

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOÃO FERREIRA DA SILVA JÚNIOR

**DETECÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA ATRAVÉS DE REDE DE SENSORES SEM FIO**

RECIFE

2017

JOÃO FERREIRA DA SILVA JÚNIOR

**DETECÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA ATRAVÉS DE REDE DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de Concentração: Eletrônica.
Orientadora: Prof^ª Dr^ª Fernanda Maria Ribeiro de Alencar

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S586d Silva Júnior, João Ferreira da.
Detecção de perdas em sistemas de distribuição de água através de rede de sensores sem fio / João Ferreira da Silva Júnior. - 2017.
166 folhas, il., tabs., abr., sigl. simb.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fernanda Maria Ribeiro de Alencar.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.
Inclui Referências, Apêndices e Anexo.

1. Engenharia Elétrica. 2. Perdas. 3. Sistemas de distribuição. 4. Detecção. 5. Redes de sensores sem fio. I. Alencar, Fernanda Maria Ribeiro de (Orientadora).
II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-19



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

JOÃO FERREIRA DA SILVA JÚNIOR

TÍTULO

**“DETECÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA ATRAVÉS DE REDE DE SENSORES SEM FIO.”**

A comissão examinadora composta pelos professores: FERNANDA MARIA RIBEIRO DE ALENCAR, DES/UFPE; MARCO AURÉLIO BENEDETTI RODRIGUES, DES/UFPE e JAELSON FREIRE BRELAZ DE CASTRO, CIN/ UFPE sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **JOÃO FERREIRA DA SILVA JÚNIOR APROVADO.**

Recife, 15 de fevereiro de 2017.

MARCELO CABRAL CAVALCANTI
Coordenador do PPGE

FERNANDA MARIA RIBEIRO DE ALENCAR
Orientadora e Membro Titular Interno

JAELSON FREIRE BRELAZ DE CASTRO
Membro Titular Externo

**MARCO AURÉLIO BENEDETTI
RODRIGUES**
Membro Titular Interno

∴

Dedico esta dissertação à minha família, professores e a todos os amigos que me deram o suporte necessário para chegar até aqui de forma justa e perfeita. Em especial à minha esposa: “Você me faz querer ser um homem melhor”.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por permitir que tudo acontecesse em minha vida, e não somente nestes anos como aluno de mestrado, mas, que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Faço um agradecimento especial à minha esposa, Janaina Lima de Oliveira, pela compreensão e pelo apoio em todos os momentos difíceis, e também ao meu pai João Ferreira da Silva e à minha mãe Vera Lúcia de Oliveira, que sempre me apoiaram incondicionalmente e são as principais bases que formaram, e onde hoje se sustentam, meus conceitos morais e éticos.

À Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de fazer o curso.

À minha professora e orientadora Fernanda Maria Ribeiro de Alencar, por confiar em mim, pelo suporte, pelas suas correções e incentivos, pela compreensão e motivação, pela oportunidade de poder absorver um pouco de seu conhecimento, pela dedicação em me orientar, e, principalmente pela paciência quase que infinita. Aos membros do grupo de pesquisa *Group on Requirements Engineering, Network and Computational Intelligence* (GRENCI).

Ao professor Marcos Aurélio Benedetti Rodrigues por seus aconselhamentos rígidos e certos. Aos professores João Henrique Ranhel Ribeiro e Juliano Bandeira Lima que também me acompanharam nessa jornada. Ao professor Jaelson Freire Brelaz de Castro e a todos os membros do grupo de pesquisa *Requirements Engineering Laboratory* (LER).

A todos os professores que passaram por minha vida e semearam conhecimento.

À Companhia Pernambucana de Saneamento Compesa por permitir que eu desenvolvesse esta pesquisa, e também pelo vasto conhecimento transmitido por aqueles colaboradores que ao longo do tempo me apoiaram.

Ao amigo, e parceiro acadêmico, Sérgio Francisco Tavares de Oliveira Mendonça que sempre esteve presente quando precisei de apoio.

À minha família pelo suporte e apoio incondicionais.

∴

*“... Não! Tentar não. Faça, ou não faça. Tentativa não há.”
(Mestre Yoda)*

RESUMO

O consumo descontrolado da água tem levado esse recurso natural limitado à sua exaustão, e questões de ordem ambiental tem sido evidenciadas devido à escassez de água vivida nos últimos anos. Um dos aspectos importantes observados no setor de saneamento são as perdas de água, que ocorrem durante todos os processos operacionais do sistema de abastecimento de água. As maiores perdas de água são encontradas nas redes de distribuição urbanas que fornecem água para os setores da indústria e comércio e para o consumo residencial. Constitui o índice de perdas, um dos principais indicadores de desempenho das empresas do setor de saneamento. No Brasil o elevado índice de perdas é preocupante, dados do SNIS mostram que em média as empresas de saneamento apresentam perdas em torno de 40%, tendo algumas facilmente superado os 60%. Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma rede composta por sensores sem fio que dotados de processamento local sejam capazes de detectar automaticamente as perdas. De início foi realizada uma revisão da literatura para confirmar a escolha da área de pesquisa e identificar evidências publicadas sobre o tema de estudo. Em seguida foi feito um mapeamento sistemático da literatura no intuito de identificar quais métodos, estratégias e ferramentas são utilizadas para detectar e combater as perdas em sistemas de distribuição de água. Foi proposto um modelo de arquitetura, constituída por sensores sem fio, essa arquitetura foi aplicada no desenvolvimento de um protótipo funcional com o objetivo sensoriar o fluxo da água percorrendo uma rede de distribuição. O protótipo desenvolvido foi então aplicado em um painel de simulação no intuito emular uma rede de distribuição de água e monitorar, através de sensores, a ocorrência de distúrbios a fim de identificar possíveis perdas no sistema de distribuição de água. A detecção de perdas utilizando rede de sensores se mostrou eficaz na detecção de anomalias na rede, sendo capaz de identifica-la em até 10 minutos após sua ocorrência.

Palavras-chave: Perdas. Sistemas de distribuição. Detecção. Redes de sensores sem fio.

ABSTRACT

The uncontrolled consumption of water has led to this natural resource limited to its exhaustion, and environmental issues have been evidenced due to the shortage of water experienced in recent years. One of the important aspects observed in the sanitation sector is water losses, which occur during all the operational processes of the water supply system. The largest water losses are found in urban distribution networks that provide water for the industry and commerce sectors and for residential consumption. It is the index of losses, one of the main performance indicators of companies in the sanitation sector. In Brazil, the high loss rate is worrisome, data from the SNIS show that, on average, sanitation companies present losses of around 40%, with some easily surpassing 60%. The objective of this work is to develop a network composed of wireless sensors that have local processing capable of automatically detecting losses. Initially, a literature review was carried out to confirm the choice of the research area and to identify published evidence on the study topic. Then, a systematic mapping of the literature was carried out in order to identify which methods, strategies and tools are used to detect and combat losses in water distribution systems. It was proposed an architecture model, consisting of wireless sensors, this architecture was applied in the development of a functional prototype with the objective of sensing the water flow through a distribution network. The developed prototype was then applied in a simulation panel in order to emulate a water distribution network and to monitor, through sensors, the occurrence of disturbances in order to identify possible losses in the water distribution system. The detection of losses using a sensor network proved to be effective in the detection of network anomalies, being able to identify it within 10 minutes after its occurrence.

Keywords: Losses. Distribution system. Detection. Wireless sensors network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Visão geral dos processos de MSL.	22
Figura 2 – Consumo médio de água por categoria no Brasil	27
Figura 3 – Captação da água bruta	28
Figura 4 – Adução da água bruta	29
Figura 5 – Tratamento da água	31
Figura 6 – Reservação da água tratada	32
Figura 7 – Visão geral de um sistema de distribuição de água	34
Figura 8 – Perdas no sistema de abastecimento de água	38
Figura 9 – Gráfico da evolução histórica do indicador de perdas na distribuição	39
Figura 10 – Perdas de água no Estado de Pernambuco	41
Figura 11 – Modelo de matriz para balanço hídrico proposto pela IWA	45
Figura 12 – Visão geral das aplicações de RSSFs	50
Figura 13 – Arquitetura geral de um nó sensor	52
Figura 14 – Topologia de rede em estrela	54
Figura 15 – Topologia de rede em malha	55
Figura 16 – Topologia de rede híbrida	56
Figura 17 – Topologia de rede híbrida baseada em ZigBee	58
Figura 18 – Modelo base do protocolo MQTT	60
Figura 19 – Visão expandida dos processos de MSL	64
Figura 20 – Gráfico do número de estudos incluídos por ano	71
Figura 21 – Modelo de setorização da rede em DMA	90
Figura 22 – Modelo ontológico para descrição de dispositivo de IoT	92
Figura 23 – Arquitetura do LWC	93
Figura 24 – Camada de aquisição da arquitetura LWC	94
Figura 25 – Camada de <i>middleware</i> da arquitetura LWC	96
Figura 26 – Modelo de dados da camada de <i>middleware</i> da arquitetura LWC	97
Figura 27 – Camada de comunicação da arquitetura LWC	98
Figura 28 – Ciclo de estados e modo de transmissão ZigBee	100
Figura 29 – Camada de aplicação da arquitetura LWC	101
Figura 30 – Visão geral da aplicação em BI	102
Figura 31 – Arduino Mega 2560	103
Figura 32 – Pinagem do microcontrolador ATmega2560	105
Figura 33 – Módulo ZigBee (XBee Pro S1)	108
Figura 34 – Pinagem do módulo ZigBee (XBeePro S1 e S2)	108
Figura 35 – Módulo <i>G3/4 Water Flow sensor</i>	110
Figura 36 – Pinagem do módulo <i>G3/4 Water Flow sensor</i>	111

Figura 37 – Diagrama esquemático do Arduino Mega 2560	112
Figura 38 – Diagrama esquemático do módulo ZigBee (XBeePro S1 e S2)	113
Figura 39 – Diagrama esquemático do módulo <i>G3/4 Water Flow sensor</i>	113
Figura 40 – Construção do protótipo para validação da arquitetura LWC	114
Figura 41 – Aspecto final do protótipo para validação da arquitetura LWC	115
Figura 42 – Monitoramento da recepção de dados	116
Figura 43 – Diagrama do painel de simulação	117
Figura 44 – Construção do painel de simulação	120
Figura 45 – Funcionamento da arquitetura LWC	122
Figura 46 – Identificação de bursts	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características gerais das perdas	42
Tabela 2 – Fontes de pesquisa	66
Tabela 3 – Palavras-chave de pesquisa	67
Tabela 4 – Resultado do mapeamento sistemático	70
Tabela 5 – Estudos incluídos de maior aderência	70
Tabela 6 – Como são detectadas as perdas em sistemas de distribuição de água . .	76
Tabela 7 – Estratégias para combate às perdas em sistemas de distribuição de água	78
Tabela 8 – Ferramentas ou modelos que auxiliam no processo	80
Tabela 9 – Fragilidades identificadas nos estudos incluídos	83
Tabela 10 – Síntese das fragilidades identificadas	85
Tabela 11 – Quadro resumo do mapeamento sistemático	86
Tabela 12 – Especificações técnicas do Arduino Mega 2560	104
Tabela 13 – Relação dos tipo de dados na plataforma Arduino	106
Tabela 14 – Especificações técnicas do módulo <i>G3/4 Water Flow sensor</i>	110
Tabela 15 – Relação de material e custos do protótipo	116
Tabela 16 – Especificações técnicas do Arduino com ATmega328/P	118
Tabela 17 – Relação de material e custos do painel de simulação	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ACP	Análise de Componentes Principais
AFI	Análise da Frequência Instantânea
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
BI	<i>Business Intelligence</i>
C4ISR	<i>Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Compesa	Companhia Pernambucana de Saneamento
CRM	<i>Customer Relationship Management</i>
DMA	<i>District Metered Area</i>
DMC	Distrito de Medição e Controle
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
EQM	Erro Quadrático Médio
FFD	<i>Full-Function Device</i>
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
IBM	<i>International Business Machines</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ILMSS	<i>International Leakage Management Support Services</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific & Medical</i>
IWA	<i>International Water Association</i>
IWEMC	<i>Intelligent Wireless Electric Power Management and Control</i>
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Network</i>
LWC	<i>Local Water Control</i>

MAC	<i>Media Access Control</i>
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MQTT-SN	<i>Message Queuing Telemetry Transport for Sensors Networks</i>
MS	Ministério da Saúde
MSL	Mapeamento Sistemático da Literatura
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PMSS	Programa de Modernização do Setor de Saneamento
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RFD	<i>Reduced-Function Device</i>
RSSFs	Redes de Sensores Sem Fio
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SIP	Sistema de Informações Operacionais
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
StArt	<i>State of the Art through Systematic Review</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
W3C	<i>World Wide Web Consortium</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WSNs	<i>Wireless Sensor Networks</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
CE	Consumo Estimado não-medido
D	Desvio padrão
DC	<i>Direct Current</i>
GHz	Gigahertz
H	Transformada de Hilbert
$ H $	Transformada de Hilbert Normalizada
IP	Índice de Perdas
K	Fator de correção para o consumo estimado não-medido
KB	Kilobyte
$Kbps$	Kilobit por segundo
L/min	Litros por minuto
mA	Miliampere
MHz	Megahertz
MPa	Megapascal
ms	Milissegundo
$^{\circ}C$	Grau centígrado, ou grau Celsius
pH	Potencial ou concentração hidrogeniônica do meio
QD	Quadratura Direta
TEO	<i>Teager Energy Operator</i>
V	Volt
VAC	Volume de Água Consumido
VAD	Volume de Água Distribuído
\overline{VAD}	Média Aritimética Simples do VAD
VAP	Volume de Água Produzido
VAS	Volume de Água de Serviço

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contextualização	18
1.2	Hipótese e Objetivos de Pesquisa	19
1.2.1	Hipótese de Pesquisa	19
1.2.2	Objetivos de Pesquisa	20
1.3	Procedimentos Metodológicos	21
1.3.1	Fase 1 — Revisão de Literatura	21
1.3.2	Fase 2 — Mapeamento Sistemático da Literatura	22
1.3.3	Fase 3 — Construção do Protótipo para Controle Local de Água	23
1.3.4	Fase 4 — Validação do Protótipo para Controle Local de Água	23
1.4	Contribuições	23
1.5	Estrutura da Dissertação	24
2	SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	25
2.1	Conceituação dos Sistemas de Abastecimento de Água	25
2.2	Captação e Adução da Água Bruta	26
2.3	Tratamento e Reservação da Água Tratada	29
2.4	Sistema de Distribuição de Água	32
2.5	Considerações Finais	35
3	PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	36
3.1	Definições e Conceitos das Perdas	36
3.1.1	Perdas Físicas	42
3.1.2	Perdas Não-físicas	43
3.2	Métodos para Gestão de Perdas	43
3.2.1	Balanco Hídrico	44
3.2.2	Análise da Vazão Mínima Noturna	45
3.2.3	Setorização em DMA	46
3.3	Considerações Finais	47
4	REDES DE SENSORES SEM FIO	49
4.1	Definições e Conceitos das Redes de Sensores Sem Fio	49
4.2	Arquitetura Geral de um Nó Sensor	51
4.3	Topologia para RSSFs	52
4.3.1	Topologia Estrela	54
4.3.2	Topologia em Malha	54

4.3.3	Topologia Híbrida	55
4.4	Tecnologia ZigBee	56
4.5	Protocolo MQTT-SN	59
4.6	Considerações finais	61
5	MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA	63
5.1	Planejamento	63
5.1.1	Escopo do MSL	64
5.1.2	Questões de pesquisa	66
5.1.3	Expressão de busca	67
5.1.4	Procedimentos para Busca de Publicações	68
5.1.5	Critérios para Seleção das Fontes de Pesquisa	68
5.1.6	Critérios de Inclusão e Exclusão	69
5.2	Condução	69
5.3	Relato	71
5.3.1	Q1 – Como são detectadas as perdas em sistemas de distribuição de água?	72
5.3.2	Q2 – Que estratégias são utilizadas para combater as perdas em sistemas de distribuição de água?	77
5.3.3	Q3 – Existem ferramentas ou modelos que auxiliam no processo? Quais são?	79
5.3.4	Fragilidades identificadas nos estudos incluídos	81
5.4	Considerações finais	83
6	REDE DE SENSORES PARA DETECÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	87
6.1	A Demanda por Água	87
6.2	Cálculo de Perdas	89
6.3	Arquitetura para Controle Local de Água	92
6.3.1	Camada de Aquisição	94
6.3.2	Camada de Middleware	95
6.3.3	Camada de Comunicação	98
6.3.4	Camada de Aplicação	100
6.4	Desenvolvimento do Protótipo LWC	102
6.4.1	Plataforma de Desenvolvimento Arduino	103
6.4.2	Módulo de Comunicação ZigBee	107
6.4.3	Módulo Medidor de Fluxo da Água	109
6.4.4	Diagrama Esquemático	112
6.4.5	Protótipo Utilizando a Arquitetura LWC	113
6.5	Painel de Simulação	117
6.5.1	Construção do Painel de Simulação	118

6.5.2	Execução da Simulação	120
6.5.3	Resultados da simulação	123
6.6	Considerações finais	123
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	126
7.1	Conclusões	126
7.2	Contribuições	130
7.3	Trabalhos futuros	131
	REFERÊNCIAS	132
	APÊNDICES	137
	APÊNDICE A – CÓDIGO DO MÓDULO SENSOR	138
	APÊNDICE B – CÓDIGO DO MÓDULO MONITOR	140
	APÊNDICE C – CÓDIGO DA TABELA SENSORS	143
	APÊNDICE D – CÓDIGO DA TABELA DATASTREAM	145
	ANEXOS	147
	ANEXO A – CÓDIGO DA BIBLIOTECA MQTT	148

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma visão geral da dissertação. A seção 1.1 introduz o tema e apresenta o contexto da pesquisa juntamente com a motivação que levou ao desenvolvimento deste trabalho, na seção 1.2 é apresentada a hipótese proposta e os objetivos de pesquisa desta dissertação, a abordagem de pesquisa adotada é apresentada na seção 1.3 como um compêndio dos procedimentos metodológicos, a seção 1.4 apresenta um resumo das contribuições deste trabalho, e, por fim, é apresentada na seção 1.5 a estrutura de todo o documento.

1.1 Contextualização

A água é um recurso natural limitado e seu consumo descontrolado leva à exaustão dos mananciais, ocasionando questões de ordem ambiental e agravando questões de ordem social quando da ocorrência de desabastecimentos ou impossibilidade do fornecimento de água para a população.

Considerando as recomendações da WHO (2011)¹, o acesso aos serviços de saneamento básico devem englobar o fornecimento da água tratada de forma ampla e irrestrita à população, no intuito de prover qualidade de vida por meio da promoção à saúde.

Em face à escassez de água vivida nos últimos anos a boa gestão dos recursos hídricos assume um papel prioritário nas definições de políticas públicas, pois impactam severamente nos diversos setores econômicos da sociedade, no meio ambiente e na qualidade de vida da população. (EPA, 2010)²

Um dos aspectos importantes observados no setor de saneamento são as perdas de água, que ocorrem durante todos os processos operacionais do sistema de abastecimento de água. Apesar de sua menor representatividade no consumo, em média 30% do consumo total, as maiores perdas de água são encontradas com maior frequência nas redes de distribuição urbanas que fornecem água para os setores da indústria e comércio e para o consumo residencial.

¹ *World Health Organization* (WHO): em português Organização Mundial da Saúde (OMS), agência especializada em saúde, subordinada à Organização das Nações Unidas (ONU), tem como objetivo promover ao máximo possível o nível de saúde de todos os povos. A OMS define saúde como sendo um “estado de bem-estar físico, mental e social e não consistindo apenas da ausência de doença ou enfermidade”.

Disponível em: <<http://www.who.int>>. Acesso em: mar. 2015.

² *Environmental Protection Agency* (EPA): agência federal do governo dos Estados Unidos da América encarregada da proteção à saúde humana e meio ambiente.

Disponível em: <<https://www.epa.gov>>. Acesso em: mar. 2015.

As perdas são de fato inerentes, mas indesejáveis, aos sistemas de abastecimento de água. Constituem o índice de perdas, um dos principais indicadores de desempenho das empresas do setor de saneamento. Reduzir as perdas, em todo o sistema de abastecimento, se mostra como um grande desafio do setor, na medida que afeta diretamente os aspectos social, financeiro e ambiental quando da disponibilidade de água para captação e posterior oferta para o consumo. Por isto se faz necessário o devido controle através da gestão das perdas, possibilitando o melhor aproveitamento da capacidade hídrica.

De acordo com informações publicadas pela ABES (2013)³, os indicadores de perdas de água das operadoras de saneamento no Brasil mostram que apesar de uma ligeira queda, em torno de 6.8%, ter sido observada nos últimos 12 anos, ainda há muita ineficiência na gestão das perdas.

1.2 Hipótese e Objetivos de Pesquisa

O processo de gestão das perdas passa por identificar e classificar as eventuais ocorrências, para em seguida efetuar uma análise dos impactos causados e determinar um grau de priorização, e, por fim atuar na resolução das causas raízes que provocam as perdas.

As empresas de saneamento possuem monitoramento constante das redes de adutoras, devido ao grande volume de água transportado oriundo dos mananciais e das estações de tratamento até a distribuição ou reservação.

Já na rede de distribuição de água, que leva ao consumo de fato, o monitoramento se dá, em grande parte, em função da leitura mensal do consumo para geração do faturamento, este é o padrão adotado mundialmente.

Ademais isto faz com que as empresas deixem de perceber de imediato alguma ocorrência de distúrbios na rede de distribuição final, o que poderia representar alguma perda. Em função disto, neste trabalho foi tratado especificamente das *perdas em sistemas de distribuição de água*.

1.2.1 Hipótese de Pesquisa

As principais técnicas utilizadas na detecção de perdas em sistemas de distribuição de água se baseiam em adaptações sobre o modelo para a matriz do balanço hídrico

³ Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES): associação sem fins lucrativos que reúne profissionais do setor. Tem como missão ser propulsora de atividades técnico-científicas, político-institucionais e de gestão que contribuam para o desenvolvimento do saneamento ambiental, visando à melhoria da saúde, do meio ambiente e da qualidade de vida das pessoas. Disponível em: <<http://abes-dn.org.br>>. Acesso em: abr. 2015.

proposto pela *International Water Association* (IWA)⁴ e na minimização da complexidade do sistema de distribuição de água através da setorização da rede de distribuição em sistemas menores.

Ambas as técnicas tem como principais objetivos: a) isolar as ocorrências de distúrbios na rede de distribuição de água; e, b) identificar a magnitude da perda de água. A partir de então, se estabelecem as prioridades para correção e planejamentos das eventuais ações de reparo necessárias. (European Commission, 2015; SILVA, 2015; JÚNIOR, 2014)

Contudo o problema na aplicação dessas técnicas está no fato de que grande parte dos dados necessário às análises são coletados com um intervalo de tempo que pode variar bastante, em função da natureza mensal dos processos de faturamento comercial das empresas de saneamento.

Portanto, neste trabalho foi questionada a possibilidade de: como detectar automaticamente as perdas em sistemas de distribuição de água?

Tendo em vista obter uma solução para este questionamento, foi proposta a hipótese de pesquisa em que: as redes de sensores sem fio poderiam ser utilizadas para detectar automaticamente as perdas em sistemas de distribuição de água.

1.2.2 Objetivos de Pesquisa

Este trabalho teve como objetivo geral: desenvolver uma rede composta por sensores sem fio que dotados de processamento local fossem capazes de detectar automaticamente as perdas.

Pretendeu-se com isso prover um novo método para detecção de perdas em sistemas de distribuição de água que, de modo automático, e com o menor tempo possível, forneça dados que permitam uma melhor eficiência na gestão de perdas das empresas de saneamento.

Para que fosse possível alcançar o objetivo geral, foram propostos os objetivos específicos relacionados a seguir:

- a) realizar um mapeamento sistemático da literatura: no intuito de identificar quais métodos, estratégias e ferramentas são utilizadas para detectar e combater as perdas em sistemas de distribuição de água, foi realizado um mapeamento sistemático da literatura que avaliou a literatura cinza disponível e a produção científica de empresas e pesquisadores da área de saneamento;

⁴ International Water Association (IWA): organização sem fins lucrativos formada por profissionais e empresas do setor hídrico. É a referência mundial e fonte de conhecimento do setor, promovendo a evolução dos padrões e compartilhamento de melhores práticas em soluções hídricas sustentáveis. Disponível em: <<http://www.iwa-network.org>>. Acesso em: abr. 2015.

- b) construir um modelo de arquitetura para sensoriamento remoto sem fio: no intuito de avaliar a hipótese de pesquisa foi proposto um modelo de arquitetura constituída por sensores sem fio e dotada de processamento local, essa arquitetura foi aplicada no desenvolvimento de um protótipo funcional;
- c) simular a ocorrência de distúrbios em uma rede de distribuição através de um painel de simulação, coletar e avaliar os dados gerados: no intuito de concluir a avaliação da hipótese e atingir o objetivo geral de pesquisa foi desenvolvido um painel de simulação para rede de distribuição de água, na qual o protótipo desenvolvido foi aplicado, foram gerados dados a partir do sensoriamento da passagem de água, os dados coletados foram processados, e, por fim exibidos em um painel de indicadores.

1.3 Procedimentos Metodológicos

Esta seção fornece uma visão geral da abordagem de pesquisa adotada nesta dissertação, apresenta os caminhos e estratégias empreendidas no intuito de alcançar os objetivos estabelecidos.

De acordo com Biolchini et al. (2005) a ciência pode ser entendida como uma atividade social e cooperativa, e o conhecimento científico é o resultado de um processo cumulativo desta cooperação. O conhecimento científico é desenvolvido através de muitos caminhos e abordagens, atualmente definidos como metodologia científica. O método de abordagem é o caminho, a forma, o modo do pensamento. É ainda uma abordagem para o nível de abstração do fenômeno, concluindo como o conjunto de processos ou operações mentais empregadas na pesquisa.

Neste trabalho foi realizada uma *pesquisa exploratória*, que visa determinar uma melhor definição para um fenômeno, e adotado o método *hipotético dedutivo*, que consiste na construção de um pressuposto científico baseado em hipóteses que deverão ser validadas a partir do processo de inferência dedutiva acerca da análise dos fenômenos estudados, no intuito de determinar a veracidade do pressuposto.

1.3.1 Fase 1 — Revisão de Literatura

A revisão de literatura é comumente um passo inicial em qualquer pesquisa científica utilizado para confirmar a escolha da área de pesquisa a ser trabalhada e para identificar evidências publicadas na área de estudo. Também fornece uma concepção inicial sobre o corpo de conhecimento ao passo que apresenta os principais referenciais teóricos e estudos relevantes que compõem a base da pesquisa empreendida.

No desenvolvimento desta pesquisa foram realizados estudos a fim de compor um corpo de conhecimento acerca dos sistemas de abastecimento e distribuição de água e das redes de sensores sem fio, tema de estudo desta dissertação.

De início foram identificadas e estudadas fontes de informações sobre os sistemas de abastecimento de água e suas partes constituintes, em seguida se buscou conhecer as definições e conceitos sobre as perdas em sistemas de distribuição de água, e, por fim, esta fase foi concluída com estudos sobre os conceitos relacionados às redes de sensores sem fio.

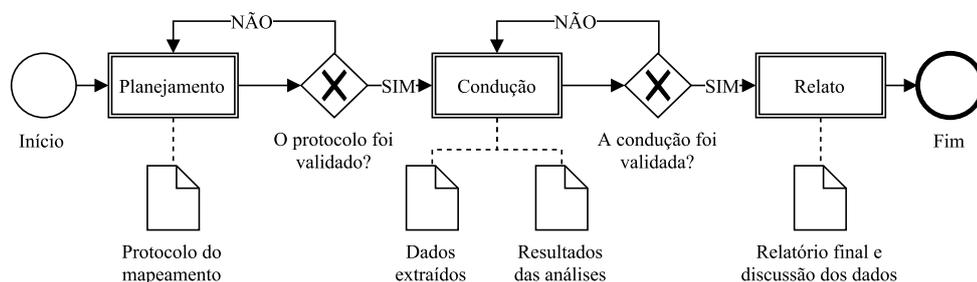
1.3.2 Fase 2 — Mapeamento Sistemático da Literatura

O Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL)⁵ é um tipo de investigação científica considerada como estudo observacional de trabalhos anteriores ou estudo de recuperação e análise crítica da literatura.

Amplamente são utilizadas as recomendações propostas por Kitchenham e Charters (2007) que dividem o processo de conduzir um mapeamento sistemático em 3 passos fundamentais: a) planejamento; b) condução; e, c) relato.

O planejamento tem como saída o protocolo do mapeamento contendo o escopo e as questões de pesquisa que levam à construção de uma expressão geral de busca. Na condução da pesquisa os trabalhos são identificados e os dados são extraídos, neste momento também é feita a síntese e análise dos dados. Por fim, no relato, é produzido um relatório final de resultados que encerra o processo de mapeamento, contendo o resultado final da análise e a discussão dos dados. Na Figura 1 é ilustrada uma visão geral dos processos que fazem parte do mapeamento sistemático da literatura.

Figura 1: Visão geral dos processos de MSL.



Fonte: Adaptado de Kitchenham e Charters (2007)

Esta imagem ilustra uma visão geral dos processos de MSL em seus passos fundamentais de: a) planejamento; b) condução; e, c) relato.

⁵ Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL): método para construir esquemas de classificação a fim de estruturar o conhecimento sobre determinada área de interesse.

1.3.3 Fase 3 — Construção do Protótipo para Controle Local de Água

O primeiro passo na construção do protótipo foi a identificação e elicitación dos requisitos voltados à aplicação. O protótipo desenvolvido teve como objetivo sensoriar o fluxo de água percorrendo uma rede de distribuição e transmitir os dados sensorizados através de outros sensores distribuídos pela rede, e, por fim armazenar esses dados em um servidor remoto.

A proposta foi criar uma aplicação imersa no conceito de Internet das Coisas, com semântica, entidades e representações consistentes, com base em: a) recuperação; b) transmissão; e, c) armazenamento de dados. As preocupações com fatores de qualidade envolveram questões inerentes à: a) segurança; b) privacidade; c) confiabilidade; d) entrega; e, e) latência na transmissão de dados.

1.3.4 Fase 4 — Validação do Protótipo para Controle Local de Água

Na fase de validação do protótipo foi criado um painel de simulação no qual a aplicação foi introduzida. O objetivo do painel de simulação foi simular uma rede de distribuição de água e monitorar, através de sensores, a ocorrência de distúrbios a fim de identificar possíveis perdas no sistema de distribuição de água.

Os dados coletados através dos sensores foram transmitidos para um servidor remoto utilizando o protocolo de comunicação *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT)⁶, no qual a troca de mensagens se baseia no modelo de *divulgador-ouvinte*, desenvolvido para aplicações em dispositivos embarcados e plataformas móveis.

Foi criado um painel de indicadores, (*dashboard*), em sistema de *Business Intelligence* (BI)⁷, com o propósito de monitorar em tempo real a ocorrência de distúrbios identificados pela rede de sensores.

1.4 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho está na oportunidade de melhorar os indicadores de performance que as empresas do setor de saneamento passam a ter, caso apliquem este novo método para detecção automática de perdas em seus sistemas de distribuição de água.

Aplicando este novo método proposto é possível detectar as perdas automaticamente, reduzindo a necessidade de inferência humana, deste modo possibilitando tomadas de

⁶ Message Queuing Telemetry Transport (MQTT): protocolo de comunicação para mensagens leves, bastante utilizado em rede de sensores ou dispositivos móveis.

Disponível em: <<https://iot.eclipse.org/standards>>. Acesso em: jul. 2015.

⁷ Business Intelligence (BI): processo de coletar, organizar, analisar, compartilhar e monitorar informações de suporte à gestão.

decisão mais precisas e em tempo real.

Outra contribuição importante se deu em função do levantamento bibliográfico a respeito da detecção de perdas em sistemas de distribuição de água, realizado durante o mapeamento sistemático da literatura, onde se conseguiu identificar como são detectadas, quais estratégias são utilizadas para combater as perdas, e quais são as principais ferramentas ou métodos que auxiliam na detecção ou combate às perdas nos sistemas de distribuição de água.

E, por fim, foi desenvolvido um protótipo funcional de dispositivo embarcado com o propósito de sensoriar o fluxo de água em uma rede de distribuição e identificar automaticamente a ocorrência de distúrbios que apontassem perdas. As empresas do setor de saneamento podem fazer uso desse dispositivo no intuito de melhorar seus índices de controle das perdas.

1.5 Estrutura da Dissertação

Sinteticamente, este trabalho está organizado da seguinte forma:

- a) nos três primeiros capítulos é realizada uma revisão conceitual de literatura, relativa às bases que compõem o tema de estudo desta dissertação:
 - no Capítulo 2 são apresentadas algumas das definições para o setor de saneamento, tratando especificamente sobre os sistemas de abastecimento de água e seus componentes, dentre os quais existem os sistemas de distribuição de água que são objeto deste estudo;
 - no Capítulo 3 são abordadas as definições de perdas nos sistemas de distribuição de água, características, bem como as principais causas conhecidas, técnicas e benefício do combate às perdas;
 - no Capítulo 4 são apresentados os conceitos sobre redes de sensores sem fio;
- b) no Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados do mapeamento sistemático da literatura sobre as possíveis soluções existentes para o problema de pesquisa em questão;
- c) no Capítulo 6 é apresentada a solução proposta para o problema de perdas utilizando uma rede de sensores sem fio, composta por dispositivos dotados de processamento local para sensoriamento do fluxo da água; e por fim,
- d) no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre os sistemas de abastecimento de água e suas partes constituintes. A seção 2.1 apresenta os principais conceitos e leis que definem o sistema de abastecimento de água no Brasil, em seguida são apresentadas as três fases que compõem o processo de abastecimento de água, iniciando na seção 2.2 onde é descrita a fase de captação da água bruta nos mananciais e adução até as estações de tratamento de água que compõem a fase de tratamento e reservação da água tratada, descrita na seção 2.3, logo após, na seção 2.4 é descrita a fase de distribuição de água tratada para o consumo, e, por fim, é apresentado na seção 2.5 um resumo do capítulo.

2.1 Conceituação dos Sistemas de Abastecimento de Água

Os sistemas de abastecimento de água compõem o setor de saneamento e são parte crucial da promoção à saúde e qualidade de vida da população, além de favorecerem o desenvolvimento econômico.

No Brasil as doenças resultantes da falta ou inadequação do saneamento, especialmente em áreas pobres, têm agravado o quadro epidemiológico de doenças, a exemplo da cólera, dengue, esquistossomose e leptospirose. De acordo com FUNASA (2004)¹, baseado em dados divulgados anualmente pelo Ministério da Saúde (MS)², estima-se que para cada R\$ 1,00 (um real) investido em saneamento serão economizados R\$ 4,00 (quatro reais) em tratamentos de saúde.

Impactando diretamente sobre os indicadores de saúde pública, a qualidade do saneamento passa pela sua correta definição e determinação de escopo. Naturalmente, como era de se esperar, a definição do que vem a ser saneamento no Brasil vem evoluindo com o tempo em função dos avanços sociais, políticos, culturais e em conhecimento técnico-científico. Sendo considerado ao mesmo tempo como um arcabouço legal, um setor da economia e um conjunto de ações práticas em função da promoção à saúde e manutenção do meio ambiente.

Atualmente a *Lei nº 11.445, de 5 de Janeiro de 2007*, Brasil (2007), regulamentada pelo decreto federal, *Decreto Nº 7.217, de 21 de Junho de 2010*, Brasil (2010), trata

¹ Fundação Nacional de Saúde (FUNASA): instituição de referência com reconhecimento nacional e internacional nas ações de saneamento e saúde ambiental, contribuindo com as metas de universalização do saneamento no Brasil.

Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br>>. Acesso em: fev. 2015.

² Ministério da Saúde (MS): órgão responsável pela organização e elaboração de planos e políticas públicas para a promoção, prevenção e assistência à saúde dos brasileiros.

Disponível em: <<http://www.saude.gov.br>>. Acesso em: fev: 2015.

do saneamento no Brasil e inclui em sua definição, dentre outros tópicos: *a garantia universal de acesso ao conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável.*

Da evolução conjunta desses conceitos chega-se à síntese de que saneamento é imprescindível para a qualidade de vida, e que o homem e o meio ambiente exercem entre si uma relação que deverá ser arbitrada pelo setor de forma a manter a sustentabilidade econômica e ambiental.

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)³, divulgados em Brasil (2014), mostram que o consumo médio de água no Brasil, considerando os setores da agricultura, indústria e comércio, e o consumo doméstico ou residencial, é dividido da seguinte forma: a) 70% de toda água é utilizada na agricultura; enquanto que, b) 22% da água é utilizada na indústria e comércio; restando, c) 8% da água, utilizada no consumo doméstico ou residencial. A Figura 2 ilustra uma representação do consumo médio de água no Brasil, considerando os setores da agricultura, indústria e comércio e o consumo residencial.

O sistema de abastecimento de água é composto por vários conjuntos de infraestruturas, obras civis, materiais, equipamentos e obedece a contextos de ordem legal, administrativa e social. É destinado à produção e à distribuição canalizada de água potável para a população e aos setores da agricultura, indústria e comércio.

Neste estudo foram identificadas três fases principais durante o processo do abastecimento de água. O início se dá com a *captação e adução da água bruta* que é enviada para as estações de tratamento onde passa pelos processos de *tratamento e reservação da água tratada* para enfim ser enviada para a *distribuição da água tratada* para o consumo.

Os componentes de cada fase são apresentados nas seções a seguir, distribuídas da seguinte forma: na seção 2.2 é descrita a fase de captação e adução da água bruta, na seção 2.3 é descrita a fase de tratamento e reservação de água tratada, e, por fim, na seção 2.4, é descrita a fase de distribuição da água tratada.

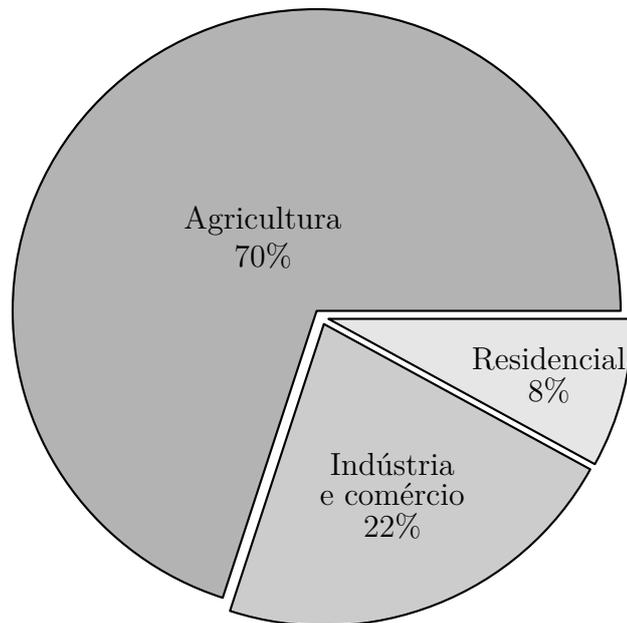
2.2 Captação e Adução da Água Bruta

Na fase de *captação e adução da água bruta*, a água é captada a partir de uma manancial de abastecimento, quer seja de superfície ou subterrâneo, e a seguir é bombeada através das adutoras de água bruta até as estações de tratamento.

³ Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): maior e mais importante sistema de informações do setor de saneamento brasileiro. O sistema possui uma base de dados que contém informações e indicadores sobre a prestação de serviços de água e esgotos, de manejo dos resíduos sólidos e da drenagem e manejo das águas pluviais urbanas.

Disponível em: <<http://www.snis.gov.br>>. Acesso em: abr. 2015.

Figura 2: Consumo médio de água por categoria no Brasil



Fonte: Adaptado de ABES (2013), ABES (2015)

Esta imagem ilustra uma representação do consumo médio de água no Brasil, considerando os setores da: a) agricultura; b) indústria e comércio; e, c) o consumo residencial.

A captação da água bruta é o processo de captar a água em seu estado bruto a partir dos mananciais de abastecimento. A água bruta pode ser captada a partir de mananciais de superfície ou subterrâneos, onde a água é captada para posteriormente ser transportada pelo sistema de adução. Os mananciais para captação da água bruta são classificados em:

- a) mananciais de superfície: são os rios, lagos, barragens ou represas artificiais, ou ainda a água do mar;
- b) mananciais subterrâneos: são os poços de profundidade ou os poços de água salobra, utilizados quando não há disponibilidade local dos mananciais de superfície.

Alguns exemplos de elementos constituintes do sistema de captação da água bruta estão ilustrados na Figura 3. Na Figura 3a é ilustrada uma represa artificial construída para armazenar a água oriunda de rios, na Figura 3b é ilustrada uma torre de captação de água por coluna de profundidade onde ficam localizadas as bombas de captação da água bruta, na Figura 3c é ilustrada a captação por bomba apoiada em balsa normalmente utilizada em lagos ou represas, na Figura 3d é ilustrada a captação por bomba de sucção localizada às margens do manancial de superfície, e, por fim, nas Figuras 3e e 3f são ilustradas bombas de captação em poços artesiano e de profundidade.

Figura 3: Captação da água bruta

(a) Barragem ou represa artificial (b) Captação em coluna de profundidade



(c) Captação por bomba apoiada em balsa (d) Captação por bomba de sucção



(e) Captação em poço artesiano (f) Captação em poço profundo



Fonte: Banco de imagens cedido pela Compesa

Esta imagem ilustra alguns exemplos de elementos que constituem a fase de captação da água bruta, exibindo: a) mananciais de superfície e subterrâneo; e, b) modos para a captação da água.

A adução da água bruta é o processo de bombear a água, na forma como é encontrada na natureza, antes de receber qualquer tratamento, e acontece entre a captação da água bruta e a estação de tratamento. A adução da água bruta é composta por estação de bombeamento e sistema de canalização por meio de adutoras, definidos como:

- a) estação de bombeamento da água bruta: é a unidade que recebe a água bruta, oriunda da captação, e faz o seu bombeamento, geralmente enviando a água

para longas distâncias, através das adutoras de água bruta;

- b) adutoras de água bruta: são tubulações de grandes dimensões responsáveis por canalizar a água bruta bombeada até a estação de tratamento.

Alguns exemplos de elementos constituintes do sistema de adução estão ilustrados na Figura 4. Na Figura 4a é ilustrada uma estação de bombeamento da água bruta captada nos mananciais, e na Figura 4b é ilustrada uma adutora de água bruta que leva a água captada até a estação de tratamento.

Figura 4: Adução da água bruta



Fonte: Banco de imagens cedido pela Comesa

Esta imagem ilustra alguns exemplos dos elementos que constituem a fase de adução da água bruta, composta por: a) estação de bombeamento; e, b) sistema de adutoras.

2.3 Tratamento e Reservação da Água Tratada

Na fase de *tratamento e reservação da água tratada*, a água bruta é tratada por processos mecânicos e químicos e a seguir é bombeada para os reservatórios de água tratada a partir de onde será distribuída. O sistema de tratamento da água bruta é composto pela estação de tratamento de água bruta e pela reservação da água tratada para posterior distribuição.

A estação de tratamento de água é a unidade onde a água não tratada chega, vindo pelas adutoras de água bruta, para a partir de então o processo de tratamento ser de fato iniciado. O processo de tratamento da água possui as etapas de:

- a) tratamento químico: inicia o tratamento da água pelo processo de oxidação a partir da adição de cloro ou outro produto oxidativo, isso torna insolúveis os metais que por ventura estejam presentes na água, principalmente o ferro e o manganês, nesse momento também ocorre a oxidação de matéria orgânica que será removida posteriormente;

- b) tratamento por coagulação e filtração mecânica: ocorre nos tanques de coagulação, floculação e filtração, iniciando pela coagulação dos particulados em suspensão na água a partir da adição do sulfato de alumínio ou do cloreto férrico, isso promove a aglutinação dos particulados em flocos que sedimentam no fundo dos tanques, a água então decantada e livre dos particulados, irá passar pelos filtros de limpeza mecânica;
- c) tratamento por desinfecção: finaliza o processo de tratamento da água realizando a desinfecção, correção do pH e dessalinização logo após a filtração, quando novamente é adicionado o cloro para desinfecção, o pH da água é corrigido com a adição de cal e o processo de tratamento é finalizado com a adição do flúor (ácido fluossilícico). Quando a água é captada do mar ou em poços de água salobra é necessário realizar o processo de dessalinização (osmose inversa), no mais, em quase a totalidade das vezes, a água captada em poços é isenta de contaminação além de não apresentar turbidez ou cor, bastando portanto a desinfecção simples por meio da adição do cloro.

