RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Tese será disponibilizado somente a partir
de 21/02/2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia de Bauru

RODRIGO PITA ROLLE

Detecção e Localização de Vazamentos utilizando Internet das Coisas e Aprendizado de Máquina

Bauru

2024

RODRIGO PITA ROLLE

Detecção e Localização de Vazamentos utilizando Internet das Coisas e Aprendizado de Máquina

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação
Linha de Pesquisa: Mecatrônica
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy

Bauru
2024

R749d

Rolle, Rodrigo Pita
Detecção e localização de vazamentos utilizando Internet das Coisas e Aprendizado de Máquina / Rodrigo Pita Rolle. -- Bauru, 2024
123 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Eduardo Paciência Godoy

1. Detecção de vazamentos. 2. Internet das Coisas. 3. Cidades Inteligentes. 4. Aprendizado Profundo. 5. Redes Neurais de Grafo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE RODRIGO PITA ROLLE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 21 dias do mês de fevereiro do ano de 2024, às 14:00 horas, no(a) Unesp Sorocaba, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de RODRIGO PITA ROLLE, intitulada **DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS UTILIZANDO INTERNET DAS COISAS E APRENDIZADO DE MÁQUINA**. A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia UNESP Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. ALEXANDRE DA SILVA SIMÕES (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. DHIEGO FERNANDES CARVALHO (Participação Presencial) do(a) Departamento de Eng. Controle e Automação / Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Sorocaba - ICTS, Prof. Dr. DENIS BORG (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecatrônica / Faculdade de Engenharia de Sorocaba (FACENS), Prof. Dr. DIEGO RODRIGO CABRAL SILVA (Participação Presencial) do(a) Escola de Ciências e Tecnologia / UFRN. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Prof. Eduardo Paciencia Godoy
eduardo.godoy@unesp.br
ICPEdu - Certificado Pessoal

Assinado de forma digital por Eduardo Paciencia Godoy:29137583808
Dados: 2024.02.21 17:54:18 -03'00'

Impacto potencial desta pesquisa

O aumento da eficiência das redes de distribuição de água é uma demanda urgente no atual cenário social, considerando-se a crescente urbanização e a escassez da água, recurso essencial para a manutenção da vida e para diversas atividades do cotidiano. A localização automatizada de vazamentos possibilita uma manutenção mais rápida, reduzindo os desperdícios e também o tempo e esforço necessários para se fazer a busca pelo ponto de vazamento quando este não é aparente. A presente pesquisa tem como objetivo propor uma metodologia de detecção e localização de vazamentos em redes de distribuição de água, conciliando a infraestrutura de medição/transmissão com os padrões de Internet das Coisas (IoT) para viabilizar sua aplicação em larga escala e incorporando os avanços do aprendizado de máquina baseado em grafos para compensar as limitações decorrentes da restrição da taxa de transmissão de dados típica de aplicações de IoT. Ainda, este trabalho é parte do programa "Doutorado Acadêmico de Inovação" do CNPq, envolvendo também parceria com a empresa Yamatec e o apoio da Agência Unesp de Inovação (AUIN), no qual foi gerado um depósito de patente junto ao INPI.

Potential impact of this research

Increasing the efficiency of water distribution networks is an urgent demand in the current social scene, considering the growing urbanization and the scarcity of water, an essential resource for life maintenance and various daily activities. The automated location of leakage enables faster repair, also reducing waste and the time and effort needed to search for the leakage point when it is not visible. The present research aims to propose a leakage detection and location methodology that conciliates the infrastructure of metering/transmission with the Internet of Things (IoT) standards to enable large-scale application while incorporating the advances of graph-based machine learning to compensate for the restricted data transmission rates in typical IoT applications. Also, this research is part of the program "Doutorado Acadêmico para Inovação" from Brazil National Council of Science and Technology (CNPq), also including partnerships with Yamatec (private enterprise) and the cooperation of Unesp Agency for Innovation (AUIN), that produced a patent filing with Brazil National Institute of Industrial Property (INPI).

Agradecimentos

A Deus, por conceder a vida, a saúde e a capacitação para realizar este trabalho.

A minha esposa Jéssica, meus pais e familiares pelo suporte, incentivo e compreensão nos momentos de ausência.

Ao Professor Eduardo Paciência Godoy pela confiança e apoio em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelas contribuições e sugestões de melhoria deste trabalho.

Aos colegas Lucas Nunes Monteiro, Lucas Roberto Tomazini, Luís Fernando de Pupo Matos e Nelson Camilo de Almeida pela parceria e troca de experiências ao longo desta pesquisa.

À empresa parceira Yamatec, à Agência Unesp de Inovação e ao CNPq pelo suporte e cooperação neste projeto de pesquisa.

Ao corpo técnico da UNESP e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

"Para vós o tempo não deve ser ouro, mas sim o saber, ou seja, a cultura. E essa cultura, por sua vez, não a ponhais jamais a serviço de interesses bastardos, mas vertei-a generosamente sobre vossos semelhantes, e vos banheis nela a cada dia, para sairdes fortalecidos e dignos de vós mesmos.

(Emilio Mira y López)

Prefácio

Este trabalho é integrante do programa "Doutorado Acadêmico para Inovação" do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Com a intermediação da Agência Unesp de Inovação (AUIN), foi firmada parceria com a empresa Yamatec Indústria de Ferramentas Eletromecânicas LTDA-ME para o desenvolvimento das atividades. A temática deste trabalho atende a uma demanda da empresa parceira no sentido de desenvolver soluções de monitoramento de consumo e detecção de vazamentos de água em instalações industriais e residenciais. Desta forma, os estudos e aplicações realizados neste trabalho de Doutorado têm também a finalidade de integrar soluções comercializáveis no âmbito da empresa parceira, mediante o acordo de cooperação firmado.

A empresa Yamatec é especializada em equipamentos de identificação de vazamentos de água, tendo como principal produto o Geofone - um equipamento que identifica acúmulo de água abaixo da terra através de sinais acústicos. Recentemente, a empresa tem expandido sua área de aplicação para o monitoramento de redes de água, especialmente industriais. Neste contexto, o interesse da empresa nesta parceria é concentrado em três frentes de trabalho: em primeiro lugar, a criação e prototipagem de dispositivos de medição de água com baixo consumo de energia e capacidade de comunicação sem fio; em segundo lugar, na aquisição de *know-how* na área de redes de comunicação sem fio, incorporando aspectos como a transmissão de dados, a implementação de cobertura e a gestão dos dados de sensores; finalmente, na pesquisa de soluções para a localização automática de vazamentos através de algoritmos de Inteligência Artificial, utilizando os dados do sistema de monitoramento.

O desenvolvimento deste Doutorado é orientado por estes três focos de trabalho, contemplando o desenvolvimento do protótipo do dispositivo de medição, a implementação de uma infraestrutura de rede sem fio para comunicação de dados, o estudo sobre algoritmos de localização de vazamentos baseados em dados de medição e a criação de bancos de dados e *dashboards* para apresentação das informações ao usuário.

