

Sistema FIEB

**SENAI
CIMATEC**

PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU

PRH 27.1 ANP / FINEP / SENAI CIMATEC

Exploração, Desenvolvimento e Produção de Petróleo, Gás Natural e
Biocombustível



DANIELLE MASCARENHAS MAIA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO BASEADO NA INTERNET
DAS COISAS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM
DUTOS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO EM CAMPOS
TERRESTRES**

Salvador

2023

DANIELLE MASCARENHAS MAIA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO BASEADO NA INTERNET
DAS COISAS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM
DUTOS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO EM CAMPOS
TERRESTRES**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Desenvolvimento Sustentável do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Sustentável.

Orientador: Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson
Coorientadores: Prof. Dr. Reinaldo Coelho Mirre /
Profa. Dra. Thamiles Rodrigues de Melo

Salvador

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

M217s Maia, Danielle Mascarenhas

Sistema de monitoramento baseado na internet das coisas para detecção de vazamentos em dutos de produção de petróleo em campos terrestres / Danielle Mascarenhas Maia. – Salvador, 2023.

89 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson.
Coorientador: Prof. Dr. Reinaldo Coelho Mirre.
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Thamiles Rodrigues de Melo.

Dissertação (Mestrado Profissional em Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2023.

Inclui referências.

1. Dutos. 2. Detecção de vazamentos. 3. Campos de produção - Petróleo terrestres. 4. Internet das coisas. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Lepikson, Herman Augusto. III. Mirre, Reinaldo Coelho. IV. Melo, Thamiles Rodrigues de. V. Título.

CDD 658.51

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Profissional em Desenvolvimento Sustentável

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “**SISTEMA DE MONITORAMENTO BASEADO NA INTERNET DAS COISAS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS NA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO EM CAMPOS TERRESTRES**” apresentada no dia 17 de julho de 2023, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Desenvolvimento Sustentável.

Orientador: **Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson**
SENAI CIMATEC

Coorientador: **Prof. Dr. Reinaldo Coelho Mirre**
FIEB

Coorientadora: **Prof.^a Dr.^a Thamiles Rodrigues de Melo**
FIEB

Membro Interno: **Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho**
SENAI CIMATEC

Membro Externo: **Prof. Dr. Manuel de Almeida Barreto Filho**
UFBA

Membro Externo: **Prof. Dr. Gabriel de Veiga Cabral Malgaresi**
FIEB

*Dedico este trabalho a aquele que se fez carne
e habitou entre nós.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter manifestado a sua presença na minha vida e ter me concedido direcionamento, força e sabedoria na realização desse projeto.

A minha família, por todo o apoio e motivação nos momentos difíceis, em especial a minha querida mãe.

Aos meus amigos, por me consolarem e incentivarem nos momentos de exaustão física e mental.

Ao Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson, pela orientação e confiança depositada no meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Reinaldo Coelho Mirre, pela coorientação e suporte ao Programa PRH 27.1.

A Profa. Dra. Thamiles Rodrigues de Melo, pela coorientação, disponibilidade e paciência por me ensinar a enxergar a luz no fim do túnel.

Aos colegas do grupo de pesquisa, em especial aos meninos de Iniciação Científica: João Vitor Mendes, Amanda Lima, João Almeida, Rodrigo Bastos e Matheus Silva, pelo companheirismo, dedicação e colaboração para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Sustentável (MPDS), pelo suporte e ensinamentos.

Ao Centro Universitário SENAI CIMATEC e ao seu Centro de Petróleo e Gás pela oportunidade de estudo, bolsa de estudo e disponibilização de infraestrutura.

À ANP, pelo desenvolvimento do Programa PRH 27.1 e apoio financeiro inicial através da bolsa de Mestrado.

E a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram e participaram dessa fase da minha vida.

RESUMO

Os oleodutos estão suscetíveis a vazamentos. Particularmente, os dutos dos campos de produção terrestres têm características que acentuam os problemas de vazamento, pois encontram-se espalhados em grandes áreas e com sistemas interligados por dutos assentados na superfície. Além disso, em sua maioria são sistemas antigos que operam sem assistência humana continuamente presente. Em consequência, eles estão mais propensos a falhas. Este trabalho propõe uma prova de conceito de um sistema de monitoramento baseado na internet das coisas para detecção em tempo real de vazamentos em dutos na produção de petróleo em campos terrestres. O sistema proposto, baseado em um método de detecção de vazamento por imagem térmica, informa ao operador o *status* de funcionamento do sistema por uma página Web. A comunicação do sistema de detecção de vazamento acontece por meio de rede Zigbee entre os dispositivos IoT e a uma rede móvel 4G. Os resultados dos testes realizados demonstram que é possível e plausível um sistema de detecção de vazamento visual, automático baseado em IoT com baixos custos de aquisição e operação nos campos terrestres de produção de petróleo, garantindo a redução dos riscos e impactos sociais, econômicos e ambientais. O sistema de detecção de vazamento proposto possibilita que supervisores em estações remotas e trabalhadores de campo monitorem o status de funcionamento de oleodutos por meio de computadores, *tablets* ou *smartphones*, independentemente do local em que se encontram.

Palavras-chave: dutos, detecção de vazamentos; campos de produção de petróleo terrestres; Internet das Coisas.

ABSTRACT

MONITORING SYSTEM BASED ON INTERNET OF THINGS FOR PIPELINES LEAKS DETECTING AT ONSHORE OIL PRODUCTION FIELDS

Oil pipelines are susceptible to leaks. Particularly, pipelines from onshore oil production fields have characteristics that accentuate leak problems, as they are spread over large areas and have systems interconnected by pipelines laid on the surface. Furthermore, they are mostly old systems that operate without continuously present human assistance. As a result, they are more prone to failure. This work proposes a proof of concept of a monitoring system based on the internet of things for real-time detection of leaks in pipelines in onshore oil production fields. The proposed system, based on a thermal image leak detection method, informs the operator of the operating status of the system via a web page. Leak detection system communication takes place via Zigbee network between IoT devices and a 4G mobile network. The results of the tests carried out demonstrate that a visual, automatic leak detection system based on IoT is possible and plausible with low acquisition and operation costs in onshore oil production fields, ensuring the reduction of risks and social, economic, and environmental impacts. environmental. The proposed leak detection system allows supervisors at remote stations and field workers to monitor the operating status of pipelines through computers, tablets, or smartphones, regardless of where they are located.

Keywords: *pipelines; leak detection; onshore oil fields; Internet of Things.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Volume de óleo descarregado em atividades onshore entre 2014 e 2022.....	14
Figura 2. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	15
Figura 3. Organização do Segmento de Produção da indústria de Pétroleo e Gás.....	17
Figura 4: Fragmento do Campo de Produção Terrestre no Espírito Santo.....	18
Figura 5. Configurações de campos de produção de petróleo terrestres	18
Figura 6. Unidade de bombeamento.....	19
Figura 7. Estação Coletora Canto do Amaro (Rio Grande do Norte).....	20
Figura 8. Tipo de oleodutos	20
Figura 9. Referencial de arquitetura IoT	30
Figura 10. Topologia Mesh aplicado no protocolo Zigbee	34
Figura 11. Organograma da metodologia do estudo.....	38
Figura 12. Representação da arquitetura do SDV proposto baseado em IoT.....	41
Figura 13. Diagrama de arquitetura da PoC para o sistema de detecção de vazamentos	43
Figura 14. PoC.....	48
Figura 15. Aplicação da técnica de segmentação por limiarização na imagem capturada.....	49
Figura 16. Teste de configuração dos módulos Xbee S2	50
Figura 17. Página Web em desenvolvimento do SDV denominada “Pipecom Bahia”.....	50
Figura 19. Câmera posicionada à 25 m do sistema hidráulico.	51
Figura 18. Câmera posicionada à 10 m do sistema hidráulico.	51
Figura 20. Câmera posicionada à 40 m do sistema hidráulico.	51
Figura 21. Criação da máscara com base na faixa de cor vermelha.....	52
Figura 22. Aplicação da técnica de contornos e borda.....	52
Figura 23. Envio automático das atualizações do Github para a plataforma Vercel.....	53
Figura 24. Recebimento da imagem com vazamento no site de monitoramento	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo de incidentes onshore em 2022.....	14
Tabela 2. Aplicação dos métodos baseado em Hardware.	23

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	<i>Application-Programming Interface</i>
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>).
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
MTC	<i>Many-Task Computing</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
SDV	Sistema de Detecção de Vazamento
SSH	<i>Secure Socket Shell</i>
PoC	Proof of concept
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
1.2	Premissas consideradas	13
1.3	Organização do Documento	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	Monitoramento de vazamento em oleodutos no Brasil	14
2.2	Infraestrutura da rede de escoamento dos campos de produção	17
2.3	Tipos de métodos de detecção de vazamentos em oleodutos	22
2.3.1	Método por emissão acústica	23
2.3.2	Ultrassônico	24
2.3.3	Ultrassônico por onda guiada	25
2.3.4	Fibra óptica distribuída	26
2.3.5	<i>SmartBall</i>	27
2.3.6	Amostragem de Vapor	27
2.3.7	Imagem Termal	27
2.4	Internet das Coisas para monitoramento em campos de produção de petróleo	29
2.4.1	Comunicações por satélite	33
2.4.2	Redes 2G, 3G e 4G	33
2.4.3	Wi-Fi	33
2.4.4	Bluetooth e Zigbee	33
2.4.5	Redes de longa distância e baixa potência	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4	A ARQUITETURA DO SISTEMA PROPOSTO	41
5	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	47

5.1	Planejamento e execução	47
5.2	Arquitetura da PoC	48
5.3	Processo de integração das camadas	49
5.4	Testes finais	51
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
9	ANEXOS	63
9.1	Descrições técnicas da câmera <i>Flir ADK Thermal Vision</i>	63
9.2	Descrições técnicas do <i>Raspberry Pi 3 Model B</i>	64
9.3	Descrições técnicas do <i>módulo Zigbee XBee S2</i>	65
10	APÊNDICES	66
10.1	Algoritmo de captura, envio e recebimento da imagem	66
10.2	Algoritmo de processamento da imagem capturada	68
10.3	Algoritmo de automatização do sistema	71
10.4	Algoritmo da estrutura do site: home	72
10.5	Algoritmo de verificação das subpáginas do site	75
10.6	Algoritmo de personalização do visual do site	77
10.7	Algoritmo da lógica de funcionamento do site (<i>back-end</i>)	87

1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás tem papel estratégico no Brasil por sua importância energética e pelos benefícios proporcionados à sociedade. O setor continuará contribuindo com o crescimento econômico do país através de investimentos previstos em exploração e produção da ordem de US\$ 180 bilhões entre 2022 e 2031. A produção nacional de petróleo deverá alcançar em 2031 um volume total da ordem de 5,2 Milhões barris por dia (IBP, 2023).