Alguns exemplos de elementos constituintes do sistema de tratamento da água bruta estão ilustrados na Figura 5. Na Figura 5a é ilustrada uma visão geral de uma estação de tratamento de água, na Figura 5b é ilustrada a chegada da água pelas adutoras de água bruta e início do processo de tratamento químico com a adição do cloro, a seguir, na Figura 5c, são ilustrados os tanques de coagulação, decantação e filtração da água, na Figura 5d é ilustrado um exemplo de estação para dessalinização de água, utilizada quando não existem mananciais de água doce disponíveis, como em áreas de clima árido ou próximas ao mar, e, por fim, na Figura 5e são ilustrados tanques de cloro e sistema dosador automático para desinfecção final.

Na reservação da água tratada, a água já tratada é armazenada em reservatórios para posterior bombeamento e distribuição. O processo de reservação e bombeamento da água tratada é dividido em:

- a) reservação de água tratada: composto pelos reservatórios de água tratada que ficam localizados após o tratamento, geralmente são apoiados diretamente no solo ou semienterrados e servem como reserva estratégica para suprir a variação na demanda de consumo e manter o abastecimento durante as operações de limpeza nos tanques de tratamento e das operações de manobra, que desviam o fluxo da água entre as diversas redes de distribuição;
- b) bombeamento de água tratada: localizado na saída da estação de tratamento ficam as unidades de bombeamento da água tratada que enviarão a água através das adutoras de água tratada para posteriormente ser distribuída diretamente à população ou enviada para outros reservatórios de distribuição.

Figura 5: Tratamento da água

(a) Estação de tratamento



(b) Tratamento químico



(c) Coagulação, decantação e filtração



(d) Usina de dessalinização



(e) Cloro para desinfecção final



Fonte: Banco de imagens cedido pela Comesa

Esta imagem ilustra alguns exemplos dos elementos que constituem a fase de tratamento da água, exibindo: a) partes de uma estação de tratamento; b) tratamento químico; c) tanques de coagulação, decantação e filtração; d) usina de dessalinização; e, e) tanques de cloro para desinfecção final.

Alguns exemplos de elementos constituintes do sistema de reservação da água tratada estão ilustrados na Figura 6. Na Figura 6a é ilustrado um exemplo de reservatório semienterrado localizado após a estação de tratamento, e, na Figura 6b é ilustrado um sistema de bombeamento da água tratada para a rede de distribuição que conduz a água para o consumo.

Figura 6: Reservação da água tratada

(a) Reservatório semienterrado

(b) Bombeamento de água tratada



Fonte: Banco de imagens cedido pela Compesa

Esta imagem ilustra alguns exemplos dos elementos que constituem a fase de reservação da água tratada, exibindo: a) reservatório semienterrado; e, b) sistema de bombeamento da água tratada.

2.4 Sistema de Distribuição de Água

Na fase de *distribuição*, a água já tratada é enviada para o consumo através de um sistemas de tubos, que na imensa maioria das vezes estão enterrados sob a pavimentação da cidade. A essa tubulação é dado o nome de *rede de distribuição de água*.

Composta por diversos elementos, como adutoras de água tratada, estações elevatórias, reservatórios, entre outros, a rede de distribuição é projetada para fornecer água sob um regime mínimo de pressão e vazão administrado por válvulas redutoras de pressão e *boosters*, possibilitando o envio da água para todas as regiões atendidas.

O processo de distribuição da água tratada inicia pela macromedição, geralmente na saída da estação de tratamento, a partir de onde, a água será transportada através das tubulações adutoras, definidos conforme:

- a) macromedição: é um conjunto de medições realizadas em todo o sistema de abastecimento de água, excetuando-se as medições de consumo no cliente final, responsável pela apuração dos volumes produzidos que são entregues à rede de distribuição, fornece dados utilizados na gestão da automação, sendo o macromedidor o equipamento de telemetria que faz a medição de diversas variáveis hidráulicas como volume, sentido do fluxo de água e pressão, a macromedição também reporta o estado de válvulas ou registros;
- b) adução de água tratada: conecta a estação de tratamento à rede de distribuição, enviando a água diretamente para ser consumida ou para ser novamente armazenada em reservatórios de distribuição auxiliares.

A seguir, a água tratada pode ser armazenada em novos reservatórios ou imediatamente distribuída à população. Durante o processo de distribuição a água poderá ser conduzida por meio dos elementos:

- a) estação elevatória de água tratada: os sistemas de distribuição são projetados para aproveitar a topografia do solo utilizando a força da gravidade no escoamento da água, neste caso o papel da estação elevatória é bombear a água, de um ponto na rede localizado em área inferior, para áreas mais elevadas onde poderá ser consumida ou armazenada em reservatórios de distribuição;
- b) reservação da distribuição: visa armazenar a água tratada, em reservatórios adequados, para posterior distribuição na rede. Assim é possível atender às variações na demanda de consumo durante o dia, promover a continuidade do abastecimento em caso de paralisação nos sistemas de captação ou tratamento, gerenciar a pressão na rede de distribuição e garantir uma reserva estratégica em caso de incêndios ou outras emergências;
- c) *boosters*: com o crescimento urbano acelerado, por vezes, o projeto inicial da rede de distribuição já não atende às necessidades de pressão e vazão da água, nesses casos são instalados *boosters* que reinserem pressão e vazão à rede, permitindo o abastecimento em pontos elevados, condomínios verticais, regiões de topografia acidentada ou locais distantes;
- d) válvula redutora de pressão: é um equipamento que faz o controle automático da pressão em determinado ponto da rede, evitando assim possíveis rompimentos na tubulação ou entrega de água com pressão excessiva no ponto de consumo;
- e) válvulas de manobra: servem para segmentar a rede em áreas menores possibilitando um melhor gerenciamento da demanda através do bloqueio ou desvio no fluxo da água entre as diversas redes de distribuição.

Por fim, a água passa pelo ponto de medição e consumo, o que no contexto geral, representa a conexão do consumidor final à rede de distribuição de água. Comumente chamado de ramal predial de água, engloba tanto a tomada de água proveniente da rede quanto a medição do consumo, definidos conforme:

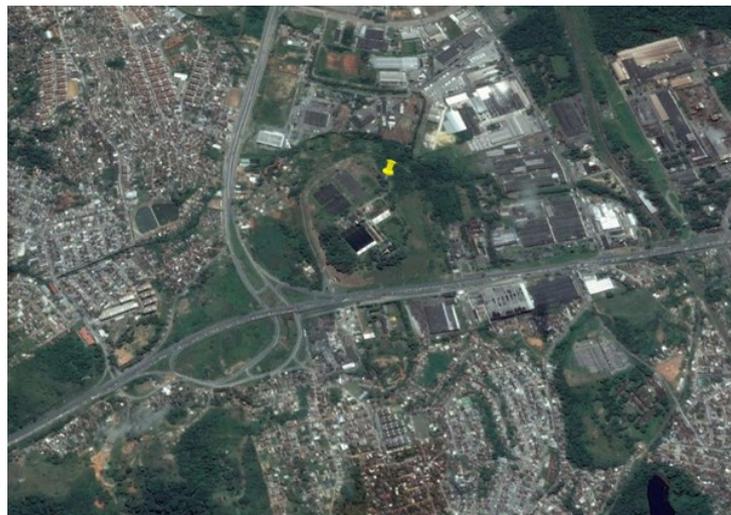
- a) micromedição: são os processos que envolvem as leituras periódicas do consumo no ponto de medição do consumidor final, realizadas em intervalos de tempo regulares e predefinidos, geralmente registradas fisicamente no micromedidor ou hidrômetro e lidas pelo leiturista que as envia para processamento e cálculo do faturamento;
- b) telemetria: é o processo de leitura a distância realizada unicamente por dispositivos eletrônicos e transmitidas através de radiofrequência ou GPRS/GSM, traz como vantagem a possibilidade de acompanhamento do consumo em tempo real

e geralmente é o método de leitura utilizado em grandes consumidores como shoppings, fábricas ou hospitais, podendo ainda ser utilizado na medição de consumo em condomínios.

Uma visão geral de um sistema de distribuição de água, contendo alguns de seus elementos constituintes, é ilustrada na Figura 7. A Figura 7a apresenta o entorno da estação de tratamento de água Castelo Branco (sistema Tapacurá), localizada às margens da BR 423 em Recife-PE, sendo contornada por bairros residenciais e zona industrial, em seguida, na Figura 7b é ilustrada uma representação gráfica para a rede subterrânea de distribuição de água nessa região, e, por fim, na Figura 7c são ilustrados pontos de consumo (representados pelos pontos verdes) na região da Cabanga, também em Recife-PE.

Figura 7: Visão geral de um sistema de distribuição de água

(a) Entorno da estação de tratamento de água Castelo Branco



(b) Representação da rede subterrânea



(c) Pontos de consumo



Fonte: Banco de imagens cedido pela Compesa

Esta imagem ilustra alguns dos elementos que constituem a fase de distribuição da água, exibindo: a) entorno da estação de tratamento de água Castelo Branco; b) representação de rede subterrânea; e, c) representação de pontos de consumo.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral sobre os sistemas de abastecimento de água e suas principais partes componentes.

De início foram apresentados os conceitos principais e as leis que definem o sistema de abastecimento de água no Brasil, em seguida foram apresentadas as três fases que compreendem os processos de abastecimento de água e as suas partes constituintes.

Os sistemas de abastecimento de água são compostos por conjuntos de infraestruturas, obras civis, materiais, equipamentos e obedece a contextos de ordem legal, administrativa e social, é destinado à produção e à distribuição canalizada de água potável para a população e aos setores da agricultura, indústria e comércio. É considerado ao mesmo tempo como um arcabouço legal, um setor da economia e um conjunto de ações práticas em função da promoção à saúde e manutenção do meio ambiente.

Os sistemas de abastecimento de água compõem o setor de saneamento básico e são parte crucial da promoção à saúde e qualidade de vida da população, além de serem fomentadores do desenvolvimento econômico. Representam um papel importante nos indicadores de saúde pública. Estimativas divulgadas pelo Ministério da Saúde (MS) mostram que cada R\$ 1,00 (um real) investido em políticas e ações de saneamento resultará em uma economia futura na ordem de R\$ 4,00 (quatro reais) em tratamentos de saúde para doenças como cólera, dengue, esquistossomose e leptospirose.

O processo de abastecimento de água tratada possui três fases principais: a) captação e adução da água bruta: são os processos de captação da água em seu estado bruto, conforme disponível nos mananciais de abastecimento, e condução dessa água até a unidade de tratamento; b) tratamento e reservação de água tratada: envolve os processos mecânicos e químicos, que tornam a água potável para o consumo humano, e seu armazenamento de onde será enviada à distribuição; c) sistema de distribuição de água: são os processos que envolvem o transporte da água tratada até os pontos de consumo, é onde ocorrem a maioria das perdas que são objeto de estudo deste trabalho.

3 PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre as perdas em sistemas de distribuição de água. A seção 3.1 apresenta as definições e principais conceitos sobre perdas, juntamente com a definição de perdas físicas na subseção 3.1.1 e das perdas não-físicas na subseção 3.1.2, logo após, na seção 3.2 são apresentados alguns dos principais métodos utilizados para a gestão de perdas, sucintamente descritos nas subseções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3, as quais, em sequência, tratam da definição do modelo para balanço hídrico, seguida pelo método para análise da vazão mínima noturna e pela setorização da rede em distritos de medição e controle, e, por fim, é apresentado na seção 3.3 um resumo do capítulo.

3.1 Definições e Conceitos das Perdas

De acordo com ABES (2015) até o final do século passado não havia um entendimento comum sobre o que eram as perdas nos sistemas de abastecimento de água.

Nos Estados Unidos, o conceito de água não contabilizada, *unaccounted-for water*, referia-se apenas a um valor de sobra contábil encontrado após a realização da chamada *auditoria das águas*¹, assim as perdas eram contabilizadas e os seus volumes de água eram então estimados. Após todas as apurações e estimativas, as águas não contabilizadas ficavam sendo aqueles volumes sobre os quais não se tinha um conhecimento da sua destinação ou uso.

Segundo os padrões recomendados pela IWA, define-se perdas como: *toda perda física ou não-física de água ou todo o consumo não autorizado que determina aumento do custo de funcionamento ou que impeça a realização plena da receita operacional das empresas de saneamento.* (BÁGGIO, 2014)

As perdas de água são um problema mundial, e um dos grandes problemas dos sistemas de abastecimento de água brasileiros. É um tema de interesse recorrente devido aos problemas de escassez hídrica e aos altos custos da energia elétrica utilizada durante os processos de captação, produção e distribuição da água tratada. As perdas são objeto de relevante importância nos processos de gestão, pois impactam diretamente nos indicadores de performance das empresas de saneamento.

¹ Auditoria das águas: método para identificação de um volume de perdas a partir da contabilização da diferença entre o volume de água produzido e os volumes utilizados na operação do sistema, usos sociais e o consumido e devidamente faturado.

Segundo a European Commission (2015) as perdas de água são ao mesmo tempo um problema de ordem técnica e financeira, mas trazem ainda outras implicações mais amplas, com repercussões significativas nos seguintes aspectos:

- a) de ordem política,: que envolvem questões relativas às entidades responsáveis pelos serviços, agências de governo, linhas de financiamento para o setor e a mídia;
- b) de ordem econômica: que envolvem custos dos volumes perdidos e não faturados, os custos operacionais de energia elétrica, produtos químicos utilizados no processo de potabilização da água, dentre outros, e os investimentos para as ações de redução ou manutenção das perdas, importantes para a sustentabilidade das empresas;
- c) de ordem social: que envolvem o uso racional da água, o pagamento ou não pelos serviços, as questões de saúde pública e a imagem das operadoras perante a população;
- d) de ordem tecnológica: que envolvem as interações entre o conhecimento técnico e as tecnologias, ferramentas e metodologias disponíveis para as atividades típicas do combate às perdas;
- e) de ordem legal: que envolvem a legislação para o setor, licenças e a respectiva regulação;
- f) de ordem ambiental: que envolvem a utilização e gestão de recursos hídricos e energéticos e impactos das obras de saneamento.

Desde a captação no manancial até a entrega da água tratada ao consumidor final ocorrem perdas, de vários tipos, que em grande parte são causadas por operação e manutenção deficientes nas tubulações e inadequada gestão comercial das companhias de saneamento.

Por isso, a vinculação entre o nível de perdas em uma companhia de saneamento e sua eficiência operacional é total, ou seja, é de se esperar que os sistemas de abastecimento bem gerenciados e mantidos possuam baixos índices de perdas.

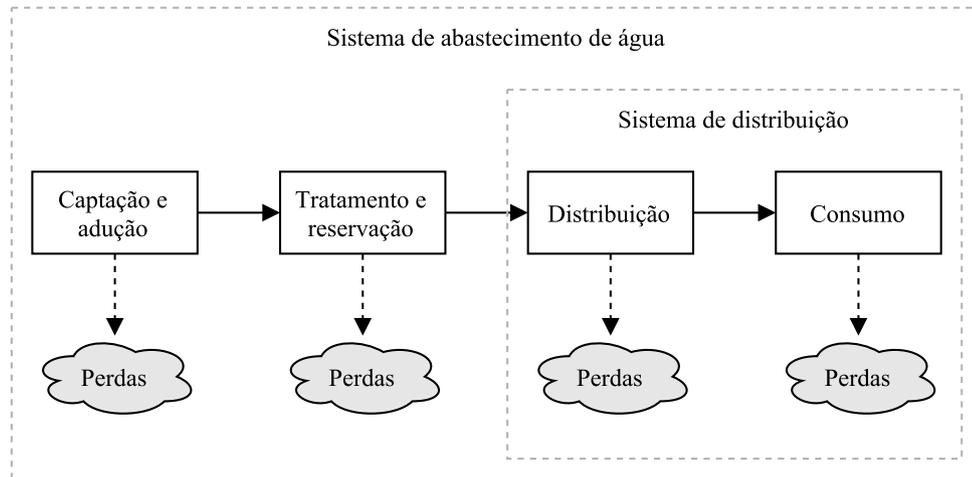
Entretanto, de acordo com a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA (2014)², quase que a totalidade das perdas em um sistema de abastecimento ocorrem na distribuição, principalmente nos ramais. Isto se deve, em grande parte, ao tipo de material utilizado nas conexões de ramais prediais e à idade de instalação das redes de distribuição

² Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA): órgão integrante do Ministério das Cidades do Brasil responsável por promover o desenvolvimento e a redução das desigualdades sociais através de políticas públicas de sustentabilidade institucional e ambiental.

Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/saneamento>>. Acesso em: abr. 2015.

de água. Na Figura 8 é ilustrada uma visão geral sobre a ocorrência de perdas no sistema de abastecimento de água.

Figura 8: Perdas no sistema de abastecimento de água



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma visão geral sobre a ocorrência de perdas no sistema de abastecimento de água.

No Brasil o elevado índice de perdas é preocupante. Dados do SNIS mostram que, em média, as empresas do setor apresentam perdas que variam em torno dos 40%, porém em algumas empresas as perdas facilmente superam os 60%. (ABES, 2013; BRASIL, 2014)

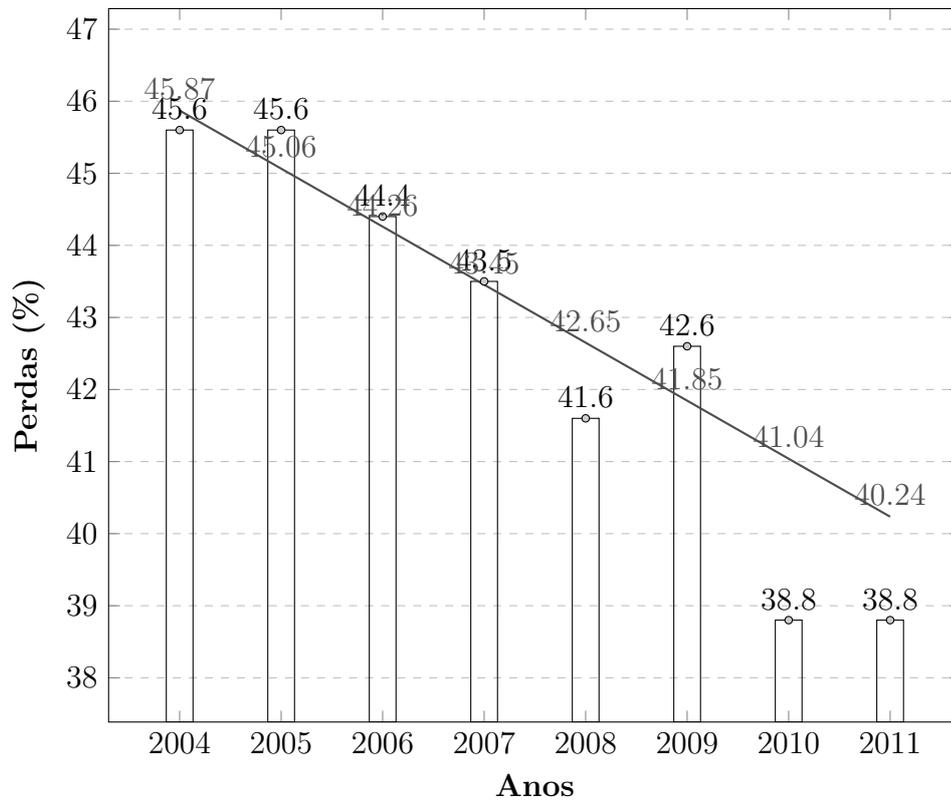
Comparando os índices de perdas brasileiros com os índices de perdas de países desenvolvidos, fica clara a grande oportunidade de melhoria para o setor. A exemplo de países como Alemanha e o Japão que apresentam índice de perdas em torno de 10%, enquanto que países como a Austrália e a Nova Zelândia conseguiram alcançar um patamar no índice de perdas inferior a 10%. (Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA, 2014)

Na Figura 9 é ilustrado um gráfico que demonstra a evolução histórica no Brasil para o indicador de perdas na distribuição ao longo dos anos de 2004 até 2011, onde pode ser identificada uma clara tendência de queda no índice de perdas, os dados originalmente foram obtidos a partir dos relatórios emitidos pelo SNIS ao longo dos anos e sintetizados pela ABES (2013).

De modo geral o Índice de Perdas (IP) é comumente calculado utilizando o Volume de Água Distribuído (VAD), obtido a partir do Volume de Água Produzido (VAP) deduzido do Volume de Água de Serviço (VAS), conforme $VAD = VAP - VAS$, e o Volume de Água Consumido (VAC), de acordo com a Equação 3.1.

$$IP (\%) = \frac{VAD - VAC}{VAD} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Figura 9: Gráfico da evolução histórica do indicador de perdas na distribuição



Fonte: Adaptado de ABES (2013)

Este gráfico ilustra a evolução histórica no Brasil para o indicador de perdas na distribuição ao longo dos anos de 2004 até 2011.

Na qual se definem as variáveis:

IP o Índice de Perdas representa o percentual geral de eficiência operacional, calculado tendo como base os volumes de água distribuído e consumido;

VAP o Volume de Água Produzido é obtido a partir da soma de todo o volume tratado na estação de tratamento de água, o volume de água tratada importado de outras fontes ou o volume de água retirado de poços;

VAS o Volume de Água de Serviço é aquele utilizado durante os processos de produção da água tratada, a exemplo na limpeza de tanques e filtros, e aquele volume utilizado na limpeza de reservatórios;

VAD o Volume de Água Distribuído indica a soma de todo o volume de água tratada produzida que fora disponibilizada para a distribuição;

VAC o Volume de Água Consumido é a soma de todo o volume de água distribuído que de foi fato consumido, aqui estão incluídos os volumes medidos e não-medidos.

No entanto, devido ao fato de que alguns dos valores considerados para essas

variáveis são obtidos por meio de estimativas, a exemplo do VAC , algumas empresas optam por variações na fórmula geral, que incluem, desde o acréscimo de um valor para o Consumo Estimado não-medido (CE) quanto o acréscimo de um fator de correção (K) definido de maneira particular, conforme a Equação 3.2.

$$IP (\%) = \frac{VAD - (VAC + (CE \cdot K))}{VAD} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Na qual foram adicionadas as variáveis:

VAC nesta equação, o valor considerado para VAC representa apenas o volume de água consumido que fora medido;

CE o Consumo Estimado não-medido é definido estimando-se o valor para o volume de água consumido que não é medido;

K determina um fator de correção para o consumo estimado não-medido, definido de modo particular por cada empresa de saneamento.

Considerando as perdas do estado de Pernambuco, dados obtidos a partir do Sistema de Informações Operacionais (SIP)³, mostram que de toda a água distribuída, apenas 27,25% é faturada e gera de fato alguma receita para a empresa, do restante distribuído, mais da metade 50,83% se perde em vazamentos pela rede e 21,92% representa o volume de água consumido mas de alguma forma não faturado, seja por consumo indevido ou não autorizado ou ainda por erros nos sistemas de medição. Na Figura 10 é ilustrado o índice de perdas no estado de Pernambuco, de acordo com relatório do SIP elaborado por Compesa (2016).

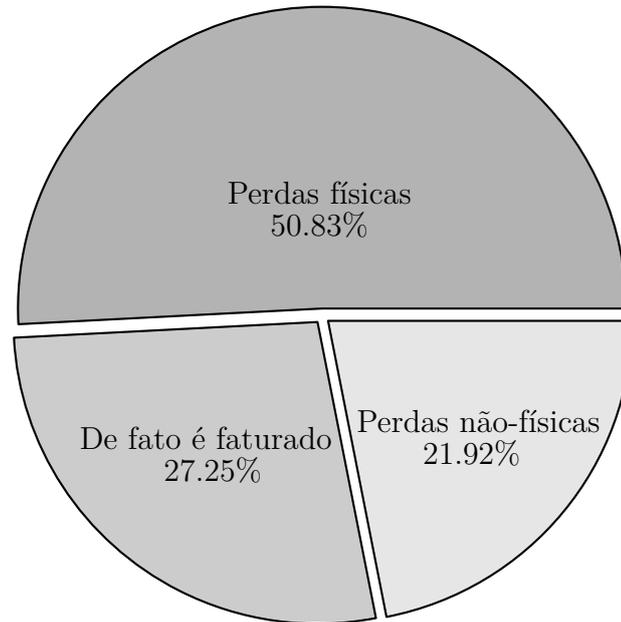
A consequência imediata das perdas é a redução no faturamento das empresas, o que afeta a capacidade de investimentos em avanços no setor e aquisição de novos recursos de financiamentos. Não incorrendo, entretanto no erro de menosprezar a importância do irreparável impacto no meio ambiente, provocado pelo esgotamento dos mananciais que obriga as empresas a buscarem novas fontes para captação de água.

Outra consequência importante das perdas é o impacto social negativo que elas provocam, quando consideradas as questões de saúde humana e animal, escassez alimentar ligada à baixa produção dos setores de agricultura e pecuária, as implicações nos setores da indústria e comércio provocadas pela indisponibilidade no fornecimento de água, além dos eventuais transtornos inerentes das novas obras de saneamento.

As ações contínuas voltadas para a redução e controle das perdas de água trazem benefícios amplos percebidos em curto, médio e longo prazos tanto para as empresas de saneamento quanto para a população, pois permitem o melhor aproveitamento dos recursos

³ Sistema de Informações Operacionais (SIP): sistema desenvolvido com o objetivo de dotar a empresa de informações básicas que possibilitem a análise sistemática da situação operacional dos sistemas.
Fonte: Compesa (2016)

Figura 10: Perdas de água no Estado de Pernambuco



Fonte: Adaptado de Compesa (2016)

Esta imagem ilustra uma representação para as perdas no estado de Pernambuco, de acordo com relatório do SIP elaborado por Compesa (2016). De toda a água distribuída pela empresa de saneamento, apenas 27,25% é faturada e gera receita, do restante distribuído, mais da metade 50,83% se perde em vazamentos pela rede e 21,92% representa o volume de água consumido mas não faturado.

hídricos, uma melhor geração de receita financeira além de aumentar a disponibilidade de água para distribuição.

Comumente são desenvolvidos programas de políticas públicas que tratam, dentre outros, de temas como: a) educação social visando a conscientização ambiental e o uso eficiente da água; b) conservação e reuso seguro da água; c) desenvolvimento de novas ferramentas para a economia de água; por fim culminando em, d) um robusto programa de gestão das perdas de água. (European Commission, 2015; VICENTINI, 2012; SILVA et al., 2003)

Com relação à sua natureza Tsutiya (2006) relata que comumente se classificam as perdas de água em dois tipos:

- a) perdas físicas: correspondem ao volume de água que foi captado, tratado e distribuído mas que não chegou ao consumidor final, estão relacionadas a vazamentos na rede de distribuição ou em reservatórios;
- b) perdas não-físicas: correspondem ao volume de água distribuído que de fato foi consumido mas, por algum motivo, não fora contabilizado pela empresa de saneamento, estão relacionadas a erros de medição ou fraudes.

A Tabela 1 resume as características gerais identificadas a partir das perdas físicas e não-físicas.

Tabela 1: Características gerais das perdas

Item	Perdas físicas	Perdas não-físicas
Tipo de ocorrências mais comum	Vazamentos	Erros de medição
Custos associados ao volume de água perdido	Custos de produção da água tratada	Valor cobrado no varejo ao consumidor
Efeito no meio ambiente	Desperdício de recursos naturais e maiores impactos ambientais devido à necessidade de ampliação da exploração dos mananciais	Não é relevante
Efeito na saúde pública	Riscos de contaminação	Não é relevante
Ponto de vista empresarial	Perda do produto industrializado (água tratada)	Perda elevada de receita
Ponto de vista do consumidor	Imagem negativa da empresa associada ao desperdício e ineficiência	Não é uma preocupação imediata
Efeitos finais no consumidor	Repasse de custos à tarifa e desincentivo ao uso racional da água	Repasse de custos à tarifa e incentivo à fraudes

Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006)

É importante ressaltar que essa nomenclatura não é definitiva, pois, de acordo com a denominação proposta pela IWA, pode-se denominar as perdas físicas como perdas reais, visto que de fato representam perdas de água através de vazamentos, e pode-se denominar as perdas não-físicas como aparentes ou comerciais, visto que representam perdas calculadas de acordo com regras definidas por cada empresa de saneamento.

3.1.1 Perdas Físicas

As perdas físicas, também conhecidas como perdas reais, referem-se a toda água disponibilizada para distribuição que não chega aos consumidores. Este tipo de perda impacta sobre a disponibilidade de recursos hídricos nos mananciais além do desperdício relacionado aos custos inerentes aos processos de tratamento e distribuição da água tratada.

Essas perdas acontecem por vazamentos em adutoras, redes, ramais, conexões, reservatórios e outras unidades operacionais do sistema. Elas compreendem principalmente os vazamentos em tubulações da rede de distribuição, provocados especialmente pelo excesso de pressão, habitualmente em regiões com grande variação topográfica. Os vazamentos também estão associados à qualidade dos materiais utilizados na rede de distribuição, à idade das tubulações, à qualidade da mão-de-obra e à ausência de programas

de monitoramento de perdas. (Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA, 2014; BÁGGIO, 2014)

Reduzir as perdas físicas permite um melhor aproveitamento dos recursos hídricos e redução dos custos de produção, além de aumentar a oferta de água disponível para a distribuição e posterior consumo. (VICENTINI, 2012)

3.1.2 Perdas Não-físicas

As perdas não-físicas, também chamadas de perdas aparentes ou comerciais, estão relacionadas ao volume de água que foi efetivamente consumido, mas que, por algum motivo, não foi medido ou contabilizado pela empresa de saneamento, gerando então perda no faturamento.

São decorrentes de erros de medição devido a hidrômetros inoperantes, hidrômetros com submedição, erros de leitura, ou ainda devido a fraudes, ligações clandestinas ou irregulares nos ramais das ligações ou por falhas no cadastro comercial.

Reduzir as perdas não-físicas permite incrementar a geração de receita nas empresas de saneamento, melhorando o desempenho financeiro. (VICENTINI, 2012)

3.2 Métodos para Gestão de Perdas

Os principais métodos utilizados para gestão de perdas se baseiam em variações sobre o modelo de balanço hídrico proposto pela IWA, se baseiam ainda na análise da vazão mínima noturna, e na setorização do sistema de abastecimento em sistemas menores, ou na combinação entre ambas. (Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA, 2014; BRASIL, 2014)

Estes métodos objetivam identificar e isolar as ocorrências de distúrbios na rede de distribuição, que possam representar perdas, com posterior análise sobre a magnitude da perda de água para enfim se estabelecerem estratégias como priorização da ocorrência e planejamentos sobre eventuais ações de reparo que se façam necessárias. (European Commission, 2015; SILVA, 2015; JÚNIOR, 2014)

O devido controle da pressão da água na rede tem se mostrado eficiente na prevenção de estouramentos e consequentes vazamentos na rede. Controlar a pressão possibilita ainda conduzir devidamente a água para regiões de difícil abastecimento como zonas de topologia irregular ou muito elevadas, ou ainda no abastecimento de áreas distantes das estações de bombeamento.

3.2.1 Balanço Hídrico

Até o final da década de 90 não havia uma definição clara sobre as perdas na distribuição de água que eram resumidas apenas pela diferença entre os volumes produzidos e aqueles consumidos e devidamente faturados.

A partir de 1997 a IWA lança as bases para a uniformização dos conceitos e indicadores em nível mundial, produzindo e estimulando a discussão sobre um modelo de matriz para balanço hídrico. Com o advento da publicação do *Manual de Melhores Práticas*, no ano de 2000, a IWA propõe: a) a padronização de conceitos e indicadores para os sistemas de abastecimento de água; b) ações comparativas entre sistemas de abastecimento em todo o mundo; c) avaliação de indicadores com base em 25 companhias de saneamento ao redor do mundo, sendo 3 delas do Brasil. (BÁGGIO, 2014)

Surgia então o modelo de matriz para balanço hídrico que é utilizado até hoje pelas empresas de saneamento. Na Figura 11 é ilustrada uma representação do modelo de matriz para balanço hídrico proposto pela IWA.

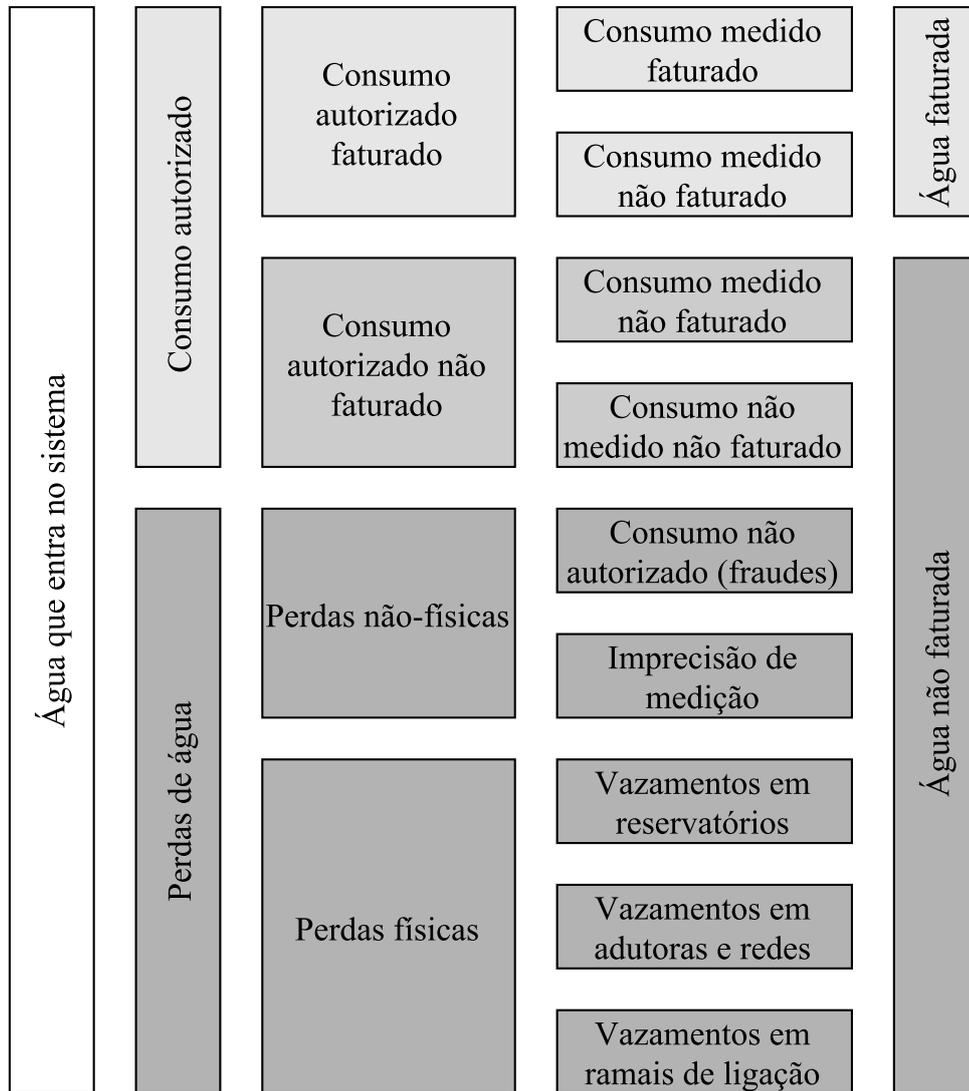
A correta quantificação dos volumes inseridos na matriz do balanço hídrico é de fundamental importância para a avaliação das perdas. Os volumes considerados para o balanço hídrico são oriundos de medições obtidas em dois níveis:

- a) macromedição: se obtém os valores de referência para os volumes que entram no sistema de distribuição, podendo ser obtidos a partir da produção na estação de tratamento de água ou pelos volumes distribuídos aos subsetores da rede de distribuição, geralmente estes dados são bastante precisos e tem um período de amostragem bem reduzido devido aos processos de automação da distribuição com base em dados de telemetria;
- b) micromedição: por sua vez apura os volumes de água consumidos, que são totalizados considerando-se um intervalo de tempo pré-definido para leitura, comumente igual ou superior a um mês, isto faz com que possam ocorrer lacunas de tempo entre a ocorrência de algum evento na rede, ou no ponto de consumo, e sua devida identificação.

Para grande parte das empresas de saneamento medir corretamente a quantidade de água não faturada é um forte indicador de desempenho. Entretanto, devem ser observadas as questões de ordem social e política quando das ações de correção de perdas.

Há certo nível de incerteza nos valores apresentados pelo balanço hídrico, isto se deve ao fato de que grande parte dos dados referentes ao consumo são estimados ou calculados com base em fórmulas determinadas, de forma particular, por cada empresa de saneamento. Devido a essa incerteza é necessário investir na correta medição desses valores para permitir, de forma mais eficiente, a definição de estratégias para a gestão de perdas.

Figura 11: Modelo de matriz para balanço hídrico proposto pela IWA



Fonte: Adaptado de Farley et al. (2008)

Esta imagem ilustra uma representação do modelo de matriz para balanço hídrico proposto pela IWA e amplamente utilizado pelas empresas de saneamento.

3.2.2 Análise da Vazão Mínima Noturna

A análise da vazão mínima noturna é um método para detecção de perdas que utiliza a variação dos consumos no sistema de abastecimento de água ao longo as 24 horas contínuas. O intuito é identificar, a partir de dados históricos, quais são os picos de consumo, que geralmente ocorrem durante o dia, e qual a vazão mínima, que geralmente ocorre durante a madrugada e daí que advém o nome para este método.

A vazão correspondente ao consumo mínimo é denominada de *vazão mínima noturna*, e é obtida a partir dos dados históricos de vazão e pressão coletados na rede de distribuição.

Este método é bastante utilizado para estimar o índice de perdas físicas, visto que no momento das medições é muito provável não haver consumo ou este ser mínimo, considerando que os reservatórios nos pontos de consumo estão cheios, com isto se assume que algum percentual do volume medido naquele momento se refira às perdas por vazamentos na tubulação.

A correta implantação deste método exige o monitoramento constante e a escolha de uma área bem delimitada e específica para a realização dos ensaios e treinamentos do método.

Identificar em quais horários ocorrem a vazão mínima também é útil para a gestão da pressão na rede. Os dados fornecem apoio à decisão para controle do sistema de bombeamento, válvulas redutoras de pressão, *boosters* e abertura ou fechamento das válvulas de comando.

O método possui, entretanto algumas desvantagens: a) o ensaio geralmente é feito por amostragem em uma área pequena e delimitada do sistema de distribuição de água, o que pode gerar equívocos se estes valores foram considerados para a análise do sistema como um todo; b) envolve custos com equipes e equipamentos utilizados desde o planejamento do método até sua implantação e análise dos dados. (TSUTIYA, 2006)

3.2.3 Setorização em DMA

Segundo Tsutiya (2006) *a operação dos sistemas de abastecimento de água requer uma compartimentação da rede de distribuição, obtida através da instalação e manuseio de registros, definindo-se uma área rigorosamente fechada onde se procura ter um perfeito monitoramento de todas as variáveis importantes*, a essa compartimentação dá-se o nome de setorização.

Utilizada por empresas de saneamento em todo o mundo, essa técnica é denominada nos países de língua inglesa como *District Metered Area* (DMA), no Brasil o termo empregado é Distrito de Medição e Controle (DMC), a técnica se baseia em dividir a rede de distribuição em áreas menores e mais gerenciáveis através da instalação de válvulas de comando que atuam no desvio ou bloqueio do fluxo da água.

Com a setorização é possível administrar o fluxo da água para que este seja conduzido até áreas muito distantes ou regiões altas, onde a água provavelmente chegaria com certa dificuldade.

A setorização também permite o monitoramento de variáveis da rede de distribuição que permitem o isolamento de ocorrências e gestão mais precisa do abastecimento, com vistas a medir: a) os volumes distribuídos; b) as vazões mínimas noturnas; c) dados de pressão na rede; d) qualidade da água; e) volumes consumidos.

A setorização, apesar de bastante eficiente, é um dos métodos mais dispendiosos utilizados na gestão de perdas, pois demanda um alto grau de utilização dos recursos e investimentos financeiros, comumente demanda obras de engenharia para a instalação de válvulas ou outros equipamentos hídricos que se façam necessários, além da possibilidade de gerar transtornos à população durante a execução das obras.

3.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral sobre as perdas em sistemas de distribuição de água.

De início foram apresentados os principais conceitos e definições sobre perdas em sistema de distribuição de água, em seguida foram apresentados os três principais métodos utilizados para a gestão de perdas.

Segundo os padrões recomendados pela IWA as perdas são definidas como *toda perda física ou não-física de água ou todo o consumo não autorizado que determina aumento do custo de funcionamento ou que impeça a realização plena da receita operacional*.

Além dos danos financeiros e ambientais, as perdas de água na distribuição geram sérios problemas para a operação do sistema de abastecimento, pois impactam diretamente nos indicadores de performance das empresas de saneamento.

As perdas de água são ao mesmo tempo um problema de ordem técnica e financeira, mas trazem ainda outras implicações mais amplas, com repercussões significativas nos seguintes aspectos: a) político; b) econômico; c) social; d) tecnológico; e) legal; e, f) ambiental.

A implementação das atividades de controle e redução de perdas nas diversas companhias de saneamento ressalta a necessidade da utilização de ferramentas para avaliação das perdas nos sistemas de abastecimento de água, que possam gerar diversos indicadores de desempenho, permitindo comparações, planejamento e avaliação de resultados, além de se estabelecer a metodologia para avaliação da confiabilidade dos indicadores.

Um dos principais métodos para gestão de perdas é o modelo de matriz para balanço hídrico. O modelo proposto pela IWA é seguido mundialmente como base das ações para gestão das perdas de água. De acordo com a matriz do balanço hídrico as perdas são classificadas em:

- a) perdas físicas, referem-se a toda água disponibilizada para distribuição mas que não chegou aos pontos de consumo;
- b) perdas não-físicas, estão relacionadas ao volume de água que foi efetivamente consumido mas não foi medido ou contabilizado.

Existem outros métodos para gestão e controle das perdas, como a análise da vazão mínima noturna, que objetiva detectar as perdas a partir do estudo de dados históricos de variáveis como demanda, consumo ou pressão na rede. Este método é bastante utilizado para estimar o índice de perdas físicas.

Outro método bastante utilizado pelas empresas de saneamento é a setorização da rede de distribuição em distritos de medição e controle, possibilitando administrar devidamente o fluxo de água e identificar e isolar as ocorrências da rede.

4 REDES DE SENSORES SEM FIO

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre as redes de sensores sem fio. A seção 4.1 apresenta os conceitos das redes de sensores sem fio evidenciando suas principais características, logo após, na seção 4.2 é apresentado um modelo para arquitetura geral de um nó sensor, seguida pela seção 4.3 onde são apresentadas as topologias de rede mais utilizadas em redes de sensores sem fio, estas sucintamente descritas nas subseções 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3, as quais, em sequência, tratam da topologia em estrela, seguida pela topologia em malha e pela topologia híbrida, na seção 4.4 é descrita a tecnologia ZigBee e são apresentados alguns exemplos de sua aplicação em soluções que envolvam redes de água, na seção 4.5 é descrito o protocolo de comunicação MQTT-SN voltado à aplicação em redes de sensores sem fio, e, por fim, é apresentado na seção 4.6 um resumo do capítulo.