Resumo

A gestão dos recursos hídricos é uma das grandes preocupações ambientais do Século XXI, sendo tema de iniciativas globais como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. O paradigma tecnológico da Internet das Coisas (IoT) traz consigo o potencial de colaborar para a criação de cidades inteligentes, marcadas pelo consumo racional e pela contenção do desperdício. Esta pesquisa aborda o problema do monitoramento distribuído das redes de distribuição de água (RDA), usando redes de comunicação sem fio de longa distância e baixa frequência de transmissão de informações (LPWAN), com foco na detecção e localização de vazamentos. O trabalho é baseado em três partes principais, sendo infraestrutura aderente à IoT, simulação computacional de RDA e técnicas de aprendizado de máquina para detecção e localização de vazamentos. Na parte relacionada à IoT, foi desenvolvido um protótipo de dispositivo remoto de medição de variáveis de interesse, como a pressão na tubulação, com conectividade LoRaWAN. Esses dispositivos de medição transmitem dados numa baixa frequência (dezena de minutos) para uma infraestrutura computacional em nuvem para análise de dados, detecção e localização de vazamentos. A técnica de Aprendizado de Máquina desenvolvida é baseada em Redes Neurais de Grafo (GNN), que são estruturas que consideram não apenas os valores das variáveis medidas pelos dispositivos de medição (pressão), mas também a disposição espacial dos pontos da rede. Através de uma correlação entre a topologia da GNN e da RDA torna-se possível estimar a localização dos vazamentos. Modelos de RDA em ambiente de simulação computacional foram criados para viabilizar a coleta de dados em diversos cenários de operação, especialmente situações de vazamentos em diferentes localidades. Duas RDAs hipotéticas de tamanhos distintos foram criadas como casos de estudo, para estudo e avaliação da capacidade de localização do vazamento pela técnica desenvolvida. Os testes realizados contemplaram variações no tamanho da rede (distância dos canos), intervalo de aquisição de dados e diâmetro da tubulação. Também foi apresentada uma proposta para estimação das medições de pressão nos pontos de junção, visando reduzir o número de sensores instalados. Os resultados mostram que a técnica baseada em GNN é viável para a detecção e estimativa da localização de vazamentos, considerando as restrições de taxa de transmissão de dados de medição das aplicações de IoT usando redes LPWAN.

Palavras-chave: Detecção de vazamentos, Internet das Coisas, Cidades Inteligentes, Aprendizado Profundo, Redes Neurais de Grafo.

Abstract

Management of water resources is one of the biggest environmental concerns in the 21st century, drawing the attention of global initiatives such as the Sustainable Development Objectives of the United Nations. The technological paradigm of the Internet of Things (IoT) provides the potential to enable smart cities, which emphasize rational consumption and waste reduction. This research approaches the problem of the distributed monitoring of water distribution networks (WDN) using low-power, long-range wireless communication with low data throughput (LPWAN) while focusing on the detection and localization of leakage points. The research is based on three main parts: IoT-compliant infrastructure, WDN computer simulation, and machine learning techniques for leakage detection and localization. In the IoT domain, a prototype of the remote measurement device was developed for measuring interest variables, such as pressure, with LoRaWAN connectivity. Such devices transmit data at a low rate (tens of minutes) to a cloud-based computational infrastructure for data analysis and additional processing for leakage detection and localization. The developed Machine Learning technique is based on Graph Neural Networks (GNN), which are structures that process not only the acquired data from measurement devices (pressure) but also the spatial displacement of the network. The topology correlation between the GNN and the WDN itself enables the algorithm to estimate the leakage locations. WDN models in computational environments were developed to provide data in various operation scenarios, especially leakage in different locations. Two hypothetical WDNs were created as a case study for analysis and assessment of the leak location capability of the developed technique. The tests included variations in the network size (pipe length), data acquisition intervals and pipe diameter. Also, a method was proposed to estimate pressure values in junction nodes to reduce the number of sensors. The results revealed that the GNN-based technique is viable for leakage detection and localization, considering the restricted data transmission rates in IoT applications that operate in LPWAN networks.

Keywords: Leak detection, Internet of Things, Smart Cities, Deep Learning, Graph Neural Networks.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Índice de perdas na distribuição dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2020, segundo macrorregião geográfica e média nacional. 22
Figura 2 – Esquemático simplificado do sistema de monitoramento de redes de distribuição de água proposto neste trabalho. 26
Figura 3 – Estrutura de camadas dos sistemas de IoT. 28
Figura 4 – Esquemático dos principais elementos de uma Cidade Inteligente. 28
Figura 5 – Classificação das redes sem fio quanto ao alcance. 30
Figura 6 – Mapeamento das redes Ethernet segundo o Modelo de Referência OSI. . . . 33
Figura 7 – Topologia da rede LoRaWAN. 33
Figura 8 – Visão geral das técnicas utilizadas para detecção de vazamentos em redes de distribuição de água 35
Figura 9 – Exemplo de aplicação de *Deep Learning*: extração de características de uma imagem utilizando diversas camadas. 39
Figura 10 – Modelos de RDA. 48
Figura 11 – Padrão de consumo fictício em uma RDA para o intervalo de um dia (24 horas). 52
Figura 12 – Esquemático da propagação de informação através do grafo através da operação do filtro convolucional - a cada passo, a informação propaga-se do nó inicial para os nós vizinhos. 57
Figura 13 – Esquemático do Perceptron de grafo, que é composto por um filtro de grafo associado a uma não-linearidade ponto-a-ponto. 58
Figura 14 – Esquemático de uma GNN, composta por diversas camadas de Perceptrons de grafo. 58
Figura 15 – Demonstração da propriedade de equivariância a permutações de GNNs, que faz com que a GNN seja capaz de preencher dados ausentes do grafo a partir de vizinhanças semelhantes. 60
Figura 16 – Demonstração da propriedade de estabilidade a deformações de GNNs. . . 60
Figura 17 – Representação esquemática do sistema proposto para monitoramento de RDAs e detecção de vazamentos. 62
Figura 18 – Fluxograma do sistema proposto. 63
Figura 19 – Módulo de transmissão LoRa Radioenge RD42C. 64
Figura 20 – Sensor de pressão Fueltech PS-10b. 65
Figura 21 – Ilustração da RDA de um condomínio fictício com quatro casas. 67
Figura 22 – Fluxograma da rotina de simulação implementada no EPANET-MATLAB *toolkit*. 68
Figura 23 – Conversão do mapa da RDA para formato de grafo. 70

Figura 24 – Exemplo de grafo com as respectivas matrizes de adjacência e distâncias. . 71
Figura 25 – Esquemático do algoritmo de ML baseado em GGNN para detecção e localização de vazamentos. 71
Figura 26 – Bancada de ensaios utilizada para o desenvolvimento do dispositivo remoto de medição. 74
Figura 27 – Protótipo do dispositivo de medição. 75
Figura 28 – *Dashboard* do provedor de conectividade LoRaWAN Kore. 77
Figura 29 – *Gateway* Radioenge RD43HAT. 77
Figura 30 – Fluxograma de operação simultânea do *gateway* na infraestrutura local ChirpStack e na plataforma TTN. 78
Figura 31 – Dispositivos de medição instalados nas dependências da Unesp Sorocaba. . 82
Figura 32 – Dispositivos de medição configurados no distribuidor LoRaWAN Kore. . . . 83
Figura 33 – Tela de visualização (*dashboard*) dos dados de medição de água na Unesp Sorocaba. 83
Figura 34 – Mapa da primeira RDA de estudo (Rede 1). 86
Figura 35 – Grafo equivalente da primeira RDA de estudo (Rede 1). 87
Figura 36 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 1, segmentado por multiplicadores de distância, com todos os dados de junção disponíveis. 88
Figura 37 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 1, segmentado por intervalos de aquisição de dados, com todos os dados de junção disponíveis. 89
Figura 38 – Curvas de acurácia de treinamento e validação obtidas pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 1, para intervalos de 10 minutos (aprendizado normal) e 12 horas (ocorrência de *overfitting*). 90
Figura 39 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 1, segmentado por multiplicadores de distância, com dados de junção zerados. 90
Figura 40 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 1, segmentado por intervalos de aquisição de dados, com dados de junção zerados. 91
Figura 41 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 1, segmentado por multiplicadores de distância, com dados de junção estimados por regressão linear. 92
Figura 42 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 1, segmentado por intervalos de aquisição de dados, com dados de junção estimados por regressão linear. 92
Figura 43 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 1, segmentado por bitola da tubulação. 94

