de Operação	Pré-checagem	Ação Corretiva
Ligar o aparelho	Verificar se a bateria ou pilha do geofone está com carga	Trocar a pilha ou recarregar a bateria do geofone
Eliminar os ruídos desagradáveis	Acionar o botão de controle de volume até o ponto onde serão eliminados os ruídos desagradáveis à operação	Verificar se os fones de ouvido e o acionador (gatilho) estão bem conectados ao amplificador
Auscultar o ruído	Colocar os fones de ouvido e instalar o sensor sobre o solo, pressionar o acionador (gatilho) e auscultar o ruído	Verificar se os fones de ouvido e o acionador (gatilho) estão bem conectados ao amplificador
Regular os filtros de frequência (em alguns equipamentos)	Acionar os filtros, quando existirem, na faixa de baixa frequência e na faixa de alta frequência, ouvir o ruído filtrado em cada combinação de filtros	Verificar se os fones de ouvido e o acionador (gatilho) estão bem conectados ao amplificador

Para inspeção do correlacionador de ruídos de vazamentos:

- Verificar a carga das baterias ou pilhas, ligando o equipamento. Em geral, essa verificação é feita através do menu do equipamento. Importante notar que o aparelho é composto por várias partes isoladas e para cada uma delas é importante essa verificação da carga, individualmente.

- Conectar os sensores aos pré-amplificadores, bem como o fone de ouvido em cada pré-amplificador, verificando se existe a transmissão de som.
- Ligar a unidade principal e colocar o equipamento no modo “trabalho” ou “correlação”, e conectar as duas bases magnéticas dos sensores e girá-las em direções opostas. Neste caso a superfície de cada base magnética deve ser friccionada. Um pico de correlação deve aparecer na tela da unidade principal. Se formar um sinal gráfico bem definido no centro da tela, indica que o correlacionador está em boas condições.
- Instalar o fone de ouvido na unidade principal e verificar se o som está alcançando os mesmos. A principal característica do uso do fone de ouvido instalado nessa condição é que cada lado do fone recebe o som de um determinado sensor, garantindo que ambos estão transmitindo e durante a utilização em campo, que o som do vazamento pesquisado está alcançando os dois sensores, permitindo a correlação.

Na Figura 29 pode ser observado um exemplo de um pico de correlação, que deve surgir quando da checagem do equipamento.

Figura 29 – Exemplo de pico de correlação (ZANIBONI, 2001).

A Tabela 6 apresenta um modelo de verificação para correlacionadores de ruídos de vazamento, apresentando o que deve ser verificado e qual a ação corretiva adequada.

Tabela 6 – Tabela de verificação para correlacionadores de ruído de vazamentos.

Condição de operação	Pré-checagem	Ação corretiva
Ligar o aparelho	Verificar a carga das baterias ou pilhas através do menu do equipamento, sendo importante essa verificação da carga, em cada componente, individualmente	Carregar as baterias ou pilhas
Conectar os sensores e os fones de ouvido aos pré-amplificadores	Verificar a transmissão do som dos sensores aos pré-amplificadores	Verificar se os sensores e o fone de ouvido estão bem conectados aos pré-amplificadores
Ligar a unidade principal e colocar o equipamento no modo “trabalho” ou “correlação”	Conectar as duas bases magnéticas dos sensores e girá-las em direções opostas	Verificar as conexões dos sensores aos pré-amplificadores. Verificar o nível da transmissão de sinal de rádio entre os componentes
Instalar o fone de ouvido na unidade principal e verificar se o som está chegando aos mesmos	Conectar o fone de ouvido à unidade principal e escutar se o som está sendo ouvido nos dois fones	Verificar as conexões o fone de ouvido. Verificar o nível da transmissão de sinal de rádio entre os componentes e carga das baterias dos pré-amplificadores

Para inspeção dos equipamentos auxiliares:

- Para os demais equipamentos, as precauções são aquelas indicadas e recomendadas por seus fabricantes, pois apresentam características operacionais diversas.

Ainda nessa fase, é importante checar os Equipamentos de Proteção individual (EPI) e Coletiva (EPC), verificando suas condições e adequações ao trabalho a ser executado.

O veículo a ser utilizado também deve ser verificado, com a inspeção de combustível, óleo lubrificante, lâmpadas de sinalização, faróis, pneus, documentação, estado geral e limpeza.

5.2 Avaliação em campo dos dados cadastrais da rede de distribuição de água

A partir das plantas cadastrais, no caso de dúvidas ou falta de informações, é verificado em campo, para cada uma das áreas de atuação, o grau de exatidão das informações disponíveis e corrigidas as imperfeições constatadas.

Para esses serviços são utilizados equipamentos especiais para a localização das tubulações e peças especiais (detector de tubulação metálica, detector de metais e detectores de tubulações não metálicas), tais como registros, válvulas e tampões encobertos, resultando elementos para a atualização dos cadastros e permitindo uma pesquisa de vazamentos com precisão.

5.3 Pesquisa acústica em válvulas, hidrantes e cavaletes

Após a determinação das condições de campo, inicia-se a fase de localização de vazamentos com a utilização dos equipamentos principais já descritos.

Neste procedimento, utiliza-se a haste de escuta, aplicando-a em válvulas, hidrantes e cavaletes, onde são verificadas as possíveis existências de vazamentos. Como esses equipamentos detectam as vibrações emitidas por possíveis vazamentos, têm-se então os pontos denominados como pontos suspeitos, que serão posteriormente verificados por outros equipamentos.

A velocidade do trabalho de detecção de vazamentos não visíveis com pesquisa acústica é aumentada, pois restringe o uso dos equipamentos mais sofisticados em áreas já pré-determinadas na pesquisa com as hastes de escuta.

Como essa pesquisa exige o contato com alguma parte da rede de distribuição, é denominada pesquisa direta de detecção.

Por sua eficiência e simplicidade, é repetida em todos os pontos possíveis do sistema, para obter um mapeamento das indicações de ocorrências de vazamentos.

Para trechos de redes que não possuam acessos para a aplicação da haste de escuta superiores a 20 metros, quando as redes são constituídas predominantemente de material plástico, ou 35 metros quando as mesmas são predominantemente de material metálico, bem como em todas as travessias, é aconselhável o uso do geofone ou correlacionador.

Cuidados especiais devem ser observados no manuseio deste equipamento, pois em função da mesma possuir uma ponta afiada na extremidade de contato, pode causar ferimentos ao operador ou a pessoas que porventura forem atingidas inadvertidamente pelo equipamento.

Também não pode ser utilizada como sonda, inserida no solo. Em função das características do equipamento, o operador não pode tocar na barra metálica durante a execução do trabalho.

Na Figura 30, são apresentados os pontos de contato a serem pesquisados com a utilização da haste de escuta, executando-se o levantamento de pontos suspeitos, para posterior confirmação com os outros equipamentos.

Figura 30 – Pesquisa acústica com a utilização da haste de escuta (Sapporo/Japão, 1994).

5.4 Pesquisa de redes e ramais com geofone

Nos trechos onde forem constatadas, através do uso da haste de escuta as evidências da ocorrência de possíveis vazamentos, utilizam-se inicialmente os

geofones, (tanto eletrônicos quanto mecânicos), que captam e amplificam as vibrações provenientes das fugas de água das tubulações sob pressão.

São utilizados percorrendo-se as linhas de distribuição de água e dos ramais prediais, vagarosamente, posicionando o sensor em intervalos de no máximo 1,5 metros, procurando captar as vibrações anormais que revelem a possível presença de vazamentos.

Ao ouvir um ruído suspeito deve ser intensificada a pesquisa nesta área, para definir o ponto com possível vazamento. O ponto onde o som atinge o seu nível máximo corresponderá ao local de maior probabilidade de localização do vazamento. Deve-se ter muito cuidado ao utilizar essa informação, pois a propagação dos sons é influenciada por diversos fatores, que podem levar a interpretações errôneas durante o trabalho.

É importante que o operador esteja de posse das informações pertinentes aos materiais da rede, da profundidade, da pressão, da idade das redes, da existência de interferências, pois a profundidade, por exemplo, é um fator que causa muitas interpretações equivocadas.

Por não exigir contato com as redes de distribuição, essa técnica denomina-se pesquisa indireta de detecção.

Importante observar que cabe aos operadores, através do uso contínuo do equipamento, o aperfeiçoamento auditivo que permita uma maior sensibilidade acústica para a identificação dos sons característicos dos vazamentos detectados.

Entretanto, em áreas de grande ocorrência de interferências, com ruídos externos que possam interferir nas pesquisas, pode ser necessária a realização das pesquisas no período noturno, com condições melhores desenvolvimento do trabalho. Outra informação pertinente é relativa à pressão mínima de trabalho, sendo recomendável que a mesma seja maior ou igual a 150KPa (15 mca).

Na Figura 31 é possível observar como deve ser utilizado o geofone eletrônico de modo correto.

Figura 31 – Pesquisa acústica com a utilização de geofones eletrônicos (ZANIBONI, 2001).

Na Figura 32, observa-se a utilização do geofone mecânico. Nota-se a ausência de qualquer possibilidade de controle de volume, dependendo da habilidade do operador a qualidade dos trabalhos de detecção de vazamentos não visíveis.

Figura 32 – Pesquisa acústica com a utilização de geofone mecânico (ZANIBONI, 2001).

5.5 Pesquisa de redes e ramais com equipamento correlacionador de ruídos de vazamentos

Esta metodologia se apresenta como um dos mais avançados procedimentos para a detecção de vazamentos não visíveis.

O correlacionador apresenta na tela a distância entre o ponto de vazamento e os sensores. Os resultados podem ser impressos, fornecendo, além dos resultados, a síntese dos dados de entrada relativos ao posicionamento dos sensores, tipo e diâmetro das tubulações, etc.

Os resultados são mais precisos à medida que o tempo de retardo (T_d) é reduzido. O uso deste equipamento confere maior exatidão aos serviços de localização de vazamentos e, portanto, além da economia de tempo e recursos, os serviços de reparos causam menos transtornos ao fluxo de tráfego, principalmente em áreas de grande movimentação de veículos e pessoas.

A aplicação do correlacionador de ruídos enquadra-se no caso de pesquisa direta de detecção, pois há contato do equipamento com a rede de distribuição.

No processo de localização de um vazamento utilizando-se o correlacionador de ruídos, algumas vezes é necessário repetir os procedimentos de operação em vários pares de pontos que abranjam o vazamento. Em cada operação definida, o correlacionador, após processar os dados recebidos, indicará na tela a posição do vazamento através de um gráfico com um pico.

O operador deve ter sempre em mente que o simples aparecimento de um pico não significa necessariamente a existência de um vazamento. O pico pode ser devido a uma derivação, válvula estrangulada ou ramal com grande consumo no trecho compreendido entre os sensores. Daí a necessidade de se proceder a uma verificação e interpretação cuidadosa das prováveis interferências, efetuar novas correlações, movendo um ou ambos os sensores de posição, dependendo do caso.

A utilização do correlacionador requer algumas operações iniciais, que visam melhorar a possibilidade do acerto da localização do vazamento. Ao ser escolhido os pontos de contato, o operador deverá inicialmente limpá-los cuidadosamente, bem como a base magnética dos transdutores, de modo que o contato entre as superfícies torne-se o mais íntimo possível.

Depois de instalados os transdutores (Figura 33), deverá instalar os fones de ouvido na unidade principal. O som de cada lado do fone representa o ruído captado por um dos transdutores, garantindo que o equipamento poderá executar a correlação.

Figura 33 – Utilização do correlacionador de ruídos (ZANIBONI, 2001).

5.6 Confirmação em campo da localização de vazamentos

Para locais onde se exige a máxima precisão das informações acerca da localização dos vazamentos, dispõe-se de um acessório de bastante utilidade e simplicidade, a haste de perfuração.

Uma vez assinalado o local do vazamento pelos equipamentos acústicos, crava-se a barra de perfuração.

Também pode ser empregado quando houver discrepâncias, não adequadamente justificadas, entre os resultados obtidos através de diferentes equipamentos.

5.7 Considerações adicionais

É importante ressaltar os seguintes aspectos relativos à pesquisa de vazamentos não visíveis:

- A pesquisa de campo deve ser efetuada em dias e horários de melhor adequação ao tipo de equipamento utilizado. Em regiões onde houver condições desfavoráveis de pressão para a pesquisa (mínimo de 15 mca – 150 KPa), durante vários dias ou onde a pressão não alcance esse valor, os serviços terão de ser executados no período noturno.
- A pesquisa acústica de vazamentos é prejudicada quando a velocidade de água na tubulação ultrapassa 3m/s, devido ao ruído próprio do fluido.
- Em locais onde não existe pavimentação, ou não seja possível a marcação com tinta por qualquer motivo, a locação do ponto do vazamento deverá ser feita pelo croqui de amarração, utilizando-se, de preferência, a soleira mais próxima do vazamento como ponto de amarração.

6 EQUIPAMENTOS AVANÇADOS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS POR MÉTODO ACÚSTICO

6.1 Armazenadores de ruídos – com e sem correlação

Este equipamento é o que de mais moderno existe em detecção de vazamentos não visíveis, com aplicação ainda restrita a poucos países, sendo utilizados no Reino Unido, Estados Unidos, África do Sul e mais recentemente no Brasil.

Os Armazenadores de Ruídos - A.Rs são equipamentos utilizados em sistemas de distribuição de água para promover o monitoramento de ruídos que podem ser provocados por vazamentos.

Esses equipamentos baseiam-se na captação de ruídos, tal como na pesquisa de vazamentos tradicional, na qual através de equipamentos acústicos, escutam-se os ruídos transmitidos pelos vazamentos, que de acordo com a pressão da rede, diâmetro do orifício, solo e material, se propagam com maior ou menor intensidade.