4.1 Definições e Conceitos das Redes de Sensores Sem Fio

Os recentes avanços alcançados pela micro-eletrônica permitiram o desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação, sistemas digitais embarcados e sensores de propósito geral mas com boa precisão e baixo custo. Uma rede de sensores pode ser definida como a composição de diversos sensores de baixo custo e consumo elétrico que são distribuídos e conectados em uma rede. Estes sensores apresentam tamanho reduzido e recursos de processamento limitados, mas são dotados de percepção para medir e recuperar informações do ambiente, e, baseado em algum nível de processamento local, transmitir esses dados sensorizados utilizando uma rede de comunicação. (SHARMA; THAKUR; KUMAR, 2013; YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008)

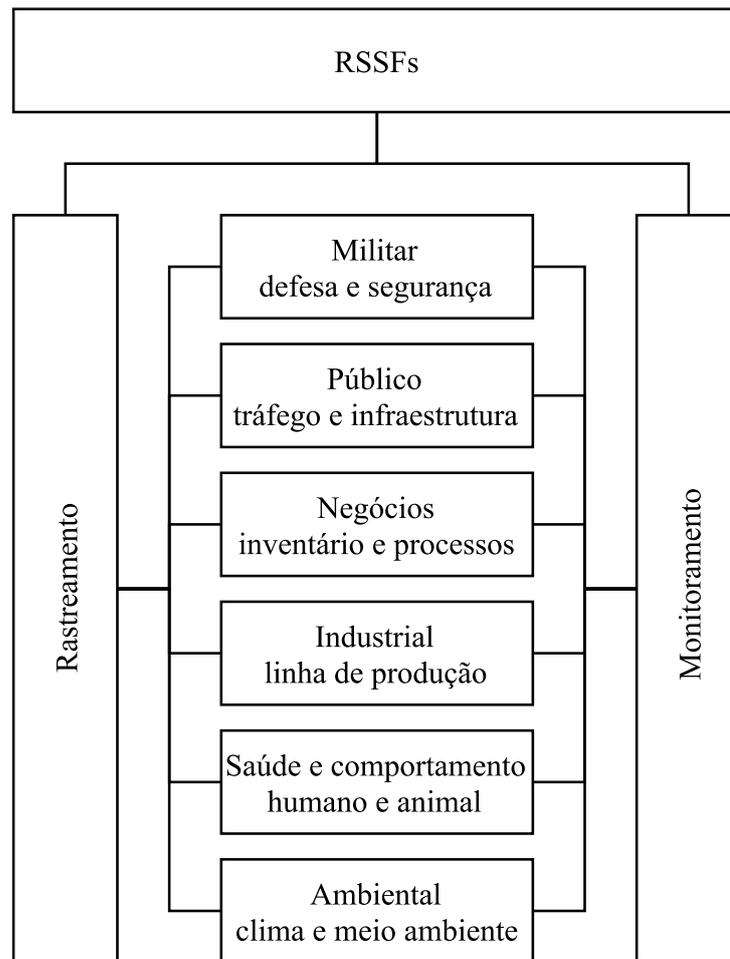
As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs)¹ são concebidas com o objetivo de monitorar a ocorrência de algum fenômeno em particular. Com o advento da miniaturização de componentes elétricos e disponibilidade a baixo custo, as redes de sensores sem fio estão sendo largamente aplicadas em monitoramento remoto.

As RSSFs possuem características que variam de acordo com sua aplicação, mas que em termos gerais compreendem: a) um grande número de sensores distribuídos; b) poder de processamento computacional limitado; c) conecta diversos dispositivos heterogêneos; d) restrições quanto ao consumo elétrico; e) restrições quanto aos dados coletados, sendo específicos e limitados em tamanho. (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008)

¹ Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs): tradução literal para a expressão *wireless sensor networks (WSNs)* comumente utilizada no idioma inglês.
Fonte: (GARG; SAROHA; LOCHAB, 2011; SILVA et al., 2004)

As aplicações de RSSFs podem ser classificadas em duas categorias: a) rastreamento: que inclui rastrear objetos em uma linha de produção ou processos de negócios, tráfego de pessoas e veículos, comportamento animal, dentre outros; e, b) monitoramento: de variáveis ambientais, comportamento humano incluindo consumo e relacionamentos, desempenho de processos de negócios, questões de segurança e de saúde humana. A Figura 12 ilustra uma visão geral das aplicações de RSSFs.

Figura 12: Visão geral das aplicações de RSSFs



Fonte: Adaptado de (YICK; MUKHERJEE; GHOSAL, 2008)

Esta imagem ilustra uma visão geral das aplicações de RSSFs, classificadas nas categorias de: a) rastreamento; e, b) monitoramento.

Com relação à aplicação em sistemas militares, as RSSFs são parte integrante dos sistemas de comando, controle, comunicação, computação, inteligência, vigilância e direcionamento. A este conjunto de termos dá-se o nome de C4ISRT² que representa soluções

² C4ISRT: acrônimo em inglês para *Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*.

Fonte: Sharma, Thakur e Kumar (2013)

baseadas em rápida entrega, tolerância à falhas e autoconfiguração para monitoramento e rastreamento de forças militares, equipamentos e munições, detecção de ataques químicos e biológicos, e reconhecimento de terrenos. (SHARMA; THAKUR; KUMAR, 2013)

As aplicações ambientais envolvem o monitoramento de diversas variáveis climáticas como temperatura do ar, da água e do solo, monitoramento da pressão atmosférica, da direção, sentido e velocidade dos ventos e da dinâmica das marés. Um exemplo bastante interessante é a aplicação no monitoramento do crescimento de colônias de insetos que possam causar impacto na produção agrícola.

Algumas das aplicações na área de saúde humana envolvem o desenvolvimento de interfaces para o monitoramento de variáveis biomédicas ou comportamentais, provendo à área médica dados de forma mais rápida que possam favorecer um diagnóstico clínico mais eficiente.

Sensores também são utilizados no monitoramento animal, sob a forma de chips de identificação que podem conter dados históricos sobre a saúde do animal, vacinação e genealogia.

Uma RSSF deve ser composta por, no mínimo: a) dispositivo de sensoriamento ou sensor: responsável por monitorar o fenômeno sendo observado; b) observador: que pode ser um usuário final analisando determinado fenômeno, ou um sistema intermediário para captação de dados, ou ainda um outro dispositivo sensor que utiliza os dados sensorizados para tomada de decisão; e, c) fenômeno: objeto de estudo do observador.

4.2 Arquitetura Geral de um Nó Sensor

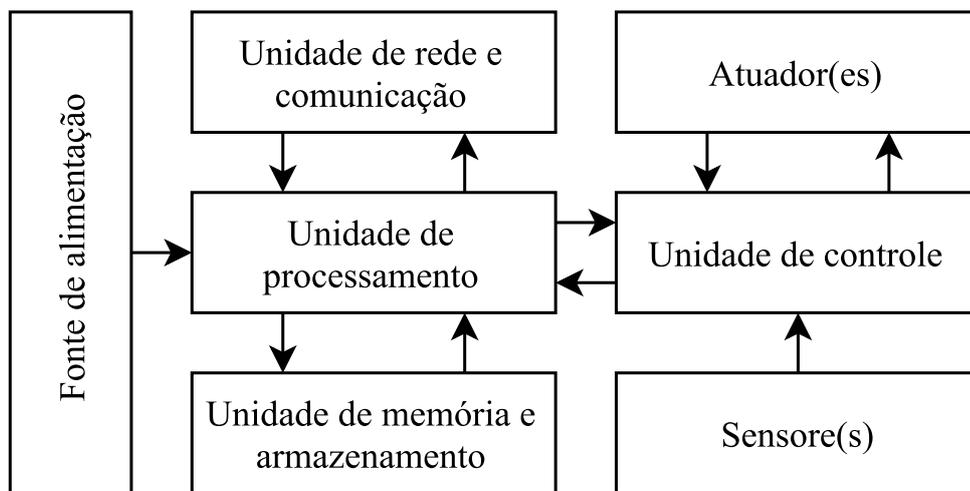
Os dispositivos sensores apresentam uma arquitetura geral composta pelas unidades básicas de:

- a) fonte de alimentação: uma das principais preocupações na construção de um dispositivo sensor, pois este deve apresentar baixo consumo elétrico;
- b) unidade de processamento e controle: geralmente compõe a mesma estrutura dentro do nó sensor sendo responsável por gerenciar as diversas funções de comunicação, gerenciamento de memória e armazenamento de dados além de controlar o sensoriamento ou atuação;
- c) memória e armazenamento: agindo em paralelo com a unidade de processamento serve para comportar instruções ou armazenar temporariamente dados que ainda não foram transmitidos;
- d) unidade de comunicação: composta por um transceptor com o propósito único de trafegar dados sensorizados ou comandos de controle;

- e) sensores e atuadores: unidades responsáveis por captar dados do ambiente ou atuar no próprio módulo sensor ou no ambiente a partir de algum processamento local ou comando de controle.

Associados em rede esses sensores podem compor estruturas de comunicação robustas onde cada sensor assumirá o papel de *nó sensor* (em inglês utiliza-se o termo *sensor node* ou apenas *node*³). Na Figura 13 é ilustrada uma representação da arquitetura geral de um nó sensor.

Figura 13: Arquitetura geral de um nó sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma representação para a arquitetura geral de um nó sensor, contendo as unidades de: a) alimentação; b) processamento e controle; c) memória; d) comunicação; e, e) sensores ou atuadores.

Os *nodes* são dispositivos autônomos capazes de executar tarefas como: a) sensoriar e processar dados do ambiente; b) tomar decisões baseadas em processamento local; c) atuar conforme comando remoto ou programado; e, d) transmitir dados sensorizados. Comumente os *nodes* são conectados por alguma tecnologia de transmissão via rádio, formando uma estrutura de *redes de sensores sem fio*. (SHARMA; TRIPATHI, 2015; GARG; SAROHA; LOCHAB, 2011)

4.3 Topologia para RSSFs

A comunicação entre *nodes* de uma RSSF se dá por meio de rádio. A linha básica de uma arquitetura geral para comunicação de RSSF segue os padrões já estipulados na indústria para redes sem fio. (YINBIAO et al., 2014; IERC, 2015)

³ *Node*: dispositivo eletrônico equipado com capacidade para sensoriamento, processamento e comunicação.

Desenvolvidas sob o aspecto de redes domésticas do tipo WPAN⁴, de modo geral, as RSSFs são estruturadas sobre o protocolo IEEE 802.15, mantido pela IEEE Computer Society (2011)⁵, e que especifica padrões para as camadas física e de controle de acesso para redes sem fio com baixas taxas de transmissão. Em se tratando especificamente de RSSFs segue-se as especificações técnicas contidas no IEEE 802.15.4 que determinam os padrões de operações para a variação LR-WPAN⁶. O foco principal é a construção de redes de comunicação sem fio flexíveis de baixa velocidade e baixo custo com fácil implementação e conexão rápida de dispositivos.

A rede com suporte ao protocolo IEEE 802.15 apresenta segurança baseada em troca de chaves simétricas entre os nós comunicantes, identificando cada nó de rede através da atribuição exclusiva de um endereço físico MAC⁷. (SASTRY; WAGNER, 2004)

O protocolo IEEE 802.15 especifica que as redes devem ser constituídas por dois tipos de nós de rede:

- a) o primeiro tipo é o *Full-Function Device* (FFD): dispositivo de função completa que pode assumir as funções de coordenador de rede ou pode funcionar como um nó comum, é responsável por implementar o modelo geral de comunicação entre os dispositivos, ou topologia, e se comunica com qualquer um dos outros nós conectados à rede atuando ainda com roteador na retransmissão de mensagens;
- b) o segundo tipo é o *Reduced-Function Device* (RFD): dispositivo de função reduzida desenvolvido com o propósito único de atuar como nó sensor, destinado às atividades específicas de sensoriamento, são geralmente mais simples e possuem menos recursos computacionais embarcados.

A topologia física de uma RSSFs é determinada pela forma de conexão entre os dispositivos FFD e RFD. De modo geral as RSSFs são construídas como redes ponto-a-ponto agrupando os dispositivos sob estrutura topológica em: a) estrela, quando há somente um *node* FFD responsável pela transmissão de dados; b) malha, o termo em inglês que denomina esse tipo de rede é *mesh* e esta tornou-se a topologia mais utilizada em RSSFs, é composta por diversos *nodes* FFD interconectados entre si; ou, c) híbrida, que é a combinação de mais de uma topologia e geralmente é implementada com o propósito de incorporar ou estender redes legadas.

⁴ WPAN: acrônimo em inglês para *Wireless Personal Area Network* (WPAN): denominação para rede sem fio de área pessoal, utilizada para interligar dispositivos próximos de modo fácil. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15>>. Acesso em: set. 2015.

⁵ *IEEE Computer Society*: subgrupo do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) dedicado à ciência e tecnologia da computação. Disponível em: <<https://www.computer.org>>. Acesso em: set. 2015.

⁶ LR-WPAN: acrônimo em inglês para *Low-Rate Wireless Personal Network* (LR-WPAN): rede sem fio de área pessoal e baixa taxa de transmissão. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>>. Acesso em: out. 2015.

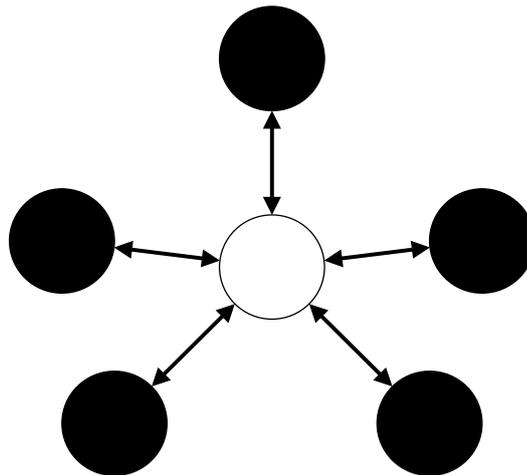
⁷ MAC: acrônimo em inglês para *Media Access Control* (MAC), endereço único que identifica os dispositivos conectados por meio físico a uma rede, é utilizado para determinar o controle de acesso à rede.

Decidir pela melhor configuração para a topologia de rede é muito importante e depende da aplicação para a qual cada projeto em específico foi desenvolvido. Deve-se ter em conta as variáveis que serão apresentadas e cada tipo de dados em vista de prover a melhor efetividade da rede considerando um menor consumo elétrico, maior segurança e taxa de transmissão de dados.

4.3.1 Topologia Estrela

A topologia de comunicação em estrela é baseada em uma única estação central, ou dispositivo concentrador atuando como FFD, que coordena a comunicação na rede e pode enviar ou receber dados provenientes dos diversos *sensor nodes* do tipo RFD. Na Figura 14 é ilustrada uma representação para a topologia de rede em estrela.

Figura 14: Topologia de rede em estrela



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma representação para a topologia de rede em estrela, formada por: a) estação central ou *node* FFD (em branco); e, b) *sensor node* (em preto).

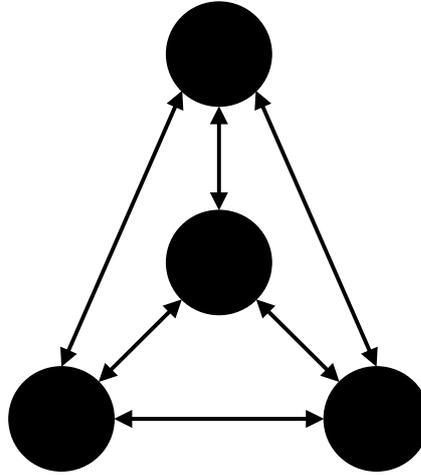
Nessa topologia: a) as vantagens: estão na simplicidade de implementação, apresenta baixa latência de transmissão de dados, além da possibilidade de economia elétrica considerando que a comunicação entre o *sensor node* e a estação central só se dá quando realmente necessária; b) a desvantagem: fica por conta do menor alcance, já que a estação central deve ser plenamente acessível por todos os *sensor nodes*.

4.3.2 Topologia em Malha

A topologia de comunicação em malha permite que quaisquer *nodes* transmitam dados entre si, estes atuando sempre como dispositivo FFD. Na Figura 15 é ilustrada uma

representação para a topologia de rede em malha.

Figura 15: Topologia de rede em malha



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma representação para a topologia de rede em malha, composta por *sensor nodes* atuando como dispositivos FFD.

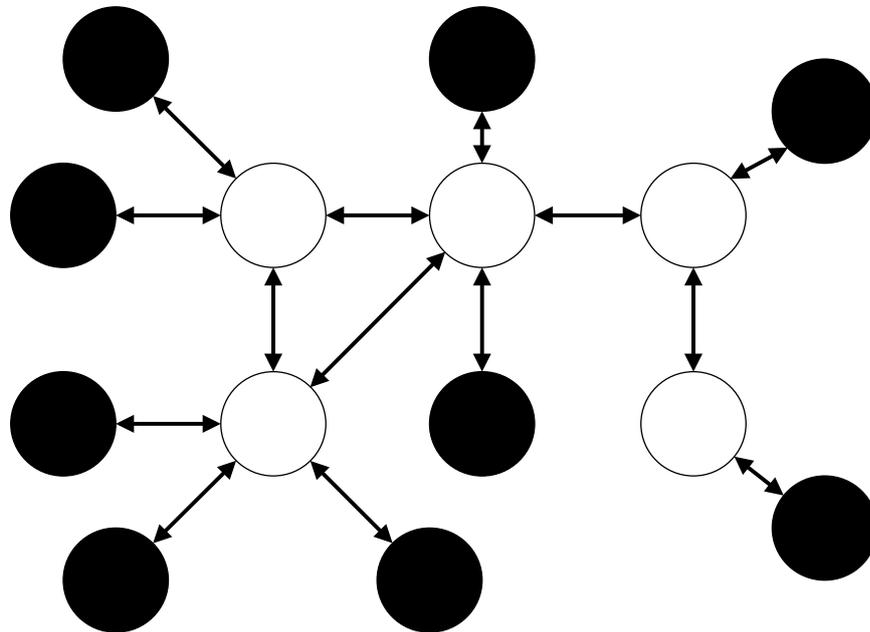
Nessa topologia: a) as vantagens: estão na possibilidade de implementação da tolerância à falhas, visto que qualquer *node* pode assumir o papel de coordenador da rede e gerenciar a transmissão de dados, além de que novos *nodes*, podem a qualquer momento, serem adicionados à rede provendo uma maior escalabilidade; b) a principal desvantagem: fica a cargo do maior consumo elétrico dentre as topologias aqui apresentadas, mas, não deve ser negligenciada a questão da segurança, visto que na rede em malha os dados transmitidos poderão trafegar por diversos nós da rede.

4.3.3 Topologia Híbrida

A topologia de comunicação híbrida representa as redes que utilizam mais de uma topologia ao mesmo tempo, de modo geral é a junção das duas topologias de rede em estrela e rede em malha. Essa é a topologia de rede mais robusta entre as apresentadas, pois une as vantagens de ambas minimizando suas desvantagens particulares. Na Figura 16 é ilustrada uma representação para a topologia de rede híbrida.

Nessa topologia: a) as vantagens: estão na robustez da rede e comunicação tolerante à falhas, pois qualquer *node* FFD poderá assumir a função de coordenador da rede e transmissão de dados, além do consumo elétrico otimizado; b) a desvantagem: fica por conta de uma maior complexidade de implantação.

Figura 16: Topologia de rede híbrida



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma representação para a topologia de rede híbrida, formada por a) *node* FFD (em branco); e, b) *sensor node* FFD ou RFD (em preto).

Bastante utilizada para a implementação de grandes redes, compostas por diversos *nodes*, promove uma maior interoperabilidade à medida que permite a conexão de dispositivos com tecnologias diferentes além de possibilitar redundância pela disponibilidade de várias rotas de comunicação. O desenho final da rede é determinado pela combinação de duas ou mais topologias distintas.

As redes híbridas geralmente são construídas no intuito de resolver problemas específicos de expansão de rede ou interconexão de tecnologias distintas e aproveita a infraestrutura de rede disponível acrescentando novos dispositivos atuando como roteadores.

4.4 Tecnologia ZigBee

A tecnologia ZigBee⁸ é ao mesmo tempo a implementação das especificações do protocolo IEEE 802.15.4 e um produto disponível no mercado sob a forma de microchip, utilizado para a construção de dispositivos de aplicação específica; ou sob a forma de um módulo totalmente funcional, utilizado para aplicações genéricas de baixo custo.

⁸ ZigBee: conjunto de especificações para comunicação sem fio entre dispositivos baseado no padrão IEEE 802.15.4 largamente utilizados em aplicações de Internet das Coisas.

Apresenta as características chave de: a) baixo consumo elétrico; b) baixa potência de transmissão sem fio; c) fácil implementação; d) taxa de transmissão de até 250Kbps; e, e) alcance máximo na ordem de 100 metros.

Os dispositivos ZigBee operam em três faixas de frequência ISM⁹, que a depender das restrições legais e das políticas de uso vigentes em cada país para utilização de redes sem fio, variam conforme: a) na especificação para o padrão internacional operam em 2.4 GHz; b) operam em 868 MHz nos países da Europa; e, c) 915 MHz nas Américas.

Os dispositivos ZigBee podem assumir os papéis de FFD, sendo utilizados como roteador, repetidor de sinal ou coordenador de rede e se comunicam com qualquer *node* na rede; e pode assumir o papel de RFD somente utilizado como *sensor node* que se comunica apenas com dispositivos FFD.

Quando em uma rede de topologia estrela o dispositivo ZigBee FFD deverá ser configurado como coordenador central da rede, ao qual todos os outros dispositivos RFD estarão conectados. O coordenador é responsável por gerenciar a rede e o roteamento dos pacotes de dados, permitindo que *sensors nodes* RFD transfiram dados entre si. Nesse tipo de topologia o desempenho geral da transmissão de dados pela rede será limitado pelo desempenho máximo de transmissão do dispositivo FFD configurado como coordenador.

Já quando em uma rede de topologia em malha todos os dispositivos ZigBee deverão ser do tipo FFD, que fazem roteamento de pacotes comunicando-se diretamente entre si, isto confere redundância na transmissão dos pacotes mas traz como desvantagem um maior consumo elétrico, dado que os dispositivos deverão estar sempre aguardando dados para transmissão.

A topologia mais efetiva e comumente utilizada para redes com dispositivos ZigBee tem sido a híbrida, onde várias redes heterogêneas são conectadas entre si através de dispositivos roteadores, conferindo alta disponibilidade de rede e redundância na transmissão dos pacotes com melhor aproveitamento da infraestrutura. Por vezes a implementação de uma rede híbrida visa conectar redes distantes entre si através de um caminho único.

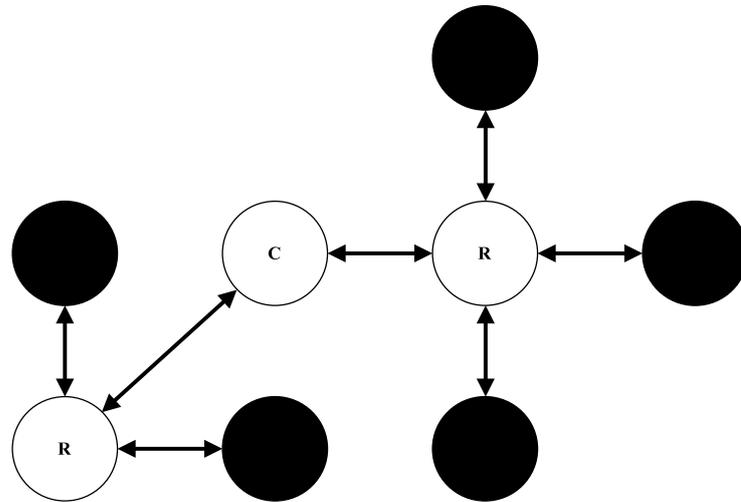
Na figura Figura 17 é ilustrada uma representação para a topologia de rede híbrida baseada ZigBee, composta por dispositivos FFD atuando como coordenador central da rede ou roteador, e dispositivos RFD atuando como *sensor node*.

Permitindo a criação de redes compostas por até 65.535 *nodes* as redes ZigBee se mostram bastante versáteis para as mais diversas aplicações na indústria e pesquisa acadêmica. Nos parágrafos a seguir estão relatados alguns trabalhos encontrados na literatura acadêmica.

No trabalho de Aminzadeh, Kashefi e Alee (2010) foi proposta a aplicação de RSSFs

⁹ ISM: acrônimo em inglês para *Industrial, Scientific & Medical*: bandas de frequência reservadas internacionalmente para o desenvolvimento de aplicações de escopo industrial, científico e médico.

Figura 17: Topologia de rede híbrida baseada em ZigBee



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma representação para a topologia de rede híbrida baseada em ZigBee, apresentando: a) dispositivo FFD coordenador (em branco – C); b) dispositivo FFD roteador (em branco – R); e, c) dispositivo RFD (em preto).

para monitoramento em tempo real da pressão na rede de distribuição de água. Durante o período de 30 dias foram coletados dados em intervalos regulares de 15 minutos nos diversos *sensors nodes* distribuídos pela rede. Os dados sensoriados foram transmitidos pelo coordenador de rede, único nó de rede dotado de conexão à internet, armazenados em um servidor e analisados com a utilização de aplicação específica. O estudo mostra que o uso de redes ZigBee é efetivo para a redução de custos na transmissão de dados à medida que os dados sensoriados podem utilizar melhor a infraestrutura de rede, neste projeto concentrada em um único ponto de transmissão.

No trabalho de Zheng e Zhang (2011) foi proposta uma rede inteligente para controle do consumo elétrico utilizando *sensors nodes* conectados através de módulos ZigBee. A arquitetura proposta no trabalho se baseia na transmissão de dados coletados em medidores elétricos para coletores de dados que enviam essas informações a um dispositivo concentrador e este por sua vez transmite para uma central de processamento. Os autores propuseram uma arquitetura em 3 níveis: a) conjunto de equipamentos para monitoramento elétrico, coleta, e transmissão de dados, chamado de *Intelligent Wireless Electric Power Management and Control (IWEMC)*; b) central de processamento; c) sistemas *web* para monitoramento.

No trabalho de Reddy e Eswaran (2013) foi proposta a criação de uma rede de sensores com o propósito de monitorar e administrar o nível de água em reservatórios de água do tipo torre elevada. Os *sensors nodes* ZigBee foram dispostos aproveitando

a infraestrutura elevada dos reservatórios, permitindo a criação de uma malha de rede redundante. Foi desenvolvido um protótipo de módulo sensor constituído por sensor para nível de água. Os testes mostraram ser possível controlar a vazão da água nos reservatórios remotamente através da rede de sensores.

Já no trabalho de Amruta e Satish (2013) foi proposta a criação de uma RSSFs para monitorar em tempo real a qualidade da água por meio de sensores que medem os valores de pH, O₂ e turbidez em diferentes locais na rede de distribuição. Os ensaios mostraram ser possível descobrir problemas imediatos na qualidade da água através da análise dos dados providos pela rede de sensores.

4.5 Protocolo MQTT-SN

Diversos protocolos da camada de aplicação são utilizados em soluções sobre RSSFs, um destes em particular é o MQTT¹⁰. Originalmente desenvolvido pela IBM¹¹ para redes TCP/IP de alta latência, este protocolo se baseia na transmissão de dados sob o modelo de comunicação *publish-subscribe*, ou publicador-subscritor, que apresenta três agentes em sua estrutura básica: a) *publisher*, fonte de origem dos dados; b) *broker*, camada intermediária responsável por distribuir os dados; e, c) *subscriber*, agente que conecta ao broker em busca de dados. (IBM, 2013)

O protocolo MQTT é otimizado para redes cuja largura de banda é baixa ou a taxa de transferência de dados é intermitente, como nas aplicações desenvolvidas para para IoT¹² e soluções voltadas para dispositivos móveis.

A variação MQTT-SN¹³ se refere às redes de sensores, e foi desenvolvida para suporte àquelas redes que não utilizam TCP/IP como é o caso das redes ZigBee.

O funcionamento do protocolo MQTT se baseia na subscrição de tópicos, quando um agente *subscriber* deseja receber determinada informação ele não se conecta diretamente a um *publisher* mas se inscreve em um agente de publicação intermediário, o *broker*, que gerencia todas as publicações e subscrições de dados. Isto representa uma ligeira fragilidade na estrutura de rede, visto que toda comunicação deverá ser consolidada em um único ponto, na indisponibilidade, toda a rede perderá comunicação, entretanto este problema

¹⁰ MQTT: acrônimo em inglês para *Message Queuing Telemetry Transport*.

Disponível em: <<http://mqtt.org>>. Acesso em: jun. 2015.

¹¹ IBM: acrônimo em inglês para *International Business Machines*, empresa multinacional com sede nos Estados Unidos voltada para a área de informática.

Disponível em: <<http://www.ibm.com>>. Acesso em: nov. 2015.

¹² IoT: acrônimo em inglês para *Internet of Things*, em português Internet das Coisas, rede de objetos físicos dotados de tecnologia embarcada que possibilite comunicação para sensoriamente e coleta de dados.

Disponível em: <<https://www.theinternetofthings.eu>>, <<http://www.iothandbook.org/>>. Acesso em: maio 2015.

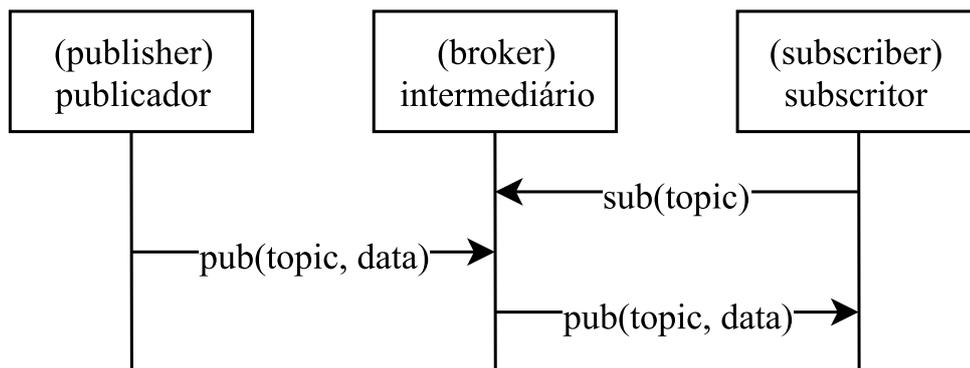
¹³ MQTT-SN: acrônimo em inglês para *Message Queuing Telemetry Transport for Sensors Networks*.

Disponível em: <<http://mqtt.org>>. Acesso em: jun. 2015.

pode ser mitigado utilizando soluções *broker* redundantes ou em cluster no intuito de prover alta disponibilidade.

O protocolo favorece a condificação simples e traz também a especificação de métodos para comunicação, dos quais os principais são: a) pub, publicação tópicos de dados, dados ou comandos; e, b) sub, subscrever a tópicos. Na figura Figura 18 é ilustrada uma representação para o modelo básico de funcionamento do protocolo MQTT.

Figura 18: Modelo base do protocolo MQTT



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma representação para o modelo básico de funcionamento do protocolo MQTT, apresentando os agentes e seus principais métodos: a) *publisher*: pub(topic,data); b) *broker*: pub(topic,data); e, c) *subscriber*: sub(topic).

Neste modelo de comunicação, o *subscriber* normalmente recebe apenas um subconjunto de dados específico do tópico publicado ao qual está subscreto e não todos os dados disponíveis na rede, isto é gerenciado pelos processos de filtragem de dados, que podem ser baseadas: a) tópicos, quando as mensagens são publicadas em classes de tópicos e o agente subscreto receberá todas as mensagens publicadas para os tópicos aos quais se inscreveu; ou em, b) conteúdo, quando é feita uma filtragem de conteúdo e a mensagem só é entregue ao subscritor se corresponder a uma série de critérios de filtragem pre-estabelecidos.

Como vantagem este protocolo apresenta uma baixa acoplagem entre o *publisher* e *subscriber* pois ambos não precisam ter ciência da existência ou parâmetros de comunicação um do outro, além de promover uma maior escalabilidade da rede devido o funcionamento da troca de mensagens através do *broker* a rede pode ser implementada com suporte a processamento de dados em paralelo e cache de mensagens.

Nas aplicações do protocolo MQTT em RSSFs o *publisher* geralmente é o dispositivo que desempenha o papel de sensor, o que se traduz em uma aplicação do protocolo sobre um dispositivo RFD ou ainda na administração remota de dispositivos FFD. As mensagens publicadas pelo *publisher* são transmitidas ao agente de publicação *broker* que as distribui aos *subscriber* de forma seletiva através dos processos de filtragem de conteúdo ou tópico

de subscrição. Neste padrão um mesmo dispositivo poderá desempenhar, ao mesmo tempo, os papéis de *publisher* ou *subscriber*, permitindo, por exemplo, que os diversos sensores da rede possam trocar mensagens indiretamente.

4.6 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral sobre as redes de sensores sem fio.

De início foram apresentados os principais conceitos e definições sobre redes de sensores sem fio, logo após foi apresentado um modelo para arquitetura geral de um nó sensor, em seguida foram apresentadas as topologias mais utilizadas em redes de sensores sem fio e uma descrição para a tecnologia ZigBee contendo alguns exemplos de sua aplicação em soluções que envolvam redes de água, e, por fim foi descrito o protocolo de comunicação MQTT-SN voltado à aplicação em redes de sensores sem fio.

As aplicações de RSSFs são concebidas com o objetivo de monitorar a ocorrência de algum fenômeno em particular quem envolvam o rastreo ou monitoramento de diversas variáveis como objetos em uma linha de produção ou processo de negócios, o tráfego de pessoas e veículos, comportamento animal, variáveis ambientais, questões de segurança e de saúde humana.

As RSSFs possuem como características principais: a) um grande número de sensores distribuídos; b) poder de processamento computacional limitado; c) conecta diversos dispositivos heterogêneos; d) restrições quanto ao consumo elétrico; e) restrições quanto aos dados coletados, sendo específicos e limitados em tamanho.

A estrutura básica que compõe uma RSSF deve, obrigatoriamente, apresentar as seguintes entidades: a) sensor, responsável por monitorar o fenômeno sendo observado; b) observador, usuário, sistema ou dispositivo acompanhando o fluxo de dados captado pelo sensor; e, c) fenômeno que é objeto de estudo do observador.

Os sensores por sua vez apresentam uma arquitetura simples, mas robusta e flexível, que basicamente contém: a) fonte de alimentação; b) unidade de processamento e controle; c) memória e armazenamento temporário de dados; d) unidade de comunicação; e, e) os sensores e atuadores. A associação em rede desses sensores constitui as RSSFs onde cada sensor assumirá um papel como dispositivo autônomo, denominado *node*, capaz de executar tarefas de: a) sensoriamento; b) processamento de dados e tomada de decisão; c) execução de comandos remotos ou programados; e, d) transmissão de dados.

A comunicação entre *nodes* de uma RSSF se dá por meio de rádio. A rede formada por esses *nodes* pode ser configurada sob as topologias de: a) estrela; b) malha; ou c) híbrida. A topologia híbrida é a mais utilizada na implementação de redes contendo um grande número de nós, pois promove uma maior interoperabilidade à medida que permite a

conexão de dispositivos com tecnologias diferentes além de possibilitar tolerância à falhas pela disponibilidade de rotas redundantes para comunicação dos dispositivos.

A tecnologia ZigBee é ao mesmo tempo a implementação das especificações do protocolo IEEE 802.15.4 e um produto disponível no mercado utilizado para construção de dispositivos de aplicação específica ou módulo totalmente funcional para aplicações genéricas de baixo custo.

O protocolo IEEE 802.15 especifica que as redes sob esse padrão devam ser constituídas por dois tipos de *nodes*: a) Full-Function Device (FFD), ou dispositivo de função completa, que pode assumir as funções de coordenador de rede ou operar como um módulo sensor; e, b) Reduced-Function Device (RFD), ou dispositivo de função reduzida, que tem o propósito específico de atuar como módulo sensor.

Operando nas frequências da faixa ISM: a) 2.4 GHz; b) 915 MHz; e, c) 868 MHz; os dispositivos ZigBee apresentam como características principais: a) baixo consumo elétrico; b) baixa potência de transmissão sem fio; c) fácil implementação; d) taxa de transmissão de até 250Kbps; e, e) alcance máximo na ordem de 100 metros.

Existem diversos protocolos ao nível de aplicação utilizados em soluções sobre RSSFs, dentre eles o MQTT se destaca como uma opção de fácil implementação, desenvolvida para redes de baixa largura de banda ou com taxa de dados intermitente. No cenário das RSSFs é utilizada a variação MQTT-SN, desenvolvido para das suporte com otimizações específicas às redes ZigBee.

O funcionamento do protocolo se baseia na subscrição de tópicos sob o modelo de comunicação *publisher-subscriber* que apresenta três agentes: a) publisher; b) broker; e o, c) subscriber; e especifica métodos para comunicação entre os agentes, dos quais os dois principais são: a) pub, para publicação; e, b) sub, para subscrição.

Apesar das questões de privacidade e segurança, oriundas do modelo de transmissão de dados em texto simples sem criptografia, o protocolo MQTT traz algumas vantagens quando consideradas as particularidades da comunicação em dispositivos de IoT, pois apresenta: a) maior simplicidade na codificação, o que favorece a criação de códigos leves e de fácil manutenção que rodam em qualquer dispositivo de IoT; b) baixa acoplagem entre os dispositivos *publisher* e *broker*; c) baixo custo de processamento e alocação de memória; d) escalabilidade dinâmica da rede, permitindo a inserção de novos dispositivos a qualquer momento.

5 MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta o mapeamento sistemático da literatura utilizado para estruturar o corpo de conhecimento a respeito do tema de pesquisa desta dissertação de mestrado. Na seção 5.1 é apresentado o planejamento do mapeamento sistemático juntamente com seu escopo na subseção 5.1.1, em seguida, na subseção 5.1.2 são apresentadas as questões de pesquisa, e na subseção 5.1.3 são apresentados os passos que levam a construção de uma expressão geral de busca, os procedimentos para busca das publicações são descritos na subseção 5.1.4, na subseção 5.1.5 é apresentada a relação de critérios para seleção das fontes de pesquisa, e logo após, os critérios para inclusão e exclusão dos trabalhos na subseção 5.1.6, na seção 5.2 são apresentados os passos principais para execução das buscas e a relação de trabalhos inicialmente identificados no mapeamento, na seção 5.3 são apresentados e discutidos os resultados do mapeamento sistemático, e, por fim, é apresentado na seção 5.4 um resumo do capítulo.

5.1 Planejamento

A revisão da literatura pode ser sintetizada como o processo de perquirir, analisar e representar o corpo do conhecimento em torno de um tema de pesquisa específico, através da análise do material disponível à consulta e de conteúdo relevante, apresentado sob a forma de livros, artigos científicos, teses e dissertações, relatório e manuais. Não devendo entretanto negligenciar a importância do conteúdo conhecido como literatura cinza, material amplamente produzido por empresas ou órgãos governamentais e disponível à consulta mas por vezes não indexado em motores de busca.

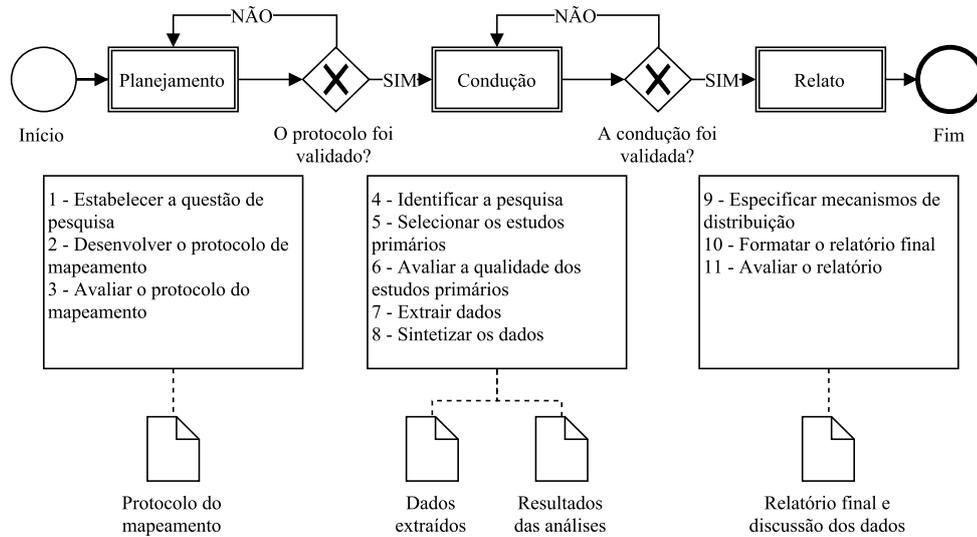
Dentre os métodos utilizados para realizar essa revisão existe o Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL)¹. Bastante difundido e utilizado na academia, esse método é projetado para ser meticuloso, formal e auditável, permitindo fácil replicação por outros pesquisadores. Na Figura 19 é ilustrada uma visão expandida dos processos de mapeamento sistemático da literatura contendo um resumo das atividades e saídas dos respectivos processos.

Amplamente são utilizadas as recomendações propostas por Kitchenham e Charters (2007) que dividem o processo de conduzir um mapeamento sistemático em 3 fases:

- a) planejamento, fase inicial que tem como saída o protocolo do mapeamento contendo o escopo e as questões de pesquisa que levam à construção de uma

¹ Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL): método para revisão planejada da literatura com o propósito de responder a uma questão de pesquisa específica, utilizando métodos sistemáticos para identificar, selecionar e avaliar estudos a fim de coletar e analisar dados.

Figura 19: Visão expandida dos processos de MSL



Fonte: Adaptado de (KITCHENHAM; CHARTERS, 2007)

Esta imagem ilustra uma visão expandida dos processos de MSL contendo um resumo das atividades e saídas.

expressão geral de busca; a ser utilizada na fase de,

- condução da pesquisa, quando os trabalhos são identificados e os dados são extraídos, neste momento também é feita a síntese e análise dos dados; que irá compor o,
- relatório de resultados, na fase que encerra o processo de mapeamento, tendo como saída o resultado final e discussão dos dados.

5.1.1 Escopo do MSL

Existe muito material a respeito do tema deste trabalho que não é acessível através dos motores de busca, por este motivo foram incluídos manualmente no mapeamento sistemático.

Para documentos classificados como *literatura cinza*, *manual* ou *relatório técnico*, foram executadas buscas manuais nos repositórios de documentos digitais das principais associações internacionais da área de saneamento e nos repositórios do Ministério das Cidades do Governo Federal do Brasil, a Tabela 2 exhibe a relação completa de endereços dos repositórios selecionados para pesquisa:

- Ministério das Cidades do Governo Federal do Brasil:
 - SNSA – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental;
 - PMSS – Programa de Modernização do Setor de Saneamento;

- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento;
- b) EPA – *United States Environmental Protection Agency*;
- c) ILMSS Ltd – *International Leakage Management Support Services*.

A SNSA tem como missão assegurar à população seus direitos humanos fundamentais de acesso à água potável em qualidade e quantidade suficientes e tem como objetivo promover o avanço do setor de saneamento rumo à universalização do abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, gestão dos resíduos sólidos urbanos, além do adequado manejo das águas pluviais urbanas, com o consequente controle de enchentes.

O PMSS é um instrumento permanente de apoio à gestão das políticas de saneamento do Governo Federal do Brasil, tem suas ações voltadas à criação das condições propícias a um ambiente de mudanças e de desenvolvimento do setor de saneamento no país (FRANGIPANI, 2007).

O SNIS é o maior e mais importante sistema de informações do setor de saneamento brasileiro. O sistema possui uma base de dados que contém informações e indicadores sobre a prestação de serviços de água e esgotos e de manejo de resíduos sólidos urbanos.

A agência EPA trata, nos Estados Unidos, de questões ambientais e consequentemente do uso da água, possui um corpo científico voltado, entre outros temas, a estudos sobre sustentabilidade no uso da água.

A organização ILMSS Ltd foi criada para promover estudos e melhorias sobre as práticas de gestão das perdas de água. Possui membros em diversos países, inclusive no Brasil.

Para os trabalhos classificados como *dissertações, teses, artigos científicos, livros e capítulos de livro*, foram executadas buscas nos indexadores de trabalhos científicos recuperados a partir da *busca por base* no portal Periódicos CAPES^{2,3} para as áreas de *engenharias* e subáreas *engenharia elétrica, eletrônica e telecomunicações*. Na Tabela 2 é apresentada a relação de fontes de pesquisa utilizadas neste trabalho.