Para que o Brasil e o setor concretizem as oportunidades associadas à cadeia de produção de petróleo é necessário, porém, superar alguns desafios, especialmente o que tange o monitoramento e controle de vazamento de óleo. A produção de petróleo terrestre ocorre, em grande maioria, em regiões do interior e majoritariamente no Nordeste do Brasil (FIRJAN, 2017). Essas áreas são carentes de infraestruturas, como: estradas, redes elétricas e redes telefônicas (MENDES et al., 2019), o que torna o monitoramento do escoamento da produção de petróleo uma atividade desafiadora.

Em campos de produção terrestres, após a extração, o petróleo segue por uma rede de oleodutos até as estações coletoras, onde é preliminarmente tratado e depois para as refinarias. Essa rede é muita das vezes extensa e complexa, além de estar exposta às condições climáticas e outras contingências ambientais ao longo dos anos. Em consequência, uma das desvantagens do transporte de petróleo por oleodutos é a possibilidade de vazamentos, que podem causar graves danos ambientais e socioeconômicos. Por isso, a indústria de óleo e gás busca continuamente por sistemas de monitoramento sensíveis, exatos, confiáveis além disso capazes de detectar o vazamento de forma remotamente.

Atualmente, o monitoramento de muitos oleodutos do sistema de produção de petróleo de campos terrestres no Brasil é realizado por meio de uma inspeção visual, na qual o operador tem que se deslocar até determinados trechos da linha de operação e observar as áreas que o chamem atenção. Também podem ser feitas inspeções visuais por terceiros, contratados apenas com esse objetivo, ou então uma análise de dados secundários oriundos do sistema supervisorio implementado, como Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA*) de trechos suspeitos nos oleodutos.

O monitoramento de oleodutos e a detecção de vazamentos são atividades importantes para as operadoras de produção de petróleo, seja pelo aumento da rigorosidade da legislação ambiental ou pela confiabilidade do sistema. Quanto mais prévias forem as detecções, mais rápidas serão as respostas, permitindo uma intervenção mais efetiva no sistema (ADEGBOYE; FUNG; KARNIK, 2019).

Novas iniciativas sobre monitoramento e/ou detecção de vazamentos rápidas e precisas são fundamentais para que a indústria do petróleo possa não apenas debater o tema, mas continue sendo competitiva com sustentabilidade. Além dos dutos estarem em grandes áreas remotas, eles estão interligados com sistemas antigos que operam sem assistência humana continuamente presente.

Trabalhos de pesquisas anteriores raramente abordam o monitoramento para detecção de vazamento baseado na Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things* – IoT) (ABA et al., 2021). No entanto, um monitoramento inteligente e confiável é altamente desejável, e a Internet das Coisas é a chave para estabelecer esse acompanhamento por meio de dispositivos microcontrolados de baixo custo (BHASKARAN et al., 2021), que podem ser conectados em rede sem fio, viabilizando, no caso, aplicações em campos de petróleo terrestres (*onshore*).

A tomada de ações preventivas nesse contexto, proporcionará que o setor contribua cada vez mais com a industrial nacional e parcerias essenciais aos governos na contribuição no desafio de atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 que lhe são atinentes. Diante deste cenário, contribuir no monitoramento dos oleodutos em campos terrestres é significativo para o crescimento sustentável do setor ao longo dos anos.

Observa-se que embora as operadoras usem uma ampla gama de técnicas para detecção de vazamentos, a aplicação da tecnologia de detecção remota de vazamentos em linhas de produção e de coleta é rara ou inexistente, e não oferece monitoramento ininterrupto e em tempo real ao longo da rota da linha. A fim de contribuir na área de produção de petróleo em campos terrestres, este trabalho propõe uma arquitetura de um sistema de monitoramento baseado na Internet das Coisas para auxiliar na detecção de vazamentos em tempo real em oleodutos, com uma relação custo-benefício significativamente baixa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um sistema de monitoramento baseado na Internet das Coisas para detecção de vazamentos em oleodutos da produção de petróleo em tempo real de campos terrestres.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar uma configuração e/ou arquitetura do sistema de monitoramento baseado na Internet das Coisas para detecção de vazamento;

- Construir uma prova de conceito (do inglês, *Proof of Concept* – PoC) da arquitetura projetada para o sistema de detecção de vazamento (SDV);
- Realizar testes experimentais em um sistema hidráulico fechado de bancada para validação da PoC;
- Avaliar os resultados obtidos para análise do conceito desenvolvido.

1.2 Premissas consideradas

- O SDV proposto não será aplicado em oleodutos subterrâneos.

1.3 Organização do Documento

Este trabalho de dissertação de mestrado é composto por seis capítulos, estruturados da seguinte forma:

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão da literatura sobre monitoramento e detecção de vazamento em oleodutos e as suas principais características, conceitos e tecnologias envolvidas em sistemas baseados em IoT.

No Capítulo 3, os materiais e a metodologia utilizada são descritos para o desenvolvimento do SDV proposto.

No Capítulo 4, é descrito a etapa experimental da dissertação, assim como os detalhes de como foi planejado e executado.

No Capítulo 5, é apresentado os resultados e discussões dos testes experimentais;

Por fim, no Capítulo 6, são tecidas as considerações finais e apresentam-se as percepções obtidas durante o desenvolvimento da pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão da literatura sobre o monitoramento e a detecção de vazamento em oleodutos, assim como as principais características, conceitos e tecnologias da Internet das Coisas que impactam no conceito a ser proposto.

2.1 Monitoramento de vazamento em oleodutos no Brasil

Em 2007, a indústria de petróleo do Brasil relatou um custo de cerca de R\$ 120 mil por m³ vazado. Um vazamento de 50 m³ pode acarretar uma perda estimada em R\$ 60 milhões, por exemplo. Além disso, o vazamento de petróleo causa sérios danos ambientais, prejudicando todo o ecossistema a curto e a longo prazo, podendo colocar em risco vidas humanas. (PETRO & QUÍMICA, 2007).

No relatório anual de Segurança Operacional de 2022 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP foram comunicados no total 53 acidentes relacionados a descarga de óleo em seus campos terrestres, como demonstrado na Tabela 1 (ANP, 2020).

Tabela 1. Resumo de incidentes *onshore* em 2022.

Acidentes mais comunicados		
1	Descarga menor de óleo	31
2	Princípio de incêndio	26
3	Descarga significativa de óleo	22
4	Ferimento com afastamento por mais de 3 dias	11
5	Descarga significativa de água oleosa	10

Fonte: ANP, 2023.

No mesmo relatório também é ilustrado o volume de óleo descarregado em terra por meio do gráfico em barras apresentado na Figura 1.

Figura 1. Volume de óleo descarregado em atividades *onshore* entre 2014 e 2022.



Fonte: ANP, 2023

A ANP define o termo descarga, como “qualquer despejo, escape, derrame, vazamento, esvaziamento, lançamento para fora ou bombeamento de substâncias nocivas ou perigosas, em qualquer quantidade, a partir de uma embarcação, instalação, sistema ou equipamento”. Já o termo vazamento é a liberação não planejada ou não controlada de qualquer material oriundo da contenção primária (ANP SIM, 2020).

No gráfico da Figura 1 é possível notar que, de fato, o volume vazado reduziu-se desde 2014, contudo essa redução não é contínua, sempre havendo variações para mais ou para menos. O segundo maior valor desde 2014 foi atingido em 2022. As descargas menores e significantes de óleo foram, respectivamente, a primeira e terceira tipologias de acidente mais comum nas instalações *onshore*.

Esses resultados demonstram que a indústria de Petróleo e Gás ainda enfrenta desafios significativos em relação à sustentabilidade, principalmente nesse momento que o Brasil e o mundo estão comprometidos com a Agenda Mundial 2030. O desejo mundial por um planeta ecologicamente limpo, seguro para vida, garantindo que todas as pessoas tenham paz e prosperidade foi transformado em Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que foram adotados durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável em setembro de 2015 (Estratégia ODS, 2023). Hoje, 169 metas fazem parte da Agenda Mundial 2030 derivadas dos seguintes 17 ODS, conforme ilustrado na Figura 02.

Figura 2. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: ONU Brasil

- **1º ODS** – Erradicação da pobreza: acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares.
- **2º ODS** – Fome zero e agricultura sustentável: acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável.
- **3º ODS** – Saúde e bem-estar: assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades.
- **4º ODS** – Educação de qualidade: assegurar a educação inclusiva, e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos.
- **5º ODS** – Igualdade de gênero: alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas.
- **6º ODS** – Água limpa e saneamento: garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos.
- **7º ODS** – Energia limpa e acessível: garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos.
- **8º ODS** – Trabalho decente e crescimento econômico promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo, e trabalho decente para todos.
- **9º ODS** – Inovação infraestrutura: construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação.
- **10º ODS** – Redução das desigualdades: reduzir as desigualdades dentro dos países e entre eles.
- **11º ODS** – Cidades e comunidades sustentáveis: tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis.
- **12º ODS** – Consumo e produção responsáveis: assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis.
- **13º ODS** – Ação contra a mudança global do clima: tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.
- **14º ODS** – Vida na água: conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares, e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável.
- **15º ODS** – Vida terrestre: proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da Terra e deter a perda da biodiversidade.

- **16º ODS** – Paz, justiça e instituições eficazes: promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis.
- **17º ODS** – Parcerias e meios de implementação: fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, o desenvolvimento de novos sistemas de monitoramento para detecção de vazamento pode desempenhar um papel fundamental na promoção de vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pelas Nações Unidas, tais como: a ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 15 (Vida terrestre).

2.2 Infraestrutura da rede de escoamento dos campos de produção

O petróleo obtido de diferentes reservatórios possui características distintas. Mas, basicamente o petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos, e uma parcela de outros elementos, como o nitrogênio, enxofre e oxigênio (THOMAS, 2004). Pode se apresentar no estado sólido, líquido ou gasoso, dependendo das condições de pressão e temperatura em que são encontrados (VAZ, 2008). No estado líquido, o petróleo é uma substância oleosa, menos densa que a água, inflamável, com cheiro característico e cor variando entre preto e castanho-claro (THOMAS, 2004).

No Brasil, a produção de petróleo e gás natural está estruturada em três segmentos principais: *upstream*, *midstream* e *downstream*. O *upstream* engloba a prospecção, exploração, extração e produção do petróleo bruto e gás. O *midstream* envolve a transferência, transporte e armazenamento de petróleo ou gás natural. Por fim, o *downstream* refere-se ao refino do petróleo bruto, comercialização e distribuição dos produtos derivados do petróleo, conforme a ilustração na Figura 3.