Os armazenadores de ruído registram dois parâmetros distintos:

- Intensidade: parâmetro que indica o pico do ruído do vazamento, ou seja, se aquele ruído apresentar um som de grande intensidade pode ser caracterizado como um ponto de vazamento suspeito;
- Dispersão: parâmetro que indica a amplitude do ruído na rede, ou seja, a capacidade que o som tem de ser espalhar a partir de um ponto de vazamento suspeito, sendo que valores de baixa dispersão associados a valores de alta intensidade indicam grande proximidade do vazamento.

Uma importante característica dos armazenadores de ruídos é que seu princípio de funcionamento é baseado na escuta da intensidade sonora, que é a percepção da amplitude da onda sonora e não em sua frequência, como ocorre nos demais equipamentos de detecção acústica. Frequentemente também é chamada de volume ou pressão sonora.

Como ocorre com muitas outras grandezas, a percepção da intensidade pelo ouvido humano não é linear, mas logarítmica. Isso significa que o ouvido só percebe variações de intensidade como lineares, se as amplitudes variarem exponencialmente. Para facilitar a medição da pressão sonora em relação à percepção auditiva, utiliza-se uma unidade logarítmica: o decibel (dB).

O decibel (dB) é uma medida da razão entre duas quantidades, sendo usado para uma grande variedade de medições em acústica, física e eletrônica. O decibel é muito usado na medida da intensidade de sons.

Uma intensidade I ou potência P pode ser expressa em decibels através da equação(16)

$$I_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad \text{ou} \quad P_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (16)$$

onde I_0 e P_0 são as intensidades e potências de referência.

Se P_{dB} é 3 dB então P é o dobro de P_0 .

Se P_{dB} é 10 dB então P é 10 vezes maior que P_0 .

Se P_{dB} é -10 dB então P é 10 vezes menor que P_0 .

Se P_{dB} é 20 dB então P é 100 vezes maior que P_0 .

Se P_{dB} é -20 dB então P é 100 vezes menor que P_0 .

Após análise destes parâmetros o A.R. armazenará as informações que serão transmitidas à Unidade Receptora (U.R.), através de sinais de rádio, identificando no display, ou por aviso sonoro, a existência de vazamento ou não no trecho pesquisado. Alguns equipamentos permitem a visualização dos dados diretamente na tela da U.R., porém essas informações serão descarregadas em computadores ou “laptops” para geração de planilhas e gráficos.

Geralmente os A.Rs atuam no período noturno, das 2h00 às 4h00, horário onde as vazões e os consumos são menores e as pressões maiores. A programação da leitura dos dados pode ser feita e alterada em vários intervalos, permitindo que a probabilidade de detecção de um vazamento existente torne-se maior e mais eficaz.

Quanto mais curto o tempo entre a programação dos A.Rs e o recebimento dos sinais de ruídos registrados, mais precisos serão os resultados. Os A.Rs podem armazenar medidas de amplitude de até 10 dias e valores de vazamento de até 180 dias sem qualquer perda de dados.

Esses equipamentos podem ser divididos em duas categorias básicas:

- **Armazenadores sem capacidade de correlação**

Os armazenadores de ruídos sem correlação ficam em contato direto com as redes de abastecimento, onde são programados a ligarem em horas e intervalos determinados, em geral à noite, aproveitando ao máximo a vazão menor e o consequente aumento de pressão, quando então “escutam” os ruídos do sistema, a procura daqueles que possam se configurar como vazamento.

O princípio parte do pressuposto que os vazamentos têm ruídos constantes, porém com intensidade irregular. A partir dessa informação, os equipamentos, uma vez “acordados”, começam a auscultar a rede a cada três segundos, podendo esse valor ser modificado em função da área a ser pesquisada ou da precisão desejada na pesquisa. Nesse momento, todos os ruídos que estiverem ao alcance do A.R será armazenado e registrado.

Mesmo os consumos noturnos ou movimento de automóveis em passagem podem ser captados, mas os mesmos não possuem a característica da constância do ruído do vazamento, ou seja, apresentam maior dispersão em relação ao ruído do vazamento propriamente dito. Baseado nessa informação é que se faz o trabalho de análise dos armazenadores de ruídos.

Quando são localizados, dentro do raio de ação do sensor, o mesmo registra a hora, a intensidade e a continuidade do sinal, eliminando aqueles que possam ser uso legítimo, pela sua descontinuidade. Caso o sinal persista, a possibilidade de existir um vazamento na área de influência daquele sensor é grande e a informação fica armazenada na memória do aparelho. Essa memória é recolhida por um

equipamento, a bordo de um veículo, quando o mesmo passa nas proximidades do sensor, emitindo um sinal que faz com que o mesmo “acorde”, se identifique e passe o que foi registrado para esse equipamento e na existência do provável vazamento avisa o operador imediatamente, através de um sinal sonoro ou gráfico, que pode então localizar o vazamento com os equipamentos e procedimentos já descritos.

Para facilitar a localização dos vazamentos, são colocados sensores em espaços que variam entre 50 a 100 metros, principalmente em função do material predominante existente no trecho que se quer pesquisar, de modo a sobrepor a sensibilidade entre eles, buscando sempre ter a indicação da existência de um vazamento em no mínimo dois sensores.

- **Armazenadores com capacidade de correlação**

Os armazenadores de ruídos com possibilidade de correlação possuem um princípio de funcionamento semelhante ao dos sem correlação, mas possuem a vantagem de poderem pontuar o local do vazamento com razoável precisão, facilitando sobremaneira o trabalho das equipes de detecção de vazamentos não visíveis.

A principal vantagem destes equipamentos é a possibilidade de se manter uma área relativamente grande sob constante observação, facilitando a descoberta de vazamentos existentes e do surgimento de novos vazamentos, permitindo uma rápida intervenção no local, diminuindo perdas de água e suas consequências. Também podem ser mudados de áreas com facilidade, permitindo utilizá-los nas áreas mais críticas, conforme a necessidade.

Sua principal desvantagem é o elevado custo de aquisição, pois o número de sensores que são necessários para se obter um resultado compensador é de no mínimo 150 unidades, sua relativa fragilidade, pois como devem ser instalados em pontos de contato com a rede, em locais tais como cavaletes, hidrantes, caixas de válvulas, ventosas, etc., podem sofrer danos, vandalismo ou roubo por parte da população e dos próprios funcionários, principalmente quando na execução de manobras nos registros, ocasião em que o operador das chaves de manobra não

visualiza o equipamento na sede da válvula e acaba danificando-o, bem como possuir pessoal altamente especializado na operação e na interpretação de dados. Outra desvantagem é a dificuldade de instalação dos A.Rs em cavaletes, que requer uma difícil negociação com os moradores do local previsto para a instalação dos sensores, nem sempre conseguindo essa autorização.

6.1.1 Componentes principais dos Armazenadores de Ruído de vazamentos

Os equipamentos principais e seus respectivos acessórios aqui descritos a seguir são os mais utilizados atualmente no mercado brasileiro.

- 01 unidade receptora (U.R.) de dados com bateria recarregável ou fixa (durabilidade de cinco anos) e antena pequena (curto alcance) para uso portátil;
- A.R. com transmissão remota de dados com antena fixa ou removível;
- 01 cabo de alimentação 12 volts DC com interface para o acendedor de cigarros do veículo;
- 01 cabo para transmissão dos dados;
- 01 alça para transporte da U.R. (em alguns equipamentos);
- 01 antena (longo alcance) com cabo coaxial integrado;
- 01 unidade principal de alimentação da bateria recarregável da U.R. (em alguns equipamentos);
- 01 computador móvel (laptop) com software específico (em alguns equipamentos).

Acessórios:

- 01 compartimento para transporte da U.R.;

- 01 Bateria de reposição da U.R. (em alguns equipamentos);
- 01 Impressora portátil com cabo;
- 01 Caixa para transporte dos A.R.s.

A Figura 34 demonstra um modelo de armazenador de ruídos e seus respectivos componentes.

Figura 34 – Componentes do armazenador de ruídos (ZANIBONI, 2001).

6.2 Metodologia para a utilização dos Armazenadores de Ruídos de vazamentos

6.2.1 Procedimentos operacionais

Essas definições que serão descritas têm caráter operacional, visando a aplicação dos armazenadores de ruídos. Sob essa ótica, a sequência de operações necessárias se fazem presentes, de modo pormenorizado, permitindo um melhor entendimento das potencialidades do mesmo.

6.2.2 Pré-definição dos pontos de instalação do A.R.

Escolher a área de instalação mediante:

- Pré-estudo das perdas reais em áreas delimitadas e estanques;
- Utilização do método fator de pesquisa medido em distritos de medição e controle (pitométricos), ou em áreas de influência de válvulas redutoras de pressão ou bombeadas, baseando-se no método das vazões mínimas noturnas;
- Busca nos históricos operacionais das áreas de influência de bombas, dos locais com alta pressão, da idade de rede e de alto índice de vazamentos;
- Montar, com ajuda das plantas cadastrais referentes à área em estudo o esquema de distribuição dos A.Rs, visando estimar a quantidade necessária, de acordo com as características do material da rede de distribuição, e identificar em planta a numeração dos A.Rs a serem instalados no campo.

A distância entre os pontos a serem instalados deve ser definida de acordo com o tipo de material existente na rede:

- Em redes de material plástico (PVC e PE) os A.R.s devem ser instalados a cada 50 metros, aproximadamente;

- Em redes de outros materiais (cimento amianto, ferro fundido ou aço) os A.Rs devem ser instalados a cada 100 metros, aproximadamente;
- Em redes mistas (vários tipos de materiais) ou sem informação do tipo de material existente em campo, os A.Rs devem ser instalados a cada 50 metros, aproximadamente.

Separar os A.Rs pertencentes a área a ser verificada e prepará-los através da checagem de comunicação (sincronização) com a unidade receptora (U.R.).

Durante a instalação (Figura 35), as bases dos A.Rs devem ser limpas com pano seco e a superfície de contato (cavalete, registros de parada e abraçadeira metálica) deve ser lixada manualmente com material de rugosidade baixa, por exemplo, lixa d'água nº2, e limpa com pano seco.

Figura 35 – Instalação dos armazenadores de ruídos de vazamentos (Sabesp, 2003).

Deve ser instalado um dispositivo de segurança nos A.Rs, através de cabo de aço ou caixa protetora, evitando-se roubos e danos ao equipamento.

Os A.Rs devem ficar instalados, no mínimo, por um período de três dias antes de se efetuar a primeira leitura comparativa de ruídos e verificar a indicação de possíveis vazamentos, neste caso deverá ser dada continuidade aos serviços de pesquisa da rede até que não haja mais indicação de vazamentos na área em estudo.

6.2.3 Obtenção de dados com unidade receptora

Após a instalação dos A.Rs nos locais pré-determinados, o armazenamento de dados é executado automaticamente, seguindo a programação determinada pelos operadores do equipamento. Fica a cargo do técnico ou do operador a pesquisa e extração das informações com a U.R. para verificar a existência ou não de vazamentos.

A Figura 36 apresenta de modo esquemático, o processo de trabalho dos armazenadores de ruídos.

Figura 36 – Esquema do processo de pesquisa utilizando armazenadores de ruído (Sabesp, 2003).

As pesquisas devem ser realizadas com veículo adequado, de modo a percorrer toda a área onde os equipamentos foram instalados. A coleta de dados é feita através da transmissão de ondas de rádio que acusam condições de vazamento ou não vazamento. Em alguns aparelhos de A.R. pode-se obter a leitura de pontos com características de vazamentos suspeitos, que são identificados na U.R. através de letras, símbolos ou avisos sonoros.

Os dados coletados em campo (Figura 37) deverão ser descarregados em computador através de programa específico, de modo que os dados obtidos pelos A.Rs que apresentarem níveis de dispersão (amplitude) menores e intensidades maiores (picos de ruídos) sejam indicados como possíveis pontos de vazamentos.

Gráfico típico de indicação de provável vazamento

Gráfico típico de não indicação de provável vazamento

Figura 37 – Gráficos típicos de pesquisa utilizando armazenadores de ruído (IWA, 2007).

Os trechos entre os pontos suspeitos de vazamentos devem ser demarcados na planta cadastral referente à área em estudo, possibilitando a sua visualização e análise.

A Figura 38 mostra um exemplo de marcação em planta cadastral, da instalação dos armazenadores de ruídos, onde são demarcados os pontos suspeitos de vazamentos assinalados pelos armazenadores de ruídos.

Figura 38 – Planta cadastral com a localização dos armazenadores de ruídos (IWA, 2007).

Cabe observar que nem toda indicação do A.R. significa vazamento, podendo existir casos nos quais agentes externos falseiam os resultados, portanto, quando for assinalado um A.R. com suspeita de vazamento, espera-se que essa informação também seja identificada por outros A.Rs próximos, caso contrário, isso pode

significar que o aparelho que está acusando o vazamento pode estar sofrendo interferência local. Tal suspeita é confirmada pelo método de pesquisa convencional que inclui o uso dos equipamentos acústicos de pesquisa e detecção de vazamentos não visíveis.

A Tabela 7 apresenta um modelo de verificação para armazenadores de ruídos de vazamento, apresentando o que deve ser verificado e qual a ação corretiva adequada.

Tabela 7 - Tabela de verificação para armazenadores de ruído de vazamentos (Sabesp, 2003).

Verificação	Periodicidade
Caso os ER que possuam “leds” de indicação de funcionamento, os mesmos devem piscar em intervalos de 15 segundos, permitindo verificar seu funcionamento	Durante a instalação, leitura e retirada dos equipamentos
Verificar, no momento da instalação, a existência de acúmulo sujeira e/ou obstruções nos pontos de contato necessários para a instalação dos equipamentos	Durante a instalação dos A.Rs
Limpeza da área de contato de instalação dos A.Rs	Durante a instalação dos A.Rs
Análise da possibilidade de riscos aos A.Rs, no ponto de instalação	Durante a instalação dos A.Rs
Verificação do equipamento em relação às sincronizações necessárias entre os A.Rs e a UR	Antes da instalação dos equipamentos
Armazenamento do equipamento deverá ser feito de modo adequado	Durante o transporte e no ponto de armazenagem
Transporte dos equipamentos em recipientes adequados	Sempre
Limpeza geral	Antes da instalação a após a retirada dos equipamentos

6.3 Equipamentos de inserção em tubulações para pesquisa acústica

Avanços em tecnologia permitiram a criação de novas técnicas para detectar, quantificar e melhorar a precisão de vazamentos para adutoras de grande diâmetro. A técnica de inserção em tubulações para pesquisa acústica é importante na medida em que o leque de ferramentas para detectar vazamentos não visíveis são resultados do foco existente nas pesquisas em redes de distribuição, que apresentam diâmetros e profundidades menores (BOND, 2007).