A partir destas fontes de pesquisa especificadas foram recuperados trabalhos nos idiomas inglês e português produzidos ou publicados nos últimos 10 anos, de 2006 a 2016, que são de maior interesse pois apresentam conceitos e estratégias mais atuais e diretamente relacionados ao tema desta pesquisa, entretanto houveram alguns trabalhos além deste período, devido ao grau de reconhecimento que lhes é conferido pela academia e indústria ou por comporem o estado da arte para o setor de saneamento ou para a área de redes de sensores sem fio.

² CAPES: acrônimo para Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, órgão que atua na expansão e consolidação da pós-graduação *stricto sensu*, ligado ao Ministério da Educação do Brasil. Disponível em: <<http://www.capes.gov.br>>. Acesso em: fev. 2015.

³ Periódicos CAPES: Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: fev. 2015.

Tabela 2: Fontes de pesquisa

Tipo	Fonte	Endereço
Literatura cinza	SNSA	http://www.cidades.gov.br/saneamento-cidades
	PMSS	http://www.pmss.gov.br
	SNIS	http://www.snis.gov.br
	EPA	https://www.epa.gov
	ILMSS	http://www.leakssuite.com
Indexadores	ACM Digital Library	http://dl.acm.org
	Engineering Village	https://www.engineeringvillage.com
	Emerald	http://www.emeraldinsight.com
	IEEE Xplore digital Library	http://www.emeraldinsight.com
	ProQuest	http://search.proquest.com
	ScieELO	http://search.scielo.org
	ScienceDirect	http://www.sciencedirect.com
	Scopus	https://www.scopus.com
	Taylor & Francis Online	http://www.tandfonline.com
Web of Science	https://www.webofknowledge.com	
Wiley Online Library	http://onlinelibrary.wiley.com	

Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.2 Questões de pesquisa

As seguintes questões de pesquisa foram levantadas no intuito de prover conhecimento acerca do tema de perdas em sistemas de distribuição de água:

Q1 Como são detectadas as perdas em sistemas de abastecimento de água?

- esta questão objetiva identificar quais são as propostas estudadas pela academia para solução do problema de perdas.

Q2 Que estratégias são utilizadas para combater as perdas em sistemas de distribuição de água?

- com esta questão se busca conhecer quais são as ações executadas para gestão das perdas ou de maneira preventiva identificar e evitar que elas ocorram.

Q3 Existem ferramentas ou modelos que auxiliam no processo? Quais são?

- por fim esta questão tem como objetivo identificar quais são as ferramentas computacionais ou aplicação de modelos matemáticos que são utilizados para apoiar a detecção das perdas.

5.1.3 Expressão de busca

O processo que leva à construção de uma expressão geral de busca inicia pela definição das palavras-chave, ou *keywords*, a partir de estudos primários, que são aqueles trabalhos originais aos quais a maioria das publicações relevantes faz referência.

Consultando a literatura disponível sobre o tema deste trabalho foram elencadas as principais palavras-chave, considerando variações e sinônimos, nos idiomas inglês e português, que referenciam perdas em sistemas de distribuição de água. Na Tabela 3 estão relacionadas as palavras-chave de pesquisa elencadas para este trabalho.

Tabela 3: Palavras-chave de pesquisa

Idioma principal (inglês)	Idioma secundário (português)
control water losses	controlar perdas de água
detect water losses	detectar perdas de água
(leak or leakage) on service connections	vazamento nos ramais
(leak or leakage) on transmission and distribution mains	vazamento nas adutoras e redes
water (distribution or supply) network	rede de (abastecimento ou distribuição ou fornecimento) de água
water (distribution or supply) system	sistema de (abastecimento ou distribuição ou fornecimento) de água
water losses	perdas de água

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota:

* É importante destacar que em inglês a palavra *leak* se refere à falha na tubulação enquanto que *leakage* se refere à passagem da água por essa falha.

A expressão de busca foi determinada com base em refinamento das palavras-chave no intuito de cobrir ao máximo a ocorrência de sinônimos e variações linguísticas para ambos idiomas. A seguir são exibidas as expressões de busca para os idiomas determinados, no Algoritmo 5.1 a expressão de busca para o idioma inglês, e em português no Algoritmo 5.2, cada expressão foi posteriormente adaptada às peculiaridades dos buscadores para compor a *string* de busca utilizadas nas respectivas fontes de pesquisa.

Algoritmo 5.1: Expressão de busca em inglês

```
( ( control OR detect ) AND ( losses OR leak OR leakage ) AND water AND ( (
  ↪ distribution OR supply ) AND ( network OR system ) ) )
```

Algoritmo 5.2: Expressão de busca em português

```
( ( controlar OR detectar ) AND ( perdas OR vazamento ) AND ( ( rede OR
  ↪ sistema ) AND ( abastecimento OR distribuicao OR fornecimento ) ) AND
  ↪ agua )
```

5.1.4 Procedimentos para Busca de Publicações

Foram executadas buscas em mecanismos digitais a partir de seus respectivos *websites*, de acordo com a segmentação:

- a) para documentos classificados como literatura cinza, manual, documentação ou relatório técnico, foi executada busca manual pelo tema perdas em sistemas de distribuição de água:
 - nos websites das associações internacionais especializadas na área de saneamento e gestão de perdas;
 - nos repositórios de documentos digitais do Ministério das Cidades do Governo Federal brasileiro;
- b) para trabalhos de dissertações, teses, artigos científicos, livros e capítulos de livro, foi executada busca nos:
 - indexadores de trabalhos científicos.

5.1.5 Critérios para Seleção das Fontes de Pesquisa

Com relação a literatura cinza já é de pleno conhecimento quais são os repositórios de documentos digitais das principais associações nacionais e internacionais da área de saneamento, há também os repositórios do Ministério das Cidades do Governo Federal do Brasil que são de livre consulta.

Quanto aos trabalhos científicos, foi necessário observar que cada indexador escolhido atendesse às regras de:

- a) ser acessível através de redes vinculadas à CNPQ⁴/CAPES;
- b) retornar trabalhos científicos disponíveis na íntegra para a leitura, acessados através de redes vinculadas à CNPQ/CAPES;
- c) aceitar *strings* de busca compostas por operadores lógicos, conforme a subseção 5.1.3, e adaptadas de acordo com as regras estabelecidas por cada mecanismo de busca;
- d) exportar o resultado da consulta no formato *bibtex* ou disponibilizar outro formato semelhante; e,
- e) estar escrito e retornar trabalhos em algum dos idiomas definidos na subseção 5.1.1.

⁴ CNPQ: acrônimo para Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, órgão de incentivo à pesquisa, ligado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil. Disponível em: <<http://www.cnpq.br>>. Acesso em: fev. 2015.

5.1.6 Critérios de Inclusão e Exclusão

Esta etapa é composta pela seleção de trabalhos com base em critérios de inclusão e exclusão, seleção dos estudos primários e finalmente pela catalogação dos trabalhos relevantes com base nos critérios estabelecidos. Portanto, cada trabalho identificado deveria atender aos critérios de:

- a) estar relacionado ao escopo desta pesquisa;
- b) estar escrito em algum dos idiomas definidos;
- c) estar disponível na íntegra para leitura, acessado através de redes vinculadas à CNPQ/CAPES;
- d) quando recuperado a partir de indexadores de trabalhos científicos fosse do tipo:
 - artigo publicado em periódico, revista ou anais de conferência, *article* ou *inproceedings*;
 - livro, *book* ou *booklet*;
 - capítulo de livro, *inbook* ou *incollection*;
 - teses e dissertações, *masterthesis* ou *phdthesis*;
- e) quando recuperado a partir de repositórios de literatura cinza fosse do tipo:
 - documentação técnica, manual;
 - relatório técnico, *techreport*;
- f) ter sido produzido dentro do período de 10 anos, de 2006 até 2016.

5.2 Condução

A identificação e seleção dos estudos foram executadas de acordo com o protocolo estabelecido. Durante a revisão foi utilizada a ferramenta StArt⁵ para apoiar o processo de condução, organização e análise dos estudos primários obtidos ainda na primeira fase de seleção. Já na segunda fase foi utilizado o Microsoft Excel para organizar e analisar os dados a fim de sintetizar os resultados para a elaboração do relato final.

Após execução de busca nas fontes de pesquisa relacionadas na subseção 5.1.1 foram recuperados inicialmente 2.178 estudos. Após a remoção dos duplicados e aplicação dos critérios de seleção, através da análise do título e do resumo, restaram 1.065. Dos quais após nova aplicação dos critérios de seleção, por meio da leitura completa do estudo, em busca de identificação da afinidade com o tema desta pesquisa, restaram 529 estudos.

⁵ StArt: acrônimo para *State of the Art through Systematic Review*, ferramenta desenvolvida pela equipe do Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software da Universidade Federal de São Carlos, para apoio ao desenvolvimento de mapeamento sistemático. Disponível em: <http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool>. Acesso em: mar. 2015.

Tabela 4: Resultado do mapeamento sistemático

Fonte de busca	Aceitos	Duplicados	Fase 1	Fase 2	Incluídos
ACM	71	21	35	17	8
Engineering Village	302	90	148	74	37
Emerald Insight	34	10	16	8	4
IEEE	185	55	91	45	22
ProQuest	195	58	95	47	23
Scielo	6	1	3	1	0
Science Direct	378	113	185	92	46
Scopus	768	230	376	188	94
Taylor & Francis Online	40	12	19	9	4
Web of Science	127	38	62	31	15
Wiley Online Library	72	21	35	17	8
Total	2178	649	1065	529	261

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim após a aplicação dos referidos filtros, 261 trabalhos foram selecionados para inclusão, por tratarem com maior rigor sobre temas relacionados a esta pesquisa, como pode ser observado na Tabela 4, e finalmente, desses 261 estudos incluídos foram identificados 16 que tiveram maior aderência à esta pesquisa, relacionados na Tabela 5.

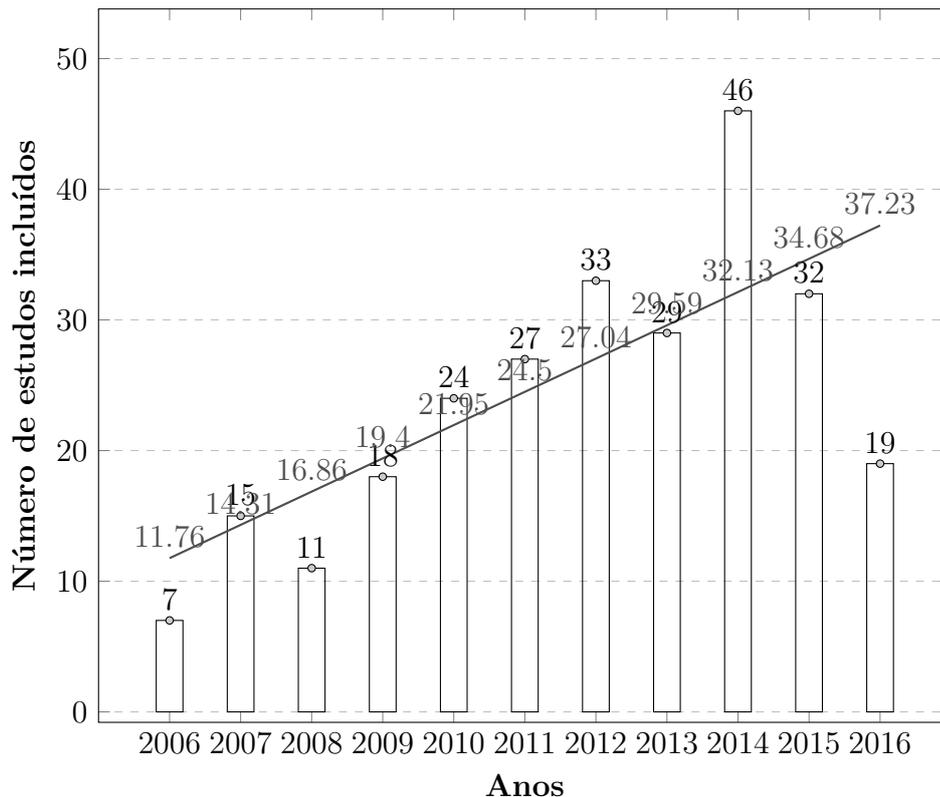
Tabela 5: Estudos incluídos de maior aderência

ID do Estudo	Autor(es)	Ano
1	Goulet, Coutu e Smith	2013
2	Gong et al.	2016
3	Arsene, Gabrys e Al-Dabass	2012
4	Perelman e Amin	2014
5	Meseguer et al.	2014
6	Quevedo et al.	2012
7	Rosich e Puig	2013
8	Jin, Yumei e Ping	2012
9	Gertler et al.	2010
10	Xia, Guojin e Xinhua	2011
11	Allen et al.	2013
12	Prodon, Denegre e Liebling	2010
13	Mounce, Boxall e Machell	2010
14	Nazif et al.	2010
15	Zhonghua He e Zhao	2011
16	Ghazali et al.	2012

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 20 exibe um gráfico contendo o total de 261 estudos incluídos distribuídos por ano e apresenta uma linha de tendência que demonstra um crescimento no interesse da comunidade em pesquisar soluções para o problema de ineficiência no sistema de distribuição de água. Comparando os gráficos da Figura 9 e da Figura 20 nota-se que o número de estudos científicos aumenta ao passo que o índice de perdas na distribuição diminui, evidenciando a importância da constante busca por novas soluções através da pesquisa científica.

Figura 20: Gráfico do número de estudos incluídos por ano



Fonte: Elaborado pelo autor

Este gráfico ilustra o número de estudos científicos incluídos por ano. A linha de tendência mostra que há um crescimento no interesse da comunidade em pesquisar soluções para o problema de perdas.

5.3 Relato

Baseado na análise dos estudos incluídos foi produzido este relato de pesquisa, apresentando a seguir as principais considerações sobre os estudos de maior aderência e em qual contexto, para cada questão de pesquisa, eles se aplicam, identificando também as fragilidades encontradas em cada solução proposta.

5.3.1 Q1 – Como são detectadas as perdas em sistemas de distribuição de água?

Dentre os estudos incluídos de maior aderência, relacionados na Tabela 5, após análise, foram identificados os meios utilizados para detecção das perdas em sistemas de distribuição de água. Nas linhas a seguir é apresentada uma síntese sobre a proposta para detecção das perdas identificada em cada estudo.

No estudo 1, Goulet, Coutu e Smith (2013) propõem uma metodologia para posicionamento de sensores e detecção de vazamentos com base na refutação de cenários de vazamento. A abordagem inclui modelagem e medição de incertezas durante o processo de detecção do vazamento a partir da análise de dados acústicos. O desempenho da metodologia proposta é testado em uma rede de distribuição de água em grande escala usando dados simulados. No contexto da detecção de vazamentos, a hipótese testada é de que um vazamento está ocorrendo em um ponto específico na rede. Tal hipótese é parametrizada no modelo do sistema como um cenário de vazamento.

Um cenário de vazamento é refutado se diferenças entre a vazão prevista e a vazão medida na rede não forem maiores que o erro máximo plausível, determinado por processos gerenciais específicos, para qualquer local de medição. O modelo utiliza o algoritmo de deleção reversa (*reverse-delete algorithm*)⁶, frequentemente utilizado em teoria dos grafos para redução da árvore de probabilidades, com intuito de otimizar a localização e quantidade de sensores pela rede de distribuição, de modo que se configure maior assertividade com menor custo do algoritmo.

Diversos modelos de sistema com cenários de vazamento são refutados no intuito de prever a localização de vazamentos a partir da inferência de dados. Nos cenários de vazamento, candidatos à prova, são realizados exames locais com técnicas como detecção acústica no intuito de refinar a localização do vazamento.

No estudo 2, Gong et al. (2016) propõem a criação de uma rede composta por pontos de controle, conhecidos por *beacons*⁷, no intuito de recuperar informação da vazão de água transmitida por sensores inseridos dentro da tubulação. Estes sensores seguem livremente o fluxo da água e sinalizam sua passagem aos pontos de controle, ou *beacons*, distribuídos pela tubulação. Os vazamentos e refluxos são monitorados através dos dados recuperados pelos sensores

No estudo 3, Arsene, Gabrys e Al-Dabass (2012) propõem técnicas para simulação de uma rede de distribuição onde são inseridos vazamentos aleatórios, a partir de um algoritmo, e estes são identificados. A rede de distribuição, já plenamente conhecida, é

⁶ *Reverse-delete algorithm*: algoritmo de supressão reversa, é utilizado em teoria dos grafos para obter uma árvore de expansão mínima a partir de um grafo ponderado.

⁷ *Beacons*: dispositivos que transmitem sinais por ondas de rádio de baixo alcance, atuando como intermediário na comunicação entre dispositivos móveis e entre dispositivos sob o contexto de IoT.

modelada sob a forma de uma árvore de dispersão e submetida ao algoritmo *General Fuzzy Min-Max Neural Network*⁸ para classificação do estado da rede a partir de um estimador de vazão pelo método dos mínimos quadrados (MMQ)⁹. Quando são detectadas anomalias como mudança na demanda entre dois nós de rede conhecidos é identificado o vazamento.

No estudo 4, Perelman e Amin (2014) propõem modelar a rede de água utilizando uma função potencial definida sobre os nós da rede, nesse modelo representando as interconexões e pontos de consumo, e uma função de fluxo definida sobre os arcos da rede, representando as tubulações. Em particular, a diferença de função potencial entre dois nós é caracterizada por uma função não linear do fluxo sobre a ligação entre os dois nós. A ocorrência de algum evento na rede infere sobre a demanda, causando mudança na pressão e níveis de água na rede.

No estudo 5, Meseguer et al. (2014) utilizam uma rede de distribuição segmentada em DMA e composta por sensores de pressão localizados em pontos específicos distribuídos pela rede. O procedimento proposto para detecção de vazamentos é realizado comparando dados de pressão medidos em certos pontos internos definidos no DMA com a sua estimativa baseada em dados históricos. O valor residual calculado pela diferença entre a pressão medida e a pressão estimada indica uma potencial ocorrência de vazamento.

No estudo 6, Quevedo et al. (2012) propõem uma metodologia para isolar a ocorrência de vazamentos de água de acordo com o volume disponibilizado e o volume de fato faturado. A ideia básica da metodologia é combinar a análise histórica do consumo mensal de duas formas: a) a primeira é chamada de consumo econômico e representa a razão entre o volume de água disponibilizado para o DMA e o total de água faturado para consumo; b) a segunda forma se baseia em utilizar o consumo noturno como referência de consumo para o DMA. Uma análise comparativa entre os resultados encontrados nas duas metodologias indica a ocorrência de distúrbios na rede, o que pode indicar vazamentos.

No estudo 7, Rosich e Puig (2013) utilizaram um modelo para rede de distribuição bastante recorrente em estudos acadêmicos da área, chamado de *Hanoi water distribution network*. Este modelo de rede é fornecido contendo dados distribuídos entre 32 nós de rede, representando conexões, e 34 arcos, representando as tubulações.

O princípio proposto para o diagnóstico de falhas é baseado em modelos, no intuito de verificar a consistência do comportamento observado em cada nó de rede. A consistência é tipicamente encontrada por meio de cálculo residual, verificando a diferença entre o dado de volume fornecido ao nó de rede e o dado de volume informado pelo nó seguinte.

⁸ *General Fuzzy Min-Max Neural Network*: generalização e extensão do algoritmo de agrupamento e classificação *fuzzy min-max*, o método combina aprendizagem supervisionada e não supervisionada em um único algoritmo de treinamento.

⁹ Método dos Mínimos Quadrados (MMQ): técnica de otimização matemática, utilizada com o propósito de encontrar um melhor ajuste para um conjunto de dados informado.

No estudo 8, Jin, Yumei e Ping (2010) simularam uma rede do tipo *Elman Network* na qual cada nó da rede simulada representa uma conexão da rede de distribuição de água. A proposta se baseia em utilizar uma rede de propagação de duas camadas com uma conexão de retroalimentação a partir da saída da camada oculta para a entrada da rede e assim estimar a geração de padrões temporais sobre dados acústicos. Com este método são identificados os distúrbios de rede que provavelmente indiquem a ocorrência de vazamentos.

No estudo 9, Gertler et al. (2010) propõem uma abordagem baseada em *PCA*¹⁰ para detecção e isolamento de vazamentos em sistemas de distribuição de água. O modelo PCA foi elaborado a partir de dados simulados. A resposta aos vazamentos é identificada quando da ocorrência de dispersão nos dados de pressão entre cada nó de rede.

No estudo 10, Xia, Guojin e Xinhua (2011) propõem a simulação de uma rede de distribuição no intuito de identificar onde seriam os melhores pontos para posicionamento de sensores. A rede de distribuição de água avaliada é obtida a partir de simulação utilizando técnicas de inteligência artificial. Utilizando algoritmo genético a rede simulada é otimizada em seus pesos iniciais aplicando o algoritmo *backpropagation*¹¹ no intuito de minimizar os erros e assim completar o treino da rede. Nessa rede simulada a disponibilidade dos pontos de monitoramento é otimizada, com isso os sensores são distribuídos pela rede real de forma a melhor detectar a ocorrência de vazamentos.

No estudo 11, Allen et al. (2013) descrevem a utilização de uma rede de sensores sem fio com o propósito de monitorar continuamente dados acústicos e hidráulicos sobre vazão e pressão. Os dados sensoriados são transmitidos via Internet para um central onde são analisados em busca de identificar a ocorrência de transientes. É identificado o vazamento quando são detectadas transientes em vários sensores próximos distribuídos pela rede, o agrupamento dessas transientes forma uma grade representando a provável localização de um vazamento.

No estudo 12, Prodon, Denegre e Liebling (2010) propõem uma abordagem baseada em teoria dos grafos utilizada para otimização da conectividade entre os nós de uma rede. O trabalho descreve a utilização de transdutores eletroacústicos posicionados sobre hidrantes hidráulicos espalhados pela cidade, cada transdutor transmite um sinal acústico único que é captado pelos demais sensores, nessa abordagem cada hidrante associado a um sensor representa um nó de rede. Os dados sensoriados são transmitidos pela Internet para uma central de processamento.

¹⁰ PCA: acrônimo em inglês para *Principal Component Analysis*, em português é utilizado o termo Análise de Componentes Principais (ACP), é um procedimento matemático para ortogonalização de vetores muito utilizado em cálculos estatísticos no intuito de avaliar um conjunto de variáveis possivelmente correlacionadas transformando-as em um conjunto de variáveis linearmente não-correlacionadas chamadas então de componentes principais.

¹¹ *Backpropagation*: algoritmo utilizado em redes neurais para treinamento utilizando retroalimentação de dados, ou propagação do erro, da camada adjacente à camada anterior.

A solução proposta é otimizar o reconhecimento dos vazamentos na rede a partir dos dados acústicos sensorizados utilizando o algoritmo *branch and bound*¹² no intuito de encontrar soluções ótimas de conectividade entre os nós de rede, representando os sensores, para que encontrem a localização de distúrbios acústicos estimando com maior precisão a proximidade entre o distúrbio e os sensores que o detectaram.

No estudo 13, Mounce, Boxall e Machell (2010) propõem a aplicação de algoritmos de inteligência artificial na detecção de vazamentos, identificados sobre os dados históricos de vazão de água e pressão na rede. O primeiro passo da abordagem é segmentar a rede de distribuição em DMAs para a partir dessa definição analisar dados históricos de uma determinada área. O intuito é verificar a existência de anormalidades na rede a partir da identificação de *bursts*¹³, o que poderia sinalizar a ocorrência de vazamentos.

No estudo 16, Ghazali et al. (2012) relatam uma análise comparativa sobre técnicas utilizadas para Análise de Frequência Instantânea (AFI) tendo como base dados de pressão na rede, no intuito de identificar a ocorrência de transientes. A frequência instantânea do sinal de pressão é analisada utilizando a transformada de Hilbert (\mathcal{H}), a transformada de Hilbert normalizada ($|\mathcal{H}|$), a quadratura direta (\mathcal{QD}), *Teager Energy Operator* (\mathcal{TEO})¹⁴ e o método *Cepstrum*¹⁵.

Este trabalho demonstra a eficácia da análise de frequência instantânea na detecção de vazamentos e outras características dentro da rede. Verificou-se que a aplicação da $|\mathcal{H}|$ e \mathcal{QD} permitiram a identificação aproximada da localização de vazamentos, enquanto que o desempenho do \mathcal{TEO} foi considerado moderado, tendo o *Cepstrum* apresentado o pior desempenho entre os métodos avaliados.

Nesta seção foi apresentada uma síntese dos estudos destacados que apresentaram formas para detecção prematura de perdas, os quais estão resumidos na Tabela 6.

A forma de detecção mais utilizada pelos trabalhos selecionados se dá por meio da análise de dados sobre a vazão da água. Citado por 8 trabalhos (estudos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 11 e 13), o que representa 57,1% do total de trabalhos destacados.

A utilização de sensores foi citada por 6 trabalhos (estudos 5, 6, 8, 10, 11 e 12), isto representa 42,9% de utilização desta abordagem e mostra a importância da obtenção de dados confiáveis para análises. De igual importância segue a análise dos dados sobre a pressão de água na tubulação, sendo citada por 6 trabalhos (estudos 3, 5, 9, 10, 11 e 16).

¹² *Branch and bound*: algoritmo bastante utilizado em problemas NP-completos no intuito de encontrar soluções ótimas de conectividade.

¹³ *Burst*: em análise de sinais são identificados *bursts* quando da ocorrência de grandes variações de sinal em um curto período de tempo.

¹⁴ \mathcal{TEO} : acrônimo em inglês para *Teager Energy Operator*, operador não-linear definido para sinais de tempo contínuo e discreto, utilizado para calcular a frequência instantânea.

¹⁵ *Cepstrum*: procedimento matemático utilizado para extrair o espectro de um sinal, de forma logarítmica, utilizando a transformada inversa de Fourier.

Tabela 6: Como são detectadas as perdas em sistemas de distribuição de água

Detecção	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	%
Análise Acústica	x							x			x	x					28,6
Análise da Pressão			x		x				x	x	x					x	42,9
Análise da Vazão	x	x	x	x		x	x				x			x			57,1
Balanço Hídrico					x	x											14,3
Rede de Sensores					x	x		x		x	x	x					42,9
Setorização DMA					x	x	x		x				x				35,7
Simulação	x	x					x		x							x	35,7
Totais	3	2	2	1	4	4	3	2	3	2	4	2	2	-	-	2	-

Fonte: Elaborado pelo autor

A segmentação da rede em DMA foi citada por 5 trabalhos (estudos 5, 6, 7, 9 e 13), o que representa 35,7% dos trabalhos destacados. É importante destacar que a utilização de DMA visa reduzir a complexidade da rede segmentando-a em áreas menores, isto é salutar pois quanto mais áreas reduzidas da rede existirem, mais fácil se dará a detecção de perdas, entretanto a utilização dos DMAs esbarra nos altos custos e transtornos sociais envolvidos na execução das obras de engenharia necessárias para instalação de válvulas de manobra e adição de nova tubulação.

A modelagem e simulação de redes e sensores foi citada por 5 trabalhos (estudos 1, 2, 7, 9 e 16), também representando 35,7% dos trabalhos destacados, visa a criação de modelos de cenários e comparação de dados, geralmente vazão (estudos 1, 2 e 7) ou pressão (estudos 9 e 16), também esteve associada à análise de dados acústicos (estudo 1), se mostrando uma boa abordagem adicional para incremento na precisão da detecção de perdas. A modelagem e simulação estava ligada à utilização dos algoritmos de teoria dos grafos, com foco em otimização e minimização de erros, os dados de vazão e pressão eram submetidos a comparação de seu valor real, quando sensoriado, ou valor simulado com seu valor estimado através de dados históricos.

Os trabalhos também faziam uso de algoritmos de inteligência artificial e algoritmos genéticos, como análise de dados utilizando lógica *fuzzy*, *backpropagation* e *branch and bound*. Também foram utilizados modelos matemáticos, que compreendem a aplicação de uma função potencial, as transformadas de Hilbert (\mathcal{H}) e a transformada de Hilbert normalizada ($|\mathcal{H}|$), a quadratura direta (\mathcal{QD}), *Teager Energy Operator* (\mathcal{TEO}), *Cepstrum* e o método dos mínimos quadrados. Dois trabalhos destacados utilizaram a Análise de Frequência Instantânea (AFI) para identificar a ocorrência de transientes nos dados de pressão da rede.

Outra forma de detecção utilizada foi a análise de dados acústicos, sendo citada por 4 trabalhos (estudos 1, 8, 11 e 12), o que representa 28,6% do total de trabalhos destacados.

Finalmente a análise sob a metodologia do balanço hídrico, descrita na subseção 3.2.1, é citada por 2 trabalhos (estudos 5 e 6), o que representa 14,3% dos trabalhos destacados, cada um utilizou o balanço hídrico de forma particular, mas de modo geral a aplicação dessa metodologia se resume à análise de dados sobre a vazão da água em pontos de distribuição e consumo.

5.3.2 Q2 – Que estratégias são utilizadas para combater as perdas em sistemas de distribuição de água?

Dentre os estudos incluídos de maior aderência, relacionados na Tabela 5, após análise, foram identificadas as estratégias utilizadas para combater as perdas em sistemas de distribuição de água. Nas linhas a seguir é apresentada uma síntese sobre a proposta para combate às perdas identificada em cada estudo.

Considerando os 16 estudos de maior aderência, 3 deles tratavam, além da detecção, de estratégias para combater as perdas, sendo que desses trabalhos 2 tratavam exclusivamente deste assunto.

No estudo 11, Allen et al. (2013) descrevem a utilização de uma rede de sensores sem fio com o propósito de monitorar continuamente dados acústicos e hidráulicos a fim de controlar a abertura e fechamento de válvulas e o bombeamento da água, administrando desse modo a pressão na rede. Os dados hidráulicos fornecem informações sobre a pressão e sentido do fluxo de água e transdutores eletroacústicos captam ruídos oriundos da tubulação de água.

Devido o monitoramento constante é possível administrar a abertura e fechamento de válvulas no intuito de otimizar o bombeamento da água de acordo com a demanda de consumo. A solução proposta provê uma otimização do bombeamento com predição de até 24 horas de antecedência, isso favorece uma melhor gestão da pressão na rede e armazenamento da água.

No estudo 14, Nazif et al. (2010) propõem uma técnica para redução de vazamentos através da gestão da pressão na rede, utilizando otimização por algoritmo genético. Cada nó da rede é identificado como um ponto de interconexão ou consumo, onde se posicionam os sensores. Os sensores tem por objetivo captar dados sobre a variação de pressão mínima e máxima em cada nó da rede.

É aplicado o algoritmo genético para desenvolver o histórico das variações horárias otimizadas da pressão na rede a fim de prover dados para uma melhor gestão, baseada em pressão mínima.

No estudo 15, Zhonghua He e Zhao (2011) propõem um modelo de previsão baseado na análise sobre a frequência de vazamentos, utilizando dados sobre perdas anuais,

frequência de vazamentos e dados de consumo relacionando-os com a idade dos canos subterrâneos. O modelo de previsão objetiva encontrar o tempo ideal para substituição de canos subterrâneos a partir da chamada curva da banheira. Consequentemente o modelo também se propõe a prever o momento de ruptura da tubulação.

A curva da banheira apresentada no trabalho estima que mais de 80% das ocorrências de rupturas na tubulação ocorrem no primeiro ano de instalação ou próximo ao final do tempo de vida médio proposto pelo fabricante da tubulação. Para determinar a otimização do modelo são criadas duas taxas: a) uma que estabelece a previsão para a taxa média de ruptura da tubulação; e, b) outra que estabelece a taxa máxima de rupturas identificadas na rede, a partir dos dados históricos.

Através da combinação da taxa média estipulada para ruptura da tubulação e a taxa máxima de ruptura identificada, foi estabelecido um modelo de previsão para o tempo de substituição de tubos de água e o método de determinação para o tempo ótimo de substituição. Com base na previsão para perda de água e na incorporação dos custos de valor presente para a perda de água e manutenção, um modelo ótimo de intervalo de detecção é estabelecido pela análise do custo de perda de água e controle de vazamento.

Nesta seção foi apresentada uma síntese dos estudos destacados que tratavam de estratégias para combate às perdas, os quais estão resumidos na Tabela 7.

Tabela 7: Estratégias para combate às perdas em sistemas de distribuição de água

Combate	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	%
Controle do fluxo											x						33,3
Controle da pressão											x			x			66,7
Previsão histórica														x	x		66,7
Totais	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	2	1	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

As estratégias para combater as perdas, em sua maioria, se estruturam na análise de dados de vazão e pressão em busca de valores ótimos para controle do fluxo da água pela rede e otimização da menor pressão possível na tubulação.

O controle de fluxo, apesar de pouco citado nos trabalhos, se mostra como uma opção viável no intuito de isolar a ocorrência de problemas na rede através de desvios no fluxo da água.

5.3.3 Q3 – Existem ferramentas ou modelos que auxiliam no processo? Quais são?

Dentre os estudos incluídos de maior aderência, relacionados na Tabela 5, após análise, foram identificadas as ferramentas ou modelos utilizados para detectar ou combater as perdas em sistemas de distribuição de água. Nas linhas a seguir é apresentada uma síntese sobre a proposta identificada em cada estudo.

Em 4 dos trabalhos destacados (estudos 3, 6, 8 e 15) não foi possível identificar qual ferramenta ou modelo havia sido utilizado, restando portanto 12 trabalhos dos quais foram extraídas as ferramentas ou modelos que serão apresentados nesta seção.

Nos estudos 1, 2, 4, 5, 7 e 14 foi utilizado o EPANET¹⁶, *software* desenvolvido e mantido sob licença de domínio público pela EPA, que permite simular comportamento hidráulico de uma rede de distribuição e tubulação de água. Foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição, melhorando o conhecimento sobre o transporte e qualidade da água para consumo humano.

No estudo 2 foi utilizado o FlowSim, ferramenta desenvolvida por Suresh et al. (2013) como extensão do EPANET, tendo como finalidade adicionar um recurso para movimentação de sensores dentro de uma tubulação modelada. Adicionalmente, nesse mesmo estudo, foi utilizada a cidade virtual Micropolis desenvolvida por Brumbelow et al. (2007) contendo 5.000 residentes e dados simulados distribuídos em 130 anos sobre um modelo hidráulico baseado no EPANET.

No estudo 7 foi utilizado o *Hanoi Water Distribution Network*, modelo de rede de distribuição de água para ser inserido no EPANET. Contém 32 nós de rede e 34 arcos, cada nó de rede representa uma interconexão ou um ponto de entrada ou saída do fluxo de água, já os arcos representam a tubulação da rede. O modelo também apresenta dados de elevação topográfica e tubulação com diâmetros variando entre 12, 16, 20, 24, 30 e 40 polegadas. Essa rede é bastante utilizada em modelos acadêmicos de simulação para redes de distribuição e eficiência hidráulica.

Nos estudos 10, 13, 14 e 16 foi utilizado o MATLAB¹⁷, ambiente de programação de alto nível que ao mesmo tempo representa uma linguagem de programação para computação numérica envolvendo vetores e matrizes e um conjunto de ferramentas extensíveis, chamadas de *toolboxes*, que acrescentam função das mais diversas áreas da ciência, como química, biologia, bioinformática ou processamento de imagens. É muito utilizado no processamento de algoritmos de otimização, inteligência artificial e redes neurais.

¹⁶ EPANET: software desenvolvido e distribuído pela agência EPA, utilizado para modelagem e simulação de sistemas de distribuição.

Disponível em: <<https://www.epa.gov/water-research/epanet>>. Acesso em: mar. 2015.

¹⁷ MATLAB: acrônimo para *MATrix LABORatory*, software desenvolvido pela empresa *MathWorks*. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso em: mar. 2015.

No estudo 9 foi utilizado o Simulink¹⁸, ambiente de modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, baseado em diagrama de blocos, também desenvolvido pela empresa *MathWorks*, funciona integrado ao MATLAB.

No estudo 11 foi utilizada a WaterWiSe, plataforma que gerencia e analisa dados de uma rede de nós de sensores sem fio, monitorando continuamente parâmetros hidráulicos, acústicos e de qualidade de água. WaterWiSe suporta muitas aplicações, incluindo previsões de demanda de água e estado hidráulico, detecção on-line de eventos, como *burst*, em tubulações e mineração de dados para identificação de tendências de longo prazo.

No estudo 12 foi utilizado o LORNO, ferramenta proposta por Prodon, Denegre e Liebling (2010) para detecção de vazamentos a partir do sensoriamento de dados acústicos pela tubulação de água, através de sensores localizados sobre hidrantes de água distribuídos pela cidade e uma central remota de processamento.

Nesta seção foi apresentada uma síntese dos estudos destacados nos quais foram identificadas ferramentas ou modelos que auxiliam no processo de detecção ou combate às perdas, o resumo pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8: Ferramentas ou modelos que auxiliam no processo

Ferramenta	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	%
EPANET	x	x		x	x		x							x			50,0
FlowSim		x															8,3
Hanoi Network							x										8,3
LORNO												x					8,3
MATLAB Toolbox										x			x	x		x	33,3
Micropolis		x															8,3
Simulink									x								8,3
WaterWiSe											x						8,3
Totais	1	3	-	1	1	-	2	-	1	1	1	1	1	2	-	1	-

Fonte: Elaborado pelo autor

A ferramenta EPANET foi utilizada em 6 trabalhos (estudos 1, 2, 4, 5, 7 e 14), o que representa 50,0% dos trabalhos destacados. Já o MATLAB foi utilizado em 4 trabalhos (estudos 10, 13, 14 e 16), representando 33,3% dos trabalhos destacados. O EPANET e o MATLAB são ferramentas que foram utilizadas nesses trabalhos para simulação de modelos e execução de cálculos de otimização e predição.

As demais ferramentas, FlowSim, *Hanoi Water Distribution Network*, LORNO, Micropolis, Simulink e WaterWise, foram utilizadas, cada uma, em apenas um trabalho, o que corresponde a 8,3% dos trabalhos destacados.

¹⁸ Simulink: ambiente para design baseado em modelo, desenvolvido pela empresa *MathWorks*. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>>. Acesso em: mar. 2015.

5.3.4 Fragilidades identificadas nos estudos incluídos

Dentre os estudos incluídos de maior aderência, relacionados na Tabela 5, após análises, foram identificadas algumas fragilidades. Nas linhas a seguir é apresentada uma síntese sobre as fragilidades identificadas na proposta para detecção ou combate às perdas de cada estudo.

No estudo 1, Goulet, Coutu e Smith (2013) propõem uma metodologia para posicionamento de sensores acústicos e detecção de vazamentos com base na refutação de cenários de vazamento. A fragilidade está tanto na imprecisão do sensoriamento acústico quanto no uso dados simulados através de algoritmo para geração de números aleatórios.

No estudo 2, Gong et al. (2016) propõem a criação de uma rede composta por *beacons* que recuperavam dados de sensores introduzidos na tubulação. A fragilidade está tanto no uso de dados simulados, através de algoritmo para geração de números aleatórios, quanto na validação da proposta feita por simulação em software.

No estudo 3, Arsene, Gabrys e Al-Dabass (2012) propõem técnicas para simulação de uma rede de distribuição onde foram inseridos vazamentos aleatórios a partir de um algoritmo. A fragilidade está no uso de dados simulados através de algoritmo para geração de números aleatórios.

No estudo 4, Perelman e Amin (2014) propõem a modelagem de uma rede de distribuição real utilizando uma função potencial sobre os nós da rede, representando as conexões e pontos de consumo, e uma função de fluxo sobre os arcos, representando as tubulações. Apesar de utilizar uma rede de distribuição de água como base para modelar os nós e arcos da rede simulada, os dados de pressão e níveis de água na rede, bem como a ocorrência de vazamentos, são simulados via algoritmo para geração de números aleatórios.

No estudo 5, Meseguer et al. (2014) descrevem a utilização de uma rede segmentada em DMA e composta por sensores de pressão localizados em pontos específicos distribuídos pela rede. Apesar de utilizar uma rede de distribuição de água real para modelar os nós e arcos da rede simulada, a ocorrência de vazamentos é simulada via algoritmo para geração de números aleatórios.

No estudo 6, Quevedo et al. (2012) propõem uma metodologia para isolar a ocorrência de vazamentos de água de acordo com o volume disponibilizado e o volume de fato faturado. A fragilidade está em considerar o volume faturado ao invés do volume real consumido, este é um problema comum em análises sobre regras de negócio do setor de saneamento.

O volume faturado comumente difere daquele realmente consumido, pois segue determinações legais e regulações que são específicas de cada mercado de saneamento além de regras de negócios naturalmente variáveis em cada empresa de saneamento. Como

exemplo pode-se considerar as regras atualmente em vigência no Estado de Pernambuco, onde no caso em que um cliente consuma $3m^3$ (volume real consumido) de água em sua fatura será considerado $10m^3$ (volume faturado) e isto pode levar à análises incorretas.

Vide Regulamento Geral do Fornecimento de Água e Coleta de Esgoto no Estado de Pernambuco e Decreto N° 36.284, de 2 de Março de 2011: (PERNAMBUCO, 2011)

REGULAMENTO GERAL DO FORNECIMENTO DE ÁGUA E COLETA DE ESGOTO
DO CADASTRO, DAS TARIFAS E COBRANÇA
DA COBRANÇA DAS FATURAS

Art. 72 – A fatura mínima por economia será equivalente ao valor fixado para o volume de $10m^3$ (dez metros cúbicos) de cada categoria.

No estudo 7, Rosich e Puig (2013) propõem a utilização de rede simulada no intuito de executar diagnóstico de falhas baseado em modelos, verificando a diferença entre os dados de nós de rede subjacentes. A fragilidade está tanto no uso de dados simulados, através de algoritmo para geração de números aleatórios, quanto na validação da proposta feita por simulação em software.

No estudo 8, Jin, Yumei e Ping (2010) propõem a utilização de rede simulada para análise de padrões temporais baseados em dados acústicos. A fragilidade está tanto na imprecisão do sensoriamento acústico quanto no uso de dados simulados através de algoritmo para geração de números aleatórios.

No estudo 9, Gertler et al. (2010) propõem um método estatístico para analisar a dispersão dos dados em cada nó da rede. A fragilidade está tanto no uso de dados simulados, através de algoritmo para geração de números aleatórios, quanto na validação da proposta feita por simulação em software.

No estudo 11, Allen et al. (2013) propõem a utilização de uma rede de sensores sem fio que monitora dados hidráulicos e acústicos. A fragilidade está em identificar vazamentos analisando a qualidade de água presente na rede de esgoto e na baixa precisão do sensoriamento acústico.

No estudo 12, Prodon, Denegre e Liebling (2010) propõem a criação de uma rede de sensores para captação de dados acústicos. A fragilidade está na imprecisão do sensoriamento acústico.

No estudo 14, Nazif et al. (2010) propõem uma técnica para redução de vazamentos a partir da gestão da pressão na rede, calculando índices de inferência para as variáveis de pressão mínima e máxima. A fragilidade está tanto no uso de dados simulados, através de algoritmo para geração de números aleatórios, quanto na validação da proposta feita por simulação em software.

Nesta seção foi apresentada uma síntese sobre as fragilidades identificadas nas

propostas para detecção ou combate às perdas dos estudos destacados, as quais estão resumidas na Tabela 9.

Tabela 9: Fragilidades identificadas nos estudos incluídos

ID	Autor(es)	Ano	Fragilidade
1	Goulet, Coutu e Smith	2013	Imprecisão da medição acústica e validação simulada
2	Gong et al.	2016	Dados e validação obtidos por simulação
3	Arsene, Gabrys e Al-Dabass	2012	Dados gerados por algoritmo
4	Perelman e Amin	2014	Dados gerados por algoritmo
5	Meseguer et al.	2014	Dados gerados por algoritmo
6	Quevedo et al.	2012	Considera volume faturado
7	Rosich e Puig	2013	Dados e validação obtidos por simulação
8	Jin, Yumei e Ping	2010	Imprecisão da medição acústica e validação simulada
9	Gertler et al.	2010	Dados e validação obtidos por simulação
11	Allen et al.	2013	Imprecisão da medição acústica e da qualidade da água na rede de esgoto
12	Prodon, Denegre e Liebling	2010	Imprecisão da medição acústica
14	Nazif et al.	2010	Dados e validação obtidos por simulação

Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada para realizar a pesquisa deste trabalho. Inicialmente foi realizada uma revisão de literatura através do método de mapeamento sistemático que identificou 2.178 estudos através de busca nos indexadores de trabalhos científicos, após processos de exclusão dos estudos duplicados e seleção através de leitura do título, resumo e conclusão restaram 261 estudos que passaram para a fase de extração de dados.