Figura 3. Organização do Segmento de Produção da indústria de Pétroleo e Gás



Fonte: 3R Petroleum

Um campo terrestre de petróleo, como demonstrado na Figura 4 é composto por uma grande quantidade e diversidade de poços, equipamentos de produção e de apoio, ligados por uma rede de dutos que conecta os poços produtores às estações coletoras (THOMAS, 2004).

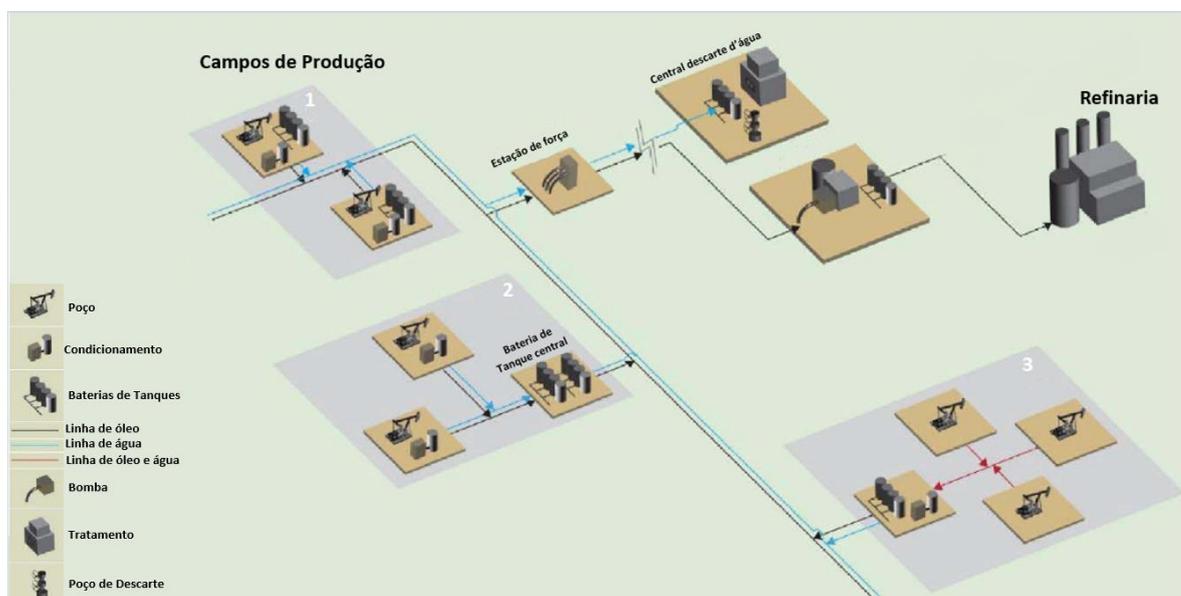
Figura 4: Fragmento do Campo de Produção Terrestre no Espírito Santo.



Fonte: Seacrest (2023).

Embora toda a produção de petróleo inclua um poço, equipamentos de condicionamento e tanques, a configuração e a logística variam dependendo de fatores como taxas de produção, geografia e questões contratuais (EERC, 2015). Em muitos casos, os poços de petróleo, os equipamentos de condicionamento e os tanques não estão todos localizados em um único local de produção, conforme ilustrado na Figura 4. A Figura 5 apresenta mais duas configurações típicas desse sistema de produção.

Figura 5. Configurações de campos de produção de petróleo terrestres



Fonte: EERC (2015)

Uma outra configuração consiste em uma bateria de tanque central (BTC) que coleta óleo e água de vários locais de produção, cada um com seus próprios poços e equipamentos de condicionamento. Nessas situações, os oleodutos de coleta transferem petróleo bruto e água do local de produção para o BTC, e linhas de coleta adicionais transportam os mesmos produtos do BTC para outra instalação, promovendo agregação ou processamento ou descarte adicional (EERC, 2015).

Uma terceira configuração inclui a localização de equipamentos de condicionamento e tanque em uma instalação centralizada, fornecida por vários poços separados, usando dutos de coleta para transportar o fluido produzido (mistura de óleo, água e gás) do local do poço para o condicionamento centralizado e localização do tanque (EERC, 2015). Dependendo do tipo de reservatório, este fluxo pode conter uma mistura gás-óleo, gás-óleo-água, óleo-água, óleo-água-gás-areia, entre outras configurações, caracterizando, portanto, um escoamento multifásico (BRATLAND, 2010). O fluido então escoar pelos dutos conectados desde à cabeça dos poços até as estações coletoras, como exemplificado na Figura 6 e 7.

Figura 6. Unidade de bombeamento



Fonte: Autoria própria

Figura 7. Estação Coletora Canto do Amaro (Rio Grande do Norte)



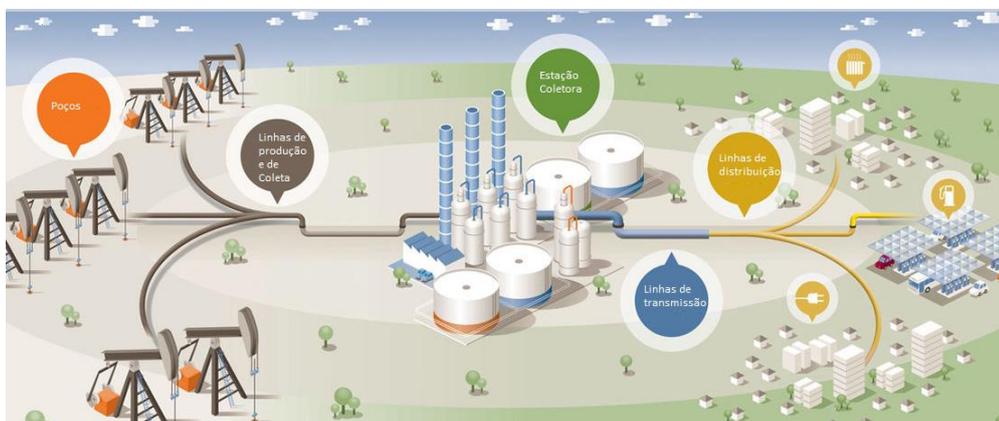
Fonte: Delfim Martins / Tyba

Os dutos podem ser classificados de acordo com o tipo de fluido, além de características como pressão, distância e localização (LU et al., 2020). A ANP define oleodutos como dutos terrestres de transporte ou transferência que movimentam petróleo, líquidos de gás natural, condensado, derivados líquidos de petróleo e gás liquefeito de petróleo; exceto gases liquefeitos por baixa temperatura. Os dutos que movimentam hidrocarbonetos líquidos e outros combustíveis tais como, biodiesel, mistura óleo diesel /biodiesel ou etanol, de forma sequencial (polidutos), são considerados oleodutos (ANP RTDT, 2011).

Contudo há também os gasodutos, dutos que realizam o transporte ou transferem apenas do gás natural recebem o nome de gasoduto. Já as que fazem esse processo com óleo bruto, são chamadas de oleodutos (ETESCO, 2022). As diferenças entre oleodutos e gasodutos vão além do tipo de fluido transportado. Há uma grande distinção no contexto de instalação, capacidade, pressão, velocidade, compressibilidade, temperatura, entre outros fatores (INTERNATIONAL PIPE, 2023).

Os oleodutos são subdivididos, de acordo com a sua função, em linhas produtoras, de coleta, de transmissão e de distribuição (KENNEDY, 1993, apud GLISIC, 2014, p. 423), como ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Tipo de oleodutos



Fonte: VESTAMID NRG

As linhas produtoras, dutos de interesse desse trabalho, são as tubulações que se conectam da cabeça do poço para a estação coletora ou para uma estação satélite, dependendo da distância do poço para a estação coletora. Elas transportam uma mistura de petróleo bruto, gás, água e resíduos sólidos do poço para o armazenamento central ou instalações de processamento de campo. Elas são relativamente curtas, com diâmetros externos que variam entre 50 e 150 mm (2” a 6”). Por serem relativamente curtas, baixas pressões operacionais são suficientes para transportar o conteúdo (GLISIC, 2014).

As linhas de coleta, também de interesse desta pesquisa, transportam o petróleo concentrados numa área satélite até as estações coletoras. Elas têm um diâmetro maior, normalmente variando entre 100 mm e 400 mm (4” a 16”), e uma pressão mais alta necessária para mover seus fluidos (GLISIC, 2014). A união desse tipo de linha constitui um sistema complexo e dinâmico devido às características da produção de petróleo, localização em grandes áreas rurais e infraestrutura de apoio limitada. Esses oleodutos estão sempre em transição de fluxo e pressão. Essa e as outras características criam desafios maiores para a detecção de vazamentos em linhas de coleta (EERC, 2015).

As linhas produtoras e as de coletas são comumente fabricadas de aço e revestidos externamente para protegê-los contra a corrosão (GLISIC, 2014). Adicionar um sistema de detecção de vazamento externo não alivia os custos normais de manutenção quando comparado ao sistema SCADA básico. Contudo, adicioná-lo é a principal forma de minimizar o volume de fluido derramado e conseqüentemente, se obterá a redução do custo diretamente atribuído à implementação externa do SDV (EERC, 2015).

Uma variedade de tecnologias mais avançadas pode ser adicionada ao sistema de automação desse processo, fornecendo maior precisão no monitoramento das condições operacionais e/ou tempo de resposta mais efetivo para a detecção de vazamentos (EERC, 2015). Sendo assim, um investimento em sistemas de automação avançados para diminuir o impacto de vazamentos em dutos é justificável quando uma empresa reconhece que os custos dos esforços de remediação podem ser maiores em ordens de magnitude. Entretanto, muitas outras razões para aplicação de um SDV são intangíveis, como:

- Dados mais consistentes e frequentes para melhor gestão do sistema e da produção;
- Maior previsibilidade do processo;
- Capacidade de divulgar e compartilhar dados de forma rápida e ampla;
- Capacidade de adquirir, integrar e analisar dados e, em seguida, divulgar rapidamente e agir sobre os resultados das análises;

- Possibilidade de predição de desempenho do sistema para operação e manutenção.
- Portanto, a aplicação do sensoriamento externo longo dos oleodutos traz como benefícios:
- Redução da perda de produção e material despejado ao meio ambiente;
 - Redução do número de multas;
 - Redução de contratos com empresas terceiras para limpeza do solo, rio e mares;
 - Redução da necessidade de inspeção visual constante;
 - Preservação do meio ambiente e os impactos na sociedade decorrentes dos vazamentos;
 - Melhoria de resultados e práticas vinculadas a ESG (*Environmental, Social and Governance*): refere-se a práticas empresariais e de investimentos que se preocupam com critérios de sustentabilidade (BUZZO, 2022).