Foram feitas algumas tentativas para utilizar os equipamentos tradicionais utilizados na pesquisa acústica em tubulações das redes de distribuição, tais como a utilização geofones eletrônicos, correlacionadores de ruídos e armazenadores de ruídos, para detectar vazamentos em adutoras de grande porte, mas na maioria dos casos os resultados foram abaixo do esperado. Esse fato se deve principalmente ao diâmetro das tubulações e sua profundidade de assentamento, fatores que afetam diretamente a propagação do som.

6.3.1 Sahara® Leak Location Sistem (Sahara® Sistema de Locação de vazamentos)

O Sistema Sahara® foi criado especificadamente para atender essa demanda, com foco em tubulações com diâmetro igual ou maior que 250 mm. Uma das suas características é a possibilidade de realizar a pesquisa com as tubulações em carga e com suas pressões normais de serviço.

6.3.2 Componentes principais do Sistema Sahara®

O Sistema Sahara® é basicamente composto por um conjunto de sensor tipo hidrofone ligado a uma espécie de pára-quedas de arraste, que é inserido na tubulação através de um TAP feito ou existente na tubulação e segue no sentido do fluxo da água, detectando os sinais acústicos gerados pelos vazamentos na parede da tubulação, juntas ou soldas.

É ligado a um cabo umbilical que transmite o sinal recebido para uma unidade de controle, permitindo a análise dos ruídos pelo operador fixo, que consegue escutar os sons detectados através de fones de ouvido. Simultaneamente, um segundo operador vai acompanhando o sensor utilizando um locador de sinais que são enviados pelo hidrofone e que permite seguir seu avanço no interior da tubulação.

A Figura 39 apresenta de modo esquemático, o sistema Sahara®, detalhando seus componentes e modo de aplicação.

Figura 39 – Esquema do Sistema Sahara® de locação de vazamentos (WRC, 1997).

Quando é detectado o ruído de vazamento, o avanço do sensor é interrompido e o segundo operador marca a posição da cabeça do sensor, permitindo um posicionamento bastante preciso da localização do vazamento.

O som captado pelo hidrofone é o resultado da passagem da água pelo orifício do tubo, de modo que pode ser captado em qualquer material e em qualquer diâmetro, podendo, no caso da existência de mais vazamentos no trecho pesquisado, serem

identificados individualmente e com vazões de vazamento inferiores a um litro por hora (BOND, 2007).

6.3.3 Parâmetros de funcionamento do Sistema Sahara®

Os parâmetros de funcionamento deste sistema evidenciam sua utilização em tubulações de grande diâmetro, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de funcionamento do Sistema Sahara® (WRC, 1997).

Parâmetros		
tubulação	Tipo de tubulação	todos
	Diâmetro da tubulação	≥250 mm
	Pressão da tubulação	≥3 psi (2mca)
	Velocidade do fluxo	≥0,3 m/s
	Diâmetro do ponto de inserção	≥2" (50 mm)
	Comprimento do cabo	2,0 km (máximo)
	Distância inspecionada /dia	4 km
	Curvas	Até 135 graus
	Sensibilidade	vazamentos mínimos de até 1 litro/hora;
Localização exata na superfície	Profundidade de detecção	Até 10 metros
Espessura da tubulação	Plástico	Ilimitado
	Aço	1" (25mm)
	Ferro fundido	1,6" (40mm)

Em função de suas próprias características, esse sistema apresenta vantagens e desvantagens, que são:

a) Vantagens

- Grande precisão na locação de vazamentos em redes com diâmetros maiores ou iguais a 250 mm;
- Pode ser utilizado para detecção em qualquer tipo de material de redes;

- Não sofre interferência de ruídos externos;
- Pode ser utilizado com as adutoras em carga;
- Equipe reduzida para a aplicação do sistema.

b) Desvantagens

- Elevado custo de operação;
- Necessidade de criar pontos de inserção para o sensor, quando não existentes, em pontos da rede distantes entre si de no máximo 1, 5 km.
- Necessidade de executar uma desinfecção no trecho pesquisado;
- Não pode ser utilizado em adutoras que possuam derivações de diâmetros menores ao da rede em que foi inserido o sensor e não possam ser manobradas, pois o sensor pode não seguir na direção desejada.
- Pode apresentar problemas em redes que apresentem incrustações, com a impossibilidade do avanço ou da retirada do sensor.

6.4 Indicador interno de ruídos de vazamentos

Várias outras tecnologias se baseiam no mesmo princípio, ou seja, usam a velocidade da água para o deslocamento de algum tipo de sensor de detecção de vazamentos no interior das tubulações. A título de citação, alguns equipamentos são do tamanho de bolas de tênis e se deslocam ao longo da tubulação, preparados para detectar os possíveis ruídos de vazamentos.

Ao detectar algum ruído suspeito, um sinal é transmitido a sensores estrategicamente colocados ao longo da tubulação a ser pesquisada. Esses dispositivos também podem ser utilizados para análise da qualidade e constituição química da água.

Importante ressaltar que esse tipo de tecnologia, do mesmo modo que outras tecnologias de inserção foram desenvolvidas para detecção de vazamentos em tubulações que transportam petróleo e seus derivados.

Em saneamento esses dispositivos são raramente utilizados, em função da dificuldade de inserção e posterior remoção dos mesmos.

A Figura 40 exemplifica um modelo de equipamento tipo indicador interno de ruídos de vazamentos.

Figura 40 – Indicador interno de ruídos de vazamentos - Smart Ball®
(IWA, 2007).

7 TECNOLOGIAS NÃO ACÚSTICAS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Existem outras metodologias para detecção de vazamentos em sistemas de abastecimento de água, mas ainda utilizadas de modo incipiente, por ser de aplicação trabalhosa e dispendiosa ou de ter aplicações limitadas pelas suas próprias características.

Dentre essas tecnologias, a principal refere-se a detecção de vazamentos por análise de gás residual. Esse equipamento consiste de um pequeno espectrômetro de massa, montado em equipamento apropriado, preparado para captar um

determinado tipo de gás, que será inserido na tubulação e que irá ser detectado no momento de seu escape para a atmosfera.

A espectrometria de massa é um método para identificar os diferentes átomos que compõe uma substância. Um espectrômetro de massa bombardeia uma substância com elétrons para produzir íons, ou átomos eletricamente carregados. Os íons atravessam um campo magnético que curva suas trajetórias de modos diferentes, dependendo de suas massas.

O campo separa os íons em um padrão chamado espectro de massa. A massa e a carga dos íons podem ser medidas por sua posição no espectro. Os cientistas identificam assim os elementos e isótopos presentes na amostra.

Com o espectrômetro de massa, criado por Francis Aston em 1919, determina-se massas atômicas com grande precisão permitindo, inclusive, distinguir as massas dos isótopos de um mesmo elemento. E descontando-se a massa dos elétrons, determina-se, então, as massas dos núcleos correspondentes.

Seu princípio de funcionamento baseia-se em uma fonte que produz íons com carga elétrica q (positiva) e massa M e velocidades variadas. Os íons entram numa região com um campo elétrico uniforme e um campo magnético também uniforme, perpendicular entre si, constituindo um filtro de velocidade.

Desprezando-se a força peso, sobre os íons atuam uma força elétrica e uma força magnética de mesma direção e sentidos contrários, com módulos dados, respectivamente, por qE e qvB . Atravessam o filtro apenas os íons para os quais a força magnética e a força elétrica se cancelam mutuamente, isto é, íons com velocidade bem determinada, de módulo v tal como na equação (17):

$$qE = qvB \text{ ou } v = E/B \quad (17)$$

Saindo do filtro, esses íons entram numa região onde existe apenas o campo magnético uniforme, de forma que percorrem trajetórias circulares de raio R sob o

efeito da força magnética, que faz o papel de força centrípeta, conforme descrito pela equação (18).

$$qvB = Mv^2/R \quad (18)$$

Das duas últimas expressões vem: equação (19):

$$M = qRB^2/E \quad (19)$$

onde:

q = carga elétrica (Coulomb);

E = intensidade do campo elétrico (volt/m);

B = densidade superficial do fluxo magnético (tesla);

v = módulo;

M = massa de íons (S/m);

R = raio (m)

Como se conhece o valor absoluto da carga do elétron, e, e o valor de q, e se mede R, B e E, essa expressão permite determinar M, a massa dos íons.

Uma vez detectado o gás, o aparelho emite sinais sonoros e dá a leitura imediata da concentração do gás inserido, permitindo avaliar se a fuga encontra-se no ponto localizado.

Os gases mais utilizados são:

Gás hélio (gr. Hélios, Sol) é um elemento químico de símbolo He e que possui massa atômica igual a 4 u, apresentando número atômico 2 (2 prótons e 2 nêutrons). À temperatura ambiente, o hélio encontra-se no estado gasoso. Apesar da sua configuração eletrônica ser 1s², o hélio não figura na tabela periódica dos elementos junto com o hidrogênio no bloco s, está colocado no grupo 18 (8A ou 0) do bloco p, já que apresenta nível de energia completo, apresentando as propriedades de um gás nobre, ou seja, é inerte (não reage) como os demais elementos.

É um gás monoatômico, incolor e inodoro. O hélio tem o menor ponto de evaporação de todos os elementos químicos, e só pode ser solidificado sob pressões muito

grandes. É o segundo elemento químico em abundância no universo, atrás do hidrogênio, mas na atmosfera terrestre encontra-se apenas traços, provenientes da desintegração de alguns elementos.

Em alguns depósitos naturais de gás é encontrado em quantidade suficiente para a sua exploração; usado para o enchimento de balões e dirigíveis, como líquido refrigerante de materiais supercondutores criogênicos e como gás engarrafado utilizado em mergulhos de grande profundidade.

O hélio é mais leve que o ar, isto é, a densidade do hélio é menor que a densidade do ar, diferenciando-se do hidrogênio por não ser inflamável, entretanto, apresenta poder ascensional 8% menor. Por este motivo, e por ser um gás inerte, é muito adequado à detecção de vazamentos em redes de distribuição de água.

Gás hidrogênio (do grego υδρώ, água e γένος-ou, gerar) é um elemento químico de símbolo H, número atômico 1 (1 próton PB ou próton PE e 1 elétron PB ou elétron PE) e de massa atômica 1 (1 u). Na temperatura ambiente é um gás diatômico (H_2) inflamável, incolor, inodoro, insípido e insolúvel em água, pertencente ao grupo (ou família) 1 (antiga coluna 1A).

É o elemento químico mais abundante do Universo, existente em grande quantidade nas estrelas no estado de plasma. Aparece também em milhões de substâncias, como por exemplo, na água e nos compostos denominados orgânicos, e é capaz de reagir com a maioria dos elementos. O núcleo do isótopo mais abundante é formado por um único próton e nenhum nêutron.

O hidrogênio é um dos gases menos densos que o ar e foi muito usado em balões e dirigíveis no início do século passado, porém por ser altamente inflamável seu uso ficou limitado apenas em balões.

Reage violentamente com o flúor e cloro, especialmente com o primeiro, com o qual a reação é tão rápida e imprevisível que não se pode controlar. Também é perigosa sua despressurização rápida, já que diferentemente dos outros gases, a sua expansão acima de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocorre com aquecimento, podendo inflamar-se.

O hidrogênio é extremamente inflamável no ar (essa probabilidade de se inflamar situa-se entre 4% e 75% por volume de ar). A energia necessária para inflamá-lo é muito pequena e, em algumas condições, pode ocorrer auto-inflamação.

Pode ser utilizado em detecção de vazamentos quando misturado ao gás nitrogênio, formando o gás traçador denominado hidrógeno. A composição utilizada é de 96 % de gás nitrogênio (N_2) e 4 % de gás hidrogênio (H_2), produzindo um composto não inflamável e não tóxico. A mistura é preparada abaixo do limite inferior de explosividade do hidrogênio, que é de uma concentração de 5,7% (norma ISO 10156).

Assim sendo, tendo dentro dos tubos uma concentração de 4%, uma vez o gás liberado no ambiente torna-se impossível superar o nível de concentração que leve ao limite de explosividade (HUBERG, 2007).

7.1 Metodologia de aplicação de gases traçadores para detecção de vazamentos em redes de água

O sistema de detecção de vazamentos de água com a tecnologia dos gases traçadores baseia-se na injeção dos gases na tubulação de água, em qualquer ponto da rede que permita essa injeção, tais como TAPs, hidrantes, cavaletes.

Na Figura 41, pode ser observada a instalação de tubo da mistura de gases para sua inserção nas tubulações de água a serem verificadas.

Figura 41 – Inserção de gás hidrógeno através de cavaletes domiciliares (Sabesp, 2007).

Os gases utilizados têm como característica serem menos densos do que o ar e a água e possuem uma forte característica ascensional. Desse modo, quando alcançam a saída da tubulação no local do vazamento, chegando à superfície rapidamente.

Desta forma, utilizando um detector (snifer) (Figura 42), é inspecionada a trajetória da rede pela superfície até serem detectados sinais dos gases traçadores, indicando os prováveis pontos de vazamento. Os detectores de gases traçadores em geral dispõem de uma bomba que aspira 1 litro por minuto. Assim, o ar é aspirado e analisado pelo espectrômetro de massa instalado no equipamento e mediante sinais um display numérico, indicam a concentração dos gases traçadores existentes no ar aspirado.