Figura 44 – Mapa da segunda RDA de estudo (Rede 2). 95
Figura 45 – Grafo equivalente da segunda RDA de estudo (Rede 2). 96
Figura 46 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 2, segmentado por multiplicadores de distância, com todos os dados de junção disponíveis. 98
Figura 47 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 2, segmentado por intervalos de aquisição de dados, com todos os dados de junção disponíveis. 98
Figura 48 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 2, segmentado por multiplicadores de distância, com dados de junção zerados. 99
Figura 49 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 2, segmentado por intervalos de aquisição de dados, com dados de junção zerados. 100
Figura 50 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 2, segmentado por multiplicadores de distância, com dados de junção estimados por regressão linear. 101
Figura 51 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 2, segmentado por intervalos de aquisição de dados, com dados de junção estimados por regressão linear. 102
Figura 52 – *Boxplot* da acurácia média de validação obtida pelo algoritmo de GGNN com os dados da Rede 2, segmentado por bitola da tubulação. 104
Figura 53 – Interpolação 2D da distribuição de probabilidades de localização do vazamento baseada nas estimações do algoritmo de GGNN - exemplo do Estudo de Caso 1. 106
Figura 54 – Interpolação 2D da distribuição de probabilidades de localização do vazamento baseada nas estimações do algoritmo de GGNN - exemplo do Estudo de Caso 2. 107
Figura 55 – Circuito do módulo ESP32. 121
Figura 56 – Circuito de alimentação principal e bateria. 121
Figura 57 – Circuito de regulação de tensão (3,3V). 122
Figura 58 – Conexões para os sensores de pressão e vazão. 122
Figura 59 – Circuito de condicionamento dos sinais de pressão e vazão. 123
Figura 60 – Circuito de conexão do módulo de transmissão LoRaWAN Radioenge RD49C. 123

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações do módulo de transmissão LoRa Radioenge RD42C. . . 65
Tabela 2 – Especificações técnicas do sensor de pressão Fueltech PS-10b. 65
Tabela 3 – Parâmetros comuns aos modelos de RDA gerados para testes no escopo deste trabalho. 76
Tabela 4 – Especificações do *gateway* LoRaWAN Radioenge RD43HAT. 78
Tabela 5 – Exemplo de sorteio de dados de treinamento/teste considerando as características da RDA simulada e intervalos de aquisição de dados. . . 85
Tabela 6 – Atribuições de *features* para as classes de vazamentos da Rede 1. . . . 87
Tabela 7 – Comparação do desempenho do algoritmo nas três situações de operação, segmentado por multiplicadores de distância, no Estudo de Caso 1. . . 93
Tabela 8 – Comparação do desempenho do algoritmo no Estudo de Caso 1, segmentado por bitola da tubulação. 95
Tabela 9 – Atribuições de *features* para as classes de vazamentos da Rede 2. . . . 97
Tabela 10 – Comparação do desempenho do algoritmo nas três situações de operação, segmentado por multiplicadores de distância, no Estudo de Caso 2. . . 103
Tabela 11 – Comparação do desempenho do algoritmo no Estudo de Caso 2, segmentado por bitola da tubulação. 105
Tabela 12 – Rótulos utilizados nos diagramas de montagem eletrônica do protótipo de dispositivo de medição. 120

Lista de abreviaturas e siglas

3GPP	*Third Generation Partnership Project*
6LoWPAN	*IPv6 Over Low-Power Wireless Personal Area Network*
ABP	*Authentication by Personalisation*
ADR	*Adaptive Data Rate*
AE	*Autoencoders*
BLE	*Bluetooth Low Energy*
CCTV	Circuito Fechado de Televisão
CLP	Controlador Lógico Programável
CNN	*Convolutional Neural Network*
CPS	*Cyber-Physical Systems*
CSS	*Chirp Spread Spectrum*
CSV	*Comma-Separated Values*
EPA	*United States Environmental Protection Agency*
ERM	*Empirical Risk Minimization*
ETA	Estação de Tratamento de Água
GAN	*Generative Adversarial Network*
GGNN	*Gated Graph Neural Network*
GNN	*Graph Neural Network*
GPRS	*General Packet Radio Service*
GPS	*Global Positioning System*
GRU	*Gated Recurrent Units*
GSM	*Global System for Mobile Communications*
IoT	*Internet of Things*

IP	*Internet Protocol*
ISM	*Industrial, Scientific and Medical*
I^2C	*Inter Integrated Controller*
LPWAN	*Low-Power Wide Area Network*
LTE	*Long Term Evolution*
LSTM	*Long Short-Term Memory*
M2M	Máquina-a-Máquina (em inglês, *Machine-to-Machine*)
MAC	*Medium Access Control*
ML	*Machine Learning*
MNF	*Minimum Night Flow*
MQTT	*Message Queuing Telemetry Transport*
NB-IoT	*Narrowband Internet of Things*
NFC	*Near Field Communication*
ONU	Organização das Nações Unidas
OSI	*Open Systems Interconnection*
OTAA	*Over-The-Air Activation*
PCA	*Principal Component Analysis*
PMC	*Perceptron* Multicamadas
RDA	Rede de Distribuição de Água
ReLU	*Rectified Linear Unit*
RF	Radiofrequência
RFID	*Radio Frequency Identification*
RNA	Redes Neurais Artificiais
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RNN	*Recurrent Neural Network*
RNV	Reservatório de Nível Variável

SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento
SoC	*System-on-Chip*
SPI	*Serial Peripheral Interface*
SVM	*Support Vector Machines*
TCP	*Transmission Control Protocol*
TTN	*The Things Network*
UART	*Universal Asynchronous Transmitter Receiver*
UDP	*User Datagram Protocol*
ULP	*Ultra Low Power*
WLAN	*Wireless Local Area Networks*
WNAN	*Wireless Neighborhood Area Network*
WPAN	*Wireless Personal Area Network*
WSN	*Wireless Sensor Network*
WWAN	*Wireless Wide Area Network*

Sumário

1 INTRODUÇÃO . . . 21
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA . . . 21
1.2 OBJETIVO . . . 24
1.3 JUSTIFICATIVA . . . 24
1.4 RESUMO DA PROPOSTA . . . 25
1.5 ESTRUTURA E CONTEÚDO . . . 26

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . 27
2.1 INTERNET DAS COISAS E CIDADES INTELIGENTES . . . 27
2.1.1 TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO PARA CIDADES INTELIGENTES . 29
2.2 DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA . . . 34
2.2.1 MÉTODOS DE DETECÇÃO PASSIVA . . . 35
2.2.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO ATIVA . . . 36
2.2.3 APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS . 38
2.3 TRABALHOS RECENTES . . . 40
2.3.1 APLICAÇÕES DE RNA E OUTROS MÉTODOS . . . 40
2.3.2 APLICAÇÕES DE IoT . . . 43
2.3.3 APLICAÇÕES BASEADAS EM GRAFOS . . . 44
2.3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A LITERATURA . . . 46

3 REVISÃO CONCEITUAL . . . 48
3.1 MODELAGEM DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA . . . 48
3.1.1 ESCOPO DOS MODELOS ABORDADOS NESTA PESQUISA . . . 49
3.1.2 COMPONENTES DE UM MODELO . . . 50
3.1.3 LEI DA CONSERVAÇÃO DE MASSA . . . 50
3.1.4 LEI DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA . . . 51
3.1.5 CONSUMO DE ÁGUA . . . 51
3.1.6 PERDAS DE CARGA . . . 52
3.1.7 CONTROLES . . . 53
3.1.8 MODELAGEM DE VAZAMENTOS . . . 53
3.2 REDES NEURAIS DE GRAFO . . . 54
3.2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DE GNN . . . 54
3.2.2 PROPRIEDADES DE GNN . . . 59
3.2.3 GNN COM *GATE* . . . 61

4 MATERIAIS E MÉTODOS . . . 62
4.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO . . . 62
4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS . . . 63
4.2.1 DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO . . . 64
4.2.2 SIMULAÇÃO DA RDA . . . 66
4.3 INFRAESTRUTURA IoT . . . 68
4.4 GESTÃO DE DADOS . . . 69
4.5 PROCESSAMENTO DE DADOS . . . 69

5 DESENVOLVIMENTO . . . 74
5.1 AQUISIÇÃO DE DADOS DA RDA . . . 74
5.1.1 DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO . . . 74
5.1.2 SIMULAÇÃO DA RDA . . . 75
5.2 INFRAESTRUTURA IoT . . . 76
5.3 GESTÃO DE DADOS . . . 79
5.4 PROCESSAMENTO DE DADOS . . . 79
5.4.1 REGRESSÃO LINEAR PARA ESTIMAÇÃO DE DADOS AUSENTES . . . 81
5.5 PILOTO NAS DEPENDÊNCIAS DA UNESP SOROCABA . . . 81