2.3 Tipos de métodos de detecção de vazamentos em oleodutos

Há diversas classificações dos métodos de detecção de vazamentos em dutos, por causa do uso de diferentes princípios e abordagens de trabalho (ADEGBOYE, FUNG, KARNIK, 2019). Os métodos podem ser classificados de acordo com o grau de automação (técnicas de detecção automática, semiautomática e manual) ou grau intuitivo de dados de detecção (detecção direta e indireta), por exemplo. Outras abordagens os dividem em três categorias: métodos baseados em *hardware*, métodos baseados em *software* e métodos biológicos (ZHANG, 1996) ou em sistemas internos, sistemas externos e sistemas visuais (ADEGBOYE, FUNG, KARNIK, 2019; EERC, 2015). A categoria mais comum é a que classifica os métodos baseados em *hardware* e *software* (LU et al., 2020).

A utilização de dispositivos projetados por princípios físicos nos dutos refere-se aos métodos de detecção baseados em *hardware* (LU et al., 2020). Geralmente, eles são sensíveis a pequenos vazamentos e precisos em relação à localização. Normalmente, a instrumentação é executada ao longo de todo o comprimento da tubulação, o que ajuda na detecção de vazamentos grandes e pequenos em tempo hábil e permite a detecção de um vazamento em qualquer lugar ao longo da tubulação.

A Tabela 2 relaciona os métodos baseado em *hardware* que podem ser aplicados tanto em oleodutos quanto em gasodutos.

Tabela 2. Aplicação dos métodos baseado em Hardware.

Classificação	Técnicas	Aplicação				
		GU	GL	GS	OL	OS
Método baseado em Hardware	Sistema LiDAR	x	x			
	Absorção de laser de diodo	x	x			
	Sistema de radar de ondas milimétricas	x	x			
	Imagem termal	x	x		x	
	Imagem espectral	x	x			
	Método por onda sonora	x	x	x	x	x
	Método ultrassônico por onda guiada	x	x	x	x	x
	Sistema sonar			x		x
	Método por emissão acústica	x	x	x	x	x
	Método ultrassônico	x	x	x	x	x
	Método de sensor de fibra óptica distribuída	x	x	x	x	x
	Método <i>Tracer</i>	x	x	x		
	Método <i>SmartBall</i>	x	x	x	x	x
	Método de medidor de vazão ultrassônico	x	x	x	x	x
	Método de transmissor de pressão dinâmica	x	x	x	x	x
	GPR	x	x		x	
	Método por cabo				x	
Método <i>Sniffer</i>	x	x				
Método de amostragem de vapor	x	x		x		

Legenda: GU-gasoduto urbano; GL- gasoduto de longa distância; GS-gasoduto subterrâneo; OL-oleoduto de longa distância; OS-oleoduto subterrâneo;

Fonte: Adaptado LU et al (2020).

Os campos de produção em estudo utilizam dutos longos, logo o método de detecção a ser escolhido deve ser aplicado para oleodutos e gasodutos de longa distância. Dentre os métodos da Tabela 2, observa-se que apenas os seguintes podem ser escolhidos: imagem termal, onda sonora, ultrassônico, ultrassônico por onda guiada, emissão acústica, fibra óptica distribuída, *SmartBall* e Amostragem de Vapor. Nas Subseções 2.2.1 a 2.2.8 são apresentadas a definição e aplicação de cada método, assim como as vantagens e desvantagem para o cenário em estudo.

2.3.1 Método por emissão acústica

Um vazamento provocado pelo aparecimento de uma ruptura ou dano, gera uma propagação de som através do fluido, dada pela diferença entre a pressão interna do duto e a pressão atmosférica. A detecção acústica de vazamentos pode fazer uso da energia associada com o escapamento de fluido através da ruptura no duto ou pela vibração emitida pelo rompimento da parede do duto (MENG et al., 2011) (ADEGBOYE, FUNG, KARNIK, 2019).

O método acústico é capaz de distinguir ondas acústicas de vazamentos de outros tipos de sinais, como ruído de fundo e sinais de distorção. Essas ondas são captadas por sensores

posicionados ao longo do duto (acelerômetros, hidrofones, transdutores piezoelétricos, etc.). Quando ocorre um vazamento, o sinal acústico de vazamento e o ruído de fundo chegam aos sensores e são comparados com os perfis de sinais de ondas acústicas presentes no sistema (MENG et al., 2011).

O ruído acústico depende de vários fatores: tamanho e forma do vazamento, topologia da superfície do material do vazamento, diferença de pressão, velocidade e perfil do fluxo (HOLSTEIN, BARTH, PROBST, 2016). O intervalo de tempo entre os sinais acústicos detectados por dois sensores é empregado para identificar a posição do vazamento (LI et al., 2012).

Através da aplicação do método de emissão acústica pode-se detectar o início de um vazamento, estimar o seu tamanho, assim como localizá-lo. O benefício de usar a emissão acústica para monitoramento da rede de dutos é a fácil utilização e a conveniência da instalação, pois não requer o desligamento do sistema para instalação ou calibração (ADEGBOYE, FUNG, KARNIK, 2019).

A chave para o método da onda sonora é determinar a velocidade da onda sonora (LOTH et al., 2003). A principal dificuldade desta tecnologia está em como selecionar o método de filtragem eficaz para eliminar o ruído e extrair o sinal característico fraco e encontrar o ponto de virada abrupto do sinal que pode caracterizar um vazamento (HAO, SHI, 2008). O efeito do ruído de outras fontes pode facilmente mascarar o som real do vazamento (ADEGBOYE, FUNG, KARNIK, 2019). Uma de suas desvantagens é ser um método muito dependente do material da tubulação, sendo difícil aplicá-lo em tubulações com diferentes tipos de materiais (FAHIMIPIREHGALIN ET AL, 2021).

2.3.2 Ultrassônico

O método ultrassônico é caracterizado por ser baseado em hardware, acústico e não invasivo. Uma maneira usual de aplicação da técnica é usar um pulsar, um transdutor e um dispositivo para exibir os sinais capturados. O pulsar é responsável por gerar ondas ultrassônicas que percorrem pelas paredes dos dutos. Uma parte da energia dessas ondas será refletida, e esses sinais serão captados pelo transdutor receptor (BOND, 2018).

Quando ocorre um vazamento na tubulação, o fluido na tubulação é perturbado e a tensão no transdutor receptor muda perceptivelmente. Ao coletar várias mudanças de tensão no ponto de vazamento e traçar a relação entre o ponto de vazamento e a variação de tensão, o vazamento pode ser encontrado imediatamente (LU et al., 2020).

A inspeção ultrassônica é um método muito útil para detectar discontinuidades superficiais ou subsuperficiais em dutos. Em comparação com outros métodos não destrutivos, suas principais vantagens são: alto poder de penetração e sensibilidade, permitindo a detecção de falhas profundas e extremamente pequenas. Além disso, apenas uma superfície precisa estar acessível (BOND, 2018).

Contudo, sua implementação requer um amplo conhecimento e aplicação cuidadosa de técnicos experientes. Outra desvantagem está relacionada aos transdutores piezoelétricos. São necessários acoplantes para fornecer transferência efetiva da energia entre os transdutores e a tubulação. Em muitas aplicações, padrões de referências também são necessários, tanto para calibração de equipamentos quanto para caracterização de falhas (BOND, 2018). Além disso, o alcance de detecção é muito influenciado pelos materiais dos dutos e suas ligações com ancoragens e outros sistemas.

2.3.3 Ultrassônico por onda guiada

O método ultrassônico por onda guiada envolve a transmissão multimodal de uma onda ultrassônica em longa distância devido à reflexão repetida através de um guia de onda. Para detecção de vazamentos é instalado um anel de transdutores piezoelétricos ao redor do duto. Quando há a necessidade de se realizar a inspeção, é acoplado um dispositivo que controla os transdutores, fazendo com que eles emitam os pulsos e os recebam de volta, levando à conversão destes sinais em uma variável que o computador consiga interpretar e analisar (GHAVAMIAN et al, 2018).

Um dos principais desafios no uso das ondas guiadas para o monitoramento de dutos é encontrar um modo de operação das ondas emitidas, pois uma única fonte de excitação é capaz de gerar todos os modos existentes em sua largura de banda. Então, inicialmente é muito importante definir a faixa de frequência que as ondas se comportam como uma função constante (GOLMOHAMADI, 2015). Em seguida, os dados adquiridos devem passar por um sistema, que transforme estes sinais em dados melhores para a análise de detecção de vazamento, e depois compará-los com o sinal captado anteriormente com o duto em condições normais.

A técnica de ondas ultrassônicas guiadas se apresenta como uma ótima proposta para monitorar longas extensões de duto, por conta da capacidade das ondas guiadas (*lamb waves*) se propagarem em materiais como o aço. Contudo, a técnica apresenta alguns desafios. Por exemplo, tem-se dificuldade na definição dos equipamentos a serem utilizados para a propagação das ondas guiadas: atualmente existe pouca variedade no mercado de “dispositivos

de prateleira’’ e seu custo é alto. Outra dificuldade está relacionada ao processamento de dados: definir a frequência ideal para a emissão das ondas guiadas e compará-la com os sinais recebidos é um processo que exige um conhecimento técnico especializado. Além disso, o método exige uma pré-calibração, ou seja, um levantamento prévio do comportamento das ondas na tubulação em seu estado operacional. Mudanças na tubulação ou nos sistemas a ela acoplados podem afetar severamente os resultados.

2.3.4 Fibra óptica distribuída

Para que uma fibra óptica seja usada como um sensor, ela deve alterar suas propriedades ópticas em resposta às perturbações externas. A escolha mais comum de sensores de fibra óptica em aplicações hidráulicas é baseada em espalhamento (sensores baseados em espalhamento Rayleigh e Brillouin) e modulada em comprimento de onda (rede de Bragg), pois esses métodos de detecção podem atuar como sistemas de sensores distribuídos, ou seja, em vez de medirem uma perturbação em um único ponto, eles são capazes de detectar ao longo de todo seu comprimento (PRISUTOVA et al, 2022).

O método de fibra óptica distribuída, basicamente, consiste na análise da reflexão característica de pulsos de laser emitidos através de um cabo de fibra óptica. Sensores instalados a cada metro ao longo do cabo medem as alterações na reflexão do laser ao longo do cabo. Essas medições são feitas analisando a intensidade e a cor dos pulsos de laser, alterados em consequência das mudanças da temperatura, do surgimento de tensões e de efeitos de vibrações ao longo do cabo de fibra óptica. Diferentes tipos de sensores são instalados para interpretar diferentes tipos de alterações no cabo (TANIMOLA e HILL, 2009).