Figura 42 – Utilização do equipamento de detecção de gases
(Sabesp, 2007).

Onde houver a indicação de maior concentração dos gases traçadores, o equipamento emite sinais sonoros e são feitos testes com a utilização de sondas introduzidas no solo por pequenos orifícios, permitindo maior acuidade na localização.

Entende-se por localização a captação e análise de uma amostra da atmosfera subterrânea. Esta fase de procedimento tem por localizar precisamente o ponto do vazamento, levando à menor intervenção possível para o reparo, diminuindo o tempo e custos para a sua realização (HUBERG, 2007).

Os gases traçadores mais utilizados, como descrito, têm peculiaridades próprias e algumas diferenças que podem pesar na avaliação para escolha de qual deva ser aplicado.

O gás hélio (He) é um gás quimicamente inerte e não explosivo, independentemente de sua concentração. As maiores reservas de Hélio encontram-se nos Estados Unidos. Estas reservas são estratégicas e controladas pelo governo norte-americano. Não está disponível para venda em grande quantidade, o que eleva o custo de aquisição e aplicação. Pode ser usado em condições onde outras tecnologias são não conclusivas ou inviáveis.

O gás hidrogênio (H_2), ou sua forma composta denominada hidrógeno, tem a menor partícula e a mais elevada velocidade molecular entre os gases conhecidos, bem como a sua viscosidade é a mínima absoluta. Isto facilita a passagem do hidrogênio através de qualquer material (exceto quando a superfície está molhada) com a máxima velocidade e a menor resistência possível. Devido à sua velocidade molecular, qualquer indício do mesmo é eliminado em breve tempo ao finalizar a busca.

Considera-se, também, que o hidrogênio não é tóxico e nem perigoso na concentração apresentada, não apresentando contra-indicações para a água e para o ambiente (HUBERG, 2007).

A tecnologia de gases traçadores pode ser utilizada quando a condição para a pesquisa por equipamentos ou métodos acústicos fica comprometida ou não é possível, como por exemplo:

- Tubulação não pressurizada ou sem água;
- Pressões abaixo de 150 KPa na tubulação;
- Elevado nível de ruído ambiente.

Aplicam-se, também, nos casos de vazamentos que tenham formado alagamentos abaixo da superfície, o que praticamente elimina os ruídos passíveis de serem detectados pelos métodos acústicos convencionais. Não há impedimento para a sua utilização em tubulações de grande diâmetro.

Algumas desvantagens da utilização da tecnologia de detecção de vazamentos com a aplicação de gases traçadores são:

- O não isolamento da tubulação onde é injetado o gás traçador leva à perda da eficácia da utilização dessa tecnologia, consistindo na sua principal desvantagem, não inviabilizando, porém, a sua utilização;
- A superfície molhada impede a sua utilização;
- Custos elevados em relação aos praticados na utilização de métodos acústicos convencionais em uma comparação direta da aplicação das tecnologias.
- Processo trabalhoso, necessitando de várias intervenções junto aos imóveis e válvulas no entorno da área pesquisada, visando isolar a tubulação a ser pesquisada.

Essa diferença deve ser analisada de forma criteriosa, devendo ser considerados todos os aspectos que envolvem os processos da localização e reparo. Isso deriva da possibilidade de utilização dessa tecnologia em condições de elevado nível de ruído (durante o dia com tráfego pesado, sem necessidade da sua interrupção, por exemplo), bem como a precisão da localização do vazamento, levando o reparo ao mínimo de obra necessário.

Essa metodologia é mais indicada para a localização de vazamentos em imóveis, após a caixa d'água, onde as pressões são determinadas pela mesma; em indústrias, principalmente em função do ruído interno, não necessitando paralisar as atividades; na localização de fraudes e ligações clandestinas e na verificação de

estanqueidade de válvulas. Por sua característica, o hidrogênio pode ser utilizado também na localização de vazamentos inerentes.

8 TECNOLOGIAS ESPECIAIS PARA A REDUÇÃO DE PERDAS

8.1 Válvula Redutora de Pressão

A Válvula Redutora de Pressão (VRP) é um equipamento mecânico, operado hidráulicamente, com a função de regular a pressão a jusante em área definida de um setor de distribuição de água, com vistas a reduzir a magnitude e o surgimento de vazamentos, bem como manter a integridade das tubulações, atendendo necessidades de pressão e vazão adequadas ao abastecimento.

O controle de pressão através de VRPs possibilita:

- Reduzir a vazão dos vazamentos, e em consequência os custos associados;
- Reduzir a frequência de arrebentamentos de tubulações e consequentes danos que são caros para reparar, minimizando também as interrupções de fornecimento e os perigos causados aos usuários de ruas e estradas;
- Prover um serviço mais constante ao consumidor, pois grandes variações de pressão podem dar ao mesmo a impressão que a companhia tem um serviço mal gerenciado. A alta pressão pode induzir no consumidor expectativas e percepções erradas do que é mais adequado;
- Reduzir os consumos relacionados com a pressão da água, como por exemplo, a rega de jardins;
- Prevenir a ocorrência de danos às instalações internas dos usuários até a caixa de água (tubos, registro e bóias).

Uma das características mais marcantes da tecnologia que utiliza VRP é que sua implantação requer, obrigatoriamente, uma área de atuação bem definida na rede de distribuição de água, isolada por registros limítrofes, configurando um subsetor (zona de pressão) ou um Distrito de Medição e Controle (DMC).

Esse subsetor de atuação será a área de controle de pressão e, por conseguinte, a base da gestão operacional e redução de perdas reais.

A instalação típica de uma VRP permite que se tenha um grande conhecimento das vazões nas tubulações à jusante (medições contínuas ou intermitentes), além do gerenciamento de alguns pontos de controle na rede.

Quaisquer alterações que venham a ocorrer na rede de distribuição, pela introdução de um grande consumidor no sistema ou incremento do número ou magnitude dos vazamentos, podem ser rapidamente registradas e equacionadas através de medidas corretivas (consertos de vazamentos, por exemplo) ou ajustes operacionais da VRP como a sua recalibração ou novo ajuste, ou nova calibragem.

Portanto, para que essa capacidade de controle e gestão seja possível, é imprescindível que o subsetor definido pela VRP esteja fechado, garantindo assim os meios de comparação das situações operacionais a serem avaliadas.

8.1.1 Características das Válvulas Redutoras de Pressão

As VRPs são utilizadas visando à redução de perdas por vazamentos em redes de distribuição de água. Com este objetivo devem-se conhecer como as perdas se relacionam com a pressão de serviço. Vários trabalhos, GERMANOPOULOS & JOWITT (1989), JOWITT & XU (1990), GRATÃO & PORTO (2000), VIEGAS (2003), entre outros utilizam um modelo do tipo pressão versus vazamento, conforme equação (20):

$$q_{ij} = (C_d \cdot L_{ij}) \cdot P_{ij}^N \quad (20)$$

Onde:

q_{ij} = vazão de vazamento na tubulação entre os nós i e j (L/s);

C_d = coeficiente de descarga;

L_{ij} = comprimento da tubulação (m);

P_{ij} = pressão média na tubulação (Kg/cm²);

N = expoente do emissor.

GERMANOPOULOS & JOWITT (1989) propuseram uma relação análoga a essa equação como resultado de uma série de experimentos em redes de distribuição na Inglaterra. Tais experimentos consistiram de ensaios sobre distritos de operação

com pouco ou nenhum consumo noturno, onde foram medidas as vazões, várias pressões e registrados os resultados, uma vez que a identificação da relação entre pressão de serviço e vazamento esbarra na necessidade de identificar o consumo noturno.

Outra formulação relaciona diretamente o vazamento com os nós, ao invés dos trechos (TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI, 1999). Essa nova formulação apresenta duas grandes vantagens: uma do ponto de vista computacional, já que na maioria dos modelos de simulação se trabalha com equações em nível de nó e não de trecho, e outra por incluir o diâmetro do tubo (D_{ij}) como uma variável, melhorando a determinação do coeficiente de perdas.

A relação entre carga hidráulica no nó j (H_j) e vazamento é dada pela equação (21):

$$q_j = (H_j - z_j)^{\alpha_j} \sum_{i-j}^{M_j} \varphi_{ij} \frac{\pi}{2} D_{ij} L_{ij} \quad (21)$$

Onde:

q_j = vazão de vazamento no nó j (L/s);

H_j = carga hidráulica no nó j (N/m²)

z_j = cota do nó j (m);

φ_{ij} = coeficiente de perda no trecho L_{ij} ;

α_j = expoente de perdas no nó j ;

M_j = nº de trechos adjacentes ao nó j ;

$i-j$ = nós considerados na equação;

D_{ij} = diâmetro do tubo (m);

L_{ij} = comprimento da tubulação (m)

Quando a demanda é variável no tempo, o vazamento de água é calculado como sendo a média das vazões ao longo do tempo.

As perdas por vazamentos na rede de distribuição, decorrentes de falhas construtivas, defeitos em peças especiais e conexões, rupturas, materiais inadequados, etc., aproximam-se ao escoamento em orifícios e fendas. Para tubos metálicos em geral, a vazão perdida é uma função proporcional à raiz quadrada da carga hidráulica. Dessa forma, especial atenção deve ser dada ao controle de

cargas hidráulicas na rede, pois sua simples redução leva a reduções substanciais nas perdas nos vazamentos existentes, além de restringir o risco de novas rupturas. (SILVA et al. 1998).

Observa-se a necessidade de levantamento de campo dos parâmetros da relação pressão versus vazamento, "N" e "Cd", para cada rede e/ou setor em estudo, pois estes parâmetros sofrem mudanças de acordo com as características da rede e não é prudente utilizar dados importados de outras redes ou países sem nenhum critério técnico de avaliação.

A equação (22), levantada através de experimentos realizados em um distrito pitométrico, levou a uma equação considerada adequada para a determinação de vazão através do orifício, como segue (Sabesp, 1998):

$$Q = A_o \cdot C_d \cdot P^N \quad (22)$$

Onde:

Q = vazão (m³/s);

A_o = área do orifício (m²);

C_d = coeficiente de descarga;

P = pressão (mca);

N = 0,5 – para tubos metálicos

N = 1,5 – para tubos não metálicos (PVC, PEAD, etc.)

Baseado nessas premissas estabeleceu-se algumas equações simplificadas, que esclarecem como a relação da vazão dos vazamentos está diretamente relacionada com a variação de pressão e com o tipo de material das redes.

Para tubos metálicos estabeleceu-se a equação (23):

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{0,5} \quad (23)$$

Onde:

Q₀ = Vazão antes do acréscimo ou decréscimo de pressão (carga hidráulica);

Q₁ = Vazão após o acréscimo ou decréscimo de pressão;

P_o = Pressão inicial;

P_1 = Pressão final;

$N = 0,5$

Para tubos não metálicos (PVC, PEAD, etc.) estabeleceu-se a equação (24):

$$\frac{Q_1}{Q_o} = \left(\frac{P_1}{P_o} \right)^{1,5} \quad (24)$$

Observa-se que houve alteração apenas no expoente.

Para as condições gerais da rede de distribuição, onde se misturam furos com área fixa e com área variável, estudos recentes mostram que o expoente médio da relação de pressões é da ordem de 1,15. Para afeito prático, considera-se $N = 1$, ou seja, a vazão do vazamento é proporcional à pressão. Desse modo pode-se afirmar que se a pressão diminui 10%, a vazão do vazamento diminui 10% (Sabesp, 2004) como pode ser observado na Tabela 9, que apresenta alguns exemplos de aplicação prática dessas equações.

Tabela-9 Variação da vazão do vazamento em função da pressão e da abertura do ponto de fuga (Sabesp, 2004).

Abertura (mm)	Volume (l/dia)		
	$P_o = 15 \text{ mca}, P_1 = 30 \text{ mca}$		
	Valores de N1		
	0,5	1,0	2,5
Gotejamento	32	46	260
1	1466	2.068	11.704
2	3.909	5.512	31.200
6	11.631	16.400	92.800
9	18.014	25.400	143.700
12	24.102	33.984	192.300

Essa relação entre a pressão e a vazão do vazamento também é demonstrada na Figura 43, onde se pode observar o comportamento das vazões dos vazamentos quando a pressão aumenta ou diminui.

Figura 43 – Relação entre a Pressão e a vazão de vazamento (Sabesp, 2004).

As VRPs atuam em áreas estanques, por fechamento natural ou provocado pelo fechamento de registros existentes ou colocados para esse fim, visando atender preferencialmente, mas não exclusivamente, áreas onde as pressões médias estejam acima do estabelecido pela NBR 12218/1994, entre 100 KPa (10 mca) de pressão dinâmica e 500 KPa (50 mca) de pressão estática. Importante observar que essas pressões são as limites, podendo as pressões de trabalho adequar-se a cada situação.

Segundo TARDELLI FILHO (2004) as válvulas redutoras de pressão normalmente são instaladas em uma derivação da tubulação principal, chamada "*by pass*" (Figura 44), guarnecidos por registros de bloqueio a montante e a jusante para as manutenções. Na tubulação principal também é instalado um registro para trabalhar normalmente fechado, só sendo aberto em situações de manutenção ou alguma emergência operacional a jusante.

Figura 44 – Projeto de VRP com instalação de “by pass” (Sabesp/BBL, 1999).

O princípio básico da VRP é a manutenção de uma pressão fixa na sua saída. Em locais onde se verificam consideráveis variações de pressão, decorrentes de perdas de carga no sistema, torna-se interessante à utilização de controladores eletrônicos, que são equipamentos dotados de circuito eletrônico com armazenador de dados e válvulas solenóides, alimentados através de bateria de lítio, com uma vida útil de aproximadamente 5 anos. Assim, há três tipos básicos de controle de pressão com utilização de VRP:

- **Controle de pressão através de VRP com pressão de saída fixa**

Este tipo de sistema de controle de pressão usualmente se aplica a uma região isolada alimentada por uma VRP. A pressão de saída da VRP é ajustada, pela modificação da pressão da mola da válvula piloto, de tal forma que sob condição de máxima vazão a pressão no ponto crítico é mantida.