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . 84
6.1 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS . . . 84
6.2 ESTUDO DE CASO 1 . . . 86
6.2.1 SITUAÇÃO 1 - TODOS OS DADOS DISPONÍVEIS . . . 88
6.2.2 SITUAÇÃO 2 - SEM DADOS DAS JUNÇÕES . . . 90
6.2.3 SITUAÇÃO 3 - ESTIMAÇÃO DOS DADOS DE JUNÇÃO POR REGRESSÃO LINEAR . . . 91
6.2.4 SITUAÇÃO 4 - VARIAÇÃO NA BITOLA DA TUBULAÇÃO . . . 94
6.3 ESTUDO DE CASO 2 . . . 95
6.3.1 SITUAÇÃO 1 - TODOS OS DADOS DISPONÍVEIS . . . 97
6.3.2 SITUAÇÃO 2 - SEM DADOS DAS JUNÇÕES . . . 99
6.3.3 SITUAÇÃO 3 - ESTIMAÇÃO DOS DADOS DE JUNÇÃO POR REGRESSÃO LINEAR . . . 100
6.3.4 SITUAÇÃO 4 - VARIAÇÃO NA BITOLA DA TUBULAÇÃO . . . 103
6.4 VISUALIZAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES . 105
6.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS . . . 107

7 CONCLUSÕES . . . 110

REFERÊNCIAS . . . 112

APÊNDICES **119**

APÊNDICE A – PROJETO ELETRÔNICO DO DISPOSITIVO REMOTO DE MEDIÇÃO **120**

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

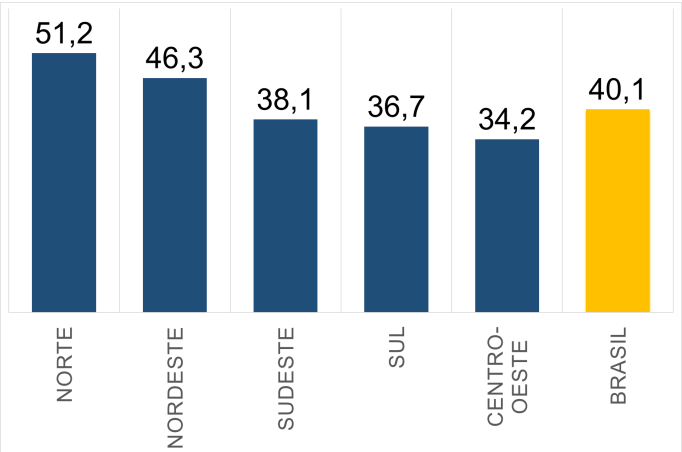
A gestão dos recursos hídricos é um tema fundamental no Século XXI. A questão é tratada nos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU) (UNIDAS, 2015). A gestão sustentável da água é um tópico que tem despertado a atenção de pesquisadores e empresas. O problema global de escassez de água é intensificado pelas perdas que ocorrem nas redes de distribuição e produz consequências ambientais e econômicas, particularmente nos países em desenvolvimento (NKEMENI; MIEYEVILLE; TSAFACK, 2020). Estatísticas recentes mostram que um terço dos países do mundo apresenta níveis de perda superiores a 40% da água circulante em seus sistemas de distribuição por conta de vazamentos não identificados e estouros de canos (FOOD; NATIONS, 2017), um problema que se mostra mais expressivo em países em desenvolvimento. Em 2016, um estudo do Banco Mundial estimou perdas em torno de 45 milhões de metros cúbicos de água diariamente somente nos países em desenvolvimento. O prejuízo financeiro decorrente destas perdas supera 3 bilhões de dólares por ano (NKEMENI; MIEYEVILLE; TSAFACK, 2020).

A ONU aponta ainda que a rápida urbanização requer das administrações nacionais e locais uma ação mais efetiva no combate às perdas de água por vazamento. Segundo o Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos (CONNOR, 2015), a capacidade institucional de governos e empresas de saneamento em aumentar investimentos e melhorar a entrega dos serviços hidráulicos é um fator crítico, especialmente nas localidades com instalações hidráulicas antigas e com pouca manutenção, cenário frequente em países subdesenvolvidos. Na esteira dos levantamentos mundiais, países e blocos têm produzido legislações e relatórios técnicos a fim de sanar os problemas do setor hidráulico. O Roteiro para uma Europa Eficiente na utilização de recursos (COMMISSION, 2011) desenvolvido pela Comissão Europeia aponta que "a Europa desperdiça de 20% a 40% de sua água e a eficiência hídrica poderia ser melhorada em 40% unicamente com melhorias tecnológicas".

No contexto latino-americano, o Relatório Mundial aponta que um passo prioritário é estabelecer e consolidar a governança hídrica. Dada a relativa abundância de água na região, a crise hídrica é de caráter institucional, não envolvendo necessariamente a falta de água para o uso (CONNOR, 2015). A falta de legislação rígida, o financiamento insuficiente e as limitações tecnológicas na rede de distribuição são apontadas como elos frágeis que precisam de atenção.

No Brasil, os Relatórios Anuais disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) desde 1995 retratam a evolução do setor hídrico. Segundo o Relatório Anual de 2021 (BRASIL, 2021), a média nacional de perda de água tratada nos sistemas de distribuição é de 39,2%. Este cálculo engloba vazamentos, falhas nos sistemas de medição e ligações clandestinas. A Figura 1 apresenta os índices de perdas na distribuição dos prestadores de serviços participantes do SNIS por região. Nota-se que as regiões Norte e Nordeste apresentam as maiores perdas, superando a média nacional.

Figura 1 – Índice de perdas na distribuição dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2020, segundo macrorregião geográfica e média nacional.



Fonte: Brasil (2021).

O Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei 14.026 de 15 de Julho de 2020) traz instrumentos legais específicos para a abordagem do problema das perdas nos sistemas de distribuição. Todos os contratos relativos à prestação de serviços públicos de saneamento estão obrigados a conter metas de redução de perdas na distribuição de água tratada. Tais metas devem ser verificadas anualmente por agência reguladora.

O aumento da densidade populacional no ambiente urbano criou a necessidade de tornar as cidades mais eficientes, ou "inteligentes", a fim de atender às necessidades de seus cidadãos. À medida que o planeta se torna mais "urbano", as cidades precisam se tornar inteligentes, dispondo de métodos e ferramentas para uma gestão eficiente e sustentável dos recursos disponíveis (TALARI et al., 2017; EREMIA; TOMA; SANDULEAC, 2017). Neste contexto, surge o conceito de "Cidades Inteligentes" (ou *Smart Cities*), que pode ser definido como "cidades que promovem a eficiência energética, energia renovável, mobilidade verde e desenvolvimento tecnológico, incentivando a exploração da gestão do conhecimento em ambientes urbanos" (ARAGÃO, 2020).

Promover o desenvolvimento sustentável do ambiente urbano é uma preocupação antiga. Já em 1898 planejadores urbanos se debruçaram sobre esta questão (EREMIA; TOMA; SANDULEAC, 2017) e o conceito de "cidade do futuro" tem evoluído desde então.

Atualmente utiliza-se o termo "Cidade Inteligente", um conceito que está em evolução e ainda não tem definição consensual (CHOURABI et al., 2012). Em linhas gerais, pode-se definir as Cidades Inteligentes como "cidades nas quais o uso de Tecnologia de Informação e Comunicação promove um crescimento sustentável, melhora a qualidade de vida de seus cidadãos e, por consequência, permite melhor gestão de recursos hídricos e energéticos" (RAMOS et al., 2020). As definições de Cidade Inteligente frequentemente evocam os avanços tecnológicos recentes, particularmente aplicações *web* (conectividade, protocolos) e tecnologias de informação e comunicação, com a finalidade de promover o uso racional dos recursos e aumentar a qualidade dos serviços prestados aos cidadãos (FERNANDES, 2018).