Como resultado indireto desta pesquisa, pode-se identificar uma tendência de crescimento no interesse da comunidade em pesquisar soluções mais eficientes para o problema de perdas no sistema de distribuição de água, quando comparada à redução gradual do índice de perdas observado no Brasil nos últimos anos, nota-se que o número de estudos científicos aumenta ao passo que o índice de perdas na distribuição cai.

Foi identificado a partir dos estudos destacados que, em resumo, as respostas para as questões de pesquisa são:

Q1 Como são detectadas as perdas em sistemas de distribuição de água?

- a forma de detecção mais utilizada pelos estudos selecionados se dá por meio da análise de dados sobre a vazão da água; seguida pela,
- utilização de rede de sensores, que mostra a importância da obtenção de dados confiáveis para análises; de igual importância segue,
- a análise dos dados sobre a pressão de água na tubulação;
- a segmentação da rede em distritos de medição e controle, para redução da complexidade da rede e melhor isolamento de ocorrências;
- modelagem e simulação de redes de distribuição e sensores, utilizando algoritmos de teoria dos grafos, inteligência artificial e algoritmos genéticos;
- análise de dados acústicos em busca de transientes que identificassem vazamentos; e, por fim,
- adaptações sobre o modelo de balanço hídrico proposto pela IWA, cada trabalho utilizou o balanço hídrico de forma particular, mas de modo geral a aplicação se resume em análises de dados sobre a vazão da água em pontos de distribuição e consumo.

Q2 Que estratégias são utilizadas para combater as perdas em sistemas de distribuição de água?

- monitoramento constante de dados sobre volume, vazão e pressão; no intuito de promover o bombeamento eficiente da água por meio da análise de dados históricos; além de,
- administrar a pressão da água na tubulação através da abertura e fechamento de válvulas para desvio de fluxo; que também servem para,
- isolar a rede no caso de detectada a ocorrência de eventos que identifiquem perdas.

Q3 Existem ferramentas ou modelos que auxiliam no processo? Quais são?

- o EPANET se apresenta como principal ferramenta para simulação de redes de distribuição e posicionamento de sensores virtuais; em alguns casos podendo ter suas funcionalidades estendidas por ferramentas como o,
- FlowSim, extensão com a finalidade de adicionar um recurso exclusivo de movimentação de sensores dentro de uma tubulação modelada no EPANET;
- *Hanoi Water Distribution Network* modelo de rede de distribuição de água para ser inserido no EPANET; outra ferramenta importante é o,
- LORNO é uma ferramenta utilizada para detecção de vazamentos a partir do sensoriamento de dados acústicos pela tubulação de água através de sensores localizados sobre hidrantes de água;
- MATLAB utilizado na execução de algoritmos de otimização e minimização de erros muito utilizados em teoria dos grafos e inteligência artificial, além

- de modelos matemáticos utilizados para detecção de anomalias em dados históricos de vazão e pressão da água;
- Micropolis, cidade virtual modelada dentro do EPANET contendo 5.000 residentes e dados hidráulicos distribuídos por 130 anos;
 - o Simulink é um ambiente de modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos baseado em diagrama de blocos, funciona integrado ao MATLAB; e, por fim,
 - o WaterWiSe é uma plataforma que gerencia e analisa dados de uma rede de nós de sensores sem fio, monitorando continuamente parâmetros hidráulicos, acústicos e de qualidade de água.

Os estudos identificados apresentaram, no geral, boa qualidade tanto nos processos relatados para desenvolvimento da pesquisa quanto na proposta de solução para o problema de perdas nos sistemas de distribuição de água

Considerando entretanto aqueles estudos destacados, esses em sua maioria trabalhavam com dados gerados unicamente por algoritmos de números aleatórios ou apresentavam validação da proposta feita em redes de distribuição simuladas em computador, sem vinculação com uma rede real de distribuição de água.

Na Tabela 10 é apresentada uma síntese das fragilidades identificadas nos estudos destacados, considerando as propostas de cada trabalho.

Tabela 10: Síntese das fragilidades identificadas

Fragilidade	Estudos	%
Dados gerados por algoritmo	2, 3, 4, 5, 7, 9 e 14	58,3
Imprecisão da medição	1, 8, 11 e 12	33,3
Validação simulada	1, 2, 7, 8, 9 e 14	50,0
Volume faturado	6	8,3

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalizando as considerações acerca deste mapeamento sistemático, considerando a relação dos estudos incluídos, em seguida, na Tabela 11 é apresentado um quadro resumo relacionando o problema, solução proposta, ferramenta utilizada e fragilidade de cada um dos estudos destacados.

Tabela 11: Quadro resumo do mapeamento sistemático

ID	Problema	Solução	Ferramenta	Fragilidade
1	Otimizar posicionamento de sensores	Refutação de cenários de vazamentos	EPANET	Imprecisão da medição acústica e validação simulada
2	Otimizar captura de dados através de <i>beacons</i>	Análise de dados sobre fluxo de água transmitidos por sensores na tubulação	EPANET, FlowSim e Micropolis	Dados e validação obtidos por simulação
3	Deteção de vazamentos utilizando algoritmo genético	Deteção de anomalias nos dados de vazão e pressão entre dois pontos da rede	Não se aplica	Dados gerados por algoritmo
4	Demonstrar a aplicação de um modelo de rede balanceada	Detectar a ocorrência de eventos na pressão e demanda da água	EPANET	Dados gerados por algoritmo
5	Descreve um sistema de decisão baseado em telemetria	Análise de dados históricos comparando variações na pressão medida com a estimada	EPANET	Dados gerados por algoritmo
6	Isolar a ocorrência de vazamentos utilizando DMA	Compara o volume distribuído com o volume faturado	Não se aplica	Considera volume faturado
7	Detectar vazamento através da consistência de dados entre nós de rede	Cálculo residual do volume distribuído com o medido no nó adjacente	EPANET, Hanoi Water Distribution Network	Dados e validação obtidos por simulação
8	Propõe deteção de vazamento por dados acústicos	Detecta transientes nos sinais acústicos	Não se aplica	Imprecisão da medição acústica e validação simulada
9	Detectar e isolar vazamentos pela análise de dados de pressão	Identifica dispersão nos dados de pressão entre cada nó da rede	Simulink	Dados e validação obtidos por simulação
10	Identificar melhores pontos de sensoramento	Otimização utilizando algoritmo genético	MATLAB Toolbox	Não se aplica
11	Monitoramento de dados acústicos e hidráulicos	Detecta transientes em dados acústicos e hidráulicos	WaterWise	Imprecisão da medição acústica e da qualidade da água na rede de esgoto
12	Detecta vazamento localizando distúrbios acústicos	Utiliza algoritmo de teoria dos grafos para estimar a localização de distúrbios acústicos	LORNO	Imprecisão da medição acústica
13	Detectar vazamento através da identificação de <i>burts</i> em dados históricos	Segmenta a rede em DMA para realizar análise sobre dados históricos de pressão e vazão da água	MATLAB Toolbox	Não se aplica
14	Redução de vazamentos através da gestão da pressão na rede	Algoritmo genético sobre dados históricos para determinar a pressão mínima	EPANET, MATLAB Toolbox	Dados e validação obtidos por simulação
15	Modelo de previsão para ruptura de redes	Dados históricos de vazamento, consumo e idade dos canos	Não se aplica	Não se aplica
16	Detectar vazamentos utilizando AFI sorbe dados de pressão da água	Identifica transientes por meio de transformadas e outros algoritmos	MATLAB Toolbox	Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor

6 REDE DE SENSORES PARA DETECÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Este capítulo apresenta uma solução para detecção de perdas em sistemas de distribuição de água. A solução proposta se baseia em coletar dados sobre o fluxo e vazão de água a partir de uma rede de sensores e então os transmitir para uma central, onde os dados são então persistidos em um sistema gerenciador de banco de dados para serem processados e analisados no intuito de identificar quais trechos da rede de distribuição apresentam falhas, as informações são então exibidas em um painel de indicadores, construído em sistema de *Business Intelligence* (BI). Na seção 6.1 é feito um breve comentário sobre a demanda por água, em seguida, na seção 6.2 é apresentado um modelo matemático utilizado para o cálculo de perdas, a seção 6.3 descreve um modelo de arquitetura para controle local do consumo da água, desenvolvida como base para a solução proposta neste trabalho, na seção 6.4 é exibida a aplicação da arquitetura em um protótipo funcional, desenvolvido com o propósito de melhorar o entendimento a respeito da arquitetura e dos seus requisitos, em seguida, na seção 6.5 é demonstrada a execução da simulação realizada no intuito de entender melhor os problemas reais envolvidos nas perdas de um sistema de distribuição de água, a simulação foi realizada utilizando o protótipo funcional desenvolvido neste trabalho, possibilitando simular as características hídricas reais encontradas em um sistema de distribuição de água, e, por fim, é apresentado na seção 6.6 um resumo do capítulo.

6.1 A Demanda por Água

A água é o recurso natural mais abundante do planeta, e está presente no dia a dia de todos. Nos últimos anos o Brasil passou a perceber indícios do que pode ser a maior crise hídrica de sua história. O recurso fundamental à sobrevivência do ser humano enfrenta uma grande crise de abastecimento. A média brasileira das perdas de água é de aproximadamente 40%, entre perdas físicas e não-físicas, em todo os processos deste a captação até seu tratamento e disponibilidade para consumo da população. (ABES, 2013)

Comparado ao observado na década de 1950 o consumo de água triplicou em todo o mundo. Diante disso, várias iniciativas de planejamento e controle são propostas com a intenção de minimizar o desperdício e má a gestão dos recursos hídricos.

O controle e a medição individual do consumo dos recursos hídricos doméstico apresentam inúmeros problemas e requerem ações mais efetivas, a saber:

- a) gerenciar a demanda por água;
- b) minimizar o desperdício de água, devido a:
 - consumos inadequados (lavagem de calçadas, veículos, etc. . .); ou,
 - vazamentos nas tubulações (aparentes ou não-aparentes).

Bem requisitada para resolver problemas em muitos setores da indústria, bem como nos sistemas computacionais atuais, se posiciona a área de pesquisas em sistemas embarcados, caracterizados por uma unidade processadora, executando um software específico desenvolvido para executar uma aplicação com garantia de alta disponibilidade de uso por longo período de tempo. Dependendo da natureza desses sistemas, arquiteturas específicas para conectá-los podem ser consideradas e utilizadas.

Foi identificada durante a revisão da literatura uma tendência de crescimento no interesse da comunidade em pesquisar soluções mais eficientes para o problema de perdas no sistema de distribuição de água, quando comparada à redução gradual do índice de perdas observado no Brasil nos últimos anos nota-se que o número de trabalhos científicos aumenta ao passo que o índice de perdas na distribuição cai.

Nos estudos selecionados para a revisão foram identificadas diversas propostas de soluções utilizando redes de sensores sem fio como meio para coleta e transmissão de dados diversos. As soluções encontradas para o problema de perdas em sistemas de distribuição de água envolviam basicamente:

- a) o sensoriamento de sinais acústicos que eventualmente identificassem a ocorrência de vazamentos; ou,
- b) coleta de dados hidráulicos, como a vazão ou pressão da água, utilizando rede de sensores; e ainda,
- c) a simulação em ambiente computacional pela aplicação de algoritmos de inteligência artificial, redes neurais ou transformadas.

Alguns dos estudos identificados apresentaram boa relação com o propósito desta pesquisa e estão relacionados nas linhas a seguir.

No estudo de Aminzadeh, Kashefi e Alee (2010) foi proposto monitorar a pressão de água nos tubos da rede de distribuição utilizando redes de sensores sem fio por meio de dispositivos ZigBee.

No estudo de Zheng e Zhang (2011) os autores apresentaram estratégias muito semelhantes ao trabalho anterior, dando mais ênfase à arquitetura ZigBee. Esse estudo tem por objetivo apresentar uma metodologia para controlar o consumo elétrico, realizando a leitura de medidores em tempo real e enviando os dados para uma central de processamento e monitoramento remoto. A proposta apresentada evidencia como vantagem evitar o

trabalho humano nos processos de leitura e gestão dos medidores, e, conseqüentemente, favorecer à minimização de erros comuns como erros de leitura.

No estudo de Reddy e Eswaran (2013) foi proposta uma rede de sensores sem fio, composta por dispositivos ZigBee, aproveitando a infraestrutura de reservatórios de água, do tipo torre elevada, para compor uma malha de rede que fosse redundante e tolerante à falhas. Para validar a proposta foi desenvolvido um protótipo de módulo sensor constituído de sensor de nível de água. Os testes mostraram ser possível controlar a vazão da água nos reservatórios remotamente através da rede de sensores.

No estudo de Amruta e Satish (2013) foi demonstrado o trabalho de monitorar a qualidade da água através da leitura de pH, O₂ e turbidez da água, utilizando uma rede de sensores sem fio. Os ensaios mostraram ser possível descobrir problemas imediatos na qualidade da água por meio da rede de sensores que proveram dados para análise

Esses trabalhos contribuíram para a construção da proposta apresentada nesta pesquisa. Foram utilizados os resultados dos seus testes para verificar os dispositivos utilizados na camada de comunicação da solução aqui proposta, tendo em vista que apresentou, nos testes descritos nos artigos, melhores desempenhos na comunicação e baixo consumo energético, além de apresentar indícios para a melhoria do sistema de monitoramento de uma rede de distribuição doméstica.

6.2 Cálculo de Perdas

A IWA define perdas como sendo *toda perda física ou não-física de água ou todo o consumo não autorizado que determina aumento do custo de funcionamento ou que impeça a realização plena da receita operacional das empresas de saneamento.* (BÁGGIO, 2014)

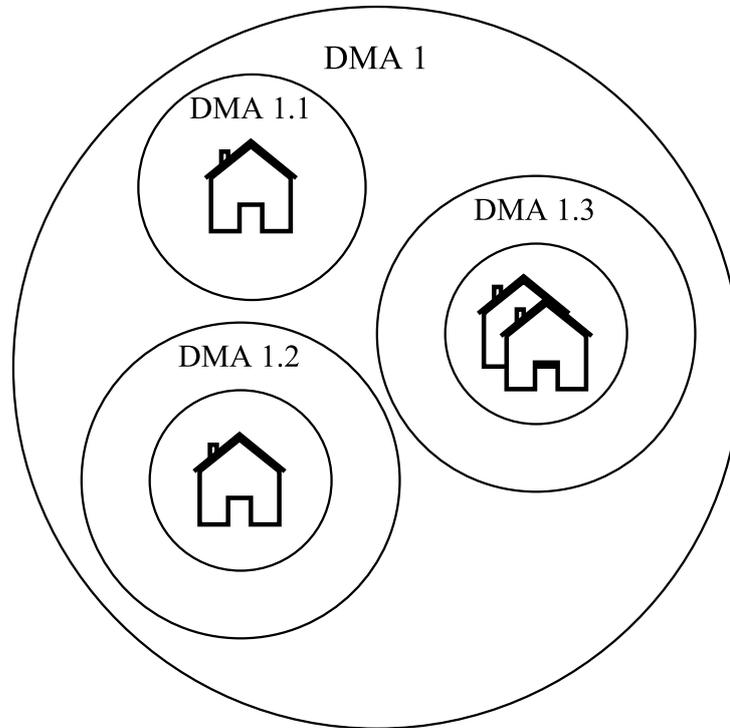
As perdas ocorrem por todo o sistema de abastecimento de água, desde a captação até a distribuição ao consumidor final. São em grande parte causadas por pela má operação e manutenção deficiente das tubulações, além da gestão comercial ineficiente. Existe portanto uma forte vinculação entre o índice de perdas e os indicadores de eficiência operacional das empresas de saneamento.

Dados publicados pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA (2014) mostram que quase a totalidade das perdas em um sistema de abastecimento são encontradas na distribuição e, principalmente, nos ramais de conexão da rede aos pontos de consumo. Este fato é diretamente relacionado ao tipo de material utilizado nas conexões de ramais prediais e à idade da instalação de algumas redes. No Brasil o índice de perdas é bastante elevado, variando entre 40% e 60%.

Uma das formas de controlar as perdas é pela setorização da rede em áreas menores chamados de DMA. Cada DMA pode conter outras subdivisões no intuito de isolar

determinadas características da rede, como pressão, volume ou características comerciais como quantidade de clientes servidos. Uma representação dessa setorização da rede em DMAs é ilustrada na Figura 21.

Figura 21: Modelo de setorização da rede em DMA



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma representação para o modelo de setorização da rede de distribuição de água em DMA.

A fórmula geral para o cálculo do índice de perdas utilizada neste projeto considerou o Volume de Água Distribuído (VAD) e o Volume de Água Consumido (VAC), não foi considerado o Consumo Estimado não-medido (CE) nem o fator de correção (K), visto que toda a rede de distribuição utilizada para testes em laboratório foi sensoriada plenamente, portanto, a fórmula geral utilizada está de acordo com a Equação 6.1.

$$IP (\%) = \frac{VAD - VAC}{VAD} \cdot 100 \quad (6.1)$$

A fórmula da Equação 6.1 representa um contexto geral, é necessário, entretanto, observar que a composição de dados que denotam o abastecimento de água em determinada área está em função do tempo discreto, determinado a partir da captura de dados pelos sensores distribuídos pela rede.

Aproveitando o modelo de setorização em DMA, o índice de perdas deverá então ser calculado considerando a área analisada em função do tempo, calculando em profundidade

o índice de perdas da menor unidade, que seja o ponto de consumo ou sub-setor do DMA até a completude de todo o conjunto de sub-setores do DMA sob análise.

Considerando que a rede de distribuição de água sob análise esteja setorizada em DMAs, denota-se disto a existência de um conjunto S contendo todos os sub-setores que compõem o DMA, ao qual é submetido, durante determinado período, um volume de água distribuído (VAD) calculado sob a fórmula da Equação 6.2.

$$VAD (m^3) = \sum_t^T \left(\sum_{s_t=1}^{S_t} VAD_{s_t} \right) \quad (6.2)$$

Cada sub-setor do DMA, denotado por s_t , considerando o período de análise, está relacionado um sub-conjunto de pontos de consumo, que representa os clientes ou imóveis onde estarão os medidores finais, ou sensores de telemetria conforme proposto neste trabalho. O volume de água consumido (VAC) no sub-conjunto dos pontos de consumo, dentro do período em análise, poderá ser obtido através da fórmula na Equação 6.3.

$$VAC (m^3) = \sum_t^T \left(\sum_{s_t=1}^{S_t} \left(\sum_{\langle s_t, c_t=1 \rangle}^{\langle s_t, C_t \rangle} VAC_{\langle s_t, c_t \rangle} \right) \right) \quad (6.3)$$

Segue portanto que o índice de perdas (IP_t), em determinado instante de tempo t , poderá ser obtido através da fórmula na Equação 6.4.

$$\sum_t^T IP_t (\%) = \frac{\left(\sum_{s_t=1}^{S_t} VAD_{s_t} \right) - \left(\sum_{s_t=1}^{S_t} \left(\sum_{\langle s_t, c_t=1 \rangle}^{\langle s_t, C_t \rangle} VAC_{\langle s_t, c_t \rangle} \right) \right)}{\left(\sum_{s_t=1}^{S_t} VAD_{s_t} \right)} \cdot 100 \quad (6.4)$$

Na qual se definem as variáveis:

t tempo inicial, iterador para a dimensão do tempo discreto do período em análise;

T tempo final, ou conjunto de tempo discreto para análise de dados;

IP_t índice de perdas em função do tempo discreto, ou período de análise;

s_t setor inicial do DMA, em função do tempo discreto, iterador para a dimensão de análise do setor;

S_t setor final do DMA, em função do tempo discreto, representa o conjunto de sub-setores ou a completude do DMA;

VAD_{s_t} valor de água distribuído para o setor do DMA, em função do tempo discreto;

$\langle s_t, c_t \rangle$ sub-conjunto iterador dos imóveis que compõem a menor unidade DMA;

$\langle s_t, C_t \rangle$ sub-conjunto final dos imóveis que compõem a menor unidade DMA.

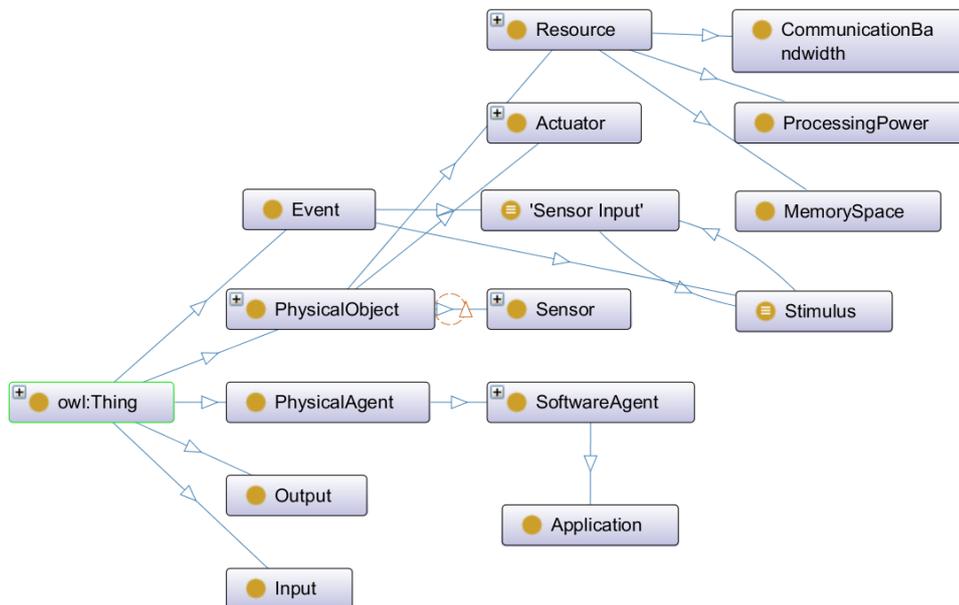
6.3 Arquitetura para Controle Local de Água

Para identificar e estabelecer as entidades envolvidas na construção do protótipo, foi identificado no trabalho de Kotis e Katasonov (2012) uma estrutura geral de entidades que possibilitou a apropriação dos conceitos ontológicos envolvidos na pilha tecnológica da W3C¹, com o objetivo de criar uma aplicação totalmente imersa nos conceitos da Internet das Coisas, contendo estrutura semântica, entidades e representações consistentes.

Diversos pontos precisam ser considerados com relação à forma de coleta, transmissão e armazenamento dos dados, tais como questões relacionadas à segurança, privacidade, confiabilidade, envio, e latência na transmissão dos dados, além de outros aspectos.

Uma das preocupações envolvidas no desenvolvimento deste protótipo foi manter a integridade entre as entidades inteligentes e entidades de controle, bem como as associações entre as entidades físicas e suas características, recursos, agentes de software, aplicações e serviços. Portanto, foi desenvolvido um modelo ontológico, para descrição das camadas de dispositivos de IoT, utilizado como base para a definição da arquitetura e no desenvolvimento do protótipo proposto neste trabalho. A Figura 22 ilustra uma visão expandida do modelo ontológico para descrição de dispositivo de IoT.

Figura 22: Modelo ontológico para descrição de dispositivo de IoT



Fonte: Adaptado de (KOTIS; KATASONOV, 2012)

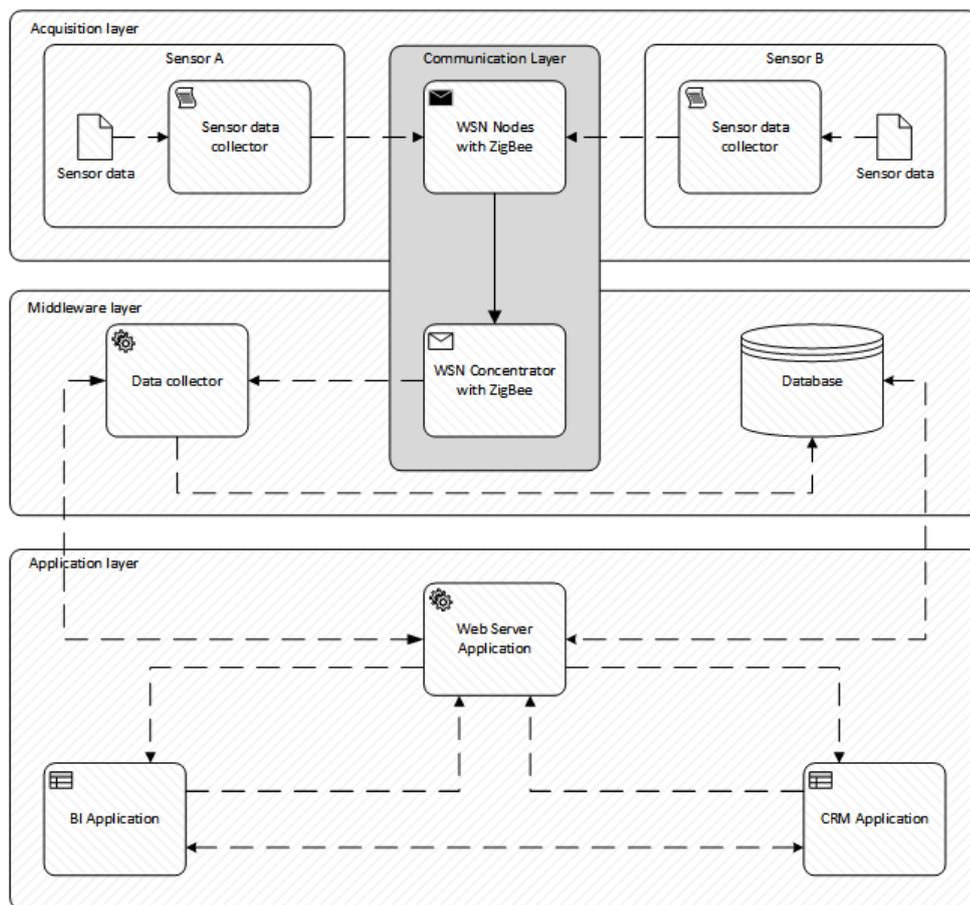
Esta imagem ilustra uma visão expandida do modelo ontológico para descrição de dispositivo de IoT.

¹ W3C: sigla em inglês para *World Wide Web Consortium*, comunidade internacional de trabalho conjunto para desenvolvimento dos padrões da Web. Disponível em: <<https://www.w3.org>>. Acesso em: nov. 2016.

A arquitetura proposta foi construída considerando quatro camadas: a) a camada de aquisição, (*acquisition layer*); b) a camada *middleware*²; c) a camada de comunicação, (*communication layer*); e, d) a camada de aplicação, (*application layer*).

A esta arquitetura foi dado o nome de *Local Water Control* e estabelecida a sigla (LWC), que representa uma arquitetura local para controle de água desenvolvida sobre redes de sensores sem fio, com o propósito de coletar dados, transmitir, processar e observar fenômenos em redes de distribuição de água. Na Figura 23 é ilustrada uma visão geral sobre o modelo proposto da arquitetura para controle local de água.

Figura 23: Arquitetura do LWC



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma visão geral sobre o modelo proposto de arquitetura para controle local de água, *Local Water Control* (LWC).

Nas seções a seguir estão detalhadas as camadas de aquisição de dados, na subseção 6.3.1, *middleware*, na subseção 6.3.2, comunicação e transmissão de dados, na subseção 6.3.3, e a camada de aplicação e monitoramento, na subseção 6.3.4.

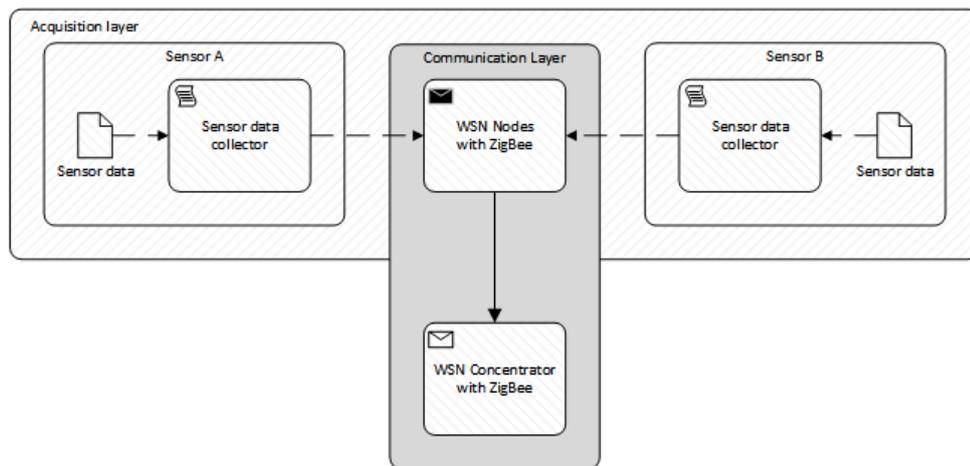
² *Middleware*: camada intermediária para transporte de dados entre aplicações e serviços de software mediada por definições de protocolos de comunicação.

6.3.1 Camada de Aquisição

A aquisição de dados pode ser descrita como um processo para percepção de fenômenos físicos e transformação destes em sinais elétrico-digitais para posterior transmissão e processamento. A constituição básica de uma camada de aquisição se dá por: a) módulo sensor; b) módulo tradutor e coletor de dados; e, c) módulo de transmissão.

Neste trabalho a camada de aquisição é composta, de modo particular considerando a arquitetura LWC, por: a) módulo sensor, responsável por captar os dados do fluxo de água; b) módulo micro-controlador, que traduz os dados sensorizados em informação digital e realiza processamento local básico; para por fim enviar para o, c) módulo ZigBee, responsável por transmitir (enviar e receber) os dados. Dentro da camada de aquisição os dados coletados pelos sensores são carregados para a camada de comunicação, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24: Camada de aquisição da arquitetura LWC



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra a camada de aquisição da arquitetura LWC, composta por: a) módulo sensor; b) coletor de dados; e, c) transmissão utilizando dispositivos ZigBee.

Para o cenário considerado neste trabalho, os sensores são responsáveis por medir o fluxo da água. A camada de aquisição é responsável pela captura dos dados referentes ao consumo, realizada através de um sensor de fluxo de água. O sensor de fluxo de água é constituído por um corpo plástico, um rotor e um sensor de efeito *Hall*³. A água que flui, ao girar o rotor produz uma frequência de pulsos que são entregues pelo sensor de efeito *Hall*, é possível então saber a vazão, e, conseqüentemente, o consumo de água. O código-fonte utilizado para controle do módulo sensor pode ser consultado no Apêndice A, os componentes da camada de aquisição serão melhor discutidos na seção 6.4 adiante.

³ Sensor de efeito *Hall*: é um transdutor que quando aplicado sob um campo magnético responde com uma variação na tensão de saída.

6.3.2 Camada de Middleware

Um fator a ser considerado no projeto de redes de sensores é a heterogeneidade, a natureza distinta ou desigual, dos diversos dispositivos interconectados. Isto remete a um desafio de compor redes interoperáveis que integrem os mais variados dispositivos, tecnologias, propósitos e desempenho sob uma mesma estrutura de rede, além de permitir uma dinâmica flexível para o incremento de novos dispositivos à rede. Sob este contexto são desenvolvidas plataformas de gerenciamento de camada intermediária, nomeadas de *middleware*, que fazem a mediação da comunicação entre diversos softwares e dispositivos.

De modo geral, visando atender às necessidades de aplicação, Pires et al. (2015) sugere que uma estrutura básica de *middleware* deve apresentar como requisitos: a) interoperabilidade; b) descoberta e gerenciamento de dispositivos; c) escalabilidade; d) ciência de contexto; e) gerenciamento de grandes volumes de dados; e, f) segurança.

A interoperabilidade é uma propriedade essencial em redes de sensores sem fio, pois estas integram diversos dispositivos das mais variadas tecnologias de construção, transmissão e dados. Neste quesito a camada de *middleware* desempenha um papel extremamente importante, pois é nela que se concentram os modelos de desenvolvimento e protocolos que permitem a abstração necessária para a construção de estruturas de sensoriamento mais ágeis.

Outra propriedade essencial em redes de sensores sem fio se reflete na flexibilidade da rede que deve ser construída para permitir a inclusão dinâmica de novos dispositivos sem a necessidade de parada de toda a estrutura, a esta propriedade se dá o nome de descoberta e gerenciamento de dispositivos. Esta propriedade está intimamente ligada à escalabilidade que é a capacidade de assimilar dinamicamente o número crescente de novos dispositivos sem prejuízo da funcionalidade da rede.

A ciência de contexto se refere ao metadados que identifiquem, dentre outras, propriedades de estado, conectividade e localização dos dispositivos.

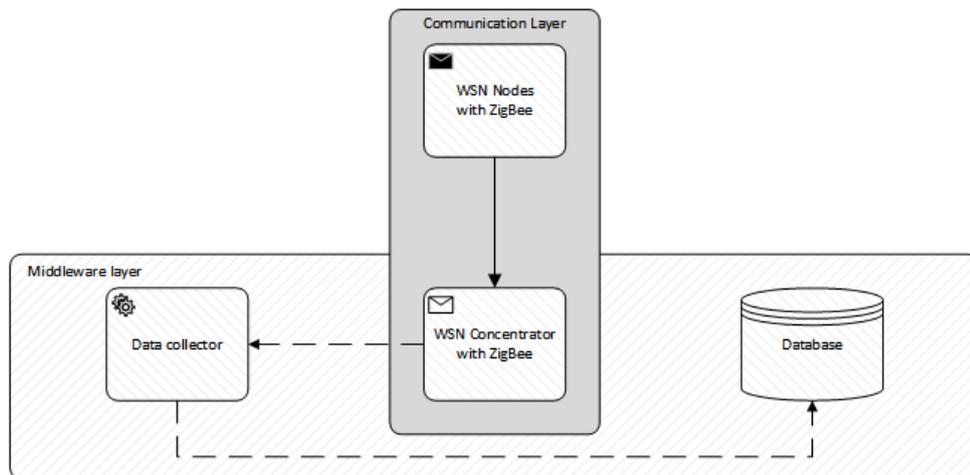
O gerenciamento de grandes volumes de dados permeia toda a solução de uma rede de sensores sem fio, pois ao passo que uma rede escalável incorpora novos dispositivos sensores, estes proverão mais dados que deverão ser devidamente: a) transmitidos; b) armazenados; c) recuperados; e, d) processados.

Não menos importante é a segurança dos dados que pode ser obtida a partir de técnicas de mascaramento e prevenção à corrupção de dados, como a criptografia, que deve manter a: a) integridade, os dados deverão trafegar por toda a estrutura sem sofrer modificação em seu conteúdo; b) privacidade, os dados deverão ser transmitidos e armazenados para que não sejam legíveis por meios não autorizados; c) disponibilidade, o acesso ao dado deverá estar disponível sempre que solicitado por quem for devidamente autorizado; e, d) confiabilidade, os dados devem representar exatamente aquilo que inicialmente foi

coletado em sua origem.

A camada de *middleware*, de modo particular considerando a arquitetura LWC, é composta por: a) módulo coletor, responsável por receber os dados dos diversos sensores; e enviá-los para um, b) sistema gerenciador de banco de dados (SGBD), responsável por administrar a persistência dos dados da aplicação. A Figura 25 ilustra uma representação para a camada de *middleware* da arquitetura LWC proposta neste trabalho.

Figura 25: Camada de *middleware* da arquitetura LWC



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra a camada de *middleware* da arquitetura LWC, composta por: a) módulo coletor; b) SGBD.

O protocolo MQTT é um padrão da indústria que sugere um modelo para gerenciamento do envio de mensagens entre dispositivos. Foi desenvolvido pela IBM com o propósito de gerenciar a transmissão de dados através de redes intermitentes ou com pouca banda de dados. Possui como propriedades principais: a) baixa complexidade de implementação; b) otimizado para aplicação tanto em redes TCP/IP como em redes não-TCP/IP; c) garantia de alta taxa de entrega de pacotes; d) gestão de mensagens através do envio de pacotes de controle; e, e) permite a construção de aplicação com baixo consumo elétrico.

Utilizando o modelo de aplicação para protocolo MQTT, foi introduzido no módulo coletor de dados uma aplicação *broker*, atuando como intermediário na captura dos dados transmitidos pelos módulos sensores, que desempenham o papel de *publisher*, e no armazenamento desses dados em um SGBD. A implementação do protocolo MQTT escolhida para o desenvolvimento deste projeto foi a *Mosquitto*⁴.

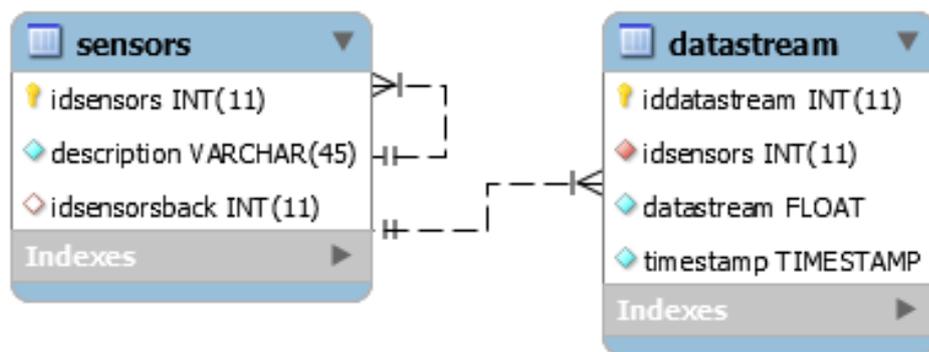
⁴ Mosquitto: implementação do protocolo MQTT, de código-fonte aberto, escrita na linguagem C, muito utilizada em projetos de IoT, desenvolvida e mantida pela *Eclipse Foundation*. Disponível em: <<http://mosquitto.org>>. Acesso em: nov. 2015.

No Apêndice A consta o código-fonte para o módulo sensor desenvolvido para este projeto, seguido do código-fonte utilizado para controle do módulo de monitoramento remoto, no Apêndice B. Foi necessária a utilização da biblioteca *PubSubClient* para auxiliar na comunicação através do protocolo MQTT. Os códigos-fonte que compõem a biblioteca constam no Anexo A, onde inicialmente se apresenta a *licença de uso*, no Algoritmo A.1, seguida do código-fonte do componente *PubSubClient.cpp*, no Algoritmo A.2, e, por fim, o código-fonte do componente *PubSubClient.h*, no Algoritmo A.3.

O SGBD escolhido foi o MariaDB, devido sua licença de uso livre e por questões de compatibilidade com o padrão SQL, o MariaDB também apresenta uma baixa exigência de *hardware* e boa velocidade, se comparado com outros SGBDs padrão do mercado.

Para a persistência de dados foi utilizado um modelo de dados composto por duas entidades, sendo uma responsável por identificar o módulo sensor e a outra responsável por armazenar os dados lidos. A primeira entidade, chamada de *sensors*, armazena a identificação do sensor e sua relação de herança, já a segunda entidade, chamada de *datastream*, armazena o fluxo de dados contendo a identificação do sensor de origem e uma assinatura de tempo. A Figura 26 ilustra o modelo de dados utilizado na camada de *middleware* da arquitetura LWC proposta neste trabalho.

Figura 26: Modelo de dados da camada de *middleware* da arquitetura LWC



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra o modelo de dados utilizado na camada de *middleware* da arquitetura LWC.

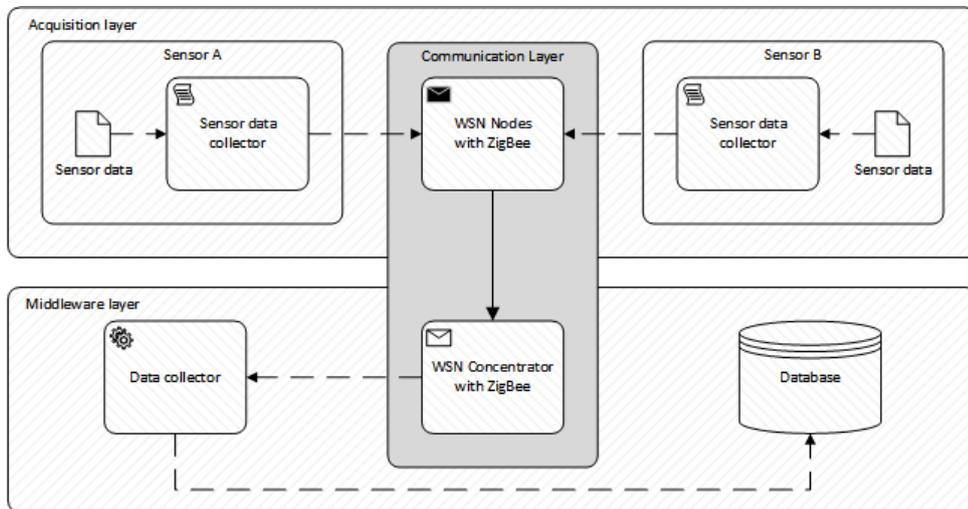
As entidades foram criadas utilizando as definições padrões de código na linguagem SQL. No Apêndice C consta o código SQL para criação da tabela *sensors*, e o código SQL para criação da tabela *datastream* consta no Apêndice D.

6.3.3 Camada de Comunicação

A camada de comunicação, na arquitetura LWC, é composta por módulos de transmissão de dados via rede sem fio. Esta camada permeia as duas camadas anteriormente descritas, na subseção 6.3.1, camada de aquisição, e na subseção 6.3.2, camada de *middleware*.

Foram utilizados módulos de comunicação ZigBee implantados nos módulos sensores e no módulo de coleta de dados. A Figura 27 ilustra uma representação da camada de comunicação da arquitetura LWC proposta neste trabalho, onde nota-se que a camada de comunicação permeia as camadas de aquisição e *middleware*.

Figura 27: Camada de comunicação da arquitetura LWC



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra a camada de comunicação da arquitetura LWC, que permeia as camadas de aquisição e *middleware*.

O ZigBee é um padrão de comunicação sem fio de baixo custo e duplo caminho, isto significa que os dados podem trafegar dos sensores para a aplicação e também podem ser enviados comandos de atuação de volta para os sensores. Apresenta alcance de comunicação que varia de 75 metros até alguns quilômetros, e pode construir redes formadas por até 65.536 dispositivos em topologia de rede em estrela, árvore ou malha (*mesh*).

As vantagens da adoção dessa tecnologia são: a) fácil implementação; b) baixo consumo elétrico; c) design compacto; d) livre de interferências eletromagnéticas; e) alta confiabilidade; f) garantia de entrega; g) correção de pacotes; e, h) criptografia nativa de 128 bits.

Os dispositivos ZigBee podem apresentar funções distintas no modelo de comunicação em rede, pode assumir o papel de coordenador, nó de rede ou dispositivo final (*end-device*). Ao assumir o papel de coordenador, o dispositivo terá a função de iniciar e

manter a rede em funcionamento, além de atuar como ponte entre redes distintas assumindo assim o papel de roteador, já o papel de dispositivo final é representado pelos dispositivos sensores. (RAMOS, 2010)

Uma das características dos dispositivos ZigBee é o baixo consumo elétrico, em parte, possibilitado pelo modo de operação, podendo mudar de ocioso, ou *idle*, para ativo em menos de 30ms. O dispositivo ZigBee se mantém em estado ocioso até o momento em que identifica um pacote de dados disponível para transmissão. No intuito de minimizar o consumo elétrico e conferir maior eficiência na comunicação, o dispositivo ZigBee pode assumir 6 estados em um modelo cíclico:

- a) inativo;
- b) ativo; que pode assumir os sub-estados de:
 - transmissão;
 - recepção; e,
 - comando; para voltar ao estado,
- c) ocioso.

A Figura 28 ilustra o ciclo de estados e modo de transmissão de dados ZigBee.

No estado inativo o dispositivo executa apenas uma verificação de sinal na antena em busca de conhecer se há solicitação para transmissão, nesse momento o dispositivo não transmite e nem recebe dados.