Os sensores de fibra óptica não requerem energia elétrica e combinam baixas perdas de transmissão óptica e pouca deterioração do sinal, o que lhes permite transmitir grandes volumes de informações rapidamente e por longas distâncias. Além disso, a mesma fibra pode ser usada para detectar e transmitir informações. Isso é especialmente benéfico ao usar a detecção distribuída, pois uma fibra pode atuar como vários elementos sensíveis, exigindo apenas um cabo para conectá-la a um sistema de aquisição de dados (PRISUTOVA et al, 2022).

Contudo, os sistemas de detecção que são instalados através da parede do tubo e requerem a perfuração de um orifício separado para acomodá-los são considerados difíceis de adaptar. Essa observação significa que os aspectos práticos do uso de um protótipo de sistema de detecção de laboratório em cenários da vida real são frequentemente negligenciados ao conceber o sistema (PRISUTOVA et al, 2022).

2.3.5 *SmartBall*

O método *SmartBall* é uma tecnologia de detecção abrangente. Ela inclui uma série de sensores acústicos, acelerômetros, magnetômetros, transmissores ultrassônicos, sensores de temperatura, dentre outros. Esses sensores rolam na tubulação seguindo o fluxo (LU et al., 2020).

O detector *SmartBall* pode ser colocado na tubulação através de dispositivo de *pigging* instalado. Para poder usar *SmartBalls* em dutos de transmissão de longa distância, a *Pure Technologies* melhorou sua capacidade de bateria (110h) a capacidade de armazenamento de dados (16 GB - para diâmetro inferior a 100 mm e 32 GB para diâmetro superior a 100 mm). Após testes, o *SmartBall* pode identificar gás natural com um vazamento de 0,11 L/min (ARIARATNAM; CHANDRASEKARAN, 2010). Durante a demonstração técnica a faixa de localização de erros de vazamento foi de ± 2 m.

As principais restrições deste método se relacionam à necessária presença de um operador para inserir as *SmartBalls*, além das limitações no caso de tubulações com entroncamentos, desvios e *manifolds*, característicos dos campos de produção de petróleo.

2.3.6 Amostragem de Vapor

A técnica de amostragem de vapor consiste em coletar amostras de vapor de hidrocarboneto perto da tubulação monitorada para determinar o vazamento de óleo com base na concentração de gás medido. Este método pode usar um sistema de monitoramento de vapor ou dispositivo detector móvel (LU et al., 2020), (ALJUAID et al. 2020).

O sistema de monitoramento de vapor utiliza um tubo de ensaio semipermeável em paralelo com o topo da tubulação a ser monitorada. Se a tubulação vazar, o gás pode penetrar através da membrana do tubo e ser bombeado para a estação de monitoramento (LU et al., 2020).

Esta técnica é particularmente adequada para a detecção de pequenas concentrações de gás difuso. Além disso, ela tem um elevado tempo de detecção envolvido e requer muitos sensores em tubulações longas; por isso, esta técnica não é muito eficaz (ALJUAID et al. 2020).

2.3.7 Imagem Termal

O método de detecção por imagens térmicas, também conhecido como termografia infravermelha, utiliza câmera infravermelha para analisar as mudanças de radiação térmica em

torno do duto (LU et al., 2020) na faixa infravermelha de 900 –1400 nanômetros (nm) (MANEKIYA; ARULMOZHIVARMAN, 2016).

A técnica de termografia não é afetada pelos materiais ou tamanhos dos tubos e suas conexões. Essa vantagem torna viável a implantação de uma câmera infravermelha para superar as restrições das tecnologias convencionais de detecção de vazamentos. Contudo, as condições da superfície da área de teste, a radiação solar, a cobertura de nuvens e a temperatura ambiente podem impactar nas capacidades deste método (MOHD; HO, 2022).

Um termovisor portátil é a maneira mais fácil de inspecionar dutos em locais contidos em uma grande instalação. Para dutos em locais remotos, a montagem do sistema em drones oferece resultados mais eficientes, pois permite que o usuário avalie rapidamente as informações através do *streaming* em tempo real. No entanto, devido à variação de posições e ao movimento rápido dos drones, a maioria dos algoritmos de visão de máquina não são adequados para lidar com as imagens capturadas. Além disso, os drones não são conhecidos por serem equipamentos intrinsecamente seguros em ambientes com alto risco de ignição (FAHIMIPIREHGALIN ET AL, 2021).

Outra possibilidade é o uso de várias câmeras fixadas em diferentes posições para capturar imagens de diferentes partes de uma planta de grande porte. Nesse caso, cada câmera captura uma parte específica da planta e a inspeção baseada em visão é implementada nessa focando as tubulações visualizadas (FAHIMIPIREHGALIN ET AL, 2021).

Fahimipirehgalin et al propuseram um método para inspeção visual automatizada e independente da competência e inspeção humana para plantas industriais. Na fase de experimentação, utilizou-se uma câmera IR TIM640 - Micro-Epsilon. A partir dos resultados obtidos no teste descrito, observou-se que os vazamentos puderam ser detectados, localizados e classificados com alta precisão. As trajetórias dos vazamentos puderam ser detectadas pela segmentação e pelo método block-PCA introduzido nesta contribuição.

A precisão da abordagem proposta e o tempo de detecção foram considerados satisfatórios, e o parceiro industrial considerou o método como uma abordagem aplicável para plantas industriais reais. Entretanto, um dos desafios restantes para a aplicação industrial é a questão de qual a melhor forma de implantar efetivamente essa abordagem para plantas de grande escala. Além disso, observa-se que nessa aplicação não foi utilizado nenhum sistema de comunicação.

A IntelliView, líder no mercado em análise de vídeo, desenvolveu uma combinação de tecnologias de câmeras visuais e térmicas da FLIR com análise de vazamento integrada,

conectividade sem fio e controle automático de temperatura. A solução de detecção de vazamento é conhecida como DCAM (*Dual Camera Analytic Module*). Dentro de seu campo de visão, o DCAM pode detectar um vazamento de óleo de 0,36 m³/h a uma distância de até 60 m. O *software* então analisa automaticamente o evento com base nos parâmetros de vazamento definidos pelo usuário e, se uma condição crítica for determinada, uma notificação de alerta com imagem e vídeo é gerada para verificação instantânea (WOELLWARTH, 2018).

Essas empresas buscaram uma abordagem para monitorar estações de bombeamento não tripuladas. Contudo, não há relatos se há uma distribuição dessas câmeras por toda a estação e nem como elas estariam se comunicando. Todavia, é evidente que há uma tendência do mercado pela busca de soluções visuais. Nota-se, portanto, uma grande oportunidade de utilização de câmeras termográficas IoT em campos de produção terrestres de petróleo.

2.4 Internet das Coisas para monitoramento em campos de produção de petróleo

Os campos terrestres de petróleo são locais usualmente remotos, com acesso limitado, onde ainda se encontram muitas áreas limitadas de comunicação, quando existente, infraestrutura de telecomunicações. É muito comum, mesmo quando há presença de uma rede local, a presença de sinal fraco, velocidade de navegação baixa e quedas de conexão frequentes. A comunicação de informação neste ambiente é um desafio quando se tem em conta como um sistema de monitoramento é importante para mitigar os problemas de vazamento em oleodutos.

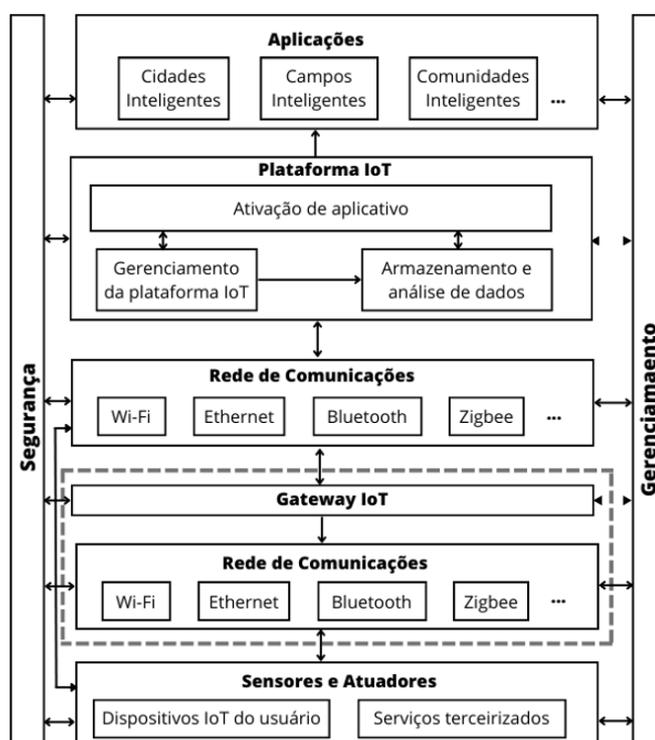
A Internet das Coisas é, atualmente, uma possibilidade eficaz para os fins monitoramento de ambiente pretendidos. O objetivo é garantir que os dispositivos físicos com eletrônica embarcada, *software*, sensores, atuadores e conectividade de rede possam se identificar, coletar e trocar dados entre si (BHASKARAN et al., 2021). Independentemente de sua funcionalidade, todo esse sistema deverá estar inserido em um determinado ambiente e terá um processador, um transceptor de comunicação e uma fonte de alimentação (LOHMANN, 2016).

A concepção é que os dispositivos IoT tenham hardware autônomo, com dimensões reduzidas e manutenção em intervalos de tempo espaçados. Dessa forma, eles formam uma rede de sensores sem fio, do inglês WSN (*Wireless Sensor Networks*), ideal para coletar dados do ambiente e para automatizar tarefas. O uso de WSN em casos de monitoramento de oleodutos e gasodutos possui uma topologia baseada em alta densidade de sensores, que são distribuídos ao longo dos dutos e organizados em grupos de nós para controlar alguns segmentos da

tubulação. Adotar tecnologias WSN no monitoramento de oleodutos permite prevenir o perigo causado por vazamentos (JUNIE et al, 2012).

Hoje ainda não existe um padrão ou tecnologia predominante utilizada por plataformas e dispositivos IoT. Contudo, vários esforços são liderados por organizações para criar especificações técnicas para sistemas IoT e muitas arquiteturas têm sido propostas nos últimos anos, por exemplo, uma referência de arquitetura abstrata foi compartilhada recentemente para mapear diferentes arquiteturas de IoT de última geração (DOMÍNGUEZ-BOLAÑO ET AL.,2022). Esse referencial, demonstrado na Figura 8 considera o padrão IEEE para uma arquitetura IoT.