Os métodos, ferramentas e tecnologias do contexto da Internet das Coisas (ou IoT - *Internet of Things*) são aplicáveis a diversas demandas das Cidades Inteligentes, tais como: geolocalização, coleta de dados distribuída, monitoramento e supervisão (TALARI et al., 2017). O conceito de IoT é fundado na ideia de conectar objetos dos mais diversos tipos ("coisas") à Internet. Estes dispositivos devem ter a capacidade de coletar, transmitir e processar dados (SISINNI et al., 2018), sendo chamados "dispositivos inteligentes" (ou *smart devices*). Por suas características de operação em redes e distribuída, os dispositivos do contexto da IoT são um substrato importante para fornecer os serviços das Cidades Inteligentes, como monitoramento de ciclistas, veículos, estacionamentos, controle de poluição, ruído e supervisão em geral (TALARI et al., 2017).

O monitoramento do consumo de água no ambiente urbano é uma das aplicações das Cidades Inteligentes. A água tem impacto direto em toda a sociedade: produção de energia, atividades recreativas, higiene e bem estar são áreas diretamente impactadas pela disponibilidade de água (UMAR; UHL, 2016). As redes de distribuição de água são instaladas ao longo das cidades para servir à população; porém o envelhecimento, condições ambientais desfavoráveis e até mesmo danos de terceiros podem resultar em rompimentos e vazamentos (ADEDEJI et al., 2017).

Tendo em vista que os métodos convencionais de monitoramento da distribuição de água não são eficientes para a detecção de vazamentos (TALARI et al., 2017), este trabalho aborda o problema do monitoramento distribuído com foco na detecção e localização de vazamentos em redes de distribuição de água no contexto das Cidades Inteligentes, utilizando para isso (i) dispositivos e conectividade aderentes à IoT; (ii) modelagem e simulação computacional de redes de distribuição de água e (iii) técnicas de aprendizado de máquina para detecção e localização de vazamentos.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é projetar, avaliar e validar um sistema de monitoramento de redes de distribuição de água que tenha a capacidade de identificar a ocorrência e a localização aproximada de vazamentos. Para atingir este fim, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Elaborar modelos de simulação computacional de redes de distribuição de água para coleta de dados e realização de testes;
- Selecionar as variáveis de interesse para a análise dos dados;
- Projetar e construir o protótipo de dispositivo de campo (sensor) a ser instalado nas tubulações reais para coleta de dados;
- Implementar e validar um algoritmo de aprendizado de máquina baseado em grafos para processar os dados das redes de distribuição de água e realizar as tarefas de detecção e localização de vazamentos;
- Avaliar requisitos e métricas de desempenho do método de detecção de vazamentos, tais como: sensibilidade, acurácia, número mínimo de pontos de medição, entre outros.

1.3 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a crescente urbanização, o consequente aumento de demanda por água nas cidades e as grandes perdas que ocorrem nos sistemas de distribuição, há um esforço de setores industriais, institucionais e acadêmicos no sentido de reduzir as perdas de água, tal como as técnicas de *smart grid* têm sido aplicadas no setor elétrico (GIUDICIANNI et al., 2020).

A gestão inteligente da água é um componente das Cidades Inteligentes. Sistemas e métodos de gestão de água são frequentemente denominados "*Smart Water Systems*" na literatura de língua inglesa. Nos últimos dez anos, experimentos em cidades como Brisbane (Austrália), Singapura e San Francisco (Estados Unidos) apresentaram resultados promissores que impulsionaram o setor de gestão inteligente de água (LI; YANG; SITZENFREI, 2020).

Apesar dos avanços obtidos ao longo dos anos, há diversos problemas de pesquisa ainda não solucionados. A literatura sobre detecção de vazamentos em redes de distribuição de água frequentemente mostra resultados com altos níveis de incerteza (ADEDEJI et al., 2017). Ainda, diversos trabalhos apresentam metodologias que requerem elevadas taxas de aquisição de dados, como por exemplo a análise de transitórios ou a análise de sinais acústicos (ADEDEJI et al., 2017), nos quais taxa de aquisição de dados necessária inviabiliza as aplicações baseadas em redes de comunicação de longo alcance e baixo consumo de

energia (LPWAN - *Low-Power Wide Area Networks*). Neste cenário, o desenvolvimento de tecnologias avançadas e a adoção de modelos de gestão mais robustos são dois pontos fundamentais para a redução das perdas de água (RAMOS et al., 2020; GIUDICIANNI et al., 2020).

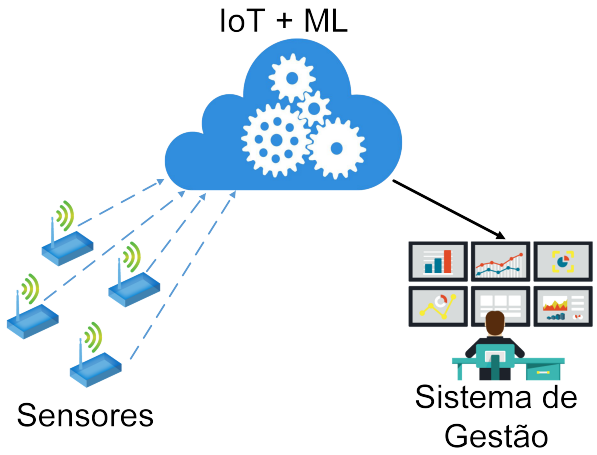
Considerando o exposto, este trabalho apresenta as seguintes contribuições:

- Propõe um sistema de monitoramento de redes de distribuição de água aderente ao contexto de IoT/Cidades Inteligentes;
- Implementa técnicas recentes de aprendizado de máquina ao problema da detecção e localização de vazamentos de água, considerando as taxas limitadas de aquisição de dados;
- Realiza a detecção de vazamentos com menor quantidade de dados, dadas as características operacionais de LPWANs;
- Os sensores são posicionados apenas nos pontos de medição usuais (entrada principal e unidades consumidoras);
- Apresenta o protótipo de dispositivo de campo para coleta de dados, considerando os aspectos de capacidade de transmissão de dados, redes, protocolos de comunicação, instrumentação e gestão energética.

1.4 RESUMO DA PROPOSTA

Um esquemático resumido da proposta deste trabalho é apresentado na Figura 2. Em linhas gerais, o objetivo é desenvolver um sistema de monitoramento e gestão de água em redes de distribuição urbanas, utilizando para isso instrumentação do contexto de IoT, neste caso, dispositivos que utilizam tecnologias de comunicação sem fio de baixo consumo de energia. Os dados de monitoramento devem ser enviados a uma plataforma capaz de armazená-los de forma estruturada. Os dados serão utilizados em algoritmos de aprendizado de máquina (*Machine Learning* - ML) para realização das tarefas de detecção e estimativa de localização de possíveis vazamentos existentes na rede. Por fim, um sistema de gestão deverá apresentar uma interface de usuário reunindo as informações da rede, métricas de avaliação e os resultados dos algoritmos de detecção de vazamentos.

Figura 2 – Esquemático simplificado do sistema de monitoramento de redes de distribuição de água proposto neste trabalho.



Fonte: Autoria própria.

1.5 ESTRUTURA E CONTEÚDO

O presente trabalho está dividido em 7 Capítulos considerando a presente introdução e desconsiderando as referências bibliográficas.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico deste trabalho, sobretudo considerando os tópicos: IoT e Cidades Inteligentes, técnicas de detecção de vazamentos e trabalhos recentes sobre detecção de vazamentos no contexto de IoT e aprendizado de máquina.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão conceitual sobre dois temas: modelagem de redes de distribuição de água com o aplicativo EPANET e Redes Neurais de Grafo, que são a abordagem de aprendizado de máquina utilizada neste trabalho. O Capítulo 4 apresenta os materiais e métodos da pesquisa, considerando os aspectos de aquisição, transmissão e processamento dos dados hidráulicos.

O desenvolvimento do trabalho é apresentado no Capítulo 5. Nele estão os detalhes do protótipo de dispositivo de medição, implementação da infraestrutura de comunicação e detalhes do algoritmo de aprendizado de máquina utilizado.