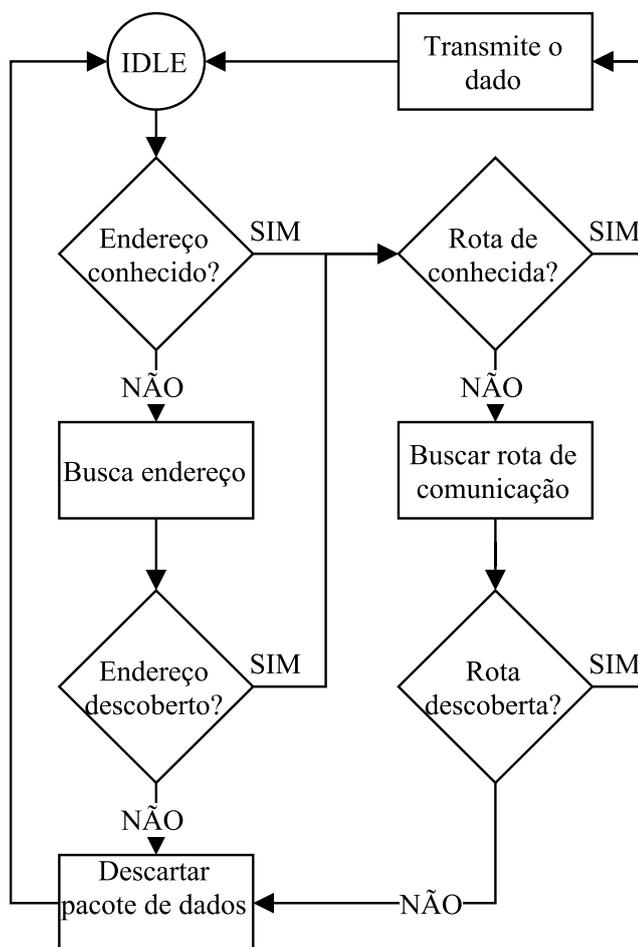
Diferentemente do estado inativo, no estado ocioso o dispositivo ZigBee não está executando nenhuma ação. Esse é o modo de maior economia de energia e é a vantagem apresentada por esse dispositivo frente a outros módulos de transmissão de dados sem fio como WiFi ou Bluetooth. No ZigBee a troca de estados se dá em menos de 30ms.

Quando o dispositivo detecta sinais de rádio na antena entra no estado ativo e verifica pela validade do pacote e endereço para comunicação, possibilitando os modos de transmissão, recepção ou comando.

Ao passar para o modo ativo o dispositivo poderá assumir os sub-estados de: a) transmissão; b) recepção; e, c) comando.

O modo de transmissão inicia com a verificação do endereço de destino, caso o endereço não seja conhecido será feita uma busca por um endereço válido, que ao ser descoberto será utilizado na busca da rota de destino, caso o dispositivo ZigBee não consiga encontrar um endereço válido ou uma rota de comunicação o pacote será descartado e ele voltará o estado ocioso, do contrário será feita a transmissão do dado e novamente o dispositivo volta ao estado ocioso aguardando nova transmissão de dados. Essa estratégia permite economizar energia elétrica no dispositivo, pois só haverá transmissão de dados para endereço e rota válidos.

Figura 28: Ciclo de estados e modo de transmissão ZigBee



Fonte: Adaptado de (RAMOS, 2010)

Esta imagem ilustra o ciclo de estados que um dispositivo ZigBee pode assumir, o propósito desse ciclo é minimizar o consumo elétrico e conferir maior eficiência na comunicação.

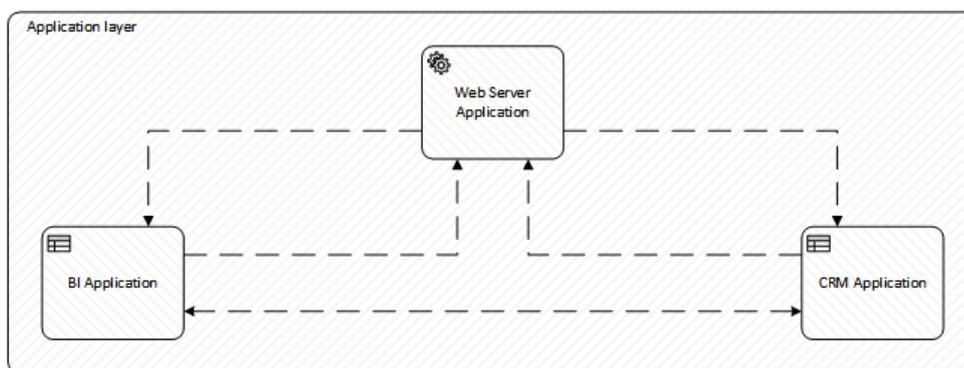
O modo de recepção é assumido quando são percebidos dados válidos, que são então transferidos para transmissão. Já o modo de comando tem o propósito exclusivo de enviar e receber comandos de configuração entre os dispositivos ZigBee

6.3.4 Camada de Aplicação

A camada de aplicação é composta por um *Web Server Application* executando o papel de *subscriber*, ou ouvinte, do protocolo MQTT. Este módulo é também responsável por recuperar os dados armazenados no SGBD e apresentá-los aos módulos de aplicação para análises e tomadas de decisões, considerando a arquitetura LWC, apresentando os dados em uma aplicação de *Business Intelligence (BI)* e *CRM Application*. A Figura 29 ilustra uma representação da camada de aplicação da arquitetura LWC.

A camada é composta por um agente inteligente, incorporado ao *Web Server Application*, responsável por monitorar os dados da camada de *middleware*, possibilitando emitir alertas pré-configurados no caso identificar a ocorrência de distúrbios na rede de distribuição de água.

Figura 29: Camada de aplicação da arquitetura LWC



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra a camada de aplicação da arquitetura LWC, que é composta por: a) *Web Server Application*; b) aplicação de *Business Intelligence (BI)*; e, c) *CRM Application*.

O módulo BI foi desenvolvido utilizando a plataforma *QlikView Personal Edition*⁵, que provê gratuitamente, e para uso pessoal, uma ferramenta voltada à criação rápida de aplicativos analíticos guiados e apresentação de dados em painel de indicadores.

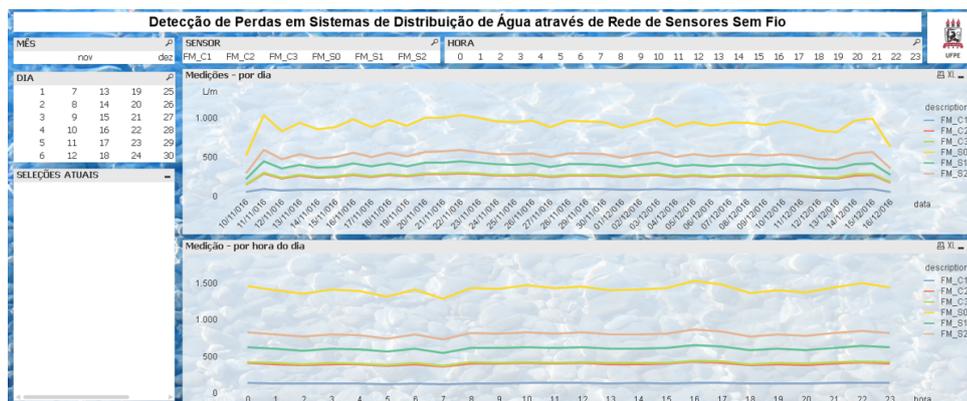
No módulo BI é exibido um painel de indicadores, contendo os dados coletados por todos os sensores, apresentando de forma rápida e clara a variação na demanda e consumo de água. Os painéis apresentados no módulo BI do protótipo desenvolvido são:

- a) gráfico de medições por dia;
- b) gráfico de medições por hora;
- c) seletor de sensores;
- d) seletor para o mês, dia e hora; e,
- e) um agrupador das opções selecionadas.

A Figura 30 ilustra a tela principal da aplicação em BI, desenvolvida para monitoramento dos dados coletados pelos sensores.

⁵ *QlikView Personal Edition*: versão gratuita, voltada para uso pessoal, da plataforma para visualização de dados *QlikView* desenvolvida pela empresa *Qlik*. Disponível em: <<https://www.qlik.com>>. Acesso em: maio 2016.

Figura 30: Visão geral da aplicação em BI



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra a tela principal da aplicação em BI, desenvolvida para a camada de aplicação da arquitetura LWC.

6.4 Desenvolvimento do Protótipo LWC

Neste trabalho foi desenvolvida uma proposta de arquitetura para controle local da água utilizando uma rede de dispositivos sensores sem fio, à qual foi dado o nome de *Local Water Control* e estabelecida a sigla (LWC).

Esta arquitetura foi desenvolvida com o propósito de prover controle local do consumo de água, utilizando rede de sensores sem fio. A fim de validar a eficácia dessa arquitetura foi desenvolvido um protótipo utilizando como base a plataforma Arduino⁶ Mega 2560, acrescida de um módulo para redes sem fio ZigBee e um módulo medidor de fluxo da água por meio de sensor de efeito *Hall*.

O protótipo foi desenvolvido utilizando como base a plataforma Arduino Mega 2560, responsável pela comunicação entre a camada de aquisição e o processamento, e por controlar a comunicação dos dados. O módulo ZigBee utilizado foi adicionado à plataforma Arduino por meio de placa própria para este fim. O protótipo foi concluído com a adição do módulo medidor de fluxo da água utilizando um sensor de efeito *Hall*, mais à frente será detalhado o funcionamento deste sensor.

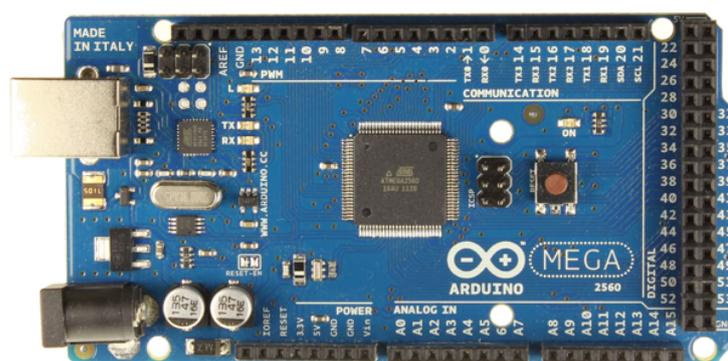
A seguir serão detalhados na subseção 6.4.1 a plataforma de desenvolvimento Arduino Mega 2560, na subseção 6.4.2 é descrito o funcionamento do módulo de comunicação ZigBee utilizado neste protótipo, na subseção 6.4.3 é descrito o módulo para medição de fluxo da água por meio de sensor de efeito *Hall*, na subseção 6.4.4 segue o diagrama esquemático do protótipo LWC, e por fim na subseção 6.4.5 é exibido o protótipo final.

⁶ Arduino: plataforma eletrônica de código aberto, baseada em hardware e software fáceis de usar, destinada a desenvolvimento de projetos interativos. Disponível em: <<https://www.arduino.cc>>. Acesso em: nov. 2015.

6.4.1 Plataforma de Desenvolvimento Arduino

Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto, desenvolvida e distribuída sob a filosofia do projeto *Open-source Hardware*⁷, que estimula o desenvolvimento de soluções pessoais por meio de aplicações fáceis de criar e usar, mas que ao mesmo tempo podem ser utilizadas para a criação de projetos grandes e complexos. A Figura 31 ilustra a placa utilizada no desenvolvimento deste protótipo.

Figura 31: Arduino Mega 2560



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra a placa Arduino Mega 2560 utilizada como base no desenvolvimento deste protótipo.

O Arduino Mega 2560⁸ é uma placa baseada no microcontrolador ATmega2560, possui 54 pinos de entrada e saída digital, 16 pinos de entrada analógica, cristal oscilador de 16 MHz. Na Tabela 12 estão relacionadas as principais especificações técnicas da placa Arduino Mega 2560.

À época do desenvolvimento deste protótipo, uma placa do Arduino Mega 2560 custava R\$ 120,00, foram utilizadas duas placas para os ensaios em laboratório, conforme pode ser visto mais adiante na subseção 6.4.5.

Cada um dos pinos do Arduino Mega 2560, 64 pinos digitais e 16 analógicos, pode ser usado como entrada ou saída, bastando apenas a definição através das funções descritas no Algoritmo 6.1. Cada pino digital opera de 0V a 5V e pode prover ou receber uma carga máxima de 40 mA (20 mA recomendado). Os pinos analógicos tem uma resolução de 10 bits, atingindo 1024 valores diferentes. A Figura 32 ilustra a configuração de pinagem do microcontrolador ATmega2560 utilizado no Arduino Mega 2560.

⁷ *Open-source Hardware: hardware* eletrônico projetado e desenvolvido sob a mesma filosofia do *software* livre, os dispositivos desenvolvidos sob essa filosofia tem todo o seu projeto, diagramas, estrutura de dados e leiaute de placas divulgados livremente.

Disponível em: <<https://www.openhardware.io>>, <<https://www.mysensors.org>>. Acesso em: nov. 2015.

⁸ Arduino Mega 2560: placa desenvolvida sob especificações de plataforma do projeto Arduino.

Disponível em: <<https://www.arduino.cc>>. Acesso em: nov. 2015.

Tabela 12: Especificações técnicas do Arduino Mega 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Voltagem de operação	5V
Voltagem de entrada (recomendada)	7-12V
Voltagem de entrada (limite)	6-20V
Pinos de I/O digitais	54 (dos quais 15 provém saída PWM)
Pinos de entrada analógicos	16
Corrente DC por pino I/O	20 mA
Corrente DC no pino de 3.3V	50 mA
Memoria flash	256 KB (dos quais 8 KB são do <i>bootloader</i>)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade de <i>Clock</i>	16 MHz

Fonte: Adaptado da documentação oficial da plataforma Arduino. Disponível em: <<https://www.arduino.cc>>. Acesso em: nov. 2015.

Algoritmo 6.1: Definição de pinos do Arduino

```

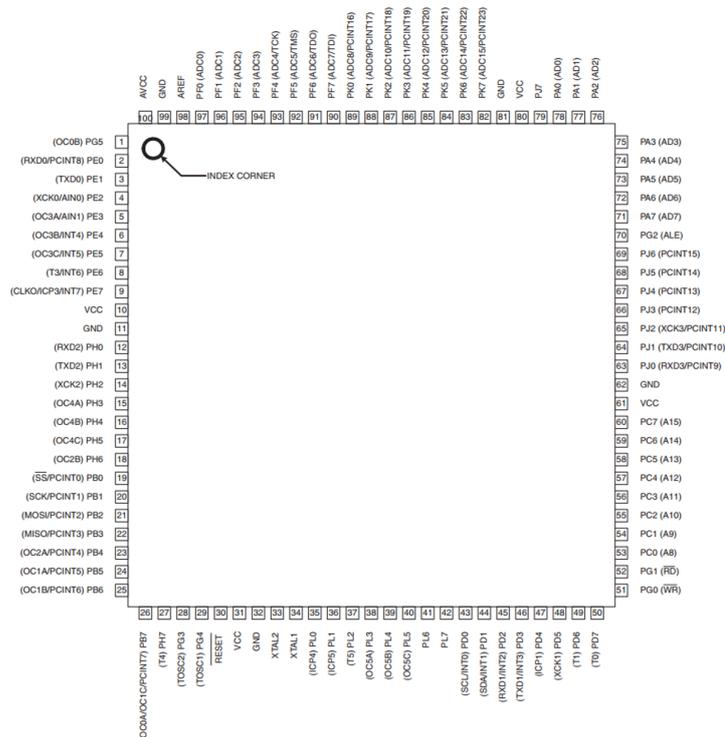
1 // Configura o pino para I/O
2 pinMode(pino, <INPUT/OUTPUT>);
3
4 // <5V,3V> high, 0V low
5 digitalWrite(pino, <HIGH/LOW>);
6 // Le o valor HIGH/LOW do pino
7 digitalRead(pino);
8
9 // Escreve o valor analogico de 0 a 255
10 analogWrite(pino, valor);
11 // Le valor analogico 5V em unidades de 0,0049V
12 analogRead(pino);

```

As variáveis declaradas na plataforma Arduino podem assumir os tipos de dados suportados pela linguagem C++. Na Tabela 13 consta uma relação dos tipos de dados aceitos, obtidos a partir da documentação oficial da plataforma.

O código base de qualquer programa desenvolvido sob a plataforma Arduino segue um padrão fixo que deve contar com: a) definições de preâmbulo, onde são incluídas chamadas de bibliotecas; b) uma função obrigatória *setup()*, onde são definidas algumas configurações iniciais do programa para configuração das especificações de plataforma e *hardware* agregados; e, c) uma função também obrigatória *loop()*, principal função do programa, fica executando indefinidamente até um momento de parada determinado ou desligamento da plataforma.

Figura 32: Pinagem do microcontrolador ATmega2560



Fonte: Adaptado da documentação oficial da plataforma Arduino. Disponível em: <<https://www.arduino.cc>>. Acesso em: nov. 2015.

Esta imagem ilustra a configuração de pinagem do microcontrolador ATmega2560 utilizado no Arduino Mega 2560.

A função *setup()* é chamada uma única vez durante a execução do programa ou quando o programa é reiniciado, nela são incluídas definição da pinagem ou velocidade do *buffer* de transmissão serial.

A função *loop()* contém o programa principal executado pela plataforma, esta função executa indefinidamente até que uma parada programada no sistema ocorra ou quando a plataforma é desligada.

No Algoritmo 6.2 está um exemplo básico de código desenvolvido para a plataforma Arduino, a função é ler os dados analógicos da porta *A0* e enviá-los via conexão serial.

Algoritmo 6.2: Código básico de um programa Arduino

```

1 // Exemplo de código básico de um programa Arduino
2
3 // Inclusão de bibliotecas
4 #include "SoftwareSerial.h"
5
6 // Definição de constantes
7 const int analogInPin = A0;
8

```

Tabela 13: Relação dos tipo de dados na plataforma Arduino

Tipo de dado	Descrição
boolean	ocupa 1 byte de memória e pode assumir os valores <i>true</i> ou <i>false</i>
byte	ocupa 1 byte de memória, faixa de valores de 0 a 255
char	ocupa 1 byte de memória, reserva apenas um caractere, letra ou número na faixa de valores de -128 a 127
unsigned char	ocupa 1 byte de memória, reserva apenas um caractere, letra ou número sem sinal na faixa de valores de 0 a 255
int	ocupa 2 bytes de memória, armazena números inteiros de 16 bits com sinal na faixa de valores de -32768 a 32767
unsigned int	ocupa 2 bytes de memória, armazena número inteiro de 16 bits sem sinal na faixa de valores de 0 a 65535
short	ocupa 2 bytes de memória, armazena número inteiro de 16 bits com sinal na faixa de valores de -32768 até 32767
long	ocupa 4 bytes de memória, armazena número inteiro de 16 bits com sinal na faixa de valores de -2147483648 a 2147483647
unsigned long	ocupa 4 bytes de memória, armazena número inteiro de 16 bits sem sinal na faixa de valores de 0 a 4294967295
float	ocupa 4 bytes na memória, armazena número real de precisão simples, ponto flutuante, na faixa de valores de -3.4028235E+38 até 3.4028235E+38
double	ocupa 4 bytes na memória, armazena número real de precisão dupla, ponto flutuante, na faixa de valores de -3.4028235E+38 até 3.4028235E+38
string	cadeia de caracteres
void	tipo de dado vazio

Fonte: Adaptado da documentação oficial da plataforma Arduino. Disponível em: <<https://www.arduino.cc>>. Acesso em: nov. 2015.

```

9 // Definicoes da funcao setup()
10 setup() {
11     // Definicao de pinagem
12     pinMode(13, HIGH);
13
14     // Abertura de conexao serial
15     Serial.begin(9600);
16 }
17
18 // Programa principal escrito na funcao loop()
19 loop() {
20     // Testa a conexao seria para o envio de dados
21     if (Serial.available()){
22         Serial.print("Dados do pino A0: ");
23         // Escreve a saida de dados do pino analogico A0
24         Serial.println(analogRead(analogInPin));
25     }
26 }
```

6.4.2 Módulo de Comunicação ZigBee

Os módulos ZigBee são construídos pela implementação do protocolo IEEE 802.15.4 em rádio frequência que permite comunicação sem fio em curtas distâncias, operando na faixa de frequência ISM. No Brasil os módulos ZigBee autorizados operam na frequência de 2.4GHz, oferecendo 16 canais de comunicação.

As redes sem fio construídas com módulos ZigBee oferecem boa imunidade contra interferências e possibilidade de acoplar até 65.535 dispositivos na mesma rede, oferecendo taxas de transmissão entre 20Kbps até 250Kbps com reduzido consumo elétrico.

Os dispositivos ZigBee podem assumir os papéis de FFD ou RFD, apresentando as seguintes características:

a) dispositivo FFD:

- o ZigBee coordenador é o dispositivo responsável por iniciar a rede e coordenar a troca de chaves de segurança na rede;
- o ZigBee roteador pode desempenhar as funções de dispositivo sensor ou roteador intermediário de rede, servindo inclusive para a interconexão entre redes distintas;

b) dispositivo RFD:

- o ZigBee dispositivo final somente realiza transmissão de dados que ele mesmo captou, é neste dispositivo onde se localiza o sensor e não faz comunicação com os outros dispositivos finais, apenas se comunica com dispositivos roteador ou coordenador;
- também pode receber comandos enviados pelo coordenador de rede para execução de configuração ou processamento local.

A Figura 33 ilustra a placa ZigBee (XBeePro S1) utilizada como dispositivo final no desenvolvimento deste protótipo.

À época do desenvolvimento deste protótipo, um kit contendo dois módulos ZigBee RFD, um módulo ZigBee FFD e um módulo gravador USB custava R\$ 750,00, foi utilizado um kit completo de módulo ZigBee (XBeePro S1 e S2) para os ensaios em laboratório, conforme pode ser visto mais adiante na subseção 6.4.5.

O módulo XBeePro possui 20 pinos distribuídos de forma sequencial dividida entre os dois lados da placa. A Figura 34 ilustra a configuração de pinagem do módulo ZigBee (XBeePro S1 e S2) utilizado neste projeto.

Cada dispositivo deverá ser inicializado de acordo com sua função na rede, seja coordenador, roteador ou dispositivo final. No Algoritmo 6.3 está um exemplo de código básico para inicialização de um módulo coordenador de rede, a função `loop()` foi omitida

Figura 33: Módulo ZigBee (XBee Pro S1)



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra a placa do módulo ZigBee (XBeePro S1) utilizada no desenvolvimento deste protótipo.

Figura 34: Pinagem do módulo ZigBee (XBeePro S1 e S2)

1	VCC 3.3	SDA/IO	20
2	TX/IO	SCL/IO	19
3	RX/IO	IO 8	18
4	IO 0	IO 7	17
5	RESET	RST/IO	16
6	IO 1	IO 6	15
7	IO 2	VREF	14
8	IO 3	IO 5	13
9	DTR/IO	CTS/IO	12
10	GND	IO 4	11

Fonte: Adaptado da documentação oficial do módulo ZigBee (XBeePro). Disponível em: <<https://www.digi.com>>. Acesso em: nov. 2015.

Esta imagem ilustra a configuração de pinagem do módulo ZigBee (XBeePro S1 e S2).

neste exemplo por economia de espaço, mas deverá ser implicitamente considerada em um código funcional.

Algoritmo 6.3: Código básico de funcionamento do módulo ZigBee Coordenador

```

1 // Exemplo de código básico para funcionamento do módulo ZigBee
  ↪ coordenador
2 #include <SPI.h>
3 #include <ZigBee.h>
4
5 int connectStatus=FAIL;
6
7 void setup() {
8   Serial.begin(9600);

```

```

9   Serial.print("Dispositivo coordenador, inicializando rede...");
10  connectStatus=ZigBee.begin(COORDINATOR);
11  if(connectStatus==SUCCESS){ Serial.println("Rede inicializada"); }
12  else{
13      Serial.print("Error: 0x");
14      Serial.println(connectStatus);
15  }
16 }

```

No Algoritmo 6.4 está um exemplo de código básico para inicialização de um módulo como dispositivo final, a função *loop()* foi omitida neste exemplo por economia de espaço, mas deverá ser implicitamente considerada em um código funcional.

Algoritmo 6.4: Código básico de funcionamento do módulo ZigBee Final

```

1 // Exemplo de código básico para funcionamento do módulo ZigBee final
2 #include <SPI.h>
3 #include <ZigBee.h>
4
5 void setup() {
6     Serial.begin(9600);
7     Serial.print("Dispositivo final.");
8     connectStatus=ZigBee.begin(END_DEVICE);
9     if(connectStatus==SUCCESS) { Serial.println("Conectado!"); }
10    else {
11        Serial.print("Error: 0x");
12        Serial.println(connectStatus);
13    }
14 }

```

6.4.3 Módulo Medidor de Fluxo da Água

O módulo medidor de fluxo da água, identificado no mercado sob o nome *G3/4 Water Flow sensor*, utiliza um sensor de efeito *Hall*, cuja rotação provoca a geração de campo magnético que induz variação de tensão na saída do sensor, essa variação de tensão é então convertida em dados que representam o fluxo da água.

O sensor é construído em corpo plástico, possui um rotor onde são posicionados ímãs e uma bobina fixa que capta a rotação do rotor. A Figura 35 ilustra o módulo *G3/4 Water Flow sensor* exibindo o sensor de efeito *Hall*.

À época do desenvolvimento deste protótipo um módulo medidor de fluxo de água custava R\$ 29,00, foram utilizado dois sensores para os ensaios em laboratório, conforme pode ser visto mais adiante na subseção 6.4.5.

Figura 35: Módulo *G3/4 Water Flow sensor*

Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra o módulo *G3/4 Water Flow sensor* utilizado no desenvolvimento deste protótipo.

Na Tabela 14 constam as principais especificações técnicas do *G3/4 Water Flow sensor*, obtidas a partir da documentação oficial do módulo.

Tabela 14: Especificações técnicas do módulo *G3/4 Water Flow sensor*

Característica	Valor
Modelo	YF-S201
Faixa de voltagem de operação	5V a 24V DC
Voltagem típica de operação	5V DC
Corrente típica de operação	15mA (5V DC)
Fluxo de água de operação	0 a 60L/min
Pressão de água de operação	1.75MPa
Faixa temperatura de operação	-20°C a 80°C

Fonte: Adaptado a partir da documentação oficial do módulo *G3/4 Water Flow sensor*. Disponível em: <<http://wiki.seeed.cc>>. Acesso em: nov. 2015.

O sensor de fluxo da água é um dispositivo simples, possuindo apenas um conector contendo 3 fios, sendo, vermelho para alimentação em corrente contínua, preto para GND, e um fio amarelo por onde se coleta o sinal do sensor *Hall*. Na Figura 36 pode ser vista a configuração de pinagem para o *G3/4 Water Flow sensor*.

No Algoritmo 6.5 está um exemplo de código básico para leitura de dados gerados pelo módulo *G3/4 Water Flow sensor* a partir da medição de fluxo da água.

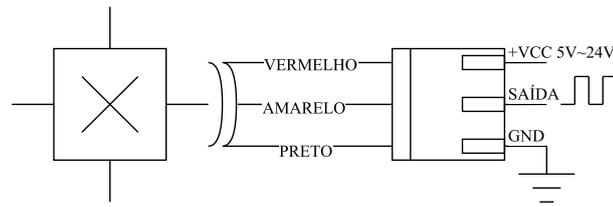
Algoritmo 6.5: Código básico de funcionamento do módulo ZigBee Final

```

1 // Exemplo de código básico para leitura de dados do sensor de fluxo
2 #include "SoftwareSerial.h"

```

Figura 36: Pinagem do módulo *G3/4 Water Flow sensor*



Fonte: Adaptado a partir da documentação oficial do módulo *G3/4 Water Flow sensor*. Disponível em: <<http://wiki.seeed.cc>>. Acesso em: nov. 2015.

Esta imagem ilustra a configuração de pinagem do módulo *G3/4 Water Flow sensor* utilizado no desenvolvimento do protótipo.

```

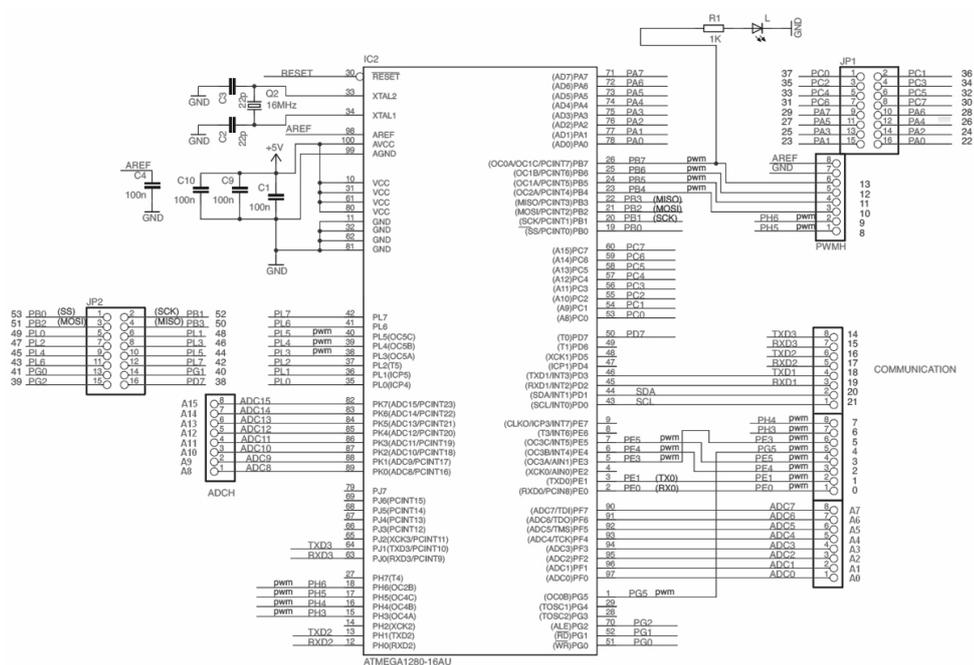
3
4 volatile int sensorSinal;
5 const int sensorPino = 2;
6 float fluxoAgua = 0;
7
8 void rpm();
9
10 void setup() {
11     pinMode(sensorPino, INPUT);
12     attachInterrupt(0, rpm, RISING);
13
14     Serial.begin(9600);
15 }
16
17 void loop() {
18     sensorSinal = 0;
19     sei();
20     delay(800);
21     cli();
22     // O calculo para o fluxo de agua e dado pela frequencia de rotacao do
23     ↪ sensor hall multiplicado por 60, dividido pela razao 5.5
24     fluxoAgua = (sensorSinal * 60 / 5.5);
25
26     Serial.println("");
27     Serial.print("SensorA: ");
28     Serial.print(fluxoAgua, 4);
29     Serial.print(" litros/hora | ");
30     Serial.print(fluxoAgua/1000, 4);
31     Serial.println(" m^3/hora");
32 }
33 void rpm() {
34     sensorSinal++;

```

6.4.4 Diagrama Esquemático

A plataforma Arduino Mega 2560 é desenvolvida sobre o microcontrolador ATmega2560, o que provê características de operação robustas e confiáveis. O diagrama esquemático, contendo a pinagem do microcontrolador e o circuito básico de operação, pode ser visto conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37: Diagrama esquemático do Arduino Mega 2560



Fonte: Adaptado da documentação oficial da plataforma Arduino. Disponível em: <<https://www.arduino.cc>>. Acesso em: nov. 2015.

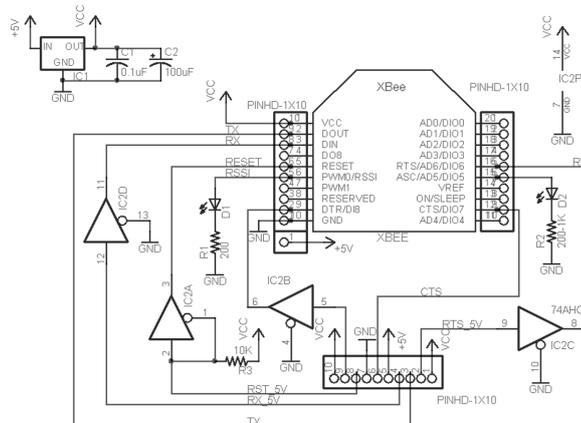
Esta imagem ilustra o diagrama esquemático do Arduino Mega 2560.

O módulo de comunicação ZigBee utilizado neste protótipo foi o desenvolvido e comercializado pela empresa DIGI⁹, o kit utilizado possui dois módulos ZigBee (XBeePro S1) utilizados como dispositivos finais (RFD) e um módulo ZigBee (XBeePro S2) utilizado como concentrador (FFD). Ambos utilizam a mesma tecnologia, diferindo em poucos aspectos como potência e consequentemente consumo elétrico. A Figura 38 ilustra o diagrama esquemático do módulo ZigBee (XBeePro S1 e S2).

O módulo para medição de fluxo de água, *G3/4 Water Flow sensor*, é um dispositivo de concepção simples, utiliza um sensor de efeito *Hall* para medição de fluxo da água a

⁹ Digi International, Inc. (Digi): empresa multinacional voltada à produção de soluções para IoT. Disponível em: <<https://www.digi.com>>. Acesso em: nov. 2015.

Figura 38: Diagrama esquemático do módulo ZigBee (XBeePro S1 e S2)

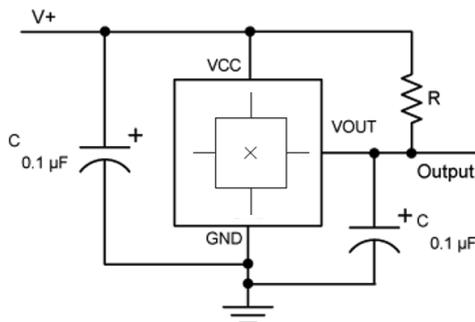


Fonte: Adaptado da documentação oficial do módulo ZigBee (XBeePro). Disponível em: <<https://www.digi.com>>. Acesso em: nov. 2015.

Esta imagem ilustra o diagrama esquemático do módulo ZigBee (XBeePro S1 e S2).

partir da rotação inferida em um rotor constituído por pás plásticas associado a um ímã em um corpo selado por onde passa a água. A Figura 39 ilustra o diagrama esquemático do módulo *G3/4 Water Flow sensor*.

Figura 39: Diagrama esquemático do módulo *G3/4 Water Flow sensor*



Fonte: Adaptado a partir da documentação oficial do módulo *G3/4 Water Flow sensor*. Disponível em: <<http://wiki.seeed.cc>>. Acesso em: nov. 2015.

Esta imagem ilustra o diagrama esquemático do módulo *G3/4 Water Flow sensor*.

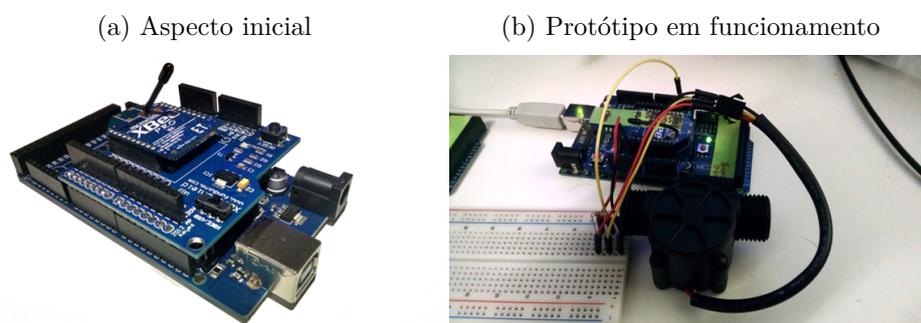
6.4.5 Protótipo Utilizando a Arquitetura LWC

A fim de validar a eficácia da arquitetura para controle local da água, *Local Water Control* (LWC), foi desenvolvido este protótipo utilizando a plataforma Arduino Mega

2560 como base para aposição do módulo de comunicação ZigBee e do sensor para medição de fluxo da água.

O protótipo foi construído utilizando uma placa *protoboard*¹⁰, a Figura 40a ilustra o aspecto inicial da montagem do protótipo, já com o módulo ZigBee acoplado, a Figura 40b ilustra o protótipo pronto para funcionamento, já acoplado com o módulo ZigBee e com o sensor para medição de fluxo da água. A utilização da *protoboard* se fez necessária uma vez que não há forma de conectar o sensor diretamente à plataforma Arduino, já o módulo ZigBee conta com opção de instalação sobre *shield*¹¹ próprio.

Figura 40: Construção do protótipo para validação da arquitetura LWC



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra a montagem do protótipo para validação da arquitetura LWC.

Para realização dos testes em laboratório foram construídos dois protótipos iguais com a finalidade de verificar a funcionalidade da camada de comunicação da arquitetura LWC. Os dados sensoriados, pelo *G3/4 Water Flow sensor*, foram transmitidos através dos módulos ZigBee, operando como RFD, e recebidos no módulo ZigBee coordenador da rede. Os protótipos utilizados nos testes foram alimentados através da conexão da porta USB do computador do laboratório, o funcionamento do protótipo foi mantido durante 7 dias, totalizando um pouco mais que 160 horas de testes.

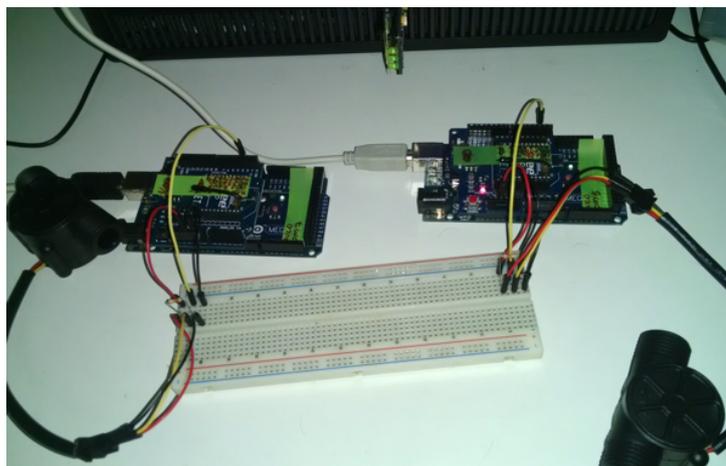
A Figura 41 ilustra o aspecto final da montagem dos dois protótipos, contendo os módulos de sensoriamento, *G3/4 Water Flow sensor*, e os módulos para transmissão de dados, ZigBee (XBeePro S1), comunicando-se com o módulo ZigBee (XBeePro S2) coordenador de rede que estava conectado diretamente ao computador do laboratório.

Uma observação importante se faz referente às eventuais falhas do protótipo, devido a mau contatos que ocorreram *protoboard*. Decorridas as primeiras 9 horas de testes o procedimento teve que ser interrompido, pois um dos conectores do sensor apresentou

¹⁰ *Protoboard*: placa para ensaios de circuitos eletrônicos formada por uma matriz de contatos associados à furação correspondente onde se encaixam os componentes sem necessidade de soldagem.

¹¹ *Shield*: são placas de circuito impresso que podem ser conectadas sobre a plataforma Arduino adicionando novas funcionalidades.

Figura 41: Aspecto final do protótipo para validação da arquitetura LWC



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra o aspecto final do protótipo para validação da arquitetura LWC.

defeito, após substituição do conector defeituoso o processo de teste foi reiniciado e a contagem de tempo oficial se deu a partir deste momento.

Nos testes de laboratório não foi utilizada persistência de dados, e sim uma contagem referente à quantidade de conexões efetuadas com sucesso efetuando transmissão de dados pelo módulo sensor e recebimento pelo coordenador de rede.

No módulo sensor o valor referente à quantidade de conexões abertas foi armazenado em uma variável do tipo inteiro e transmitida junto com os dados do sensor, no módulo coordenador também foi armazenada a quantidades de conexões recebidas, ao final foram 703.597 amostragens de sensoriamento contra 703.294 de fato recebidas pelo coordenador de rede, o que representou falha na transmissão de 303 conexões, ou 0,0431% de todas as conexões abertas pelos módulos de sensoriamento.

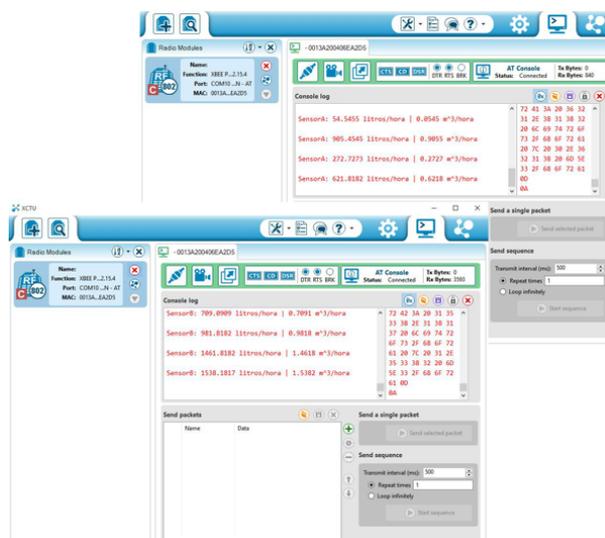
Essas falhas de transmissão ocorreram por *timeout* de conexão¹² ou colisão entre as transmissões dos módulos. Não existe uma referência que determine um valor mínimo para perda de pacotes em redes ZigBee. Apesar do protocolo ZigBee especificar o tratamento de colisões, estas eventualmente podem ocorrer e levam ao descarte do pacote de dados.

O funcionamento da rede de sensores foi monitorada em intervalos regulares, utilizando a aplicação XCTU¹³ fornecida pelo fabricante do módulo ZigBee. A Figura 42 ilustra duas telas contendo o monitoramento da recepção de dados, transmitida através dos módulos ZigBee, durante os testes em laboratório.

¹² *Timeout*: ou tempo limite de conexão, tempo esgotado na tentativa de conexão ou transmissão de dados entre dispositivos de rede.

¹³ XCTU: aplicação multi-plataforma gratuita para configuração, gerenciamento e testes de módulos ZigBee. Disponível em: <<https://www.digi.com>>. Acesso em: nov. 2015.

Figura 42: Monitoramento da recepção de dados



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra o monitoramento da recepção de dados dos módulos ZigBee durante os testes executados em laboratório.

Para construção deste protótipo foi utilizado duas placas da plataforma Arduino Mega 2560, um kit de módulos ZigBee (XBee Pro) e dois sensores *G3/4 Water Flow sensor*. Na Tabela 15 consta a relação de materiais utilizados e seus respectivos preços de custo à época do desenvolvimento deste protótipo. Não foram computados os cabos USB utilizados no experimento nem os cabos do tipo *jumpers*¹⁴ para conexão à *protoboard* pois estes já estavam disponíveis no laboratório.

Tabela 15: Relação de material e custos do protótipo

Qtd.	Descrição	Valor (R\$)
2	Arduino Mega 2560	240,00
1	Kit de módulos ZigBee	750,00
2	Sensor para medição do fluxo da água	58,00
1	<i>Protoboard</i> 830 pontos	12,00
Total		1.060,00

Fonte: Elaborado pelo autor

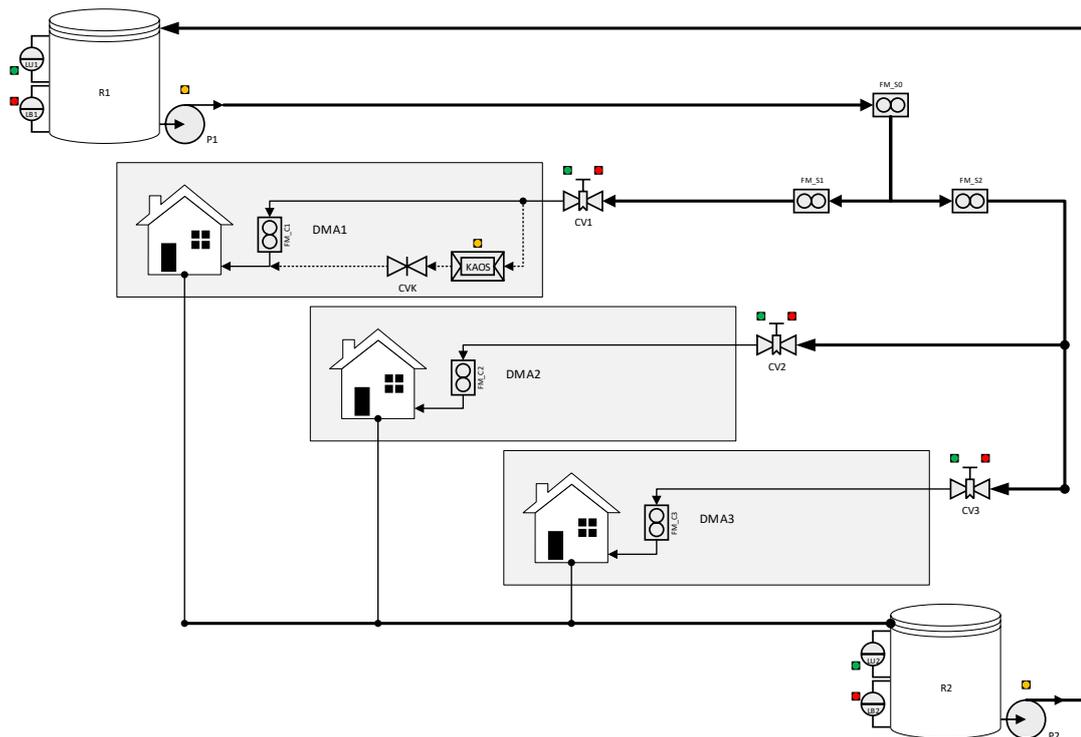
¹⁴ *Jumpers*: em eletrônica são artefatos responsáveis pela conexão elétrica entre pontos de contato, originalmente não conectados, podem ser encontrados na forma de cabos ou peças plásticas contendo filamento de metal condutor.