Figura 9. Referencial de arquitetura IoT



Fonte: Domínguez-Bolaño et al. (2022)

Tal arquitetura é composta por sete partes: sensores e atuadores, rede de comunicação, gateway IoT, plataforma IoT, aplicativos, gerenciamento e segurança, conforme descritas a seguir:

- **Sensores e atuadores:** sensores são dispositivos que medem parâmetros físicos do ambiente ou de outros sistemas. Atuadores são dispositivos que executam ações com base em solicitações de uma ação de controle (na figura, a partir do gerenciamento), no caso, em ambiente IoT. Ambos dispositivos se referem à camada de percepção de um sistema IoT. Nessa camada, distingue-se entre dispositivos IoT do usuário, que são dispositivos físicos implantados pelo usuário, por exemplo, sensores de temperatura; e

serviços terceirizados, geralmente disponíveis por meio de um representante API (*Application-Programming Interface*) de transferência de estado (por exemplo, REST - *Representational State Transfer*) que fornece dados mediante solicitação, por exemplo, de sensores, como os meteorológicos fornecidos por agências governamentais. Os sensores podem também executar cálculos para pré-processar os dados capturados antes da transmissão. Nesse caso, trata-se da chamada computação de borda.

- **Rede de comunicação:** a camada de rede do sistema IoT é responsável por permitir a troca de dados entre os sensores, atuadores e a plataforma IoT através do envio e roteamento de pacotes. As camadas física e de enlace geralmente são definidas em conjunto por padrões de comunicação. Normalmente, os dispositivos IoT empregam redes de comunicação sem fio. Alguns dos mais relevantes hoje são apresentados ao longo dessa seção.
- **Gateway IoT:** o *gateway* fornece à rede de comunicação meios para integrar camada de dados, protocolos e formato de dados comuns entre os dispositivos, diferentes redes e a plataforma IoT. Em cenários reais, vários dispositivos de *gateway* podem ser implantados, com cada *gateway* conectando-se a vários dispositivos IoT.
- **Plataforma IoT:** permite que os sensores e atuadores conectados sejam controlados ou monitorados com a ajuda de aplicativos, utilizando recursos de computação em nuvem. Considera-se três blocos fundamentais, que constituem a camada de serviço do sistema IoT: bloco 1 - gerenciamento da plataforma IoT, bloco 2 - armazenamento e análise de dados e bloco 3 - ativação de aplicativos. O bloco 1 fornece diversas funcionalidades de gerenciamento e conectividade relacionadas à própria plataforma IoT, enquanto o bloco 2 é responsável por armazenar e acessar os dados dos sensores recebidos, além de poder analisá-los. O bloco 3 fornece funcionalidades para desenvolver e implantar aplicativos para o sistema. Tais funcionalidades podem ser uma integração com sistemas de terceiros, ferramentas de desenvolvimento de interface do usuário para visualização e controle de dados ou suporte para aplicativos, por exemplo.
- **Aplicativos:** um aplicativo é um componente de software que executa uma tarefa específica lendo dados capturados pelos sensores e/ou controlando. Ele faz parte da camada de aplicação, que se comunica com os blocos de segurança e gerenciamento geral do sistema IoT.
- **Segurança:** o bloco de segurança é responsável por garantir a confidencialidade, integridade e disponibilidade. Autenticação do usuário, privacidade do usuário, controle

de acesso, monitoramento e auditoria de eventos de segurança e gerenciamento de chaves e certificados, estão entre suas funções.

- **Gerenciamento:** o bloco de gerenciamento executa tarefas do sistema IoT que dependem de outros blocos além da própria plataforma IoT. Tais tarefas incluem gerenciamento de falhas, gerenciamento do desempenho do sistema, gerenciamento de rede, ações de controle, configuração remota e atualização de dispositivos, dentre outras.

Com base na Figura 8 nota-se que os dados coletados através dos sensores podem ser analisados, armazenados, compartilhados ou realizada qualquer outra ação de interesse. Porém, para compartilhá-los é necessário que uma arquitetura de rede sem fio seja compatível com as especificidades do ambiente e com o tipo de pacote de dados a transferir.

Em sua maioria, os sistemas de rede sem fio utilizam modulação em rádio frequência. O licenciamento para utilização das bandas de rádio é regulado pelas autoridades governamentais. No Brasil, o órgão responsável é a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Vale observar que algumas bandas são livres de licenciamento como a banda Industrial, Científica e Médica (ISM) em 2.4 GHz, que é utilizada pelos padrões sem fio WiFi, Bluetooth e ZigBee, por exemplo.

Além de poderem se conectar à internet, os aplicativos de IoT têm requisitos específicos, como baixa taxa de transferência dados, baixo consumo de energia e custo-benefício (MEKKI et al, 2019). Contudo, a escassez de conectividade banda larga em áreas remotas no Brasil é o que inviabiliza a implantação massiva de aplicações IoT.

As principais tecnologias em uso em áreas remotas atualmente para o provimento de conectividade a sensores e para coordenação de atividades e operações em campo são: satélite, 2G/3G, *Trunking* de voz e Telemetria (MORENO et al., 2017).

A maioria dos projetos IoT opera com pequenos pacotes de dados (kilobytes - kB ou mesmo alguns bytes - B) característicos de dados coletados dos sensores e que precisam ser compartilhados. Ao reduzir o tamanho do pacote, os desenvolvedores também permitem que os dispositivos economizem bateria quando o projeto exige essas especificações.

Nas Subseções 2.4.1 a 2.4.5 será abordado em linhas gerais sobre cada tipo e características de rede de comunicação.

2.4.1 Comunicações por satélite

O uso de satélites é majoritariamente para localização (GPS) devido a custos elevados de utilização do espectro de frequência e dos equipamentos envolvidos, e às restrições de taxa do tráfego de subida (*uplink*) (MORENO et al., 2017). Entretanto, já existem soluções de satélite de baixo custo que podem atender às aplicações de IoT, os chamados satélites em órbita terrestre baixa (LEO - *Low Earth Orbit*), a exemplo de *Astrocast*, *Starlink (SpaceX)*, *Kuiper (Amazon)*, *OneWeb* e *Telesat*. Essas são alternativas a avaliar em locais onde energia dos componentes remotos não é variável crítica.

2.4.2 Redes 2G, 3G e 4G

O GSM 2G e 3G são escolhas interessantes quando há necessidade de se comunicar com dispositivos estáticos em áreas continentais, e onde a rede precisa ser capaz de cobrir grandes áreas, pois transferem dados nas taxas de velocidade necessárias para a maioria das aplicações de IoT. Pelo fato dessas redes terem sido desenvolvidas antes da IoT, elas não são otimizadas para pacotes pequenos ou economia de bateria. Além disso, há incertezas com relação ao futuro e a continuação dessas tecnologias, pois tendem a ter mais investimento / expansão nelas, tais como as próximas gerações de redes móveis como a 5G e a 6G (LinksField, 2023).

2.4.3 Wi-Fi

A necessidade de velocidades mais altas de transferência de dados tende a usar o Wi-Fi como alternativa de modo de comunicação. A limitação, nas aplicações de IoT é que essa tecnologia consome muita energia. Os tipos de aplicativos que exigiriam essa banda são mais vocacionados, por exemplo, para o *streaming* de vídeo a partir de vários pontos de captura. Aplicações envolvendo conectar dispositivos em uma área ampla exigiriam uma tecnologia diferente, porque o Wi-Fi é limitado a alcances alguns metros (interno) e as aplicações para estender seu alcance funcionariam apenas como infraestrutura de *backbone*, não para se conectar a dispositivos pequenos (LinksField, 2023).

2.4.4 Bluetooth e Zigbee

Os protocolos sem fio Bluetooth e Zigbee são amplamente usados para a comunicação entre dispositivos IoT. O Bluetooth é um protocolo de rede sem fio, projetado para comunicação

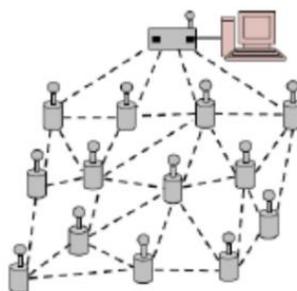
em curtas distâncias. Ele foi criado para substituir a fiação entre computadores, *smartphones*, fones de ouvido, teclados e mouses. O Bluetooth Mesh (BT Mesh) é um protocolo novo que estende o *Bluetooth Low Energy* (BLE) ponto-a-ponto, para criar redes Mesh onde os “nós” podem atuar como repetidores de sinal (BASTOS, 2020).

O BT Mesh é parecido com o Zigbee em função e arquitetura, mas com algumas diferenças, inclusive em relação às distâncias entre nós alcançáveis, que são menores. Por ser um protocolo novo, este ainda está passando por melhorias e revisões. Além disso, tal protocolo ainda não é amplamente suportado, o que significa que os equipamentos OEM, *gateways* e dispositivos ainda não são totalmente compatíveis (BASTOS, 2020).

O ZigBee é um padrão global aberto desenvolvido pelo ZigBee Alliance para implementação de redes sem fio de baixo custo, baixa taxa de dados e curto alcance e com bateria de longa duração. Especialmente, destinado a aplicações domésticas e industriais, onde se deseja utilizar a tecnologia para monitoramento e controle (FARAHANI, 2008).

Os dispositivos baseados nesse padrão operam com taxa de dados de 20Kb/s a 250Kb/s na banda ISM, utilizando basicamente três faixas de frequência: 868MHz, 915MHz e 2,4GHz. Apesar de o protocolo ZigBee ser para aplicações com baixas taxas de dados (BASTOS, 2020), graças à topologia *Mesh*, representada na Figura 09, a rede Zigbee também é vocacionada à transmissão de dados por distâncias maiores.

Figura 10. Topologia Mesh aplicado no protocolo Zigbee



Fonte: RIOS; ASSIS; SOARES, 2018

Por conta disso, redes de pequeno, médio e grande porte podem ser criadas com o Zigbee, se comparando ao alcance de qualquer rádio do tipo ponto-a-ponto. Essa capacidade de expansão da rede é a sua maior vantagem. É possível de se adicionar quantos dispositivos se queira à rede, de modo a aumentar o seu alcance total ou a aumentar o número de equipamentos monitorados. Cada dispositivo entra com um novo endereço na rede de forma automática, sem necessidade de comissionamento ou algo parecido, desde que as placas ZigBee sejam compatíveis e estejam programadas para se conectar. A malha Zigbee se configura e reconfigura

automaticamente, mesmo se alguns “nós” forem desabilitados ou removidos (FARAHANI, 2008).

Além disso, uma das principais características deste padrão é que quando os dispositivos não estão transmitindo ou recebendo dados eles não permanecem ativos e entram num modo de economia de energia, conhecido como *Sleep mode*. Como resultado os dispositivos em uma rede ZigBee podem funcionar anos sem que haja necessidade de troca da bateria. O Zigbee não usa endereçamento IP, portanto é necessário um *gateway*, que faz a interface da rede Mesh com a rede IP e os servidores na nuvem (BASTOS, 2020). Importante também destacar que nós Zigbee são baratos (R\$ 25,00 a R\$ 3,00, a depender da quantidade adquirida).