No Capítulo 6 são mostrados os resultados obtidos através da simulação computacional de duas redes de distribuição de água hipotéticas. Estes resultados são a base para as discussões sobre o potencial e as limitações das técnicas implementadas. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho e potenciais trabalhos futuros.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de monitoramento de RDAs para detecção e localização de vazamentos de água, utilizando ferramentas do contexto de IoT e ML. O problema de perda de água nos sistemas urbanos de saneamento básico é percebido de forma mais latente em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Relatórios de importantes entidades como ONU, Banco Mundial e governos nacionais enfatizam as dimensões econômicas e sociais do problema do desperdício de água potável. A solução deste problema passa pela implementação de modelos mais eficazes de governança hídrica, que incorporem legislação eficiente, financiamento adequado e tecnologias mais eficazes para que a água seja utilizada de forma racional. As ferramentas de IoT viabilizam as "Cidades Inteligentes", conceito no qual se utiliza a tecnologia recente (sobretudo a Internet) para implementar modelos urbanos voltados para o uso racional dos recursos naturais e a inclusão social da população. O uso de IoT aplicado à gestão de recursos hídricos proporciona aumento de eficiência, redução de custos e favorece o consumo responsável.

A revisão da literatura recente mostrou diversas técnicas de monitoramento e detecção de vazamentos em sistemas hidráulicos, das quais destacam-se as técnicas baseadas em ML. Tais técnicas representam um campo de pesquisa em intenso desenvolvimento e com grande potencial de prover soluções para problemas complexos como o abordado neste trabalho. Embora existam diversas metodologias propostas para a solução deste tipo de problema, o presente trabalho oferece uma contribuição diferenciada das soluções encontradas na literatura ao integrar numa mesma aplicação métodos baseados em inteligência computacional que levam em conta os limites de transmissão de dados de LPWAN e utilizam técnicas baseadas na teoria dos grafos para modelar a distribuição espacial das RDAs e assim estimar a localização do ponto de vazamento.

O sistema de monitoramento proposto envolve dispositivos remotos de medição espalhados pela RDA, com comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia (LPWAN), de forma a viabilizar a operação a baterias por longos períodos de tempo. Foi utilizada simulação computacional de RDAs através do *software* EPANET e sua biblioteca para MATLAB para obter dados sintéticos de redes hidráulicas, uma vez que o treinamento de algoritmos de ML requer grandes conjuntos de dados, incluindo diversas situações de vazamento, que são inviáveis de se realizar em tubulações reais.

Com base nos dados obtidos por simulação computacional, um algoritmo baseado em GNNs foi aplicado à detecção e estimação da localização de vazamentos. Além da variável monitorada (no caso, a pressão na tubulação), o algoritmo considera a disposição espacial dos pontos de medição e consumo da RDA, representada por uma matriz de

adjacências. Com os dados de pressão e considerando as relações espaciais, o algoritmo é capaz de estimar o nó mais próximo ao ponto de vazamento.

A avaliação do algoritmo foi realizada com base em dois estudos de caso realizados a partir de dados obtidos por simulação computacional. Cada estudo de caso foi baseado em uma RDA hipotética, com a variação de diversas condições para análise da acurácia: distância das tubulações, intervalo de aquisição de dados, disponibilidade dos dados de medição reais nos pontos de junção e diferentes diâmetros (bitolas) de tubulação. Para ambas as redes, foi possível obter acurácias médias em torno de 70%, de acordo com as situações operacionais.

Nos casos de indisponibilidade de dados de medição nos pontos de junção, utilizou-se regressão linear para a estimação da pressão nestes pontos. Os resultados obtidos utilizando regressão linear são inferiores em comparação com a situação ideal (medição em todos os pontos), mas as perdas de acurácia são maiores se nenhum método de estimação for utilizado. Ainda, a regressão linear permite a redução no número de dispositivos em operação, reduzindo o custo de implementação e permitindo o funcionamento do sistema caso haja pontos de difícil acesso ou impossibilidade de comunicação.

O desenvolvimento deste trabalho também contemplou a construção de um protótipo do dispositivo de medição remoto e a criação de uma infraestrutura de rede LoRaWAN para testes de conectividade e transmissão de dados. Finalmente, foi implementado um método de interpolação 2D para a visualização da distribuição de probabilidades indicada pelo algoritmo de GNN no mapa das RDAs analisadas. A análise visual facilita a compreensão da distribuição de probabilidades, permitindo a identificação das áreas mais prováveis, que devem ser investigadas quando da ocorrência de um evento de vazamento.

Com base nos resultados expostos neste trabalho, novas frentes de pesquisa podem ser exploradas em trabalhos futuros. A primeira é a aplicação deste método numa RDA real, utilizando-se o dispositivo de medição e a infraestrutura LoRaWAN propostas neste trabalho. Paralelamente, o método de detecção de vazamentos baseado em GNN poderia ser aplicado a *datasets* de referência utilizados na literatura para comparação com outros métodos de localização de vazamentos já utilizados na literatura, uma vez que neste trabalho as RDAs foram modeladas de acordo com as aplicações de interesse da empresa parceira do desenvolvimento. Outra possibilidade é a análise comparativa de outras arquiteturas de GNNs para a estimação do local do vazamento, incorporando-se também soluções para as limitações do atual método discutidas na Seção 6.5. Sugere-se também analisar a capacidade de generalização do algoritmo de GNN, ou seja, qual seria o desempenho se o formato do grafo/RDA sofrer alterações. Finalmente, este método pode ser também aplicado à localização de outros tipos de redes de distribuição de suprimentos, como por exemplo os circuitos pneumáticos (ar) e tubulações de outros fluidos.

Referências

ABDULSHAHEED, A.; MUSTAPHA, F.; GHAVAMIAN, A. A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 69, p. 902–911, 2017.

ADEDEJI, K. B.; HAMAM, Y.; ABE, B. T.; ABU-MAHFOUZ, A. M. Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview. *IEEE Access*, IEEE, v. 5, p. 20272–20285, 2017.

AGUIAR, F. G. *Utilização de Redes Neurais Artificiais para detecção de padrões de vazamento em dutos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2010.

ALASHKAR, T. Real-time lane and car detection on highway using vision system. *White paper*, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.18416.05128.

ARAGÃO, F. V. *Modelo de maturidade para Smart Cities: uma abordagem multicritério*. Tese (Doutorado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.

AYATI, A. H.; HAGHIGHI, A.; LEE, P. Statistical review of major standpoints in hydraulic transient-based leak detection. *Journal of Hydraulic Structures*, Shahid Chamran University of Ahvaz, v. 5, n. 1, p. 1–26, 2019.

BASFORD, P. J.; BULOT, F. M.; APETROAIE-CRISTEA, M.; COX, S. J.; OSSONT, S. J. LoRaWAN for smart city IoT deployments: A long term evaluation. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 3, p. 648, 2020.

BERMÚDEZ, J.-R.; LÓPEZ-ESTRADA, F.-R.; BESANÇON, G.; VALENCIA-PALOMO, G.; TORRES, L.; HERNÁNDEZ, H.-R. Modeling and simulation of a hydraulic network for leak diagnosis. *Mathematical and computational applications*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 23, n. 4, p. 70, 2018.

BIGHETI, J. A. *Arquitetura de automação e controle orientada a microserviços para a Indústria 4.0*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2020.

BLENN, N.; KUIPERS, F. LoRaWAN in the wild: Measurements from the things network. *arXiv preprint arXiv:1706.03086*, 2017.

BRASIL. Diagnóstico temático dos serviços de água e esgotos - ano 2020. *Ministério do Desenvolvimento Regional*, 2021.

BROCAAR, O. ChirpStack, open-source LoRaWAN stack. 2021. Disponível em: <https://www.chirpstack.io/>. Acesso em: 15 out. 2021.

CANDELIERI, A.; CONTI, D.; ARCHETTI, F. A graph based analysis of leak localization in urban water networks. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 70, p. 228–237, 2014.