6.5 Painel de Simulação

Após a validação do protótipo, realizada a partir de testes em laboratório, foi necessário comprovar a aplicação da arquitetura LWC em uma rede de distribuição de água. Em face do alto custo financeiro e demanda de tempo, que excederia o prazo para conclusão do curso de mestrado, a aplicação da arquitetura LWC em uma rede de distribuição real foi preterida, e, portanto, foi decidido pela aplicação da arquitetura LWC em um painel de simulação que representasse uma rede de distribuição de água.

Com o propósito de representar uma rede de distribuição de água real, o painel de simulação foi construído contendo um reservatório principal que fornecia água para distribuição entre três áreas de medição e controle, ou DMA. Em uma dessas áreas foi inserido um módulo com o propósito de provocar distúrbios aleatórios na rede de distribuição de água, por meio da abertura de uma válvula, provocando desvio no fluxo da água, a este módulo foi dado o nome de “gerador de KAOS”.

Figura 43: Diagrama do painel de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra o painel de simulação, contendo a representação para as três áreas de consumo, dois reservatórios de água, válvulas para controle e sensores para medição de fluxo da água.

Integrava ainda o painel de simulação, um reservatório inferior responsável por receber a água que passou por todo o painel e por bombear essa água novamente para o

reservatório principal. A Figura 43 ilustra o diagrama do painel de simulação, contendo a representação para as três áreas de consumo, onde foram inseridos os sensores para medição de fluxo da água, válvulas e reservatórios de água.

O painel de simulação foi construído tendo como principal componente o mesmo modelo de sensor para medição de fluxo da água, *G3/4 Water Flow sensor*, utilizado no protótipo. Entretanto foram utilizadas placas Arduino, baseadas em variações do microcontrolador ATmega328 de 16MHz, sendo uma placa do Arduino Uno (ATmega328P) R3, para o módulo principal, responsável por receber os dados de todos os módulos sensores e realizar a persistência de dados, seis placas do Arduino Pro Mini (ATmega328), para coleta de dados dos sensores de fluxo, e uma placa do Arduino Nano V3.0 Rev3 (ATmega328), para o módulo gerador de KAOS.

O microcontrolador ATmega328/P, possui 14 pinos de entrada e saída digital, 8 pinos de entrada analógica, cristal oscilador de 16 MHz. Na Tabela 16 estão relacionadas as principais especificações técnicas comuns às placas do Arduino construídas com base no microcontrolador ATmega328/P.

Tabela 16: Especificações técnicas do Arduino com ATmega328/P

Microcontrolador	ATmega328/P
Voltagem de operação	5V
Voltagem de entrada (recomendada)	7-12V (7-9V Mini)
Voltagem de entrada (limite)	6-20V
Pinos de I/O digitais	14 (6 PWM)
Pinos de entrada analógicos	8
Memoria flash	32 KB (dos quais 2 KB são do <i>bootloader</i>)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade de <i>Clock</i>	16 MHz

Fonte: Adaptado da documentação oficial da plataforma Arduino. Disponível em: <<https://www.arduino.cc>>. Acesso em: nov. 2016.

Compunha também o painel de simulação, válvulas solenoide para controle do fluxo da água, das quais, uma válvula foi utilizada em conjunto com o módulo gerador de KAOS para provocar o desvio no fluxo da água, e duas bombas de água, de modelo utilizado em máquinas de lavar roupas, que foram adaptadas para utilização no painel de simulação.

6.5.1 Construção do Painel de Simulação

A primeira fase da construção do painel de simulação foi a disposição dos sensores de fluxo e das válvulas solenoide em uma base de madeira perfurada, sendo fixados por

abraçadeira de nylon. As válvulas e sensores foram conectadas entre si utilizando mangueira plástica transparente e conectores para jardinagem, a fim de garantir a estanqueidade das conexões foram utilizadas abraçadeiras de nylon para forçar a vedação nas conexões.

O painel de simulação contou com dois reservatórios de água, um superior por onde o ciclo de distribuição iniciava, e outro inferior responsável por coletar toda a água que passou pelo painel. A água foi bombeada a partir do reservatório superior para a tubulação, passando pelo primeiro sensor medidor de fluxo da água, que representava a entrada principal do painel, identificado como FM_S0, conforme pode ser visto na Figura 43, e, por fim, a água então era bombeada do reservatório inferior para o reservatório superior por onde o ciclo de distribuição era novamente iniciado.

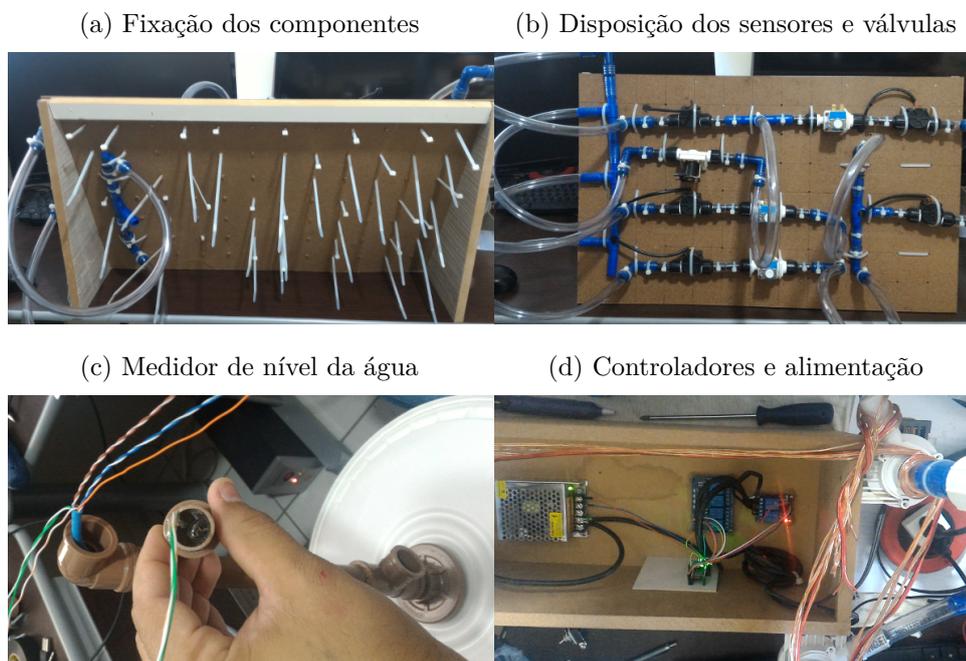
Para evitar o funcionamento indevido das eletrobombas foi desenvolvido dois sensores para medir o nível da água dentro dos reservatórios, com isso o funcionamento das eletrobombas era impedido quando o nível de água no reservatório estivesse muito baixo. Os sensores foram construídos utilizando canos de pvc, cabo de par trançado de 8 fios, parafusos e foram fixados às tampas dos reservatórios.

A Figura 44 ilustra algumas imagens feitas durante a montagem do painel de simulação, na 44a pode ser visto o painel de madeira perfurada utilizada como base de montagem para o painel de simulação, a furação serviu para passagem das abraçadeiras que fixaram os componentes do painel, a seguir, a 44b ilustra parte dos componentes já fixados, nesta imagem pode-se ver que a posição dos sensores e válvulas solenoide foi disposta de modo a seguir o desenho do diagrama do painel, conforme visto anteriormente na Figura 43, na 44c temos a construção dos sensores para medição do nível da água nos reservatórios, e, por fim, na 44d pode ser visto a disposição da fonte de alimentação que forneceu potência para funcionamento de todo o painel, os relés para acionamento das duas eletrobombas e das quatro válvulas solenoides.

Para a construção do painel de simulação foi decidido não utilizar módulos ZigBee para a transmissão de dados, devido ao custo que acrescentariam no projeto final, pois seria necessário adquirir mais um kit de módulos ZigBee, no valor de R\$ 750,00, e mais um módulo extra para configuração na função de coordenador, no valor de R\$ 270,00, totalizando um acréscimo de R\$ 1.020,00 ao projeto.

Como a transmissão de dados pela rede ZigBee já havia sido testada durante os ensaios de laboratório, então não seria necessário mais esse acréscimo de valor ao custo total do projeto, portanto, foi decidido adaptar o módulo sensor do protótipo LWC para realizar a coleta de dados dos medidores de fluxo, *G3/4 Water Flow sensor*, diretamente para as entradas das placas Arduino, utilizando para este fim cabo de par trançado padrão UTP CAT5e. Na Tabela 17 consta a relação de materiais utilizados e seus respectivos preços de custo à época do desenvolvimento deste painel de simulação.

Figura 44: Construção do painel de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra alguns dos passos na construção do painel de simulação, em a) e b) temos a fixação dos sensores e das válvulas solenoide; em c) a construção do sensor para medição de nível da água nos reservatórios; e, por fim, em d) a disposição da fonte de alimentação e dos módulos relés para controle das eletrobombas e válvulas.

6.5.2 Execução da Simulação

O painel de simulação funcionou sem interrupções do dia 10/11/2016 até o dia 16/12/2016, totalizando mais de 870 horas de simulação. O intervalo entre as coletas de dados no sensor variou entre 4 e 6 segundos, essa variação ocorreu devido o tempo de transmissão e recepção do módulo sensor até o módulo concentrador e do processo de armazenamento do dado no sistema gerenciador de banco de dados.

A primeira amostra de leitura foi registrada no banco de dados com o carimbo de data e hora de 10/11/2016 9:46:21, já a última amostra foi registrada com o carimbo de data e hora de 16/12/2016 16:50:50. O total de 3.421.440 (três milhões, quatrocentos e vinte e um e quatrocentos e quarenta) registros foi armazenado no servidor de banco de dados, compondo uma massa de dados com pouco mais que 150MB.

O primeiro ciclo de medições, totalizando 1.024 amostras de leitura, foi gerado em aproximadamente 86 minutos. Essas amostras, armazenadas no SGBD, foram submetidas ao método estatístico para cálculo de Erro Quadrático Médio (EQM)¹⁵, a fim de se

¹⁵ EQM: acrônimo para Erro Quadrático Médio, método estatístico utilizado para avaliar a qualidade dos dados obtidos por um estimador em função dos dados observados, no qual valores ótimos decaem a zero.

Tabela 17: Relação de material e custos do painel de simulação

Qtd.	Descrição	Valor (R\$)
1	Painel e base de madeira	60,00
6	Arduino Pro Mini ATmega328 16MHz	56,00
1	Arduino Nano V 3.0 Rev3 ATmega 328 5V 16MHz	17,00
1	Arduino Uno Rev3 R3 ATmega328	27,00
1	Arduino Ethernet Shield W5100	56,00
4	Válvula Solenóide 3/4 12v	128,00
6	Sensor Fluxo de Água G 3/4	174,00
2	Eletrobomba de Água 220V (maq. de lavar)	56,00
1	Fonte de alimentação 12V/10A	38,00
10 metros	Cabo UTP CAT5e	4,00
-	itens diversos (mangueiras, adaptadores de irrigação, presilhas, fios, canos de PVC, parafusos)	126,00
Total		742,00

Fonte: Elaborado pelo autor

obter um valor médio estimado para a leitura de cada sensor, identificado por FM_Xn , considerando o VAD como dado estimado e VAC como dado observado. Denota-se aqui que o VAD é o volume de água fornecido ao sensor FM_Xn e que VAC é o somatório de todo volume de água consumido sob sua hierarquia de sensores, o que acompanha aquilo definido anteriormente nas Equações 6.2 e 6.3, respectivamente. A fórmula do EQM utilizada pode ser vista na Equação 6.5.

A quantidade de 1.024 amostras foi definida pela limitação de memória do dispositivo Arduino Uno Rev3 R3, utilizado como controlador da rede, e pelo fato das 1.024 amostras serem recuperadas dentro de um intervalo de tempo bastante razoável para a detecção de anomalias na rede de distribuição de água.

$$EQM_{FM_Xn} (\%) = \frac{1}{1024} \sum_{i=1}^{1024} (VAC_{FM_Xn_i} - VAD_{FM_Xn_i})^2 \quad (6.5)$$

A cada 1.024 amostras de leituras, armazenadas no SGBD, o dispositivo coordenador de rede refazia o cálculo do EQM e o informava ao sensor correspondente. Este por sua vez incrementava, a cada 32 amostras, o valor de suas leituras efetuadas em uma variável, e efetuava o cálculo de média aritmética simples, denotado por \overline{VAD}_{FM_Xn} , conforme Equação 6.6, e o cálculo do desvio padrão, denotado por D_{FM_Xn} , conforme Equação 6.7.

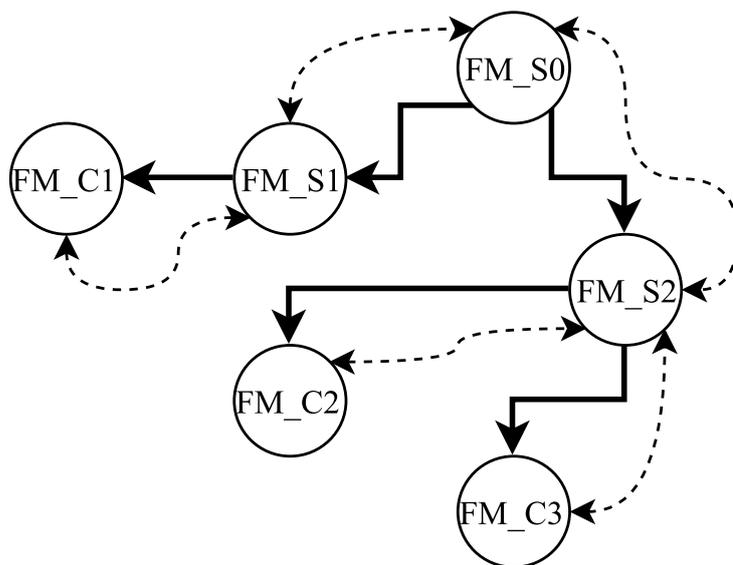
$$\overline{VAD}_{FM_Xn} (m^3) = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} VAD_{FM_Xn_i} \quad (6.6)$$

$$D_{FM_Xn} (\%) = \sqrt{\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} (VAC_{FM_Xn_i} - VAD_{FM_Xn_i})^2} \quad (6.7)$$

O cálculo da média de leitura acrescida do desvio padrão, deveria ser maior que a média de leitura acrescida do EQM, e o cálculo da média de leitura subtraída do desvio padrão, deveria ser menor que a média de leitura subtraída do EQM, caso fossem encontradas médias divergentes em 3 ciclos consecutivos de 1.024 amostras de medições, era então identificado um evento na rede de distribuição que provavelmente indicasse a ocorrência de distúrbios indesejados, como a exemplo de vazamentos.

O funcionamento da arquitetura LWC se beneficia pela troca de dados entre os sensores, seguindo uma hierarquia de relacionamentos que leva em conta a disposição e sentido do fluxo da água dentro do sistema de distribuição. A Figura 45 ilustra uma representação do funcionamento da arquitetura LWC, cada círculo na imagem representa um sensor de fluxo, onde FM_S0 é o sensor principal que mede o fluxo da água na saída do reservatório principal, portanto, mede toda a água entrante no sistema, FM_S1 é o medidor de entrada para o DMA1, denotado pelo FM_C1, e o FM_S2 é o medidor de entrada para os DMA2 e DMA3, denotados respectivamente por FM_C2 e FM_C3, as setas contínuas unidirecionais representam o sentido do fluxo da água, enquanto que as setas tracejadas bidirecionais representam a troca de dados entre os módulos sensores.

Figura 45: Funcionamento da arquitetura LWC



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra o funcionamento da arquitetura LWC, cada círculo na imagem representa um sensor de fluxo, onde FM_S0 é o sensor principal que mede o fluxo de água na saída do reservatório principal, FM_S1 medidor de entrada para o DMA1, FM_S2 medidor de entrada para os DMA2 e DMA3, os demais são medidores finais de consumo.

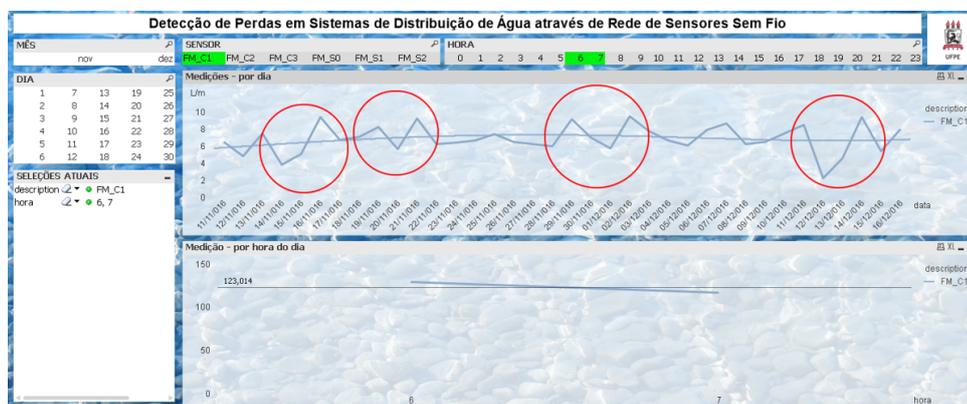
6.5.3 Resultados da simulação

O painel de simulação gerou dados durante pouco mais de 870 horas, tendo um intervalo de amostragem variando entre 4 e 6 segundos, em decorrência do tempo de transmissão e recepção dos dados e do processo de persistência em SGBD. Foram gerados 3.421.440 registros que foram armazenados em SGBD, processados e exibidos em painel de indicadores (BI) para visualização e acompanhamento do trabalho de simulação.

Duas formas para cálculo de médias dos volumes informados pelos sensores foram executadas. A primeira, executada pelo módulo coordenador da rede, utilizava uma versão adaptada do método estatístico para cálculo de Erro Quadrático Médio (EQM), a fim de obter um valor médio estimado para cada sensor de fluxo a partir do histórico de 1.024 amostras de leitura, a segunda forma calculava, diretamente no módulo sensor, a média aritmética simples e o desvio padrão para o universo de 32 amostras de leitura, o que determinava uma margem de confiança em torno do EQM a fim de detectar anomalias na rede de distribuição.

A Figura 46 ilustra uma visão geral da aplicação em BI desenvolvida para monitoramento dos dados coletados pelos sensores, na imagem em questão pode-se notar quatro pontos de interesse destacados que identificam a ocorrência de distúrbios na rede de distribuição de água.

Figura 46: Identificação de bursts



Fonte: Elaborado pelo autor

Esta imagem ilustra uma visão geral da aplicação em BI desenvolvida para monitoramento dos dados coletados pelos sensores, na imagem em questão pode-se notar quatro pontos de interesse destacados.

6.6 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada uma solução para detecção de perdas em sistemas de distribuição de água. A solução proposta se baseia na coleta de dados sobre o fluxo

e vazão da água e na transmissão desses dados a partir de uma rede de sensores sem fio, os dados foram então persistidos em um sistema gerenciador de banco de dados para serem processados e analisados, o que permitiu saber quais trechos da rede de distribuição apresentaram falhas. As informações foram exibidas em um painel de indicadores construído em sistema de *Business Intelligence*.

Comparado ao observado na década de 1950, o consumo de água triplicou em todo o mundo. Diante disto, várias iniciativas de planejamento e controle são propostas com a intenção de minimizar o desperdício e a má gestão dos recursos hídricos. O controle e a medição individual do consumo dos recursos hídricos doméstico apresentam inúmeros problemas e requerem ações mais efetivas, a saber: a) gerenciar a demanda por água; b) minimizar o desperdício de água, devido a consumos inadequados (lavagem de calçadas, veículos, etc. . .), ou vazamentos nas tubulações (aparentes e não-aparentes).

Este trabalho permitiu identificar uma tendência de crescimento no interesse da comunidade em pesquisar soluções mais eficientes para o problema de perdas no sistema de distribuição de água, quando comparada à redução gradual do índice de perdas observado no Brasil nos últimos anos, nota-se que o número de trabalhos científicos aumenta ao passo que o índice de perdas na distribuição cai.

Uma das formas de controlar as perdas é pela setorização da rede em áreas menores chamadas de DMA. Cada DMA pode conter outras subdivisões no intuito de isolar determinadas características da rede, como pressão, volume ou características comerciais, como quantidade de clientes servidos.

A fórmula geral para o cálculo do índice de perdas utilizada neste trabalho considerou o Volume de Água Distribuído (VAD) e o Volume de Água Consumido (VAC), não foi considerado o Consumo Estimado não-medido (CE) nem o fator de correção (K), visto que toda a rede de distribuição utilizada para testes em laboratório foi sensorizada plenamente, portanto, a fórmula geral utilizada está de acordo com o que consta na Equação 6.1, entretanto, esta fórmula representa um contexto geral, é necessário observar que a composição de dados que denotam o abastecimento de água em determinada área está em função do tempo discreto, determinado a partir da captura de dados pelos sensores distribuídos pela rede. Então, após algumas adaptações, segue que o índice de perdas (IP_t), em determinado instante de tempo t , é definido de acordo com o que consta na Equação 6.4.

A arquitetura proposta neste trabalho foi construída considerando quatro camadas: a) a camada de aquisição, (*acquisition layer*); b) a camada *middleware*; c) a camada de comunicação (*communication layer*); e, d) a camada de aplicação, (*application layer*).

A esta arquitetura foi dado o nome de *Local Water Control* e estabelecida a sigla (LWC), que representa uma arquitetura local para controle de água desenvolvida sobre

redes de sensores sem fio, com o propósito de coletar dados, transmitir, processar e observar fenômenos em redes de distribuição de água.

Esta arquitetura foi desenvolvida com o propósito de prover controle local do consumo de água, utilizando rede de sensores sem fio. A fim de validar a eficácia dessa arquitetura foi desenvolvido um protótipo utilizando como base a plataforma Arduino Mega 2560, acrescida de um módulo para redes sem fio ZigBee e do módulo medidor de fluxo da água por meio de sensor de efeito *Hall*.

Implantar a arquitetura LWC em uma rede de distribuição real acarretaria altos custos financeiros e demandaria um intervalo de tempo que excederia o prazo de conclusão do curso de mestrado, por este motivo decidiu-se pela aplicação da arquitetura LWC em um painel de simulação que representasse uma pequena rede de distribuição de água.

O exemplo utilizado contou com um ponto de fornecimento de água, duas grandes áreas de abastecimento contendo três distritos de medição e controle, esses definidos pela utilização de válvulas solenoide no intuito de segmentar a rede através do desvio no fluxo da água.

O painel de simulação funcionou sem interrupções do dia 10/11/2016 até o dia 16/12/2016, totalizando mais de 870 horas de simulação. O intervalo entre as coletas de dados no sensor variou entre 4 e 6 segundos, essa variação ocorreu devido o tempo de transmissão e recepção do módulo sensor até o módulo concentrador e do processo de armazenamento do dado no sistema gerenciador de banco de dados.

Os resultados experimentais sugerem que a arquitetura tem alta estabilidade, fazendo a correta medição do fluxo de água e transmitindo os dados entre os nós distribuídos pela rede. A arquitetura LWC se mostrou eficaz na detecção de anomalias na rede, sendo capaz de identifica-las em até 10 minutos após sua ocorrência.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões finais desta pesquisa de mestrado. A seção 7.1 apresenta as conclusões referentes aos resultados deste trabalho, na seção 7.2 são apresentadas as contribuições, e, por fim, é apresentado na seção 7.3 propostas de trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

Este trabalho aborda a detecção de perdas em sistemas de distribuição de água através de rede de sensores sem fio.

As perdas são de fato inerentes, mas indesejáveis, aos sistemas de abastecimento de água. Constituem o índice de perdas, um dos principais indicadores de desempenho das empresas do setor de saneamento. Reduzir as perdas, em todo o sistema de abastecimento, se mostra como um grande desafio do setor, na medida que afeta diretamente os aspectos social, financeiro e ambiental quando da disponibilidade de água para captação e posterior oferta para o consumo.

As perdas de água são um problema mundial, e de fato, uma das grandes questões de interesse na gestão dos sistemas de abastecimento de água brasileiros. É um tema de interesse recorrente, devido aos constantes problemas de escassez hídrica e aos altos custos da energia elétrica utilizada para a produção de água tratada. Impactam diretamente nos indicadores de performance das empresas de saneamento.

Desde a captação no manancial até a entrega da água tratada ao consumidor final ocorrem perdas, de vários tipos, que em grande parte são causadas por operação e manutenção deficientes nas tubulações e pela inadequada gestão comercial das companhias de saneamento. Por isso, a vinculação entre o nível de perdas em uma companhia de saneamento e sua eficiência operacional é total, ou seja, é de se esperar que os sistemas de abastecimento bem gerenciados e mantidos possuam baixos índices de perdas.

A consequência imediata das perdas é a redução do faturamento nas empresas de saneamento, o que afeta a capacidade de investimentos em avanços no setor e aquisição de novos recursos de financiamentos. Não incorrendo, entretanto, no erro de menosprezar a importância do irreparável impacto no meio ambiente, provocado pelo esgotamento dos mananciais, o que obriga as empresas a buscarem novas fontes para captação de água.

Outra consequência importante das perdas é o impacto social negativo que elas provocam, quando consideradas as questões de saúde humana e animal, escassez alimentar

ligada à baixa produção dos setores de agricultura e pecuária, as implicações nos setores da indústria e comércio provocadas pela indisponibilidade no fornecimento de água, além dos eventuais transtornos inerentes das novas obras de saneamento.

O processo de gestão das perdas passa por identificar e classificar as eventuais ocorrências, para em seguida efetuar uma análise sobre os impactos causados e com isso determinar um grau de priorização para, por fim, atuar na resolução das causas raízes que provocam as perdas.

Para grande parte das empresas de saneamento medir corretamente a quantidade de água não faturada é um forte indicador de desempenho. Entretanto, devem ser observadas as questões de ordem social e política quando das ações de correção de perdas.

As principais técnicas utilizadas para detecção de perdas em sistemas de distribuição de água se baseiam em adaptações sobre o modelo de matriz para balanço hídrico proposto pela IWA e na minimização da complexidade do sistema de distribuição de água através da setorização da rede de distribuição em sistemas menores.

Ambas as técnicas tem como principais objetivos: a) isolar as ocorrências de distúrbios na rede de distribuição de água; e, b) identificar a magnitude da perda de água.

Há um certo nível de incerteza nos valores apresentados pelo balanço hídrico, e isto resulta do fato de que grande parte dos dados referentes ao consumo são estimados ou calculados com base em fórmulas determinadas, de forma particular, por cada empresa de saneamento. Devido a essa incerteza é necessário investir na correta medição desses valores para permitir, de forma mais eficiente, a definição de estratégias necessárias para a gestão de perdas.

Neste sentido, nos últimos anos, as redes de sensores vem sendo bastante utilizadas no intuito de obter dados mais confiáveis sobre pressão e vazão da água na rede de distribuição. Isto provê uma base para a determinação de modelos matemáticos e a simulação, apoiados por algoritmos diversos, a exemplo de inteligência artificial, teoria dos grafos e otimização por algoritmos genéticos.

A implementação das atividades de controle e redução de perdas nas diversas companhias de saneamento ressalta a necessidade da utilização de ferramentas para avaliação das perdas nos sistemas de abastecimento de água. Ferramentas que possam gerar diversos indicadores de desempenho, permitindo comparações, planejamento e avaliação de resultados, além de se estabelecer a metodologia para avaliação da confiabilidade dos indicadores.

Entretanto, o problema na aplicação dessas técnicas está no fato de que grande parte dos dados necessário às análises são coletados com um intervalo de tempo que pode variar bastante, em função da natureza mensal dos processos de faturamento comercial

das empresas de saneamento.

Portanto, neste trabalho foi questionada a possibilidade de detectar automaticamente as perdas em sistemas de distribuição de água.

Tendo em vista obter uma solução para este questionamento, foi proposto como hipótese de pesquisa, que as redes de sensores sem fio poderiam ser utilizadas para detectar automaticamente as perdas em sistemas de distribuição de água.

Este trabalho teve como objetivo geral: desenvolver uma rede composta por sensores sem fio que dotados de processamento local fossem capazes de detectar automaticamente as perdas. A fim de alcançar este objetivo foi realizado:

- a) mapeamento sistemático da literatura, no intuito de identificar evidências sobre quais métodos, estratégias e ferramentas são comumente utilizadas na detecção de perdas em sistemas de distribuição de água;
- b) a construção de um modelo de arquitetura para sensoriamento remoto sem fio, pelo qual foi possível avaliar a hipótese de pesquisa, o modelo de arquitetura foi aplicado em um protótipo funcional;
- c) simular a ocorrência de distúrbios em uma rede de distribuição através de um painel de simulação, no qual foram instalados dispositivos incorporados de uma adaptação para o modelo de arquitetura proposto.

Num primeiro momento foi realizada busca, apoiada pelo modelo para mapeamento sistemático da literatura, no intuito de identificar evidências que apontassem formas eficientes para a detecção de falhas na rede de distribuição e também estratégias para a gestão de perdas. O mapeamento sistemático possibilitou estabelecer:

- a) como as perdas são detectadas, quais são as técnicas utilizadas para gestão das perdas associadas com as principais ferramentas de apoio;
- b) que as redes de sensores sem fio já estão bem difundidas como prática do mercado, e são objeto de várias pesquisas acadêmicas em todo o mundo; entretanto,
- c) os dispositivos comumente utilizados em RSSFs, em sua grande maioria, apenas captam dados e os remetem a centrais remotas para posterior análise, sem fazer maiores inferências locais; ademais,
- d) observou-se uma oportunidade na pesquisa do tema, a respeito da aplicação dos métodos em situações reais, pois a grande maioria dos trabalhos apenas realizam simulação em computador; e, por fim,
- e) as técnicas que utilizam RSSFs se baseiam em análise sobre a variação do consumo e demanda em função do horário ou pela análise dos comportamentos da pressão de água pela rede.

Este trabalho permitiu identificar, como resultado indireto, uma tendência de crescimento no interesse da comunidade em pesquisar soluções mais eficientes para o problema de perdas no sistema de distribuição de água, quando comparada à redução gradual do índice de perdas observado no Brasil nos últimos anos, nota-se que o número de trabalhos científicos aumenta ao passo que o índice de perdas na distribuição cai.

Com base nos estudos analisados foi apresentada uma arquitetura para controle local do consumo de água, que dotada de processamento local se mostrou capaz de detectar automaticamente as perdas. A arquitetura proposta neste trabalho foi construída considerando quatro camadas:

- a) a camada de aquisição, *acquisition layer*;
- b) a camada *middleware*;
- c) a camada de comunicação, *communication layer*; e,
- d) e a camada de aplicação, *application layer*.

A essa arquitetura foi dado o nome de *Local Water Control* e estabelecida a sigla (LWC), que representa uma arquitetura local para controle de água desenvolvida sobre redes de sensores sem fio com o propósito de coletar dados, transmitir, processar e observar fenômenos em redes de distribuição de água.

A fim de validar a proposta, a arquitetura foi inicialmente aplicada em um protótipo funcional de dispositivo sensor, utilizando como base de desenvolvimento a plataforma Arduino acrescida de módulo para redes sem fio ZigBee e medidor para fluxo da água por meio de sensor de efeito *Hall*, e posteriormente o modelo de arquitetura foi adaptado em um painel de simulação, contendo diversos dispositivos sensores, com o propósito de validar a aplicação da arquitetura LWC em uma rede de distribuição real.

A solução proposta se baseou na coleta dados sobre o fluxo e vazão da água e na transmissão desses dados a partir de uma rede de sensores sem fio, os dados coletados foram então persistidos em um sistema gerenciador de banco de dados para serem processados e analisados, permitindo saber quais trechos da rede de distribuição apresentaram falhas, por fim, as informações foram exibidas em um painel de indicadores construído em sistema de *Business Intelligence*.

Após uma sessão de simulação que durou 870 horas, foram coletados o total de 3.421.440 (três milhões, quatrocentos e vinte e um e quatrocentos e quarenta) registros compondo uma massa de dados com pouco mais que 150MB armazenados em SGDB.

Os resultados experimentais sugerem que a arquitetura LWC tem alta estabilidade, fazendo a correta medição do fluxo de água e transmitindo os dados entre os nós distribuídos pela rede. A arquitetura LWC se mostrou eficaz na detecção de anomalias na rede, sendo capaz de identifica-la em até 10 minutos após sua ocorrência.

7.2 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho está na oportunidade de melhorar os indicadores de performance, que as empresas do setor de saneamento passam a ter aplicando este novo método para detecção automática de perdas em seus sistemas de distribuição de água.

Aplicando este novo método proposto é possível detectar as perdas automaticamente, reduzindo a necessidade de inferência humana, deste modo possibilitando tomadas de decisão mais precisas e em tempo real.

Outra contribuição importante se deu em função do levantamento bibliográfico a respeito da detecção de perdas em sistemas de distribuição de água, realizado durante o mapeamento sistemático da literatura, onde se conseguiu identificar como são detectadas, quais estratégias são utilizadas para combater as perdas, e quais são as principais ferramentas ou métodos que auxiliam na detecção ou combate às perdas nos sistemas de distribuição de água.

Implantar a arquitetura LWC em uma rede de distribuição real acarretaria altos custos financeiros e demandaria um intervalo de tempo que excederia o prazo de conclusão do curso de mestrado, por este motivo decidiu-se pela aplicação da arquitetura LWC em um painel de simulação que representasse uma pequena rede de distribuição de água.

O exemplo utilizado contou com um ponto para fornecimento de água, duas grandes áreas de abastecimento contendo três representações para distritos de medição e controle, definidos pela utilização de válvulas solenoide, que promoviam o desvio do fluxo da água, finalizando pela disposição de sensores para medir o fluxo da água.

E por fim foi desenvolvido um protótipo funcional de dispositivo embarcado com o propósito de sensoriar o fluxo da água em uma rede de distribuição e identificar automaticamente a ocorrência de distúrbios que apontassem perdas. As empresas do setor de saneamento podem fazer uso desse dispositivo no intuito de melhorar seus índices de controle das perdas.

O macroprocesso para detecção das perdas, implantado no painel de simulação, foi dividido em ciclos recorrentes de: a) coleta dos dados sensoriados pelos dispositivos sensores; b) cálculo da confiança dos dados estimados através de algoritmo EQM; c) verificação da mudança nas médias de leitura nos sensores, através do cálculo de média aritmética simples e desvio padrão; d) propagação, na rede de sensores, das análises locais e imediatas de cada dispositivo sensor.

7.3 Trabalhos futuros

Desafios com relação ao projeto:

- a) aplicar o projeto em uma rede de distribuição de água real e avaliar seus resultados, efetuando análise comparativa com outros métodos para detecção de perdas;
- b) desenvolver o projeto do protótipo tendo em vista oferecer um produto viável para o mercado;
- c) desenvolver um painel de indicadores para acompanhamento em tempo real de dados provenientes das RSSFs dos sistemas de distribuição de água.

Durante os estudos do material bibliográfico foi identificada uma lacuna com relação à segurança dos dispositivos em RSSFs, considerando o tráfego de dados e a validação da comunicação entre os diversos dispositivos conectados em rede.

Em estudos recentes, foram detectadas novas formas para garantir segurança da aplicação através de criptografia. Uma estratégia, ainda em investigação, aponta para utilização de chaves privadas mantidas no dispositivo com objetivo de validar sua identidade entre os diversos nós da rede e, uma chave pública destinada à verificar e descriptografar a identidade pública do dispositivo. Outra abordagem identificada diz respeito à transparência da informação, frente aos modelos de segurança atuais que presam pela manutenção dos dados sob protocolos rígidos e fechados.

REFERÊNCIAS

ABES. *Perdas em sistemas de abastecimento de água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate*. [S.l.], 2013. 45 p.

Citado 5 vezes nas páginas 19, 27, 38, 39 e 87.

ABES. *Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água*. [S.l.], 2015. 99 p.

Citado 2 vezes nas páginas 27 e 36.

ALLEN, M. et al. Water distribution system monitoring and decision support using a wireless sensor network. In: *2013 14th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing*. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 641–646. ISBN 978-0-7695-5005-3.

Citado 5 vezes nas páginas 70, 74, 77, 82 e 83.

AMINZADEH, R.; KASHEFI, F.; ALEE, H. Hydraulic pressure distribution for pipeline networks by wireless sensor networks. In: *2010 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*. [S.l.]: IEEE, 2010. p. 1–5. ISBN 978-1-4244-8565-9.

Citado 2 vezes nas páginas 57 e 88.

AMRUTA, M. K.; SATISH, M. T. Solar powered water quality monitoring system using wireless sensor network. In: *2013 International Mutli-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s)*. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 281–285. ISBN 978-1-4673-5090-7.

Citado 2 vezes nas páginas 59 e 89.

ARSENE, C. T.; GABRYS, B.; AL-DABASS, D. Decision support system for water distribution systems based on neural networks and graphs theory for leakage detection. *Expert Systems with Applications*, v. 39, n. 18, p. 13214–13224, 12 2012. ISSN 09574174.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 72, 81 e 83.

BÁGGIO, M. A. *Redução de perdas em sistemas de abastecimento de água*. 2. ed. Brasília, 2014. 172 p.

Citado 4 vezes nas páginas 36, 43, 44 e 89.

BIOLCHINI, J. et al. *Systematic Review in Software Engineering*. Rio de Janeiro, 2005. RT - ES 67, n. May, 31 p.

Citado na página 21.

BRASIL. *Lei Nº 11.445, de 5 de Janeiro de 2007*. Brasília: Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 2007. 1–17 p. Web page.

Citado na página 25.

BRASIL. *Decreto Nº 7.217, de 21 de Junho de 2010*. Brasília: Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 2010. 1–24 p. Web page.

Citado na página 25.

BRASIL. *Sistema nacional de informações sobre saneamento: Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2013*. Brasília, 2014. 181 p.

Citado 3 vezes nas páginas 26, 38 e 43.

BRUMBELOW, K. et al. Virtual cities for water distribution and infrastructure system research. In: *World Environmental and Water Resources Congress 2007*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2007. p. 1–7. ISBN 9780784409275.

Citado na página 79.

COMPESA. *Sistema de Informações Operacionais - SIP*. 21. ed. Recife, 2016. 126 p.

Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.

EPA, U. S. E. P. A. *Control and Mitigation of Drinking Water Losses in Distribution Systems*. [S.l.], 2010. 1–128 p.

Citado na página 18.

European Commission. *EU Reference document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM*. [S.l.], 2015. 117 p.

Citado 4 vezes nas páginas 20, 37, 41 e 43.

FARLEY, M. et al. *The Manager's Non-Revenue Water Handbook Handbook: A Guide to Understanding Water Losses*. [S.l.], 2008. 110 p.

Citado na página 45.

FRANGIPANI, M. *Macromedição*. Brasília, 2007. 78 p. (Guias práticos: técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água).

Citado na página 65.

FUNASA, F. N. d. S. *Manual de Saneamento*. 3. ed. Brasília, 2004. 408 p.

Citado na página 25.

GARG, P.; SAROHA, K.; LOCHAB, R. Review of wireless sensor networks-architecture and applications. *International Journal of Computer Science and Management Studies*, v. 11, n. 01, p. 34–38, 5 2011. ISSN 2231-5268.

Citado 2 vezes nas páginas 49 e 52.

GERTLER, J. et al. Leak detection and isolation in water distribution networks using principal component analysis and structured residuals. In: *2010 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 191–196. ISBN 978-1-4244-8153-8. ISSN 2162-1195.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 74, 82 e 83.

GHAZALI, M. F. et al. Comparative study of instantaneous frequency based methods for leak detection in pipeline networks. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 29, p. 187–200, 2012. ISSN 08883270.

Citado 2 vezes nas páginas 70 e 75.

GONG, W. et al. Mobile sensor networks for optimal leak and backflow detection and localization in municipal water networks. *Environmental Modelling and Software*, v. 80, p. 306–321, 2016. ISSN 13648152.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 72, 81 e 83.

GOULET, J. A.; COUTU, S.; SMITH, I. F. C. Model falsification diagnosis and sensor placement for leak detection in pressurized pipe networks. *Advanced Engineering Informatics*, v. 27, n. 2, p. 261–269, 2013. ISSN 14740346.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 72, 81 e 83.

IBM, I. B. M. C. *MQTT For Sensor Networks (MQTT-SN) Protocol Specification*. [S.l.], 2013. 28 p.

Citado na página 59.

IEEE Computer Society. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. [S.l.]: IEEE, 2011. 314 p. ISBN 978-0-7381-6683-4.

Citado na página 53.

IERC, E. R. C. o. t. I. o. T. *Internet of Things - IoT Semantic Interoperability: Research Challenges, Best Practices, Recommendations and Next Steps*. [S.l.], 2015. v. 1, 48 p.

Citado na página 52.

JIN, Y.; YUMEI, W.; PING, L. Approximate entropy-based leak detection using artificial neural network in water distribution pipelines. In: *2010 11th International Conference on Control Automation Robotics and Vision*. [S.l.]: IEEE, 2010. p. 1029–1034. ISBN 978-1-4244-7814-9.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 74, 82 e 83.

JÚNIOR, J. d. C. d. S. *Distritos de medição e controle como ferramenta de gestão de perdas em redes de distribuição de água*. 182 p. Tese (Dissertação) — Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - FEC, 2014.

Citado 2 vezes nas páginas 20 e 43.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. 2.3. ed. [S.l.], 2007.

Citado 3 vezes nas páginas 22, 63 e 64.

KOTIS, K.; KATASONOV, A. An ontology for the automated deployment of applications in heterogeneous iot environments. *Semantic Web – Interoperability, Usability, Applicability an IOS Press Journal*, p. 14, 2012.

Citado na página 92.

MESEGUER, J. et al. A decision support system for on-line leakage localization. *Environmental Modelling and Software*, v. 60, p. 331–345, 10 2014. ISSN 13648152.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 73, 81 e 83.

MOUNCE, S. R.; BOXALL, J. B.; MACHELL, J. Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 136, n. 3, p. 309–318, 2010. ISSN 0733-9496.

Citado 2 vezes nas páginas 70 e 75.

NAZIF, S. et al. Pressure management model for urban water distribution networks. *Water Resources Management*, v. 24, n. 3, p. 437–458, 2 2010. ISSN 0920-4741.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 77, 82 e 83.

PERELMAN, L.; AMIN, S. A network interdiction model for analyzing the vulnerability of water distribution systems. In: *Proceedings of the 3rd international conference on High confidence networked systems - HiCoNS '14*. New York, New York, USA: ACM Press, 2014. p. 135–144. ISBN 9781450326520.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 73, 81 e 83.

PERNAMBUCO. *Decreto N^o 36.284, de 2 de Março de 2011*. 2011. 1 p.

Citado na página 82.

PIRES, P. F. et al. Plataformas para a internet das coisas. *Anais do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, p. 110–169, 2015.

Citado na página 95.

PRODON, A.; DENEGRÉ, S.; LIEBLING, T. M. Locating leak detecting sensors in a water distribution network by solving prize-collecting steiner arborescence problems. *Mathematical Programming*, v. 124, n. 1-2, p. 119–141, 2010. ISSN 00255610.