Esta pressão é constituída de 3 componentes:

- O nível mínimo de pressão de serviço requerido no ponto crítico;
- A diferença de cota altimétrica entre a VRP e o ponto crítico;
- A perda de carga no sistema entre a VRP e o ponto crítico sob condições de vazão máxima projetada.

Uma VRP com pressão de saída constante (Figura 45) pode ser a solução mais apropriada em regiões onde a perda de carga entre a válvula e o ponto crítico é menor que 10 mca sob quaisquer condições de operação ou onde as variações de pressão no ponto de instalação da VRP e as variações no ponto crítico sejam aproximadamente iguais.

As VRPs devem ser fornecidas com ventosa de forma a evitar problemas operacionais nos locais com intermitências no fornecimento.

Figura 45 – Esquema de VRP com saída constante (Sabesp/BBL, 1999).

- **Controle de pressão através de VRP com controle variável**

Existem dois tipos principais de controladores de pressão de saída, o controlador hidráulico e o eletrônico. O controle eletrônico é o que está sendo utilizado para comandar a atuação das VRPs atuais. Controladores eletrônicos possibilitam diminuir a pressão média de um setor através da variação da pressão de saída da VRP modulados pelo tempo ou pela vazão de demanda, conforme mostra a Figura 46.

Figura 46 – Esquema de VRP com saída variável (Sabesp/BBL, 1999).

- Modulação pelo tempo

Permite a diminuição ou aumento da pressão de saída da VRP em função de um determinado horário, para compensar a variação da vazão durante o dia e a perda de carga entre a VRP e o ponto crítico.

- Modulação pela vazão

Conectando-se um medidor de vazão que fornece sinais de pulso, o controlador realiza a modulação da pressão de saída da VRP com base na vazão (demanda da área), isto é, pressões maiores de saída são reguladas automaticamente quando a demanda da área aumenta, para compensar as perdas de carga adicionais entre a VRP e o ponto crítico.

8.1.2 Fatores a considerar na definição da área para instalação de uma VRP

Os principais fatores para a instalação de uma VRP são:

- Pressão estática/pressão dinâmica;
- Extensão da rede;
- Medição da vazão e pressão em pontos críticos;
- Levantamento de dados dos pontos principais (registradores);
- Dimensionamento da vazão (Q) da VRP;
- Definição das regras de operação, visando a vazão mínima noturna.

Baseando-se nessas informações, pode-se ter uma ideia do princípio de funcionamento de uma VRP, que em resumo é uma válvula que estrangula a passagem de água, criando uma perda de carga localizada. Parte dessa energia é dissipada no próprio corpo do equipamento, parte é transmitida para o sistema a

montante da instalação da válvula, fato que deve ser considerado na hora de se determinar os parâmetros para a instalação do equipamento.

Uma consideração importante é que as VRPs podem ser configuradas de diversas outras maneiras, como sustentadora de pressão, aliviadora de pressão, controladora de vazão, válvula de proteção contra transientes hidráulicos, etc. Podem também combinar duas ou mais funções dependendo da necessidade do sistema de distribuição, por exemplo, válvula redutora e sustentadora de pressão, válvula sustentadora e aliviadora de pressão, etc.

8.1.3 Levantamento de dados da área para instalação de uma VRP

As principais etapas de levantamento de dados são as seguintes:

- Escolha do ponto de instalação de VRP em função do histórico de incidência de alta pressão, assim como arrebitamentos e índices de perda. Caso o local para instalação já exista, obter informações quanto a diâmetro da tubulação, existência de by-pass, registros em operação, filtros, características do poço de visita.
- A viabilidade de controle na região candidata à instalação da VRP pode ser avaliada pela medição da pressão instantânea durante o período de máxima vazão. Um critério de avaliação pode ser um valor de pressão mínima de 35 a 40 mca no DMC. A medição da pressão durante o período noturno de menor consumo no ponto crítico também pode dar indicação sobre a viabilidade de controle de pressão na área. Neste caso, pressões acima de 30 mca indicam potencial para o controle de pressão.
- Avaliação, providências e verificação do efetivo isolamento da área através do fechamento de registros. Para esta atividade deverão ser previstos serviços de descoberta e nivelamento de registros.
- Cálculo do comprimento de tubulação a ser submetido ao controle de pressão, atendendo os requisitos de abrangência mínima, quer do ponto de vista

hidráulico quanto do ponto de vista econômico, pois em pequenos comprimentos pode ser mais adequado a mudança de zona de pressão do trecho em estudo.

- Escolha dos pontos de medição de vazão e pressão para dimensionamento da VRP:
- Medição da vazão e da pressão à montante no local de instalação da VRP (se já existir) ou num ponto próximo.
- Medição de pressão no ponto de altimetria mais elevada; no ponto mais distante da VRP; no ponto médio (representativo da pressão média noturna) e no ponto próximo a um grande consumidor, se houver.
- Instalação de equipamentos de medição e coleta de dados:

Esta atividade deverá ser antecedida de preparação dos locais de medição, de instalação de “taps” para medição de vazão e conexões para medição de pressão. A coleta de dados de pressão e vazão deve ser sincronizada, sendo recomendável obter-se dados referentes a pelo menos 24 horas de consumo e com intervalo de 15 minutos, durante um dia útil da semana, sendo muito importantes os dados referentes ao período entre 00h00min h e 06h00min h.

- Os volumes de demanda deverão ser analisados para se determinar os efeitos da sazonalidade.

8.1.4 Dimensionamento da VRP

Para dimensionar corretamente uma VRP e escolher o método de controle ou modulação (pressão de saída fixa, modulada pelo tempo ou pela vazão) é importante considerar o impacto das flutuações sazonais na demanda e o tipo de área que está sendo suprida. A maior parte das áreas tem alguma forma de macromedição parcial ou total. Realisticamente, a VRP vai controlar só uma parte de um setor. No entanto, as leituras de um macro medidor são uma boa indicação do tipo de mudança que pode ser encontrada na demanda sob efeito da sazonalidade.

O dimensionamento da válvula redutora de pressão pressupõe:

- a) Que a área de influência está isolada e, portanto, os dados de vazão e pressão são representativos;
- b) Que o potencial de redução (relação custo x benefício) foi avaliado e considerado satisfatório.

O dimensionamento de uma VRP é determinado através das seguintes etapas:

- a) Análise dos dados de campo

A partir dos dados coletados em campo, são estabelecidos os seguintes parâmetros:

- Vazão máxima: é a máxima vazão obtida durante o período de medição;
- Vazão mínima: é a mínima vazão obtida durante o período de medição;
- Vazão mínima projetada: é a vazão mínima prevista para o abastecimento da área em estudo, considerando-se fatores de sazonalidade, bem como o efeito de futuras pesquisas e reparos de vazamentos.

Uma boa estimativa é considerar a vazão mínima projetada igual à metade da vazão mínima obtida durante o período de medição;

- Pressão a montante máxima [$P_{MON MAX}$]: é a máxima pressão a montante da VRP;
- Pressão a montante mínima [$P_{MON MIN}$]: é a mínima pressão a montante da VRP.

8.1.5 Regulagem de uma VRP

Dentre os pontos de medição de pressão escolhidos para avaliar a área de influência da válvula redutora de pressão, determina-se o ponto crítico, ou seja, o ponto mais distante e/ou ponto mais alto, o qual determinará a máxima redução de pressão na válvula, (pressão a jusante), sem prejudicar o abastecimento.

A máxima redução de pressão na VRP será aquela que resultará na mínima pressão de serviço no ponto crítico, atendendo a Norma NBR 12218/94 da ABNT, durante a máxima vazão considerada no dimensionamento para esta determinada instalação, ou seja, na situação de maior perda de carga.

É importante levar em consideração problemas de qualidade de água e idade de rede para o dimensionamento de perdas de carga, pois tais fatores acabam influenciando diretamente numa variação dos pontos de instalação da VRP e do ponto crítico, podendo levar a perda da VRP.

Determinam-se as pressões a jusante da VRP (regulagem), considerando:

- Pressão a jusante máxima ($P_{JUS\ MAX}$): é a máxima pressão que a regulagem da VRP disponibilizará;
- Pressão a jusante mínima ($P_{JUS\ MIN}$): é a mínima pressão que a regulagem da VRP disponibilizará.

Na condição de pressão de saída fixa $P_{JUS\ MAX}$ é igual a $P_{JUS\ MIN}$.

- Diferencial de pressão mínimo - é calculado pela seguinte equação (25):

$$\text{Diferencial de pressão mínimo} = P_{MON\ MIN} - P_{JUS\ MAX} \quad (25)$$

- Diferencial de pressão máximo - é calculado pela seguinte equação (26):

$$\text{Diferencial de pressão máximo} = P_{MON\ MAX} - P_{JUS\ MIN} \quad (26)$$

Em função das características da área a ser controlada e da possibilidade de instalação de controladores, a regulagem será estabelecida como segue:

- Pressão de saída fixa: é usada quando o sistema a ser controlado não apresenta muita mudança de demanda e não tem muita perda de carga. Não seriam necessárias modificações (modulações) na pressão de saída da VRP, podendo a mesma, portanto, permanecer constante.
- Pressão de saída variável – modulação pela vazão: é utilizada para controle em sistemas que apresentam grande perda de carga e mudanças potenciais no perfil de consumo. Estas mudanças podem ser no tipo de uso, mudança sazonal ou mudança de população, como nos casos de cidades litorâneas.

A decisão pela modulação pela vazão em uma determinada válvula implicará na necessidade de instalação de um medidor de vazão. Geralmente opta-se por um

hidrômetro com geração de pulsos, o qual fornecerá ao controlador da VRP a informação para o controle de pressão.

- Pressão de saída variável – modulação pelo tempo: é utilizada para controlar um sistema que apresenta grande perda de carga, porém com um perfil regular de consumo.

8.1.6 Diâmetro nominal da VRP

O diâmetro nominal da VRP para atender aos parâmetros anteriormente estabelecidos é determinado através da Tabela 10. O diâmetro nominal da VRP é aquele correspondente à válvula cujas características de vazão máxima e vazão mínima da válvula atendam às necessidades de vazão para abastecimento da área a ser controlada. Se o regime da vazão máxima for contínuo (em caso de bombeamento, por exemplo), referir-se aos valores da coluna de fluxo máximo contínuo.

Tabela 10 – Determinação do diâmetro nominal da VRP (Sabesp/BBL, 1999).

Diâmetro Nominal		Vazão Mínima [m³/h]	Vazão Máxima [m³/h]	
[pol.]	[mm]		Fluxo Máximo Intermitente	Fluxo Máximo Contínuo
1 ¼ "	32	0,23	26,1	21,1
1 ½ "	40	0,23	35,9	28,4
2 "	50	0,23	59,1	47,7
2 ½ "	65	4,5	84,0	68,1
3	75	6,8	129,5	104,5
4	100	11,4	227,1	181,7
6	150	26,1	522,4	408,8
8	200	45,4	885,8	704,1
10	250	68,1	1362,7	1112,9
12	300	90,8	1953,2	1589,8
14	350	113,6	2384,7	1930,5
16	400	147,6	3179,7	2498,3

Calcula-se a relação entre vazões máximas, que é a relação entre a vazão máxima da válvula e a vazão máxima obtida durante o período de medição. Esta relação deverá ser maior ou igual ao fator de sazonalidade especificado ou estimado, caso contrário deve-se escolher uma válvula com vazão máxima maior.

Em casos de grande diferença entre a vazão máxima e a vazão mínima para abastecimento da área, e a vazão mínima da válvula for maior que a vazão mínima projetada, deve-se considerar a instalação de válvulas em paralelo.

Analisar, dentro do prazo previsto em que a válvula ficará operando na área, a possibilidade de crescimento populacional e, portanto, aumento de consumo, alterando os perfis de vazão e pressão.

8.1.7 Estimativa de perda de carga

Determinar a perda de carga provocada pelo conjunto hidráulico (VRP, hidrômetro, filtro, registros, reduções, etc.) para determinar o efeito na pressão mínima no ponto crítico da área e em relação ao critério de regulação estabelecido anteriormente.

Com os valores da vazão máxima, do diâmetro nominal da VRP e das demais singularidades do conjunto, determinar através das fórmulas e gráficos específicos a perda de carga do conjunto.

A perda de carga na VRP pode ser determinada utilizando-se a equação (27):

$$\Delta P(\text{mca}) = \left(\frac{Q}{3.6 \times CV} \right)^2 \times 0,702 \quad (27)$$

Onde:

ΔP : Perda de carga na VRP (mca)

Q: Vazão máxima da instalação (m³/h)

CV: Coeficiente de perda de carga (Tabela 11)

Tabela 11 – Relação entre diâmetro nominal e coeficiente de perda de carga
(SABESP/BBL, 1999).

Diâmetro nominal		Coeficiente de perda de carga (mca)
[pol]	[mm]	
1 ¼	32	2,33
1 ½	40	2,52
2	50	3,47
2 ½	65	5,99
3	75	7,89
4	100	13,88
6	150	29,02
8	200	52,99
10	250	88,32
12	300	109,14
14	350	145,10
16	400	186,11

A pressão mínima no ponto crítico não pode atingir níveis que possam comprometer o abastecimento, ou seja, 10 mca conforme norma NBR 12218/94 da ABNT. Se a pressão no ponto crítico cair a níveis muito baixos, verificar a possibilidade de aumentar o diâmetro da tubulação do by-pass e singularidades para o mesmo diâmetro da rede e acoplar a válvula com uma redução, a fim de diminuir o efeito da perda de carga.

Se ainda assim, as perdas de carga estiverem prejudicando o abastecimento no ponto crítico, escolher a válvula com diâmetro nominal imediatamente superior e recalcular, observando os critérios de vazões máximas e mínimas.