CHAN, T. K.; CHIN, C. S.; ZHONG, X. Review of current technologies and proposed intelligent methodologies for water distributed network leakage detection. *IEEE Access*, IEEE, v. 6, p. 78846–78867, 2018.

CHAUDHARI, B. S.; ZENNARO, M.; BORKAR, S. LPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations. *Future Internet*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 3, p. 46, 2020.

CHETTRI, L.; BERA, R. A comprehensive survey on Internet of Things (IoT) toward 5G wireless systems. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 7, n. 1, p. 16–32, 2019.

CHOURABI, H.; NAM, T.; WALKER, S.; GIL-GARCIA, J. R.; MELLOULI, S.; NAHON, K.; PARDO, T. A.; SCHOLL, H. J. Understanding smart cities: An integrative framework. In: IEEE. *2012 45th Hawaii international conference on system sciences*. [S.l.], 2012. p. 2289–2297.

COBACHO, R.; ARREGUI, F.; SORIANO, J.; JR, E. C. Including leakage in network models: an application to calibrate leak valves in EPANET. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, IWA Publishing, v. 64, n. 2, p. 130–138, 2015.

COLOMBO, A. F.; LEE, P.; KARNEY, B. W. A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of hydro-environment research*, Elsevier, v. 2, n. 4, p. 212–227, 2009.

COMMISSION, E. U. Roadmap to a resource efficient Europe. *COM (2011)*, v. 571, 2011.

CONNOR, R. *The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world*. [S.l.]: UNESCO publishing, 2015. v. 1.

CORPORATION, A. T. Rede neutra IoT ATC LoRaWAN. 2021. Disponível em: <https://iot-labs.io/rede-atc-lorawan/>. Acesso em: 15 out. 2021.

DENG, A.; HOOI, B. Graph neural network-based anomaly detection in multivariate time series. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. [S.l.: s.n.], 2021. v. 35, n. 5, p. 4027–4035.

ELIADES, D. G.; KYRIAKOU, M.; VRACHIMIS, S.; POLYCARPOU, M. M. EPANET-MATLAB Toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB. In: *Proc. 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI)*. The Netherlands: [s.n.], 2016. p. 8.

EREMIA, M.; TOMA, L.; SANDULEAC, M. The smart city concept in the 21st century. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 181, p. 12–19, 2017.

ESPRESSIF. ESP32 series datasheet. 2021. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 21 out. 2021.

FAN, X.; YU, X. An innovative machine learning based framework for water distribution network leakage detection and localization. *Structural Health Monitoring*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 21, n. 4, p. 1626–1644, 2022.

FARAH, E.; SHAHROUR, I. Leakage detection using smart water system: combination of water balance and automated minimum night flow. *Water Resources Management*, Springer, v. 31, n. 15, p. 4821–4833, 2017.

FERNANDES, J. F. M. d. M. *Sistema para deteção de zonas de estacionamento para smart cities*. Tese (Doutorado) — Instituto Universitário de Bragança, 2018.

FERREIRA, I. V.; BIGHETI, J. A.; MANSANO, R. K.; GODOY, E. P. Proposta de um modelo para a aplicação da Internet das Coisas Industrial. *XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (XIII SBAI)*, 2017.

FOOD; NATIONS, A. O. of the U. The state of food security and nutrition in the world. *Rome: Building resilience for peace and food security*, 2017.

FREITAS, J. T. de; COELHO, F. G. F. Fault localization method for power distribution systems based on gated graph neural networks. *Electrical Engineering*, Springer, p. 1–8, 2021.

FUELTECH. PS-10B pressure sensor. 2021. Disponível em: <https://www.fueltech.net/products/ps-10b-pressure-sensor>. Acesso em: 21 out. 2021.

GARDHARSSON, G. Ö.; BOEM, F.; TONI, L. Graph-based learning for leak detection and localisation in water distribution networks. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 55, n. 6, p. 661–666, 2022.

GAUTAM, J.; CHAKRABARTI, A.; AGARWAL, S.; SINGH, A.; GUPTA, S.; SINGH, J. Monitoring and forecasting water consumption and detecting leakage using an IoT system. *Water Supply*, IWA Publishing, v. 20, n. 3, p. 1103–1113, 2020.

GIUDICIANNI, C.; HERRERA, M.; NARDO, A. d.; ADEYEYE, K.; RAMOS, H. M. Overview of energy management and leakage control systems for smart water grids and digital water. *Modelling*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 1, n. 2, p. 134–155, 2020.

GORI, M.; MONFARDINI, G.; SCARSELLI, F. A new model for learning in graph domains. In: IEEE. *Proceedings. 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2005.* [S.l.], 2005. v. 2, p. 729–734.

GUPTA, G. *Monitoring Water Distribution Network using Machine Learning*. 2017. Degree Project in Electrical Engineering.

HAXHIBEQIRI, J.; POORTER, E. D.; MOERMAN, I.; HOEBEKE, J. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 11, p. 3995, 2018.

JAN, F.; MIN-ALLAH, N.; SAEED, S.; IQBAL, S. Z.; AHMED, R. Iot-based solutions to monitor water level, leakage, and motor control for smart water tanks. *Water*, MDPI, v. 14, n. 3, p. 309, 2022.

JARADAT, M.; JARRAH, M.; BOUSSELHAM, A.; JARARWEH, Y.; AL-AYYOUB, M. The internet of energy: smart sensor networks and big data management for smart grid. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 56, p. 592–597, 2015.

JAVADIHA, M.; BLESA, J.; SOLDEVILA, A.; PUIG, V. Leak localization in water distribution networks using deep learning. In: IEEE. *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT).* [S.l.], 2019. p. 1426–1431.

LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 521, n. 7553, p. 436–444, 2015.

LI, J.; YANG, X.; SITZENFREI, R. Rethinking the framework of smart water system: A review. *Water*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 2, p. 412, 2020.

LI, Y.; TARLOW, D.; BROCKSCHMIDT, M.; ZEMEL, R. Gated graph sequence neural networks. *arXiv preprint arXiv:1511.05493*, 2015.

LIANG, B.; VERMA, S.; XU, J.; LIANG, S.; LI, Z.; WANG, Y.; CHEN, F. A data driven approach for leak detection with smart sensors. In: IEEE. *2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. [S.l.], 2020. p. 1311–1316.

LOUREIRO, D.; AMADO, C.; MARTINS, A.; VITORINO, D.; MAMADE, A.; COELHO, S. T. Water distribution systems flow monitoring and anomalous event detection: A practical approach. *Urban Water Journal*, Taylor & Francis, v. 13, n. 3, p. 242–252, 2016.

MEDINA, M. M. G. *Detecção de vazamentos e alterações em redes de distribuição de água para abastecimento, durante a operação, usando sinais de pressão*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017.

MOLINA, A. M. *Prototipagem de um medidor de vazão energeticamente autossustentável integrado à Internet das Coisas*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2020.

NETWORK, T. T. The things network. 2021. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/>. Acesso em: 15 out. 2021.

NIEBUHR, D.; NSANZUBUHORO, R.; ZYL, J. van. Field experience with pressure-based leakage characterisation of bulk water pipelines. *Urban Water Journal*, Taylor & Francis, v. 16, n. 10, p. 709–717, 2019.

NKEMENI, V.; MIEYEVILLE, F.; TSAFACK, P. A distributed computing solution based on distributed kalman filter for leak detection in WSN-based water pipeline monitoring. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 18, p. 5204, 2020.

OLIVEIRA, E.; FONSECA, M.; KAPPES, D.; MEDEIROS, A.; STEFANINI, I. Leak detection system using machine learning techniques. In: *6th International Congress on Automation in Mining, At Santiago, Chile*. [S.l.: s.n.], 2018.

OLIVEIRA, L. E. S. d. *Concepção de um framework para monitoramento e teleoperação de máquinas-ferramenta CNC via internet aderente à Indústria 4.0*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2017.

PÉREZ-PÉREZ, E.; LÓPEZ-ESTRADA, F. R.; VALENCIA-PALOMO, G.; TORRES, L.; PUIG, V.; MINA-ANTONIO, J. Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 107, p. 104677, 2021.