2.4.5 Redes de longa distância e baixa potência

As exigências de aplicativos IoT levou ao surgimento também das redes de longa distância e baixa potência, conhecidas como as LPWAN – do inglês *Low Power Wide Area Network*. De um modo geral, as tecnologias de rede sem fio LPWAN são utilizadas em IoT quando há a necessidade de enviar poucos dados, em distâncias relativamente grandes, garantindo maior vida útil para as baterias (de até 10 anos) devido ao baixo consumo de energia e baixo custo na solução de implantação (MEKKI et al, 2019).

De acordo com (CHEN et al., 2017), 60% das comunicações *Machine to Machine* (M2M) irão demandar redes que possuam baixa taxa de dados (< 100 kbps) e baixo consumo energético (< 300 mA). Neste contexto, as redes LPWAN são as candidatas favoritas para suprir esses requisitos. As tecnologias de rede sem fio, baseadas em LPWAN que se destacam são a NB-IoT (*Narrow Band - Internet of Things*), LoRaWan e Sigfox.

NB-IoT é um protocolo de comunicação desenvolvido pela 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Essa comunicação é baseada na rede LTE, funcionando na mesma frequência da tecnologia LTE, mas utilizando apenas um bloco de recurso do LTE (largura de banda de 200 kHz) (CHEN et al., 2017).

NB-IoT é a única das tecnologias LPWAN que dispõe de uma rede licenciada, por ela operar nas bandas de telefonia celular e usando esta mesma infraestrutura. Isso faz com que suas restrições sejam mais rigorosas, sendo necessário por exemplo, a regulamentação dos dispositivos comercializados com essa tecnologia pela ANATEL. Em 2019, algumas operadoras brasileiras, a exemplo da Tim e da Vivo, lançaram esse tipo de comunicação em diversas cidades do território brasileiro. Apesar disso, seu uso ainda é pequeno, sendo sua

capabilidade ainda testada por pesquisadores e desenvolvedores (JULIÃO, 2019), (AMARAL, 2019).

A Sigfox usa bandas ISM não licenciadas, como 868 MHz na Europa, 915 MHz na América do Norte, 433 MHz na Ásia e 902 MHz no Brasil. Suas principais vantagens são a sua ampla capacidade de cobertura, seu custo e seu baixíssimo consumo energético. Cada estação base pode alcançar até 50 km. Assim, um número relativamente pequeno de bases é necessário para cobrir uma grande área. (MEKKI et al., 2019). A assinatura anual para envio de duas mensagens por dia por dispositivo custa US\$ 0,50 com um consumo de 10 a 50 mA durante a transmissão. A tecnologia foi desenvolvida para ter uma duração da bateria de até 10 anos, mas na prática a bateria dura em torno de 5 a 7 anos (WND BRASIL, 2017).

Como ponto de melhoria da tecnologia pode-se citar a sua latência relativamente alta, seu *payload* útil de 12 bytes por mensagem e sua limitação de 140 mensagens diárias. Esses fatores restringem bastante seu uso, principalmente em aplicações que necessitam de maior velocidade ou tamanho de mensagem como aplicações MTC (*Many-Task Computing*) e de comunicação contínua (ALI, SHAH, et al., 2017).

A rede LoRaWAN utiliza as bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) para transmitir os dados dos dispositivos IoTs. Opera em bandas de frequências não licenciadas que variam entre 6 MHz até 244 GHz (não sequencialmente e, sim, em intervalos definidos). No Brasil, a frequência adotada para a transmissão dos dados foi o intervalo de 902 MHz - 928 MHz e as taxas de transmissão são entre 980 bps - 21.9 Kbps (*download* e *upload*).

O padrão LoRaWAN que define o sistema de comunicação é de código aberto, possibilitando propostas de melhorias e suporte por toda a comunidade ao redor do mundo que a utiliza (MARQUES e BOCHIE, 2020), o que gera uma das vantagens de se trabalhar com a rede LoRad. Outra vantagem é o envio de mensagens diárias irrestritas, pois cada usuário é responsável pela instalação de sua rede física. Contudo, a regulamentação das bandas ISM propõe uma utilização máxima para tal proposta, que no futuro, poderá gerar restrições quanto ao número máximo de mensagens enviadas diariamente.

É notório que cada tecnologia tem seu lugar nas aplicações IoT. Sigfox e LoRa servirão como o dispositivo de menor custo, com uma alta cobertura (maior alcance), taxa de comunicação infrequente e vida útil da bateria muito longa. Se LoRa tem um custo de instalação mais alto devido à implantação da infraestrutura, seu custo operacional é praticamente zero. Já para Sigfox ocorre o inverso, uma vez que se paga por pacote transmitido.

Por outro lado, o NB-IoT atenderá ao mercado IoT de maior valor: aqueles que estão dispostos a pagar por uma latência muito baixa e alta qualidade de serviço, pelo fato de operar na rede de telefonia móvel, contando com uma infraestrutura já madura em relação às demais, o que pode restringir o seu uso aos locais onde está infraestrutura é disponível.

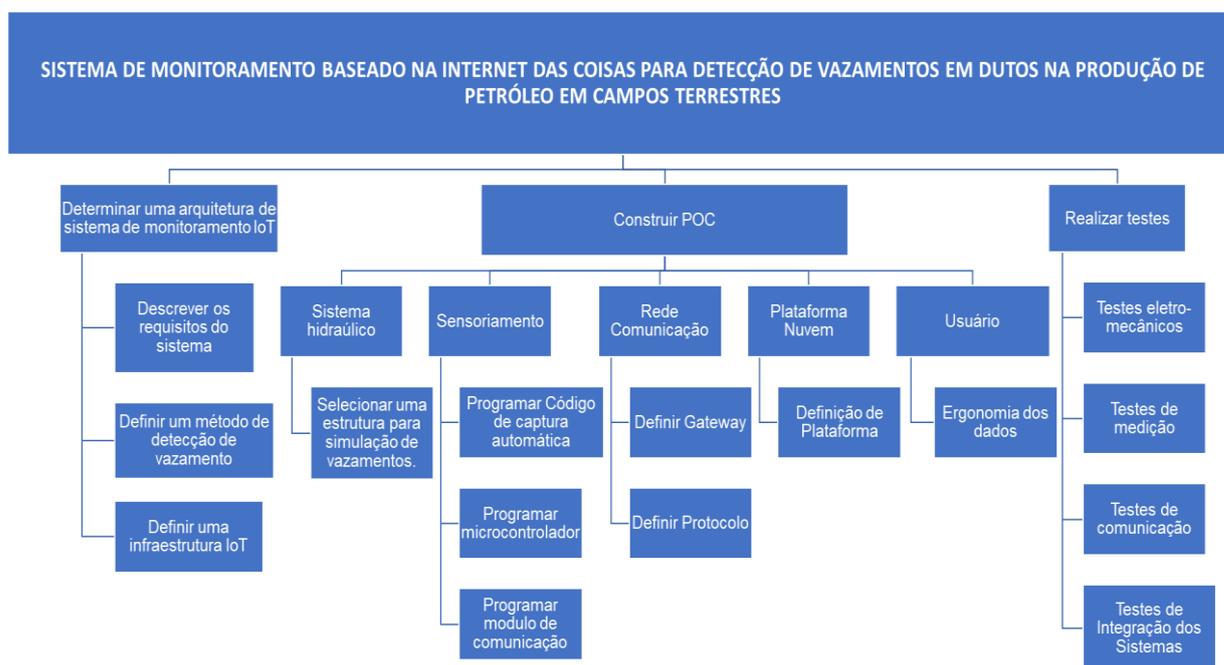
No Capítulo 3, serão apresentados os materiais e métodos utilizados no projeto da arquitetura do sistema de monitoramento IoT proposto, no intuito de detectar o vazamento de petróleo em campos terrestres.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Por definição, este trabalho é uma pesquisa aplicada que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática visando à solução de monitoramento remoto baseado em IoT para detecção de vazamento em oleodutos. Para tanto, faz uso de abordagens de pesquisas qualitativas e de investigação exploratória de soluções de processamento de imagem e IoT na identificação de vazamento em campos de produção de petróleo terrestres. Por sua natureza de sondagem, não comporta hipóteses que, todavia, poderão surgir durante ou ao final da pesquisa (WAZLAWICK, 2017).

Para a composição desta pesquisa, empregou-se como procedimento metodológico, a revisão da literatura, problematização, bem como a análise da literatura específica. O estudo é basicamente dividido em três etapas, baseadas nos objetivos específicos da pesquisa, com o intuito de propor o desenvolvimento do sistema de monitoramento. Na Figura 11 é apresentado o organograma da metodologia do estudo.

Figura 11. Organograma da metodologia do estudo



Fonte: Autoria própria

Os métodos e as técnicas a serem adotados para a execução de cada objetivo específico são descritos a seguir:

- **Determinar uma configuração e/ou arquitetura de sistema de monitoramento baseado na Internet das Coisas para detecção de vazamento:**

Esta etapa visa a definição e descrição das especificações de um sistema de monitoramento remoto para oleodutos, a classificação e a determinação de um método de detecção de vazamento. Para prover um mecanismo de detecção de vazamento confiável e aplicável, o método proposto deve atender a certos requisitos. Esses requisitos são derivados da situação atual no campo da ocorrência do vazamento. Portanto, a fim de fornecer um mecanismo de detecção de vazamento com essas características, o método proposto deve atender aos seguintes requisitos:

1. Fornecer inspeção de vazamento de forma segura e remota;
2. Fornecer um mecanismo de inspeção de vazamento automático e autônomo;
3. Ser capaz de detectar múltiplos vazamentos simultâneos;
4. Ser capaz de detectar a localização do vazamento;
5. Considerar um método que possua menor dependência possível das propriedades físicas do fluido transportado e do material das tubulações, para que possa ser aplicável independente do estado físico do fluido e das tubulações;

Além dos diferentes tipos de fluidos que circulam, o tempo de uso da maioria dos dutos torna a segurança da infraestrutura da tubulação uma perspectiva desafiadora. Os sensores necessitam ser robustos e resistentes às condições inesperadas de mudanças climáticas, pois eles funcionarão em um ambiente a céu aberto com temperatura e umidade variáveis, exigindo assim um sistema de autoteste e autocalibração.

Em relação ao consumo energético, é interessante cada dispositivo inteligente ter uma bateria recarregável com um tempo de vida de, no mínimo, um ano, para os campos que não dispõem de energia elétrica disponível.