Entretanto, estas modificações podem elevar excessivamente o custo da instalação da VRP, inviabilizando-a. Deve-se então buscar uma solução mais genérica, como por exemplo, a exclusão deste ponto crítico da área de influência.

Pode-se, opcionalmente, considerar-se a possibilidade da instalação de VRPs em paralelo, sendo a de menor diâmetro para operar nas vazões baixas e a de maior diâmetro para as vazões altas.

8.1.8 Verificação do risco de cavitação

A pressão de controle (regulagem) deverá ser maior que a pressão mínima requerida de saída para evitar a ocorrência de cavitação, caso contrário, verificar qual pode ser a menor pressão adotada e se é ou não viável esta saída para o controle na área.

Pode-se considerar a possibilidade da instalação de VRPs em série nos casos em que é necessária uma proporção de redução muito grande.

Para efetuar essa verificação podem-se utilizar os dados estabelecidos como se configuram na Tabela 12, que determina a pressão mínima possível na saída da VRP.

Tabela 12 – Relação entre as pressões de montante e jusante, em função da possibilidade do risco de cavitação (Sabesp/BBL, 1999).

A pressão a jusante mínima também pode ser estabelecida através da seguinte equação (28):

$$P_{\text{jus}} (\text{mca}) = 0,35.P_{\text{mont}} - 10$$

Sendo:

P_{JUS} : Pressão a jusante mínima - (mca)

P_{MONT} : Pressão a montante máxima - (mca)

8.2 Controle de pressão com a utilização de booster

A utilização de booster foi considerada como uma solução paliativa, visando atender situações pontuais de abastecimento quando era necessário o aumento da pressão ou da vazão no sistema, causado pelo crescimento da ocupação, pela verticalização ou outros fatores ocorridos em uma determinada área que resultassem em um aumento da demanda de água nos pontos mais elevados dos setores de abastecimento.

Entretanto, é necessária a possibilidade de implantação de soluções alternativas para melhoria do abastecimento, tais como, a setorização de zonas de pressão e a implantação de redes de reforço, antes de se optar pela utilização do booster, devido

os inconvenientes dos altos custos de manutenção dos equipamentos e de consumo de energia elétrica.

No entanto, o booster tem sido utilizado para um efetivo controle de pressões e por permitir manter as pressões necessárias nos pontos mais altos, sem elevá-la necessariamente por uma grande extensão, otimizando o equipamento, reduzindo custos, principalmente de energia elétrica e minimizando as perdas.

Isso se explica quando se considera a conformação de alguns sistemas de abastecimento e do relevo da região, onde a primeira opção é pela implantação de sistemas de bombeamento. Esse fato implica na instalação de redes de reforço e se possível, provável ressetorização do setor, visando atender as demandas reprimidas na região abrangida.

A consequência direta dessa opção é o aumento de pressão em tubulações que deverão transpor elevadas distâncias e também superar as diferenças de cotas altimétricas (Figura 47).

Figura 47 – Comportamento de sistema com setorização clássica (Sabesp, 2005).

Desse modo, tem sido utilizado boosters para o controle e manutenção efetiva das pressões, adequando o sistema, de modo a mantê-lo o mais equilibrado possível em diversas situações.

O booster, em determinados casos pode ser uma solução mais simples e econômica, permitindo o abastecimento adequado em toda área abrangida, conforme mostra a Figura 48.

Figura 48 – Pressão controlada por booster (Sabesp, 2005).

A utilização de softwares de modelos hidrodinâmicos permite a simulação dos efeitos que as intervenções causam no sistema, como a instalação de um booster na rede de distribuição. Várias alternativas de projeto podem ser facilmente simuladas e analisadas com a ajuda de ferramentas especializadas para escolha da melhor alternativa, antes da proposição de uma solução.

A avaliação das relações entre custo de investimento e custo de operação é um fator primordial na escolha da melhor solução. O dimensionamento da tubulação de recalque é feita levando-se em consideração aspectos econômico-financeiros, sendo escolhido o diâmetro e o tipo de bomba mais adequado e que conduz ao mínimo custo de implantação, de operação e manutenção do sistema.

Um importante fator é a utilização de variadores de rotação, que têm sido muito utilizados, proporcionando economia de energia elétrica e diminuição das dimensões do poço de sucção das elevatórias, podendo ser utilizados diretamente nas tubulações de abastecimento, no caso dos booster e ao aumento do fator de potência dos motores das bombas proporcionada por esses equipamentos. Pela variação de rotação, a característica da bomba pode ser modificada para atender as necessidades do sistema. Para uma bomba centrífuga com um mesmo rotor, girando a velocidades diferentes, são válidas as seguintes relações: (29)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1^3}{N_2^3} \quad (29)$$

Onde:

Q = vazão da bomba;

N = rotação da bomba;
 H = altura manométrica da bomba;
 P = potência da bomba.

Essas relações, conhecidas como leis de semelhança, são utilizadas para determinar o efeito da variação da rotação na vazão, altura e potência de uma bomba. A Figura 49 mostra a variação da curva característica da bomba (Q-H), rendimento da bomba e potência da bomba, decorrente da variação da rotação.

Figura 49 – Variação nas características da bomba pela variação da rotação (TSUTIYA, 2004).

Os variadores de rotação mais utilizados são:

- Variador de velocidade hidrocínético

É um acoplamento hidráulico com nível de óleo regulável conforme um parâmetro de controle. É composto por um eixo de entrada de rotação fixa e um eixo de saída, cuja rotação pode variar linearmente desde zero até uma rotação próxima a do eixo de entrada. A variação da rotação é obtida pela atuação de um sensor incorporado, o qual pode reagir em resposta a qualquer variável escolhida como peso, pressão, temperatura, capacidade, volume e nível.

- Inversor de frequência

O inversor de frequência é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variável nos valores da frequência elétrica que alimenta o motor, promovendo uma variação de sua rotação. A variação da frequência é feita em um painel que recebe energia na frequência da rede comandada por um sinal elétrico proveniente de um sensor, que pode ser de pressão para o caso de redes de distribuição de água ou de nível para estações elevatórias de esgotos. Esse sinal, gerado no sensor pode ser convertido por um transdutor na faixa de 4 a 20 mca e transmitido mesmo à distância para o painel para controle da variação da frequência, de modo a provocar a mudança de rotação no conjunto motor-bomba.

8.3 Padronização dos ramais de ligação de água

Os ramais prediais constituem a parte estrutural mais frágil do sistema de abastecimento de água, sendo responsáveis por quase 90% dos reparos de vazamentos realizados na rede de distribuição. Na Região Metropolitana de São Paulo são reparados cerca de 220.000 vazamentos em ramais por ano, o que resulta em um índice de 8,1 vazamentos/km.ano, ou 63 vazamentos/1.000 ramais.ano. Como comparação, sistemas bem operados em grandes cidades têm uma relação de ocorrência de vazamentos em ramais da ordem de 1 vazamento/km.ano, ou 5 vazamentos/1.000 ramais.ano (Sabesp, 2008).

Os ramais não só apresentam a maior incidência de vazamentos no sistema, mas também representam o maior volume de água perdido, especialmente quanto à componente de vazamentos inerentes. Tais vazamentos não são visíveis e não são detectáveis pelos equipamentos de pesquisa e ocorrem principalmente nas juntas e peças que compõem o ramal. Na Figura 50 observa-se a distribuição da frequência de vazamentos num ramal de água padrão.

Figura 50 – Distribuição a frequência de vazamentos num ramal predial
(Sabesp, 2008).

Visando aprimorar os ramais de água, foram executados estudos e análises, para a realização de um diagnóstico, com as seguintes atividades:

- Análise crítica da documentação existente;
- Análise da situação normativa nacional e internacional;
- Avaliação em laboratório;
- Visitas a campo;
- Levantamento quantitativo das falhas em campo (Pareto).

As principais causas desse problema foram diagnosticadas como sendo:

- Má qualidade dos tubos e peças utilizados;
- Inadequação das ferramentas utilizadas (“capa-bode”, por exemplo);
- Má qualidade na execução do ramal (pedras no solo de reaterro, por exemplo);
- Má qualidade da mão-de-obra empregada;
- Excessivo número de juntas existentes nos ramais;

A Figura 51 apresenta uma fissura em tubo de ramal de água, causada pela baixa qualidade do material dos tubos, mesmo trabalhando dentro das normas de pressão estabelecidas. A análise desse material revelou que durante a fabricação do tubo

houve contaminação do material especificado, polietileno de alta densidade (PEAD), com outros materiais, tais como, PVC e mesmo com PEAD reciclado, que não é permitido por norma.

Figura 51 – Fissura causada por contaminação do material (Sabesp, 2008).

Levantamentos realizados na Sabesp mostram que os quando os vazamentos são reparados, são utilizadas ferramentas, técnicas e materiais inadequados, levando a danos nos tubos durante esse processo. A Figura 52 mostra danos causados no tubo por ferramenta inadequada.

Figura 52 – Corte no tubo causado por ferramenta inadequada (Sabesp, 2008)

A falta de padronização dos materiais e procedimentos causou inúmeros problemas na gestão na logística da manutenção, visto que as empresas de saneamento e as prestadoras de serviços contavam com centenas de tipos de materiais disponíveis, inviabilizando a criação de padrões de trabalho e treinamento.

Com base nesse conhecimento, novos materiais e metodologias foram desenvolvidos, permitindo um aumento de eficiência e uma diminuição no número dos serviços de manutenção.

8.4 Proposta de metodologia de análise e aplicação da padronização de ramais de ligação de água

Com o objetivo de trabalhar nas causas primárias da ocorrência de vazamentos em ramais, pode ser implantado um programa extensivo de substituição de ramais, o qual se fundamentará nos seguintes pressupostos:

- Aplicação de materiais que atendam às novas normas e especificações técnicas adequadas;
- Padronização do ramal;
- Treinamento da mão-de-obra;
- Cadastro do ramal;
- Controle tecnológico da execução dos serviços de instalação do ramal.

A estrutura do programa deverá ter os seguintes componentes:

- Tecnológica: padronização, especificação de materiais e métodos;
- Formação técnica: treinamento de mão-de-obra;
- Operacional: substituição otimizada dos ramais;
- Financeira: sustentação do programa e provisão de recursos, próprios ou financiados.

Os ramais de água devem utilizar materiais que atendam especificações técnicas rigorosas, que visem a efetiva redução do número de juntas, facilidade de aplicação

e mantenham a qualidade e durabilidade necessária para um efetivo programa de redução de perdas. A Figura 53 apresenta um modelo de ligação para ramal em rede de PVC, utilizando-se a peça denominada tê de serviço integrado.

Figura 53 – Modelo de tê de serviço integrado (Sabesp, 2008).

Essa peça substitui com vantagens o colar de tomada (Figura 54), pois diminui o número de juntas e elimina a necessidade de mais duas peças e consequentemente duas juntas, do cotovelo e do adaptador, conforme mostra a Figura 55.

Figura 54 – Modelo de colar de tomada (Sabesp, 2008).

Figura 55 – Cotovelo e adaptador (Sabesp, 2008).

A Figura 56 apresenta o padrão para ligações em tubulações de ferro fundido, PVC DEF°F° ou fibrocimento, onde é utilizado um colar de ferro fundido, um registro

macho e um cotovelo adaptador. Esse modelo foi desenvolvido visando substituir o antigo ferrule, pois o mesmo, com a introdução de novas tecnologias de fabricação de tubos em ferro fundido, onde a parede do tubo é menos espessa em comparação com os tubos mais antigos, apresenta dificuldades de instalação, o triplo do tempo de execução, fragilidade no ponto da tomada da água, fragilidade no adaptador e foi desaconselhado por um importante fabricante de tubos de ferro fundido.

Figura 56 – Padrão de ligação para tubulações rígidas
(Sabesp, 2008).

Cabe destacar que, em função do elevado número de problemas causados pelo tubo de polietileno preto, os novos materiais seguem a Norma Técnica Sabesp (NTS 048), que estabelece as condições para a utilização dos tubos em ramais prediais de água.

A principal e mais importante diferença é a obrigatoriedade da impressão, nas paredes externas do tubo, do nome do fabricante, do fornecedor da resina, do lote e

tipo de resina utilizada, o que permite a rastreabilidade do material, desde a fabricação da resina e do tubo, controlando uma importante etapa desse processo.

A efetiva redução de perdas depende da aplicação sistemática de metodologias adequadas e os ramais não fogem a regra, devendo seguir diretrizes que produzam os resultados esperados, quer no âmbito técnico quer no econômico-financeiro.

Para tanto, é necessário estabelecer um programa que possua diretrizes gerais que atendam de modo adequado o contexto do mesmo, tais como:

- Os ramais velhos (ferro galvanizado, PEAD preto, ramais fora do padrão) não deverão ser reparados quando ocorrer um vazamento, porém substituídos integralmente, desde a tomada até o cavalete, utilizando-se os materiais e os padrões especificados.
- Os ramais novos, implantados dentro dos padrões definidos, caso apresentem alguma falha em algum ponto, deverão ter essa peça substituída; assim, se o problema ocorrer no tubo, troca-se o tubo, mantendo o colar de tomada; caso o problema ocorra no colar de tomada, troca-se o colar de tomada.
- Para os casos de substituição preventiva (troca de ramais em uma área específica) ou quando se executa uma substituição de rede com substituição de ramal, a troca deverá ser feita apenas nos casos de ramais fora do padrão.