PEREZ, R.; SANZ, G.; PUIG, V.; QUEVEDO, J.; ESCOFET, M. A. C.; NEJJARI, F.; MESEGUER, J.; CEMBRANO, G.; TUR, J. M. M.; SARRATE, R. Leak localization in water networks: A model-based methodology using pressure sensors applied to a real network in barcelona [applications of control]. *IEEE control systems magazine*, IEEE, v. 34, n. 4, p. 24–36, 2014.

POINTL, M.; FUCHS-HANUSCH, D. Assessing the potential of LPWAN communication technologies for near real-time leak detection in water distribution systems. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 21, n. 1, p. 293, 2021.

PONTI, A.; CANDELIERI, A.; GIORDANI, I.; ARCHETTI, F. A novel graph-based vulnerability metric in urban network infrastructures: The case of water distribution networks. *Water*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 11, p. 1502, 2021.

PROENÇA, M. H. Arquitetura iot para aplicação em smart campus. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2022.

QUIÑONES-GRUEIRO, M.; MILIÁN, M. A.; RIVERO, M. S.; NETO, A. J. S.; LLANES-SANTIAGO, O. Robust leak localization in water distribution networks using computational intelligence. *Neurocomputing*, Elsevier, v. 438, p. 195–208, 2021.

RADIOENGE. Gateway LoRaWAN RD43HAT. 2021. Disponível em: <https://www.radioenge.com.br/solucoes/iot/18-gateway-lorawan.html>. Acesso em: 21 out. 2021.

RADIOENGE. Módulo LoRaMESH RD42C. 2021. Disponível em: <https://www.radioenge.com.br/solucoes/iot/34-modulo-loramesh.html>. Acesso em: 21 out. 2021.

RAMOS, H. M.; MCNABOLA, A.; LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A.; PÉREZ-SÁNCHEZ, M. Smart water management towards future water sustainable networks. *Water*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 1, p. 58, 2020.

RASTOGI, E.; SAXENA, N.; ROY, A.; SHIN, D. R. Narrowband Internet of Things: A comprehensive study. *Computer Networks*, Elsevier, v. 173, p. 107209, 2020.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *ieee communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017.

ROBLES, T.; ALCARRIA, R.; ANDRÉS, D. M. de; CRUZ, M. N. de la; CALERO, R.; IGLESIAS, S.; LOPEZ, M. An iot based reference architecture for smart water management processes. *J. Wirel. Mob. Networks Ubiquitous Comput. Dependable Appl.*, v. 6, n. 1, p. 4–23, 2015.

ROJEK, I.; STUDZINSKI, J. Detection and localization of water leaks in water nets supported by an ICT system with artificial intelligence methods as a way forward for smart cities. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 2, p. 518, 2019.

ROMANO, M.; KAPELAN, Z.; SAVIĆ, D. A. Automated detection of pipe bursts and other events in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 140, n. 4, p. 457–467, 2014.

ROMERO, L.; BLESA, J.; PUIG, V.; CEMBRANO, G.; TRAPIELLO, C. First results in leak localization in water distribution networks using graph-based clustering and deep learning. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 53, n. 2, p. 16691–16696, 2020.

ROSSMAN, L. A.; WOO, H.; TRYBY, M.; SHANG, F.; JANKE, R.; HAXSTON, T. EPANET users manual. EPA-Environmental Protection Agency, 1994.

RUIZ, L.; GAMA, F.; RIBEIRO, A. Graph neural networks: Architectures, stability, and transferability. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 109, n. 5, p. 660–682, 2021.

SARANGI, A. K. Smart water leakage and theft detection using IoT. In: IEEE. *2020 International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech)*. [S.l.], 2020. p. 46–50.

SCARSELLI, F.; GORI, M.; TSOI, A. C.; HAGENBUCHNER, M.; MONFARDINI, G. The graph neural network model. *IEEE transactions on neural networks*, IEEE, v. 20, n. 1, p. 61–80, 2009.

SCOTT, S. L.; BARRUFET, M. A. *Worldwide assessment of industry leak detection capabilities for single & multiphase pipelines*. [S.l.]: Offshore Technology Research Center College Station, 2003.

SILVA, C. O. d. *Modelagem de rede de distribuição de água com ênfase no controle de perdas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2014.

SISINNI, E.; SAIFULLAH, A.; HAN, S.; JENNEHAG, U.; GIDLUND, M. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 14, n. 11, p. 4724–4734, 2018.

SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J. J.; SRINIVASAN, R. A. *Probabilidade e Estatística-: Coleção Schaum*. [S.l.]: Bookman Editora, 2016.

STEVENS, E.; ANTIGA, L.; VIEHMANN, T. *Deep learning with PyTorch*. [S.l.]: Manning Publications Company, 2020.

SUN, C.; PARELLADA, B.; PUIG, V.; CEMBRANO, G. Leak localization in water distribution networks using pressure and data-driven classifier approach. *Water*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 1, p. 54, 2020.

SURYAA, K.; VIGNESHWARAN, S.; SUJATHA, R. LoRaWAN based secured water leak monitoring system. In: IEEE. *2020 IEEE 4th Conference on Information & Communication Technology (CICT)*. [S.l.], 2020. p. 1–6.

TALARI, S.; SHAFIE-KHAH, M.; SIANO, P.; LOIA, V.; TOMMASETTI, A.; CATALÃO, J. P. A review of smart cities based on the internet of things concept. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 4, p. 421, 2017.

TEJASWINI, M.; SILO, G.; ASHWINI, B. Design of water supply distribution network using EPANET software: a case study of Kuvempu Nagar, Mandya. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 7, p. 1582, 2020.

TONG, H.; QIU, R. C.; ZHANG, D.; YANG, H.; DING, Q.; SHI, X. Detection and classification of transmission line transient faults based on graph convolutional neural network. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, CSEE, v. 7, n. 3, p. 456–471, 2021.

TORRES, L.; JIMÉNEZ-CABAS, J.; GONZÁLEZ, O.; MOLINA, L.; LÓPEZ-ESTRADA, F.-R. Kalman filters for leak diagnosis in pipelines: Brief history and future research. *Journal of Marine Science and Engineering*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 3, p. 173, 2020.

UMAR, M.; UHL, W. Integrative review of decentralized and local water management concepts as part of smart cities (lowasmart). Norsk institutt for vannforskning, 2016.

UNIDAS, O. ao das Nações. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. 2015. Disponível em: <https://www1.undp.org/content/dam/brazil/docs/agenda2030/undp-br-Agenda2030-completo-pt-br-2016.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

VENDEMIATTI, C. *Sistema remoto para monitoramento do consumo de água em tempo real*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2020.

WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SAVIC, D. A.; GRAYMAN, W.; BECKWITH, S.; KOELLE, E. Advanced water distribution modeling and management. Haestad press, 2003.

WU, Y.; DAI, H.-N.; TANG, H. Graph neural networks for anomaly detection in industrial internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 9, n. 12, p. 9214–9231, 2022.

WU, Z.; PAN, S.; CHEN, F.; LONG, G.; ZHANG, C.; PHILIP, S. Y. A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, IEEE, v. 32, n. 1, p. 4–24, 2020.

XYLOMENOS, G.; POLYZOS, G. C. Tcp and udp performance over a wireless lan. In: IEEE. *IEEE INFOCOM'99. Conference on Computer Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now (Cat. No. 99CH36320)*. [S.l.], 2012. v. 2, p. 439–446.

ZHANG, X.; TIAN, Q.; LIU, Y. Development of water leakage detection and localization system. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.], 2020. v. 744, n. 1, p. 012041.

ZHOU, B.; LAU, V.; WANG, X. Machine-learning-based leakage-event identification for smart water supply systems. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 7, n. 3, p. 2277–2292, 2019.

ZHOU, X.; TANG, Z.; XU, W.; MENG, F.; CHU, X.; XIN, K.; FU, G. Deep learning identifies accurate burst locations in water distribution networks. *Water research*, Elsevier, v. 166, p. 115058, 2019.