Citado 5 vezes nas páginas 70, 74, 80, 82 e 83.

QUEVEDO, J. et al. Methodology to detect and isolate water losses in water hydraulic networks: Application to barcelona water network. In: *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 8, n. PART 1, p. 922–927. ISBN 9783902823090. ISSN 14746670.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 73, 81 e 83.

RAMOS, J. d. S. B. *Sistema digital de instrumentação sem fio de uma mola Helicoidal TI-NI usando tecnologia zigbee, usb e linux*. 114 p. Tese (Dissertação) — Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

Citado 2 vezes nas páginas 99 e 100.

REDDY, B. P.; ESWARAN, P. Metro overhead tanks monitoring system using zigbee based wsn. In: *2013 IEEE Conference on Information and Communication Technologies*. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 367–371. ISBN 978-1-4673-5758-6.

Citado 2 vezes nas páginas 58 e 89.

ROSICH, A.; PUIG, V. Model-based leakage localization in drinking water distribution networks using structured residuals. *Control Conference (ECC), 2013 European*, p. 410 – 415, 2013. ISSN 10991115.

Citado 4 vezes nas páginas 70, 73, 82 e 83.

SASTRY, N.; WAGNER, D. Security considerations for iee 802.15.4 networks. *ACM workshop on Wireless security (WiSe)*, p. 32, 2004.

Citado na página 53.

Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. *Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2014*. Brasília, 2014.

Citado 4 vezes nas páginas 37, 38, 43 e 89.

SHARMA, R.; THAKUR, N.; KUMAR, S. Review paper on wireless sensor networks. In: SINGH, R. K. (Ed.). *Proceedings of the International Conference on Recent Trends In Computing and Communication Engineering*. Hamirpur: [s.n.], 2013. p. 254–258.

Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 51.

SHARMA, R.; TRIPATHI, N. Comprehensive review on wireless sensor networks. *Oriental Journal of Computer Science and Technology*, Techno Research Publishers, Bhopal, India, v. 8, n. 1, p. 59–64, 4 2015. ISSN 0974-6471.

Citado na página 52.

SILVA, B. O. C. et al. *Controle de Perdas de Água em Sistemas de Distribuição*. [S.l.], 2003.

Citado na página 41.

SILVA, F. et al. Tecnologia de nós sensores sem fio. *Controle e Instrumentação*, p. 1–26, 2004.

Citado na página 49.

SILVA, M. N. da. *Mensuração de perdas de água sob o enfoque da contabilidade gerencial: uma pesquisa-ação na companhia de saneamento de Pernambuco*. 127 p. Tese (Dissertação) — Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

Citado 2 vezes nas páginas 20 e 43.

SURESH, M. A. et al. On event detection and localization in acyclic flow networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, v. 43, n. 3, p. 708–723, 5 2013. ISSN 2168-2216.

Citado na página 79.

TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de Água*. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 643 p. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 46.

VICENTINI, L. P. *Componentes do balanço hídrico para avaliação de perdas em sistemas de abastecimento de água*. 196 p. Tese (Dissertação) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 43.

WHO, W. H. O. *Guidelines for drinking-water quality*. 4. ed. Geneva, 2011.

Citado na página 18.

XIA, L.; GUOJIN, L.; XINHUA, Z. State estimation of municipal water supply network based on bp neural network and genetic algorithm. In: *2011 International Conference on Internet Computing and Information Services*. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 403–406. ISBN 978-1-4577-1561-7.

Citado 2 vezes nas páginas 70 e 74.

YANG, D. et al. Two-tiered constrained relay node placement in wireless sensor networks: Computational complexity and efficient approximations. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 11, n. 8, p. 1399–1411, 8 2012. ISSN 1536-1233.

Citado na página 70.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 8 2008. ISSN 1389-1286.

Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.

YINBIAO, S. et al. *Internet of Things: Wireless Sensor Networks*. Geneva, 2014. 1–78 p.

Citado na página 52.

ZHENG, G.; ZHANG, Z. Intelligent wireless electric power management and control system based on zigbee technology. In: *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*. Changchun, China: IEEE, 2011. p. 1120–1124. ISBN 978-1-4577-1701-7.

Citado 2 vezes nas páginas 58 e 88.

Zhonghua He, Y. Y.; ZHAO, H. Analysis of lifecycle model for water distribution systems. In: *International Conference on Pipelines and Trenchless Technology – ICPTT 2011*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 2193–2198.

Citado 2 vezes nas páginas 70 e 77.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO DO MÓDULO SENSOR

Algoritmo A.1: sensor.c

```

1 #include "SoftwareSerial.h"
2 #include "PubSubClient.h"
3
4 const int sensorPino = 2;
5 const int RX = 2;
6 const int TX = 3;
7
8 const char* MQTT_SERVER = "iot.192.168.1.1";
9
10 int value = 0;
11 long lastMsg = 0;
12 char msg[50];
13
14 volatile int sensorSinal;
15 float fluxoAgua = 0;
16
17 SoftwareSerial SerialXBee(RX, TX);
18 Pubsubclient MQTT(CLIENT);
19
20 void rpm();
21
22 void setup() {
23   pinMode(sensorPino, INPUT);
24   attachInterrupt(0, rpm, RISING);
25   SerialXBee.begin(9600);
26 }
27
28 void reconectar() {
29   while (!MQTT.connected()) {
30     Serial.println("Conectando ao Broker MQTT.");
31     if (MQTT.connect("Sensor")) {
32       Serial.println("Conectado com Sucesso ao Broker");
33     } else {
34       Serial.print("Falha ao Conectador, rc=");
35       Serial.print(MQTT.state());
36       Serial.println(" tentando se reconectar...");
37       delay(3000);
38     }
39   }
40 }
41

```

```
42 void loop() {
43     sensorSinal = 0;
44     sei();
45     delay(800);
46     cli();
47     fluxoAgua = (sensorSinal * 60 / 5.5);
48     SerialXBee.write("");
49     SerialXBee.write("SensorA: ");
50     SerialXBee.write(fluxoAgua);
51     SerialXBee.write(" litros/hora | ");
52     SerialXBee.write(fluxoAgua/1000);
53     SerialXBee.write(" m^3/hora");
54
55     if (!MQTT.connected()) {
56         reconectar();
57     }
58     MQTT.loop();
59     long now = millis();
60     if (now - lastMsg > 1000) {
61         lastMsg = now;
62         value++;
63         if(value >= 50) value = -20;
64         snprintf (msg, 75, "%ld", value);
65         Serial.print("SensorA: ");
66         Serial.println(fluxoAgua);
67         Serial.print("Litros/hora | ");
68         Serial.println(fluxoAgua/1000);
69         Serial.print("m^3/hora");
70         MQTT.publish("temp/random", msg);
71     }
72 }
73
74 void rpm() {
75     sensorSinal++;
76 }
```

APÊNDICE B – CÓDIGO DO MÓDULO MONITOR

Algoritmo B.1: monitor-remoto.c

```

1 #include <SPI.h>
2 #include <Ethernet.h>
3
4 const int analogInPin = A0;
5 const int analogOutPin = 9;
6
7 byte mac[] = {0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED};
8 IPAddress ip(192, 168, 25, 201);
9
10 int sensorValue = 0;
11 int outputValue = 0;
12
13 EthernetServer server(80);
14
15 void setup() {
16   Serial.begin(9600);
17   while (!Serial) {
18     ;
19   }
20   Ethernet.begin(mac, ip);
21   server.begin();
22   Serial.print("Servidor executando no IP: ");
23   Serial.println(Ethernet.localIP());
24 }
25
26 void loop() {
27   EthernetClient client = server.available();
28   if (client) {
29     Serial.println(Ethernet.localIP());
30     boolean currentLineIsBlank = true;
31     while (client.connected()) {
32       if (client.available()) {
33         char c = client.read();
34         if (c == '\n' && currentLineIsBlank) {
35           client.println("HTTP/1.1 200 OK");
36           client.println("Content-Type: text/html");
37           client.println("Connection: close");
38           client.println("Refresh: 5");
39           client.println();
40           client.println("<!DOCTYPE html>");
41           client.println("<html lang='en'>");

```

```

42 client.println("<head>");
43 client.println("    <meta charset="utf-8">");
44 client.println("    <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content
    ↪ ="IE=edge">");
45 client.println("    <meta name="viewport" content="width=
    ↪ device-width, initial-scale=1">");
46 client.println("    <title>EE1057 - Projeto</title>");
47 client.println("    <link href="https://maxcdn.bootstrapcdn.
    ↪ com/bootstrap/3.3.5/css/bootstrap.min.css" rel="
    ↪ stylesheet">");
48 client.println("    <link href="https://maxcdn.bootstrapcdn.
    ↪ com/bootstrap/3.3.5/css/bootstrap-theme.min.css" rel="
    ↪ stylesheet">");
49 client.println("    <!--[if lt IE 9]>");
50 client.println("        <script src="https://oss.maxcdn.com/
    ↪ html5shiv/3.7.2/html5shiv.min.js"></script>");
51 client.println("        <script src="https://oss.maxcdn.com/
    ↪ respond/1.4.2/respond.min.js"></script>");
52 client.println("    <![endif]-->");
53 client.println(" </head>");
54 client.println(" <body>");
55 client.println(" <div class="container">");
56 client.println("     <div class="jumbotron">");
57 client.println("");
58 client.println("         <h1>Deteccao de perdas em sistemas de
    ↪ distribuicao de agua atraves de redes de sensores sem
    ↪ fio</h1>");
59 client.println("         <h2>Rede para sensoriamento da
    ↪ distribuicao de agua</h2>");
60 client.println("     </div>");
61 client.println("     <div class="row">");
62 client.println("         <div class="col-sm-4">");
63 client.println("             <h3>Sensor 1</h3>");
64 client.println("             <p>");
65 for (int analogChannel = 0; analogChannel < 6; analogChannel
    ↪ ++) {
66     int sensorReading = analogRead(analogChannel);
67     client.print("analog input ");
68     client.print(analogChannel);
69     client.print(" is ");
70     client.print(sensorReading);
71     client.println("</br>");
72 }
73 client.println("         </p>");
74 client.println("     </div>");
75 client.println(" </div>");
76 client.println(" <div class="row">");

```

```
77     client.println("         <div class=\"col-sm-4\">");
78     client.println("         <h3>Sensor 2</h3>");
79     client.println("         <p>");
80     sensorValue = analogRead(analogInPin);
81     outputValue = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 255);
82     analogWrite(analogOutPin, outputValue);
83     client.println("sensor = ");
84     client.println(sensorValue);
85     client.println(" output = ");
86     client.println(outputValue);
87     client.println("         </p>");
88     client.println("         </div>");
89     client.println("     </div>");
90     client.println(" </div>");
91     client.println("     <script src=\"https://ajax.googleapis.com/
    ↪ ajax/libs/jquery/1.11.3/jquery.min.js\"></script>");
92     client.println("     <script src=\"https://maxcdn.bootstrapcdn.
    ↪ com/bootstrap/3.3.5/js/bootstrap.min.js\"></script>");
93     client.println(" </body>");
94     client.println("</html>");
95     break;
96 }
97 if (c == '\n') {currentLineIsBlank = true;}
98 else if (c != '\r') {currentLineIsBlank = false;}
99 }
100 }
101 delay(2);
102 client.stop();
103 }
104 }
```

APÊNDICE C – CÓDIGO DA TABELA SENSORS

Algoritmo C.1: sensors.sql

```

1 CREATE DATABASE IF NOT EXISTS 'lwc' /*!40100 DEFAULT CHARACTER SET utf8
   ↪ */;
2 USE 'lwc';
3 -- MySQL dump 10.13 Distrib 5.6.24, for Win64 (x86_64)
4 --
5 -- Host: iot.192.168.1.1 Database: lwc
6 -----
7 -- Server version 5.5.54-0ubuntu0.14.04.1
8
9 /*!40101 SET @OLD_CHARACTER_SET_CLIENT=@@CHARACTER_SET_CLIENT */;
10 /*!40101 SET @OLD_CHARACTER_SET_RESULTS=@@CHARACTER_SET_RESULTS */;
11 /*!40101 SET @OLD_COLLATION_CONNECTION=@@COLLATION_CONNECTION */;
12 /*!40101 SET NAMES utf8 */;
13 /*!40103 SET @OLD_TIME_ZONE=@@TIME_ZONE */;
14 /*!40103 SET TIME_ZONE='+00:00' */;
15 /*!40014 SET @OLD_UNIQUE_CHECKS=@@UNIQUE_CHECKS, UNIQUE_CHECKS=0 */;
16 /*!40014 SET @OLD_FOREIGN_KEY_CHECKS=@@FOREIGN_KEY_CHECKS,
   ↪ FOREIGN_KEY_CHECKS=0 */;
17 /*!40101 SET @OLD_SQL_MODE=@@SQL_MODE, SQL_MODE='NO_AUTO_VALUE_ON_ZERO'
   ↪ */;
18 /*!40111 SET @OLD_SQL_NOTES=@@SQL_NOTES, SQL_NOTES=0 */;
19
20 --
21 -- Table structure for table 'sensors'
22 --
23
24 DROP TABLE IF EXISTS 'sensors';
25 /*!40101 SET @saved_cs_client = @@character_set_client */;
26 /*!40101 SET character_set_client = utf8 */;
27 CREATE TABLE 'sensors' (
28   'idsensors' int(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT,
29   'description' varchar(45) NOT NULL,
30   'idsensorsback' int(11) DEFAULT NULL,
31   PRIMARY KEY ('idsensors'),
32   KEY 'FK_IDSensorsBACK_idx' ('idsensorsback'),
33   CONSTRAINT 'FK_IDSensorsBACK' FOREIGN KEY ('idsensorsback') REFERENCES
   ↪ 'sensors' ('idsensors') ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION
34 ) ENGINE=InnoDB AUTO_INCREMENT=7 DEFAULT CHARSET=utf8;
35 /*!40101 SET character_set_client = @saved_cs_client */;
36
37 /*!40103 SET TIME_ZONE=@OLD_TIME_ZONE */;

```

```
38
39 /*!40101 SET SQL_MODE=@OLD_SQL_MODE */;
40 /*!40014 SET FOREIGN_KEY_CHECKS=@OLD_FOREIGN_KEY_CHECKS */;
41 /*!40014 SET UNIQUE_CHECKS=@OLD_UNIQUE_CHECKS */;
42 /*!40101 SET CHARACTER_SET_CLIENT=@OLD_CHARACTER_SET_CLIENT */;
43 /*!40101 SET CHARACTER_SET_RESULTS=@OLD_CHARACTER_SET_RESULTS */;
44 /*!40101 SET COLLATION_CONNECTION=@OLD_COLLATION_CONNECTION */;
45 /*!40111 SET SQL_NOTES=@OLD_SQL_NOTES */;
```

APÊNDICE D – CÓDIGO DA TABELA DATASTREAM

Algoritmo D.1: datastream.sql

```

1 CREATE DATABASE IF NOT EXISTS 'lwc' /*!40100 DEFAULT CHARACTER SET utf8
   ↪ */;
2 USE 'lwc';
3 -- MySQL dump 10.13 Distrib 5.6.24, for Win64 (x86_64)
4 --
5 -- Host: iot.192.168.1.1 Database: lwc
6 -- -----
7 -- Server version 5.5.54-0ubuntu0.14.04.1
8
9 /*!40101 SET @OLD_CHARACTER_SET_CLIENT=@@CHARACTER_SET_CLIENT */;
10 /*!40101 SET @OLD_CHARACTER_SET_RESULTS=@@CHARACTER_SET_RESULTS */;
11 /*!40101 SET @OLD_COLLATION_CONNECTION=@@COLLATION_CONNECTION */;
12 /*!40101 SET NAMES utf8 */;
13 /*!40103 SET @OLD_TIME_ZONE=@@TIME_ZONE */;
14 /*!40103 SET TIME_ZONE='+00:00' */;
15 /*!40014 SET @OLD_UNIQUE_CHECKS=@@UNIQUE_CHECKS, UNIQUE_CHECKS=0 */;
16 /*!40014 SET @OLD_FOREIGN_KEY_CHECKS=@@FOREIGN_KEY_CHECKS,
   ↪ FOREIGN_KEY_CHECKS=0 */;
17 /*!40101 SET @OLD_SQL_MODE=@@SQL_MODE, SQL_MODE='NO_AUTO_VALUE_ON_ZERO'
   ↪ */;
18 /*!40111 SET @OLD_SQL_NOTES=@@SQL_NOTES, SQL_NOTES=0 */;
19
20 --
21 -- Table structure for table 'datastream'
22 --
23
24 DROP TABLE IF EXISTS 'datastream';
25 /*!40101 SET @saved_cs_client = @@character_set_client */;
26 /*!40101 SET character_set_client = utf8 */;
27 CREATE TABLE 'datastream' (
28   'iddatastream' int(11) NOT NULL AUTO_INCREMENT,
29   'idsensors' int(11) NOT NULL,
30   'datastream' float NOT NULL,
31   'timestamp' timestamp NOT NULL DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP ON UPDATE
   ↪ CURRENT_TIMESTAMP,
32   PRIMARY KEY ('iddatastream'),
33
34   KEY 'FK_IDSSENSORS_idx' ('idsensors'),

```

```
35  CONSTRAINT 'FK_IDSensors' FOREIGN KEY ('idsensors') REFERENCES '  
    ↪ sensors' ('idsensors') ON DELETE NO ACTION ON UPDATE NO ACTION  
36 ) ENGINE=InnoDB AUTO_INCREMENT=3421441 DEFAULT CHARSET=utf8;  
37 /*!40101 SET character_set_client = @saved_cs_client */;  
38  
39 /*!40103 SET TIME_ZONE=@OLD_TIME_ZONE */;  
40  
41 /*!40101 SET SQL_MODE=@OLD_SQL_MODE */;  
42 /*!40014 SET FOREIGN_KEY_CHECKS=@OLD_FOREIGN_KEY_CHECKS */;  
43 /*!40014 SET UNIQUE_CHECKS=@OLD_UNIQUE_CHECKS */;  
44 /*!40101 SET CHARACTER_SET_CLIENT=@OLD_CHARACTER_SET_CLIENT */;  
45 /*!40101 SET CHARACTER_SET_RESULTS=@OLD_CHARACTER_SET_RESULTS */;  
46 /*!40101 SET COLLATION_CONNECTION=@OLD_COLLATION_CONNECTION */;  
47 /*!40111 SET SQL_NOTES=@OLD_SQL_NOTES */;
```

ANEXOS

ANEXO A – CÓDIGO DA BIBLIOTECA MQTT

Algoritmo A.1: LICENSE.txt

```
1 Copyright (c) 2008-2015 Nicholas O'Leary
2
3 Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining
4 a copy of this software and associated documentation files (the
5 "Software"), to deal in the Software without restriction, including
6 without limitation the rights to use, copy, modify, merge, publish,
7 distribute, sublicense, and/or sell copies of the Software, and to
8 permit persons to whom the Software is furnished to do so, subject to
9 the following conditions:
10
11 The above copyright notice and this permission notice shall be
12 included in all copies or substantial portions of the Software.
13
14 THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND,
15 EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF
16 MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND
17 NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE
18 LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION
19 OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION
20 WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE.
```

Algoritmo A.2: PubSubClient.cpp

```

1 #include "PubSubClient.h"
2 #include "Arduino.h"
3
4 PubSubClient::PubSubClient() {
5     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
6     this->_client = NULL;
7     this->stream = NULL;
8     setCallback(NULL);
9 }
10
11 PubSubClient::PubSubClient(Client& client) {
12     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
13     setClient(client);
14     this->stream = NULL;
15 }
16
17 PubSubClient::PubSubClient(IPAddress addr, uint16_t port, Client& client
18     ↪ ) {
19     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
20     setServer(addr, port);
21     setClient(client);
22     this->stream = NULL;
23 }
24
25 PubSubClient::PubSubClient(IPAddress addr, uint16_t port, Client& client
26     ↪ , Stream& stream) {
27     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
28     setServer(addr, port);
29     setClient(client);
30     setStream(stream);
31 }
32
33 PubSubClient::PubSubClient(IPAddress addr, uint16_t port,
34     ↪ MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client& client) {
35     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
36     setServer(addr, port);
37     setCallback(callback);
38     setClient(client);
39     this->stream = NULL;
40 }
41
42 PubSubClient::PubSubClient(IPAddress addr, uint16_t port,
43     ↪ MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client& client, Stream& stream) {
44     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
45     setServer(addr, port);
46     setCallback(callback);
47     setClient(client);
48     setStream(stream);
49 }

```

```

43
44 PubSubClient::PubSubClient(uint8_t *ip, uint16_t port, Client& client) {
45     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
46     setServer(ip, port);
47     setClient(client);
48     this->stream = NULL;
49 }
50 PubSubClient::PubSubClient(uint8_t *ip, uint16_t port, Client& client,
    ↪ Stream& stream) {
51     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
52     setServer(ip, port);
53     setClient(client);
54     setStream(stream);
55 }
56 PubSubClient::PubSubClient(uint8_t *ip, uint16_t port,
    ↪ MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client& client) {
57     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
58     setServer(ip, port);
59     setCallback(callback);
60     setClient(client);
61     this->stream = NULL;
62 }
63 PubSubClient::PubSubClient(uint8_t *ip, uint16_t port,
    ↪ MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client& client, Stream& stream) {
64     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
65     setServer(ip, port);
66     setCallback(callback);
67     setClient(client);
68     setStream(stream);
69 }
70
71 PubSubClient::PubSubClient(const char* domain, uint16_t port, Client&
    ↪ client) {
72     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
73     setServer(domain, port);
74     setClient(client);
75     this->stream = NULL;
76 }
77 PubSubClient::PubSubClient(const char* domain, uint16_t port, Client&
    ↪ client, Stream& stream) {
78     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
79     setServer(domain, port);
80     setClient(client);
81     setStream(stream);
82 }
83 PubSubClient::PubSubClient(const char* domain, uint16_t port,
    ↪ MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client& client) {

```

```

84     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
85     setServer(domain,port);
86     setCallback(callback);
87     setClient(client);
88     this->stream = NULL;
89 }
90 PubSubClient::PubSubClient(const char* domain, uint16_t port,
    ↪ MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client& client, Stream& stream) {
91     this->_state = MQTT_DISCONNECTED;
92     setServer(domain,port);
93     setCallback(callback);
94     setClient(client);
95     setStream(stream);
96 }
97
98 boolean PubSubClient::connect(const char *id) {
99     return connect(id,NULL,NULL,0,0,0,0);
100 }
101
102 boolean PubSubClient::connect(const char *id, const char *user, const
    ↪ char *pass) {
103     return connect(id,user,pass,0,0,0,0);
104 }
105
106 boolean PubSubClient::connect(const char *id, const char* willTopic,
    ↪ uint8_t willQos, boolean willRetain, const char* willMessage) {
107     return connect(id,NULL,NULL,willTopic,willQos,willRetain,willMessage
    ↪ );
108 }
109
110 boolean PubSubClient::connect(const char *id, const char *user, const
    ↪ char *pass, const char* willTopic, uint8_t willQos, boolean
    ↪ willRetain, const char* willMessage) {
111     if (!connected()) {
112         int result = 0;
113
114         if (domain != NULL) {
115             result = _client->connect(this->domain, this->port);
116         } else {
117             result = _client->connect(this->ip, this->port);
118         }
119         if (result == 1) {
120             nextMsgId = 1;
121             // Leave room in the buffer for header and variable length
    ↪ field
122             uint16_t length = 5;
123             unsigned int j;

```

```

124
125 #if MQTT_VERSION == MQTT_VERSION_3_1
126     uint8_t d[9] = {0x00,0x06,'M','Q','I','s','d','p',
127                   ↵ MQTT_VERSION};
127 #define MQTT_HEADER_VERSION_LENGTH 9
128 #elif MQTT_VERSION == MQTT_VERSION_3_1_1
129     uint8_t d[7] = {0x00,0x04,'M','Q','T','T',MQTT_VERSION};
130 #define MQTT_HEADER_VERSION_LENGTH 7
131 #endif
132     for (j = 0;j<MQTT_HEADER_VERSION_LENGTH;j++) {
133         buffer[length++] = d[j];
134     }
135
136     uint8_t v;
137     if (willTopic) {
138         v = 0x06|(willQos<<3)|(willRetain<<5);
139     } else {
140         v = 0x02;
141     }
142
143     if(user != NULL) {
144         v = v|0x80;
145
146         if(pass != NULL) {
147             v = v|(0x80>>1);
148         }
149     }
150
151     buffer[length++] = v;
152
153     buffer[length++] = ((MQTT_KEEPALIVE) >> 8);
154     buffer[length++] = ((MQTT_KEEPALIVE) & 0xFF);
155     length = writeString(id,buffer,length);
156     if (willTopic) {
157         length = writeString(willTopic,buffer,length);
158         length = writeString(willMessage,buffer,length);
159     }
160
161     if(user != NULL) {
162         length = writeString(user,buffer,length);
163         if(pass != NULL) {
164             length = writeString(pass,buffer,length);
165         }
166     }
167
168     write(MQTTCONNECT,buffer,length-5);
169

```

```

170         lastInActivity = lastOutActivity = millis();
171
172         while (!_client->available()) {
173             unsigned long t = millis();
174             if (t-lastInActivity >= ((int32_t) MQTT_SOCKET_TIMEOUT
175                 ↪ *1000UL)) {
176                 _state = MQTT_CONNECTION_TIMEOUT;
177                 _client->stop();
178                 return false;
179             }
180             uint8_t llen;
181             uint16_t len = readPacket(&llen);
182
183             if (len == 4) {
184                 if (buffer[3] == 0) {
185                     lastInActivity = millis();
186                     pingOutstanding = false;
187                     _state = MQTT_CONNECTED;
188                     return true;
189                 } else {
190                     _state = buffer[3];
191                 }
192             }
193             _client->stop();
194         } else {
195             _state = MQTT_CONNECT_FAILED;
196         }
197         return false;
198     }
199     return true;
200 }
201
202 // reads a byte into result
203 boolean PubSubClient::readByte(uint8_t * result) {
204     uint32_t previousMillis = millis();
205     while(!_client->available()) {
206         uint32_t currentMillis = millis();
207         if(currentMillis - previousMillis >= ((int32_t) MQTT_SOCKET_TIMEOUT
208             ↪ * 1000)){
209             return false;
210         }
211     }
212     *result = _client->read();
213     return true;
214 }

```

```

215 // reads a byte into result[*index] and increments index
216 boolean PubSubClient::readByte(uint8_t * result, uint16_t * index){
217     uint16_t current_index = *index;
218     uint8_t * write_address = &(amp;result[current_index]);
219     if(readByte(write_address)){
220         *index = current_index + 1;
221         return true;
222     }
223     return false;
224 }
225
226 uint16_t PubSubClient::readPacket(uint8_t* lengthLength) {
227     uint16_t len = 0;
228     if(!readByte(buffer, &len)) return 0;
229     bool isPublish = (buffer[0]&0xF0) == MQTTPUBLISH;
230     uint32_t multiplier = 1;
231     uint16_t length = 0;
232     uint8_t digit = 0;
233     uint16_t skip = 0;
234     uint8_t start = 0;
235
236     do {
237         if(!readByte(&digit)) return 0;
238         buffer[len++] = digit;
239         length += (digit & 127) * multiplier;
240         multiplier *= 128;
241     } while ((digit & 128) != 0);
242     *lengthLength = len-1;
243
244     if (isPublish) {
245         // Read in topic length to calculate bytes to skip over for
246         // ↪ Stream writing
247         if(!readByte(buffer, &len)) return 0;
248         if(!readByte(buffer, &len)) return 0;
249         skip = (buffer[*lengthLength+1]<<8)+buffer[*lengthLength+2];
250         start = 2;
251         if (buffer[0]&MQTTQOS1) {
252             // skip message id
253             skip += 2;
254         }
255
256     for (uint16_t i = start;i<length;i++) {
257         if(!readByte(&digit)) return 0;
258         if (this->stream) {
259             if (isPublish && len-*lengthLength-2>skip) {
260                 this->stream->write(digit);

```



```

306         topic[i] = buffer[l1en+3+i];
307     }
308     topic[t1] = 0;
309     // msgId only present for QOS>0
310     if ((buffer[0]&0x06) == MQTTQOS1) {
311         msgId = (buffer[l1en+3+t1]<<8)+buffer[l1en
312             ↪ +3+t1+1];
313         payload = buffer+l1en+3+t1+2;
314         callback(topic,payload,len-l1en-3-t1-2);
315
316         buffer[0] = MQTTPUBACK;
317         buffer[1] = 2;
318         buffer[2] = (msgId >> 8);
319         buffer[3] = (msgId & 0xFF);
320         _client->write(buffer,4);
321         lastOutActivity = t;
322     } else {
323         payload = buffer+l1en+3+t1;
324         callback(topic,payload,len-l1en-3-t1);
325     }
326 }
327 } else if (type == MQTTPINGREQ) {
328     buffer[0] = MQTTPINGRESP;
329     buffer[1] = 0;
330     _client->write(buffer,2);
331 } else if (type == MQTTPINGRESP) {
332     pingOutstanding = false;
333 }
334 }
335 }
336     return true;
337 }
338     return false;
339 }
340
341 boolean PubSubClient::publish(const char* topic, const char* payload) {
342     return publish(topic,(const uint8_t*)payload,strlen(payload),false);
343 }
344
345 boolean PubSubClient::publish(const char* topic, const char* payload,
346     ↪ boolean retained) {
347     return publish(topic,(const uint8_t*)payload,strlen(payload),
348     ↪ retained);
349 }
350 boolean PubSubClient::publish(const char* topic, const uint8_t* payload,

```

```

    ↪ unsigned int plength) {
350     return publish(topic, payload, plength, false);
351 }
352
353 boolean PubSubClient::publish(const char* topic, const uint8_t* payload,
    ↪ unsigned int plength, boolean retained) {
354     if (connected()) {
355         if (MQTT_MAX_PACKET_SIZE < 5 + 2*strlen(topic) + plength) {
356             // Too long
357             return false;
358         }
359         // Leave room in the buffer for header and variable length field
360         uint16_t length = 5;
361         length = writeString(topic,buffer,length);
362         uint16_t i;
363         for (i=0;i<plength;i++) {
364             buffer[length++] = payload[i];
365         }
366         uint8_t header = MQTTPUBLISH;
367         if (retained) {
368             header |= 1;
369         }
370         return write(header,buffer,length-5);
371     }
372     return false;
373 }
374
375 boolean PubSubClient::publish_P(const char* topic, const uint8_t*
    ↪ payload, unsigned int plength, boolean retained) {
376     uint8_t llen = 0;
377     uint8_t digit;
378     unsigned int rc = 0;
379     uint16_t tlen;
380     unsigned int pos = 0;
381     unsigned int i;
382     uint8_t header;
383     unsigned int len;
384
385     if (!connected()) {
386         return false;
387     }
388
389     tlen = strlen(topic);
390
391     header = MQTTPUBLISH;
392     if (retained) {
393         header |= 1;

```

```

394     }
395     buffer[pos++] = header;
396     len = plength + 2 + tlen;
397     do {
398         digit = len % 128;
399         len = len / 128;
400         if (len > 0) {
401             digit |= 0x80;
402         }
403         buffer[pos++] = digit;
404         llen++;
405     } while(len>0);
406
407     pos = writeString(topic,buffer,pos);
408
409     rc += _client->write(buffer,pos);
410
411     for (i=0;i<plength;i++) {
412         rc += _client->write((char)pgm_read_byte_near(payload + i));
413     }
414
415     lastOutActivity = millis();
416
417     return rc == tlen + 4 + plength;
418 }
419
420 boolean PubSubClient::write(uint8_t header, uint8_t* buf, uint16_t
↪ length) {
421     uint8_t lenBuf[4];
422     uint8_t llen = 0;
423     uint8_t digit;
424     uint8_t pos = 0;
425     uint16_t rc;
426     uint16_t len = length;
427     do {
428         digit = len % 128;
429         len = len / 128;
430         if (len > 0) {
431             digit |= 0x80;
432         }
433         lenBuf[pos++] = digit;
434         llen++;
435     } while(len>0);
436
437     buf[4-llen] = header;
438     for (int i=0;i<llen;i++) {
439         buf[5-llen+i] = lenBuf[i];

```

```

440     }
441
442 #ifndef MQTT_MAX_TRANSFER_SIZE
443     uint8_t* writeBuf = buf+(4-llen);
444     uint16_t bytesRemaining = length+1+llen; //Match the length type
445     uint8_t bytesToWrite;
446     boolean result = true;
447     while((bytesRemaining > 0) && result) {
448         bytesToWrite = (bytesRemaining > MQTT_MAX_TRANSFER_SIZE)?
449             ↪ MQTT_MAX_TRANSFER_SIZE:bytesRemaining;
449         rc = _client->write(writeBuf,bytesToWrite);
450         result = (rc == bytesToWrite);
451         bytesRemaining -= rc;
452         writeBuf += rc;
453     }
454     return result;
455 #else
456     rc = _client->write(buf+(4-llen),length+1+llen);
457     lastOutActivity = millis();
458     return (rc == 1+llen+length);
459 #endif
460 }
461
462 boolean PubSubClient::subscribe(const char* topic) {
463     return subscribe(topic, 0);
464 }
465
466 boolean PubSubClient::subscribe(const char* topic, uint8_t qos) {
467     if (qos < 0 || qos > 1) {
468         return false;
469     }
470     if (MQTT_MAX_PACKET_SIZE < 9 + strlen(topic)) {
471         // Too long
472         return false;
473     }
474     if (connected()) {
475         // Leave room in the buffer for header and variable length field
476         uint16_t length = 5;
477         nextMsgId++;
478         if (nextMsgId == 0) {
479             nextMsgId = 1;
480         }
481         buffer[length++] = (nextMsgId >> 8);
482         buffer[length++] = (nextMsgId & 0xFF);
483         length = writeString((char*)topic, buffer, length);
484         buffer[length++] = qos;
485         return write(MQTTSUBSCRIBE|MQTTQOS1,buffer,length-5);

```

```

486     }
487     return false;
488 }
489
490 boolean PubSubClient::unsubscribe(const char* topic) {
491     if (MQTT_MAX_PACKET_SIZE < 9 + strlen(topic)) {
492         // Too long
493         return false;
494     }
495     if (connected()) {
496         uint16_t length = 5;
497         nextMsgId++;
498         if (nextMsgId == 0) {
499             nextMsgId = 1;
500         }
501         buffer[length++] = (nextMsgId >> 8);
502         buffer[length++] = (nextMsgId & 0xFF);
503         length = writeString(topic, buffer, length);
504         return write(MQTTUNSUBSCRIBE|MQTTQOS1, buffer, length-5);
505     }
506     return false;
507 }
508
509 void PubSubClient::disconnect() {
510     buffer[0] = MQTTDISCONNECT;
511     buffer[1] = 0;
512     _client->write(buffer, 2);
513     _state = MQTT_DISCONNECTED;
514     _client->stop();
515     lastInActivity = lastOutActivity = millis();
516 }
517
518 uint16_t PubSubClient::writeString(const char* string, uint8_t* buf,
519     ↪ uint16_t pos) {
520     const char* idp = string;
521     uint16_t i = 0;
522     pos += 2;
523     while (*idp) {
524         buf[pos++] = *idp++;
525         i++;
526     }
527     buf[pos-i-2] = (i >> 8);
528     buf[pos-i-1] = (i & 0xFF);
529     return pos;
530 }
531

```

```
532 boolean PubSubClient::connected() {
533     boolean rc;
534     if ( _client == NULL ) {
535         rc = false;
536     } else {
537         rc = (int)_client->connected();
538         if (!rc) {
539             if (this->_state == MQTT_CONNECTED) {
540                 this->_state = MQTT_CONNECTION_LOST;
541                 _client->flush();
542                 _client->stop();
543             }
544         }
545     }
546     return rc;
547 }
548
549 PubSubClient& PubSubClient::setServer(uint8_t * ip, uint16_t port) {
550     IPAddress addr(ip[0], ip[1], ip[2], ip[3]);
551     return setServer(addr, port);
552 }
553
554 PubSubClient& PubSubClient::setServer(IPAddress ip, uint16_t port) {
555     this->ip = ip;
556     this->port = port;
557     this->domain = NULL;
558     return *this;
559 }
560
561 PubSubClient& PubSubClient::setServer(const char * domain, uint16_t port
562 ↪ ) {
563     this->domain = domain;
564     this->port = port;
565     return *this;
566 }
567
568 PubSubClient& PubSubClient::setCallback(MQTT_CALLBACK_SIGNATURE) {
569     this->callback = callback;
570     return *this;
571 }
572
573 PubSubClient& PubSubClient::setClient(Client& client){
574     this->_client = &client;
575     return *this;
576 }
577
578 PubSubClient& PubSubClient::setStream(Stream& stream){
```

```
578     this->stream = &stream;
579     return *this;
580 }
581
582 int PubSubClient::state() {
583     return this->_state;
584 }
```

Algoritmo A.3: PubSubClient.h

```

1 #ifndef PubSubClient_h
2 #define PubSubClient_h
3
4 #include <Arduino.h>
5 #include "IPAddress.h"
6 #include "Client.h"
7 #include "Stream.h"
8
9 #define MQTT_VERSION_3_1      3
10 #define MQTT_VERSION_3_1_1   4
11
12 // MQTT_VERSION : Pick the version
13 // #define MQTT_VERSION MQTT_VERSION_3_1
14 #ifndef MQTT_VERSION
15 #define MQTT_VERSION MQTT_VERSION_3_1_1
16 #endif
17
18 // MQTT_MAX_PACKET_SIZE : Maximum packet size
19 #ifndef MQTT_MAX_PACKET_SIZE
20 #define MQTT_MAX_PACKET_SIZE 128
21 #endif
22
23 // MQTT_KEEPALIVE : keepAlive interval in Seconds
24 #ifndef MQTT_KEEPALIVE
25 #define MQTT_KEEPALIVE 15
26 #endif
27
28 // MQTT_SOCKET_TIMEOUT: socket timeout interval in Seconds
29 #ifndef MQTT_SOCKET_TIMEOUT
30 #define MQTT_SOCKET_TIMEOUT 15
31 #endif
32
33 // MQTT_MAX_TRANSFER_SIZE : limit how much data is passed to the network
34 //   ↪ client
35 //   ↪ in each write call. Needed for the Arduino Wifi Shield. Leave
36 //   ↪ undefined to
37 //   ↪ pass the entire MQTT packet in each write call.
38 // #define MQTT_MAX_TRANSFER_SIZE 80
39
40 // Possible values for client.state()
41 #define MQTT_CONNECTION_TIMEOUT      -4
42 #define MQTT_CONNECTION_LOST        -3
43 #define MQTT_CONNECT_FAILED         -2
44 #define MQTT_DISCONNECTED           -1
45 #define MQTT_CONNECTED               0
46 #define MQTT_CONNECT_BAD_PROTOCOL   1

```

```

45 #define MQTT_CONNECT_BAD_CLIENT_ID    2
46 #define MQTT_CONNECT_UNAVAILABLE     3
47 #define MQTT_CONNECT_BAD_CREDENTIALS 4
48 #define MQTT_CONNECT_UNAUTHORIZED    5
49
50 #define MQTTCONNECT      1 << 4 // Client request to connect to Server
51 #define MQTTCONNACK     2 << 4 // Connect Acknowledgment
52 #define MQTTPUBLISH     3 << 4 // Publish message
53 #define MQTTPUBACK      4 << 4 // Publish Acknowledgment
54 #define MQTTPUBREC      5 << 4 // Publish Received (assured delivery
    ↪ part 1)
55 #define MQTTPUBREL      6 << 4 // Publish Release (assured delivery
    ↪ part 2)
56 #define MQTTPUBCOMP     7 << 4 // Publish Complete (assured delivery
    ↪ part 3)
57 #define MQTTSUBSCRIBE   8 << 4 // Client Subscribe request
58 #define MQTTSUBACK     9 << 4 // Subscribe Acknowledgment
59 #define MQTTUNSUBSCRIBE 10 << 4 // Client Unsubscribe request
60 #define MQTTUNSUBACK   11 << 4 // Unsubscribe Acknowledgment
61 #define MQTTPINGREQ    12 << 4 // PING Request
62 #define MQTTPINGRESP   13 << 4 // PING Response
63 #define MQTTDISCONNECT 14 << 4 // Client is Disconnecting
64 #define MQTTReserved   15 << 4 // Reserved
65
66 #define MQTTQOS0        (0 << 1)
67 #define MQTTQOS1        (1 << 1)
68 #define MQTTQOS2        (2 << 1)
69
70 #ifdef ESP8266
71 #include <functional>
72 #define MQTT_CALLBACK_SIGNATURE std::function<void(char*, uint8_t*,
    ↪ unsigned int)> callback
73 #else
74 #define MQTT_CALLBACK_SIGNATURE void (*callback)(char*, uint8_t*,
    ↪ unsigned int)
75 #endif
76
77 class PubSubClient {
78 private:
79     Client* _client;
80     uint8_t buffer[MQTT_MAX_PACKET_SIZE];
81     uint16_t nextMsgId;
82     unsigned long lastOutActivity;
83     unsigned long lastInActivity;
84     bool pingOutstanding;
85     MQTT_CALLBACK_SIGNATURE;
86     uint16_t readPacket(uint8_t*);

```

```

87     boolean readByte(uint8_t * result);
88     boolean readByte(uint8_t * result, uint16_t * index);
89     boolean write(uint8_t header, uint8_t* buf, uint16_t length);
90     uint16_t writeString(const char* string, uint8_t* buf, uint16_t pos);
91     IPAddress ip;
92     const char* domain;
93     uint16_t port;
94     Stream* stream;
95     int _state;
96 public:
97     PubSubClient();
98     PubSubClient(Client& client);
99     PubSubClient(IPAddress, uint16_t, Client& client);
100    PubSubClient(IPAddress, uint16_t, Client& client, Stream&);
101    PubSubClient(IPAddress, uint16_t, MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client&
        ↪ client);
102    PubSubClient(IPAddress, uint16_t, MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client&
        ↪ client, Stream&);
103    PubSubClient(uint8_t *, uint16_t, Client& client);
104    PubSubClient(uint8_t *, uint16_t, Client& client, Stream&);
105    PubSubClient(uint8_t *, uint16_t, MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client&
        ↪ client);
106    PubSubClient(uint8_t *, uint16_t, MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client&
        ↪ client, Stream&);
107    PubSubClient(const char*, uint16_t, Client& client);
108    PubSubClient(const char*, uint16_t, Client& client, Stream&);
109    PubSubClient(const char*, uint16_t, MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client&
        ↪ client);
110    PubSubClient(const char*, uint16_t, MQTT_CALLBACK_SIGNATURE, Client&
        ↪ client, Stream&);
111
112    PubSubClient& setServer(IPAddress ip, uint16_t port);
113    PubSubClient& setServer(uint8_t * ip, uint16_t port);
114    PubSubClient& setServer(const char * domain, uint16_t port);
115    PubSubClient& setCallback(MQTT_CALLBACK_SIGNATURE);
116    PubSubClient& setClient(Client& client);
117    PubSubClient& setStream(Stream& stream);
118
119    boolean connect(const char* id);
120    boolean connect(const char* id, const char* user, const char* pass);
121    boolean connect(const char* id, const char* willTopic, uint8_t
        ↪ willQos, boolean willRetain, const char* willMessage);
122    boolean connect(const char* id, const char* user, const char* pass,
        ↪ const char* willTopic, uint8_t willQos, boolean willRetain,
        ↪ const char* willMessage);
123    void disconnect();
124    boolean publish(const char* topic, const char* payload);

```

```
125     boolean publish(const char* topic, const char* payload, boolean
        ↪ retained);
126     boolean publish(const char* topic, const uint8_t * payload, unsigned
        ↪ int plength);
127     boolean publish(const char* topic, const uint8_t * payload, unsigned
        ↪ int plength, boolean retained);
128     boolean publish_P(const char* topic, const uint8_t * payload,
        ↪ unsigned int plength, boolean retained);
129     boolean subscribe(const char* topic);
130     boolean subscribe(const char* topic, uint8_t qos);
131     boolean unsubscribe(const char* topic);
132     boolean loop();
133     boolean connected();
134     int state();
135 };
136
137
138 #endif
```