A segunda diretriz apóia-se no fato de que, se houve uma falha nesse novo ramal, há um problema de origem na peça, que pode ter falhado por problemas de fabricação ou de instalação. Assim, é mais seguro e lógico substituir a peça em vez de se tentar repará-la, em que há o risco de ocorrer outra falha pouco tempo depois. Resumidamente, pode-se dizer que a diretriz geral do programa pode ser traduzida por:

RAMAL NÃO SE REPARA, TROCA-SE

Importante frisar que devem ser estabelecidas estratégias que permitam otimizar as substituições, tais como:

- Substituição corretiva: sempre que ocorrer um vazamento em um ramal, composto de materiais e práticas fora dos padrões e diretrizes propostos, este ramal deverá ser substituído, não se procedendo qualquer tipo de reparo. Caso a falha seja em um ramal novo, já executado dentro dos padrões definidos, a parte do ramal danificada, ou peça, deverá ser substituída.
- Substituição de redes e ramais: na substituição de redes de água, realizar a troca concomitante de todos os ramais vinculados a esse trecho de rede. Neste caso, há que se conciliar com programa de reabilitação de redes e adutoras, que porventura existirem ou estejam em desenvolvimento pelas áreas de engenharia e planejamento;
- Substituição preventiva: troca sistemática de todos os ramais de uma área ou região, através de estudos técnicos que levem à priorização dessas áreas (substituição preventiva). Esses estudos deverão contemplar os dados existentes e definindo-se como prioritárias as áreas onde há maior incidência de vazamentos nos ramais. A execução paulatina das ações de troca obriga a que periodicamente sejam reavaliados os dados e os resultados, definindo-se as novas áreas onde deverão ser previstas esses trabalhos.

Os métodos de execução deverão ser predominantemente, não destrutivos, de maneira a interferir o mínimo possível nos pavimentos das ruas ou calçadas. As ferramentas de trabalho deverão ser adequadas, quer em função da segurança do trabalho, quanto para evitar danos ou má qualidade dos trabalhos.

Deve-se evitar, de forma contundente, a utilização do “capa bode”, instrumento que, ao procurar interromper o fluxo de água, causa danos estruturais no tubo de Polietileno, gerando fragilidades e propiciando a ocorrência de vazamentos no ramal (Figura 57)

Figura 57 – Utilização de ferramentas inadequadas (Capa bode)
(Sabesp, 2008).

A aplicação de ramais com juntas soldadas (eletrofusão, por exemplo) dependerá da implantação das redes de água em tubos de polietileno. Neste caso, todas as especificações de materiais, procedimentos executivos e demais itens de controle da execução devem atender às normas específicas a este método de execução.

O resultado esperado advindo deste programa é a redução substancial de vazamentos nos ramais, e a conseqüente perda de água. Em função da melhor qualidade dos materiais e da mão-de-obra, é de se esperar que a taxa de ocorrência de vazamentos diminua a valores compatíveis com alguns sistemas bem operados em países desenvolvidos.

O diagrama da metodologia proposta para análise e aplicação da padronização de ramais de ligação de água é apresentado na Figura 58.

Figura 58 – Metodologia para aplicação de padronização de ramais de água (Sabesp, 2008).

9 ESTUDO DE CASO

9.1 Análise dos procedimentos para detecção de vazamentos não visíveis

9.1.1 Objetivo

Este estudo tem como objetivo apresentar, através dos resultados obtidos pelas equipes de detecção de vazamentos da Sabesp, Unidade de Negócios Sul (UN Sul), Divisão de Controle de Perdas Sul - MSEP, utilizando os procedimentos estabelecidos pela ABENDE - Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos, as vantagens e desvantagens destes procedimentos e também propor algumas sugestões, em função das experiências obtidas ao longo de dois anos de aplicação.

9.1.2 Metodologia

A metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho baseou-se na avaliação dos relatórios obtidos, seu acompanhamento e discussão, testes comparativos entre os vários modelos de trabalho e análise econômico-financeira, visando o melhor aproveitamento e dimensionamento das equipes.

Para melhor entendimento, cabe um breve histórico sobre a detecção de vazamentos e o início da implantação dos procedimentos adequados, conforme estabelecido em conjunto com a ABENDE.

Até meados do ano de 1999, a detecção de vazamentos não visíveis na Unidade de Negócios Sul mantinha equipes noturnas, utilizando basicamente geofones mecânicos para a execução de seu trabalho, que consistia de pesquisas em setores de abastecimento, áreas de VRPs, boosters e nas pesquisas denominadas "especiais", solicitadas pelos polos de manutenção, que são as unidades operacionais na execução das manutenções dos sistemas de distribuição de água e coleta de esgoto, para auxiliar suas equipes de reparos na localização de vazamentos pontuais.

As equipes praticavam o trabalho noturno, pois os equipamentos utilizados não possuíam a capacidade de detecção dos atuais, nem existiam as técnicas e procedimentos necessários para trabalhar com pressões menores, características do período diurno.

Com a introdução de novos equipamentos para a detecção de vazamentos não visíveis, com amplificadores eletrônicos de maior sensibilidade e maior amplitude de detecção, criou-se a condição de detectarem-se vazamentos no período diurno.

Para tanto, observou-se a necessidade de se conceber e praticar os procedimentos adequados que permitissem a melhor utilização dos equipamentos, dentro dos fatores limitantes que o trabalho diurno impõe.

Esses procedimentos foram criados por representantes de um grupo de empresas, públicas e privadas, a partir de modelos de trabalho existentes em diversos países, adaptando as melhores ideias às condições nacionais. A partir desse modelo, criou-se a base necessária para que, uma vez comprovado o acerto do mesmo, este fosse inserido na Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos - ABENDE, denominado PR – 051, visando a padronização de sua aplicação pela qualificação e certificação dos técnicos em detecção e empresas prestadoras de serviços, bem como das exigências mínimas de equipamento.

A UN Sul treinou em torno de 45 pessoas envolvidas na atividade de detecção de vazamentos não visíveis, tendo já qualificado e certificado dois Nível N3 - universitários, um Nível N2 - técnico e um Nível N1 - operacional. A maioria está ligada aos polos de manutenção, visando dar continuidade nas pesquisas “especiais”.

9.1.3 Resultados obtidos

Com o surgimento dos novos procedimentos, o histórico obtido anteriormente com as pesquisas noturnas, em termos de extensão executada por período não permitia balizar o trabalho no período diurno, sendo necessário um período de

desenvolvimento para melhor conhecimento das possibilidades das equipes e adequação de produtividade com a utilização dos novos procedimentos.

As metas estabelecidas para as equipes de pesquisa noturna na Unidade de Negócios Sul baseavam-se na possibilidade de atender tanto as demandas dos polos de manutenção, áreas de controle sanitário e de manobras, denominadas “pesquisas especiais”, quanto às necessidades de detecção ativa de vazamentos, tendo como meta um máximo de 900 km/ano, estabelecida para o ano de 2000, meta atingida no final do desse período.

Com um total de 6 pessoas, divididas conforme as necessidades realizavam-se uma média de 25 “pesquisas especiais” por período, muitas vezes em detrimento da pesquisa propriamente dita, causando descontinuidade nos trabalhos específicos, afetando diretamente a qualidade do trabalho de pesquisa, com um índice de acertos em torno de 90%, aquém do considerado satisfatório.

Houve então uma fase de transição, no qual o pessoal que atuava diretamente na pesquisa no período noturno passou pelo treinamento dos procedimentos ABENDE, sendo gradativamente realocados para o período diurno.

Para a montagem das equipes voltadas diretamente para a pesquisa ativa de detecção de vazamentos, mesclou-se o pessoal da equipe anterior com novos contratados, que também foram submetidos ao treinamento dos procedimentos. Inicialmente não foram estabelecidas metas, dando-se ênfase para o treinamento de pessoal e análise do procedimento propriamente dito.

Gradativamente, a utilização dos procedimentos mostrou-se válida, permitindo um ganho no índice de acertos da ordem de 8%, passando 90% para 98% em média, com índices de desempenho e índices de cobertura dentro dos padrões pré-estabelecidos.

Cabe observar que houve, em função da mudança do período do trabalho, duas mudanças fundamentais:

- Um acréscimo de atribuições para as equipes de detecção, pois além da detecção de vazamentos, também são verificadas possíveis perdas aparentes em cavaletes e hidrômetros, fiscalização de contratadas e apoio a áreas sensíveis, tais como controle sanitário, manobra e polos de manutenção.
- Uma diminuição de custos com pessoal, devido à eliminação dos custos com adicional noturno.

A somatória desses fatores acabou gerando um ganho significativo no trabalho de detecção de vazamentos não visíveis, tornando a prática bastante atrativa e permitindo um aprimoramento no planejamento das atividades, um ganho na qualidade e no melhor aproveitamento de mão-de-obra especializada, antes restrita devido às limitações do período noturno.

Foram determinadas novas metas para as equipes, baseando-se no livro GORP-Gestão Operacional para redução de Perdas – 1999/2002 - estabelecendo a pesquisa de no mínimo 40% da extensão do sistema de abastecimento de água da MS, com frequência dupla, em torno de 3600 km/ano, com ênfase nas áreas críticas, além de oferecer suporte, quando necessário, para as áreas de controle sanitário, controle de operação e em casos excepcionais, aos polos de manutenção.

Visando atingir as metas estabelecidas, começou-se uma avaliação para a determinação do número ideal de técnicos por equipe, que permitisse alcançar as metas sem perder o foco da qualidade e custos, dentro da disponibilidade de pessoal, levando-se em conta a necessidade de deslocamento e número de pessoas disponíveis.

Com 6 pessoas disponíveis, a montagem das equipes permitiu algumas combinações para realizar os estudos de melhor performance utilizando os procedimentos, e os resultados obtidos foram:

- Com a utilização de duas pessoas por equipe, o desempenho diário foi de 4 km, ou um total mensal de 80 km, considerando uma média de 20 dias úteis /mês. Com essa configuração, montou-se 3 equipes, que perfizeram 240 km/mês;
- Com a utilização de três pessoas por equipe, o desempenho diário foi de 7 km, ou 140 km/mês. Com essa configuração, montou-se 2 equipes, que perfizeram 280 km/mês;
- Com a utilização de quatro pessoas por equipe, o desempenho diário foi de 9 km, ou seja, 180 km/mês. Com essa configuração, montou-se 2 equipes, sendo que a segunda equipe contava com 2 pessoas. Essas equipes perfizeram 260 km/mês.

A composição de equipe de melhor desempenho demonstrou ser a formada por três pessoas, pois se notou que ao alterar a equipe de dois para três homens, o aumento foi de 75% na quantidade de extensão. Com quatro pessoas, esse aumento foi de 29% em relação à equipe de três homens, que se somando a equipe dos dois homens restantes, obteve-se um total mensal de 260 km, resultado aquém das duas equipes compostas por três homens.

Deve ser observado que para cada equipe foi considerada a utilização de veículos, divididos em:

- Um veículo para cada equipe de dois homens, totalizando três veículos;
- Um veículo para cada equipe de três homens, totalizando dois veículos;
- Um veículo para cada equipe de quatro homens, totalizando dois veículos.

Quando se considerou essa distribuição de veículos, observou-se que o custo de implantação de uma equipe de dois homens tornou-se maior que os demais. Também foi considerada a distribuição de equipamentos necessários para a realização das pesquisas, a movimentação do veículo ao longo do percurso e a

fadiga induzida pela própria atividade, quando da utilização de equipamentos acústicos.

Estas extensões foram baseadas nas equipes realizando apenas as pesquisas, desconsiderando as solicitações de “pesquisas especiais” feitas pelos polos, centro de controle e controle sanitário, e servem como balizamento para as empresas que prestam serviço para as companhias de saneamento.

Em função dessa estruturação das equipes, das metas estipuladas e das experiências de campo, observou-se que poderia se obter um aumento de eficiência com a modificação dos procedimentos ABENDE.

O procedimento tem como regra que inicialmente se faça a pesquisa com haste de escuta para a determinação de pontos suspeitos. Após essa determinação, a equipe retornaria ao local, normalmente em data posterior, para a continuação da pesquisa utilizando os equipamentos para a localização dos vazamentos.

Implantando a pesquisa instantânea, ou seja, definindo os pontos suspeitos e confirmando ou não a existência de vazamentos no local no mesmo instante, desde que as condições se apresentem ideais, evitou-se o retorno da equipe ao mesmo local em outro dia, sem prejuízo à qualidade e obtendo-se um aumento de produtividade. Esse procedimento foi facilmente implantado com a equipe de três pessoas.

Tecnicamente o maior ganho deu-se na ausência de variações de pressão ou de outras condições que inviabilizasse a determinação do vazamento em outro dia, pois as condições desde a determinação do ponto suspeito até a efetiva locação do provável vazamento praticamente não se alteram. Essa modificação foi posteriormente implantada no procedimento original.

Ressalta-se que essa modificação no procedimento e adequação de estrutura permitiu um planejamento dos serviços a níveis não alcançados anteriormente, possibilitando organizar o dia a dia das equipes, disponibilidade de equipamentos e facilitando a organização, pelos responsáveis nos reparos das áreas a se programarem com antecedência, disponibilizando recursos tanto.

Também merece destaque o incremento de novas tecnologias, principalmente dos “loggers” ou armazenadores de ruído de vazamentos com possibilidade de correlação.

Essa nova tecnologia necessitou de estudos para que sua utilização fosse feita com a maior eficácia e eficiência possível, abrindo um leque de oportunidades para o avanço da detecção de vazamentos não visíveis e consequentemente da efetiva redução de perdas reais.

9.1.4 Estimativas de ganhos com os novos procedimentos

Com a utilização dos procedimentos descritos, pode-se avaliar de modo mais consistente a recuperação das perdas reais, principalmente quando se leva em consideração os seguintes parâmetros:

Magnitude dos vazamentos = C+L+R

Onde:

C = Conhecimento da existência de um vazamento;

L = Tempo de localização do vazamento;

R = Tempo de reparo do vazamento.

O problema é a dificuldade em saber o quanto dura um vazamento não visível, pois os vazamentos visíveis acabam tendo uma magnitude significativamente mais baixa, pois são rapidamente reparados, apesar de normalmente apresentarem grandes vazões.

Para os vazamentos não visíveis necessita-se uma análise mais apurada. No caso da aplicação de uma política sistemática de pesquisa para a detecção de vazamentos não visíveis, pode-se afirmar que o tempo médio de duração do vazamento é a metade do intervalo de tempo entre as pesquisas.

Para um sistema que tenha um bom gerenciamento de infraestrutura, gerenciamento de pressões e uma boa velocidade e qualidade de reparos e considerando que a vazão de um vazamento, com uma abertura de 6 mm e com uma pressão média estimada em torno de 15 mca é de $16\text{m}^3/\text{dia}$, no intervalo de pesquisa de um ano o vazamento terá a duração média de seis meses, ou 180 dias. Baseados nesse número, a magnitude desse vazamento é de 2880 m^3 .

Na Sabesp, Unidade de Negócios Sul, aplicando-se os procedimentos, foi realizada pesquisa para a detecção de vazamentos, no período de testes, na extensão de 2372 km, sendo encontrados 1819 vazamentos e recuperado um volume estimado, baseado nos dados anteriores, de **$5.238.720\text{ m}^3$** .

Este valor é um exercício razoável do que pode ser efetivamente recuperado quando se aplicam os procedimentos, mas tende a ser maior, pois as pressões de trabalho em geral são maiores que a estimada, significando em vazões de vazamentos recuperados maiores.

Cabe observar que as pesquisas são preferencialmente executadas com uma periodicidade maior em áreas que historicamente apresentam um quadro de vazamentos não visíveis acima da média, com problemas de pressão elevada, redes antigas, etc., mas também são muito utilizadas para controlar as áreas de VRPs e boosters, áreas que mantêm certo equilíbrio no número de vazamentos, pois permitem um controle das vazões mínimas noturnas, excelentes indicadores da existência ou do aparecimento de vazamentos.

O maior diferencial observado com a utilização destes procedimentos é de ter a possibilidade de acesso aos cavaletes facilitado, raramente possível no período noturno, fato que amplia significativamente a análise e observação de problemas nos mesmos, sendo responsáveis por um volume de perdas reais e aparentes significativas.

No período diurno pode-se solicitar a intervenção quase imediata das equipes de manutenção, no caso de um vazamento de maiores proporções, colaborando decisivamente com a diminuição dos volumes das perdas reais.

9.1.5 Desvantagens observadas

A principal desvantagem observada é o custo elevado de aquisição e manutenção dos equipamentos, pois os mesmos são em sua maioria importados, com baixo ou nenhum nível de nacionalização, consequentemente dificultando sua aplicação em pequenas prestadoras de serviços de saneamento, pois o retorno do investimento, via de regra, torna-se longo.

Outro item que é considerado uma desvantagem é a obrigatoriedade de realizarem-se as pesquisas em locais que apresentem pressão mínima igual ou maior a 15 mca. Esta obrigatoriedade é justificada pela dificuldade de se determinar o ponto exato do vazamento com pressões menores, mas em casos da existência desses vazamentos se aplica o trabalho noturno, com os consequentes custos inerentes a esse trabalho. Este procedimento também se aplica em áreas com trânsito excessivo e em algumas áreas industriais.

9.1.6 Resultados alcançados

Na Tabela 13 podem ser observados os resultados alcançados durante o período de testes dos trabalhos executados pelas equipes de campo. Demonstra a quantidade

de vazamentos localizados por mês, somando-se a mão-de-obra da companhia de saneamento (mão-de-obra própria), com um total de 6 homens envolvidos no trabalho, mais a mão-de-obra contratada (contratada), com outros 6 homens.

Cabe observar que a fiscalização é executada somente pelas equipes com mão-de-obra própria, que além dos trabalhos de pesquisa propriamente ditos, também executam serviços de apoio ao centro de controle, controle sanitário e em casos excepcionais, aos polos de manutenção.

Tabela 13 – Relatório anual dos trabalhos de detecção de vazamentos executados na UN Sul.

Relatório anual - Detecção de vazamentos não visíveis - MS

Mão de obra Própria + contratada										
Mês	Mão de obra própria	Contratada	Total	Abertura de F.C	Baixa de F.C	Fiscalização executada	F.C não e	Retrabalho	Exec.	erro na detecção
Janeiro	115	27	142	142	142	142	3	3	136	3
Fevereiro	146	43	189	189	189	189	19	6	164	2
Março	122	70	192	192	192	192	2	3	187	4
Abril	135	100	235	235	235	235	12	5	218	5
Maior	96	78	174	174	174	174	14	2	158	3
Junho	57	40	97	97	97	97	7	1	89	1
Julho	58	65	123	123	123	123	5	1	117	0
Agosto	55	78	133	133	133	133	9	0	124	0
Setembro	124	47	171	171	171	171	5	0	166	0
Outubro	112	52	164	164	164	164	2	0	162	0
Novembro	112	0	112	112	112	112	2	0	110	0
Dezembro	87	0	87	87	87	87	0	0	87	0
Total	1219	600	1819	1819	1819	1819	80	21	1718	18
% de Fiscalização						100,0%				
% Folha de campo executada						94,4%				
% de Retrabalho						1,20%				
% de F.C não executada						4,4%				

A Tabela 14 mostra os resultados que se tornaram possíveis com a aplicação dos procedimentos, obtidos pelas equipes de detecção de vazamentos não visíveis. Quando se iniciou o trabalho durante o período diurno, facilitou o acesso aos cavaletes e outros pontos de contato com a rede de distribuição, necessários para a execução da pesquisa. A visualização e análise destes problemas acabaram por consolidar esta possibilidade, agregando valor ao trabalho da pesquisa em si, contribuindo de maneira importante na diminuição das perdas.

Tabela 14 – Relatório anual de trabalhos problemas detectados pelas equipes, durante os trabalhos de detecção de vazamentos – perdas aparentes.

Perdas aparentes					
Ligações MS	Ligações vistoriadas	Vaz. cav.	Hidros inclinados	Hidros c/problemas	Suspeita de fraude
567231	160429	2212	5702	484	307

Índice de não conformidade: 160429/8705 = 18

9.1.7 Análise do estudo de caso

Após dois anos de trabalho utilizando os procedimentos ABENDE para detecção de vazamentos não visíveis, foi observado que a produtividade e eficiência não sofreram nenhum tipo de redução, permitindo, pelo contrário, uma significativa melhoria no índice de acertos.

As modificações no procedimento trouxeram a possibilidade de planejar e acompanhar as pesquisas de detecção de vazamentos não visíveis em níveis não alcançados anteriormente, com ganhos de qualidade, redução de custos.

Permitiu um melhor planejamento dos responsáveis dos consertos dos vazamentos localizados, determinando qual o dimensionamento ideal para cada equipe em função do trabalho a ser executado, da disponibilidade e do tempo esperado para execução dos mesmos. Desse modo, este trabalho pode servir como ponto de partida para mudanças nos procedimentos, visando sempre o aprimoramento dos serviços de pesquisa para detecção de vazamentos não visíveis e a conseqüente diminuição de perdas reais e aparentes.

10 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões e recomendações deste trabalho são:

- O conhecimento dos equipamentos que podem ser utilizados em atividades de gerenciamento no controle de perdas de água em sistemas de abastecimento público permite balizar os gestores na escolha mais adequada à suas reais necessidades.
- Os equipamentos devem ser criteriosamente avaliados dentro dos objetivos a que se dispõe, quando se propõe realizar um trabalho de redução de perdas reais que apresente resultados a curto, médio e longo prazo. O conhecimento dos equipamentos acústicos de detecção de vazamentos não visíveis, nas suas várias configurações, é de suma importância nessa avaliação. O conhecimento dos princípios físicos que norteiam os mesmos, a capacidade humana em utilizá-los e suas vantagens e desvantagens tornam a avaliação mais precisa e confiável.
- O sucesso dos trabalhos de detecção de vazamentos é potencializado quando se utiliza a metodologia adequada, pois aumenta o índice de acertos e amplia o campo de atividade dos técnicos, com resultados que impactam na redução dos índices de perdas reais em curto prazo.
- As tecnologias de detecção de vazamentos por método não acústico, por sua vez, podem e devem ser utilizadas com bastante critério, visto que são de difícil aplicação e apresentam custos elevados, mas são excelentes opções em casos onde a detecção acústica não apresenta os resultados esperados, principalmente em áreas onde existem ruídos excessivos, profundidades de redes acima de 1,5 metros, adutoras com diâmetros maiores do que 400 mm e falta de água ou pressão.

- O gerenciamento de pressão é um fator primordial para ampliar o controle das perdas nos sistemas de abastecimento, reduzindo a magnitude dos vazamentos inerentes. O conhecimento das potencialidades de VRPs e boosters é de suma importância nesse contexto, pois mantêm o ganho obtido com os trabalhos de detecção de vazamentos e levam a uma menor fadiga do sistema, ampliando sua vida útil e reduzindo a necessidade de manutenções corretivas.
- O gerenciamento da infraestrutura, no tocante à padronização dos ramais de ligação de água, visa atacar um ponto historicamente frágil do sistema, permitindo um ganho na redução de perdas reais. Quando se padroniza, criam-se as condições de treinar, acompanhar e tomar atitudes mais imediatas quando do surgimento de eventuais problemas, agilizando a resolução dos mesmos.
- É necessário que os gestores que atuam no gerenciamento do controle de perdas conheçam com detalhes as ferramentas e metodologias existentes, suas potencialidades e limitações, permitindo com isso adequar e utilizar seus recursos, tanto financeiros quanto humanos, de modo a atender seus propósitos. Esse conhecimento terá como consequência resultados a curto, médio e longo prazos, adequados a sua realidade e capacidade, permitindo o planejamento de suas atividades e colaborando com a melhoria da imagem das prestadoras de serviços de saneamento, aumento de receita, redução de despesas e maior qualidade ambiental.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS. **Deteccão de Vazamentos Não-Vísíveis – Métodos Acústicos**. Apostila do Curso Ministrado no CETRE – Centro de Treinamento da ABENDE. São Paulo, 2005.

BOND, A. Leak Location Using the Sahara@Leak Location System, maio 2007. WRC. Disponível em: < <http://www.wrcplc.co.uk/default>>. Acesso em 03 maio 2007.

CLARKE, A. **Leak Deteccion in Large Diameter Trunk Mains**. Palestra proferida para empresas de saneamento em Portugal. Lisboa, 2007.

GERMANOPOULOS, G. & JOWITT, P. W. Leakage reduction by excessive pressure minimization in a water supply network. **Proc. Inst. of Civ. Engr.**, part 2, n. 87, p. 195-214, June 1989.

GRATÃO, U. & PORTO, R. M. Análise de Desempenho de Válvulas Redutoras de Pressão em uma Rede de Distribuição de Água. In: V Simpósio de Recursos Hídricos. Natal, RN. 2000. **Anais...**

HELLER, L. Saneamento e Saúde.: Organização Pan-Americana da Saúde/Organização Mundial da Saúde, Brasília, 1997.

HUBERG. **Relatório Teste Pesquisa de Vazamentos Inerentes com Tecnologia HUBERG na FCI Teodoro Beaurepaire**, São Paulo, 2007.

INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION – IWA. **Leakage Location and Repair – Guidance Notes**. Março 2007

LAMBERT, A. **Perdas de Água**. São Paulo: Consultoria à BBL Bureau Brasileiro Ltda., 1998.

ROSEN, G. **Uma história da Saúde Pública**. São Paulo: Hucitec: Universidade Estadual Paulista; Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pós-Graduação em Saúde Coletiva, 1994.

423p.

SABESP / BBL. **Manual de Controle de Pressão através de Válvulas Redutoras de Pressão**. São Paulo: BBL, 1999. 100 p. (Relatório técnico).

SABESP. **Manual de Operação - Detecção de Vazamentos Não Visíveis**. Apostila para Curso Interno. São Paulo, 2004.

SABESP. **Manual de Operação - Armazenadores de Ruídos – A.R.** Apostila para Curso Interno. São Paulo, 2003.

SABESP. **Perdas. Nível técnico-gerencial**. Apostila para Curso Interno. São Paulo, 2005.

SABESP. **Programa de Substituição de Ramais de Água na Metropolitana**. São Paulo, 2008.

SEBA KMT. **Detecção de Vazamentos de Água**. Palestra proferida na Copasa. Nova Lima, 2007.

Suman, L. E. e Sevciuc, N.. **Detecção de Vazamentos Não Visíveis em Tubulação Enterrada de Líquidos sob Pressão, com a Utilização de Equipamentos Acústicos e Correlacionador de Ruído de Vazamento**. Trabalho apresentado no XV Congresso Nacional de Ensaios Não-Destrutivos, São Paulo, 1996.

SILVA, F. G. B.; REIS, L. F. R. & SOARES, A. K. Calibração de rede de distribuição de água considerando as perdas por vazamentos explicitamente no modelo com o uso de algoritmos genéticos – Aplicação para rede da cidade de São Carlos, SP. In: Seminário sobre Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água, João Pessoa, PB. 2002. **Anais...**

TARDELLI FILHO, J. Controle e Redução de Perdas. In: TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. Ed.1. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. 643 p.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. Ed.1. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. 643 p.

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A. & TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 3, p. 277–285, Mar. 1999.

VIEGAS, J. V. Redução de Pressão – uma alternativa técnica para melhorar a eficiência operacional. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, PB. 2001. **Anais...**

YOSHIMOTO, P. M.; TARDELLI FILHO, J. & SARZEDAS, G. L. **Controle de Pressão na Rede**. Brasília, 1999 (Programa Nacional de Combate ao Desperdício de água, Documentos Técnicos de Apoio – D1).

WATERWORKS BUREAU. **Water Leak Prevention**. Apostila para Curso. Sapporo, Japão, 1994.

ZANIBONI, Nilton *et al.* **Análise crítica dos novos procedimentos para detecção de vazamentos não visíveis**. Trabalho apresentado no XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville, 2002. **Anais...**

ZANIBONI, Nilton *et al.* **Deteção de Vazamentos Não Visíveis e Novos Indicadores de Perdas no Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de São Paulo**. Monografia (Curso de Especialização). Faculdade de Saúde Pública, Universidade São Paulo, São Paulo, 2001.