Idealmente, o sensor escolhido deve ter facilidade de uso, caso contrário, é preciso pressupor a necessidade de treinamentos e qualificações para os operadores do sistema. Outro ponto importante para consideração é o custo de aquisição, instalação e manutenção, considerando-se a realidade dos campos de produção marginal.

- **Construir uma PoC da arquitetura projetada para o sistema de detecção de vazamento:**

Esta etapa visa o desenvolvimento de uma prova de conceito baseado na infraestrutura

IoT descrita na Seção 2.3, com o intuito de validar a concepção de um monitoramento por câmeras térmicas para detecção de vazamentos em tubulações.

- **Realizar testes experimentais em um sistema hidráulico fechado de bancada para validação da PoC:**

Esta etapa visa a utilização de um sistema hidráulico de circulação d'água fechado, para simulação controlada de vazamentos em suas tubulações, que possuem diâmetros externos de 19 milímetros (3/4"). Este sistema hidráulico em funcionamento junto ao sistema IoT descrito acima permite validar a concepção de desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto para detecção de vazamentos. No Capítulo 5 são apresentados seus detalhes e características de operação.

- **Avaliar os resultados obtidos para análise do conceito desenvolvido:**

Essa etapa visa analisar a implementação da PoC, avaliando a consistência e correspondência entre o diagrama conceitual e a montagem física da arquitetura do SDV proposto, sendo apresentado os resultados e discussões no Capítulo 5.

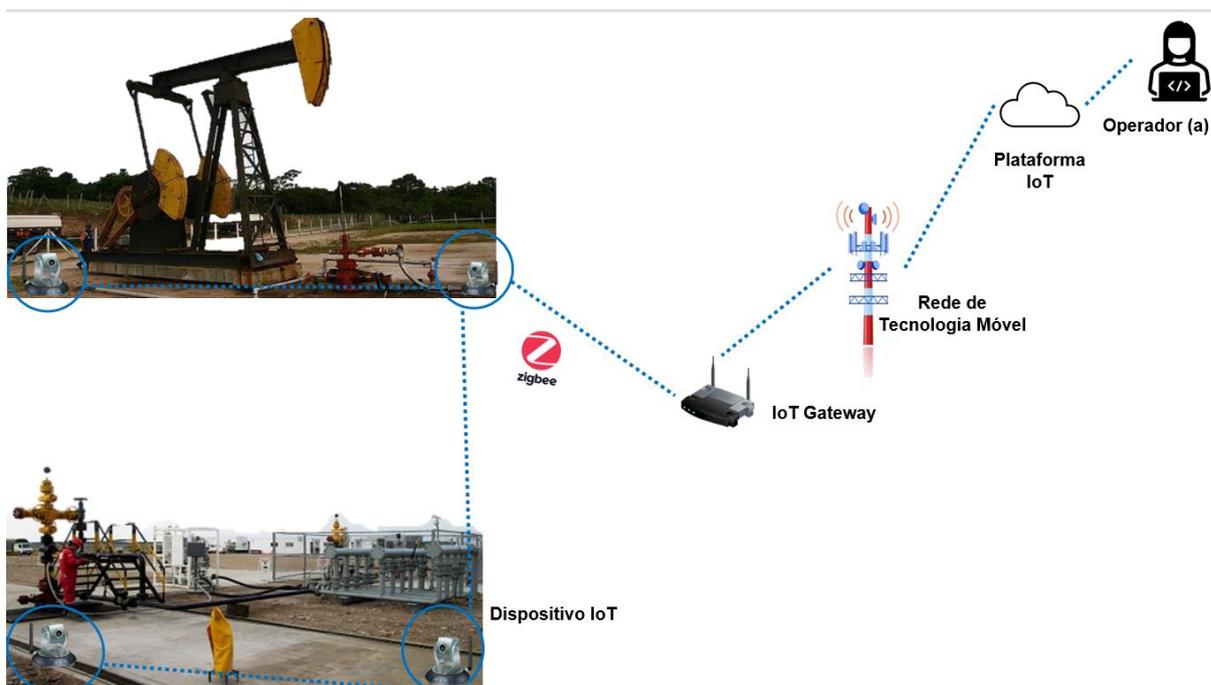
4 A ARQUITETURA DO SISTEMA PROPOSTO

Como observado na seção 2.3 existe uma diversidade de métodos para detecção de vazamento em oleodutos. Nota-se que os métodos podem ser encontrados em uma ampla variedade de áreas e para vários tipos de oleodutos. Conseqüentemente, os desafios que o sistema de detecção de vazamentos proporciona varia de acordo com o tipo da aplicação. No final, a questão que fica é: qual o sistema mais adequado? Para responder essa pergunta, a seleção deve ser feita tendo em consideração os requisitos colocados à candidatura para cada finalidade.

Isso significa que é necessário tomar uma decisão para cada aplicação. Entre outros fatores, a seleção adequada depende dos resultados desejados, do custo de instalação, operação e manutenção do sistema de detecção de vazamentos e das condições de instalação.

Baseado nos requisitos desejados acima e nas vantagens e desvantagens de aplicação de cada método de detecção descrito na Seção 3, a arquitetura do SDV proposto aplicado para oleodutos em campos terrestres de produção de petróleo é representado na Figura 12.

Figura 12. Representação da arquitetura do SDV proposto baseado em IoT.



Fonte: Autoria própria

O sistema proposto monitora os oleodutos através dos dispositivos IoT, que são as câmeras termográficas com capacidade de processamento, armazenamento e comunicação. Esses dispositivos têm como função fotografar as tubulações a cada intervalo de tempo.

A maioria dos métodos analisados são baseados nas propriedades físicas do fluido, do material da tubulação ou nos parâmetros do processo, como pressão, velocidade e temperatura. Essas informações são usadas como métricas de medição para gerar um modelo matemático para a detecção de vazamento. Além disso, tais métodos requerem um profundo conhecimento do processo para fornecer um modelo preciso e um entendimento preciso das condições de operações (FAHIMIPIREHGALIN ET AL, 2021).

Dadas as limitações desses métodos, optou-se pelo método de detecção de vazamento por imagem termal por não depender das complexidades identificadas neles. Além do mais, as câmeras térmicas têm sido usadas como método de inspeção remota em diversas aplicações industriais e foi avaliada como um facilitador na inspeção automática de vazamento, constituindo um sistema robusto e capaz de detectar pequenos vazamentos.

A disposição dos dispositivos IoT é baseada na topologia de malha com a interconexão através do protocolo ZigBee. Esta abordagem permite que cada dispositivo possa receber e retransmitir os dados mesmo em locais remotos. Essa escolha foi fundada na necessidade de uma rede de comunicação adequada para aplicação de monitoramento e controle no ambiente visualizado e nas análises das vantagens e desvantagens das tecnologias de comunicação para redes de sensores sem fio IoT, descritas na seção 2.3.

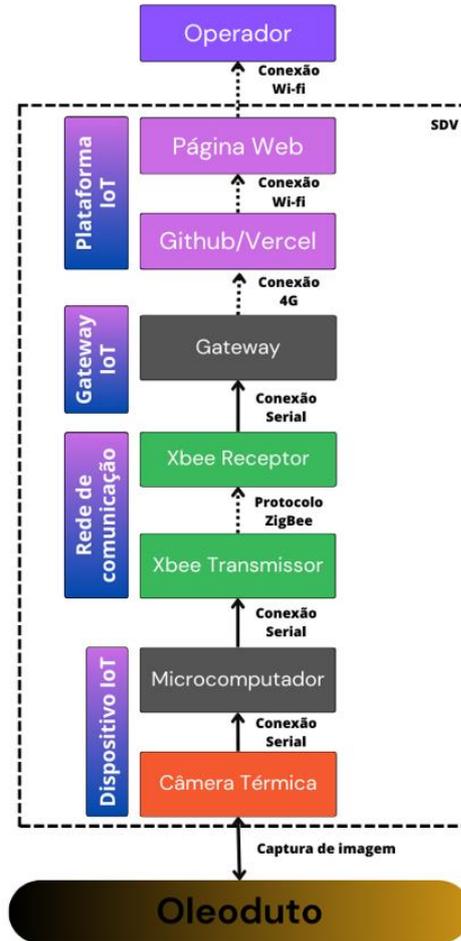
O ZigBee é um padrão voltado para aplicações que necessitam de baixa taxa comunicação de dados, ou seja, aplicações de monitoramento e controle simples, como é o caso. Por este motivo, e pela sua simplicidade e baixo custo, esta tecnologia se apresentou interessante para viabilizar a comunicação de dados no sistema proposto.

Como a rede ZigBee se destina a comunicação da rede de sensores sem fio, deve-se definir também um meio de comunicação para transporte dos dados por meio da Internet, visando maior flexibilidade do sistema. Uma alternativa é o uso das próprias tecnologias de redes móveis disponíveis próximas à região de produção, como o 3G ou 4G ou até mesmo as novas gerações de 5G ou 6G se já disponíveis. A vantagem destas redes móveis é aproveitar a infraestrutura já existente.

Os dispositivos IoT estarão dispostos a uma distância pré-definida de captura de imagens pelas câmeras térmicas e têm como função fotografar as tubulações a cada intervalo de tempo. O processamento da imagem capturada é realizado na borda. Independentemente da informação do processamento, o operador receberá uma mensagem sobre se há ou não vazamento na tubulação. Em casos de presença de vazamento no sistema, o usuário também

receberá a imagem capturada do local, validando, portanto, a localização do vazamento e o seu status visual. Na Figura 13 é demonstrada a ideia da arquitetura da PoC por meio de um diagrama.

Figura 13. Diagrama de arquitetura da PoC para o sistema de detecção de vazamentos



Fonte: Autoria própria

O sistema de monitoramento projetado inicia-se com o acionamento automático da câmera *Flir ADK Thermal Vision* (detalhes no Anexo 8.1) através do microcomputador *Raspberry Pi 3 Model B* (vide Anexo 8.2), conectada via USB à câmera para fotografar o sistema hidráulico em estudo. Essa imagem capturada é enviada para o *Gateway* (uma segunda *Raspberry*) pela comunicação estabelecida entre os módulos *Xbee Zigbee S2*, cujas especificações encontram-se no Anexo 8.3.

Para o envio da imagem capturada é necessário a conversão da imagem *JPG* para uma matriz em escala de cinza. Em seguida, essa matriz é convertida em um vetor unidimensional, o qual é enviado para o módulo receptor de comunicação através da porta serial do microcomputador.

Cada pacote contém uma parte dos dados a serem enviados. O envio completo dos pacotes ocorre pela execução de um *loop*, que os envia de forma sequencialmente. O tempo

médio para não perder as informações entre cada envio de pacote é de dois segundos. Esse algoritmo de captura da imagem pela câmera é apresentado no Apêndice 9.1.

Após o envio e recebimento da imagem pela segunda Raspberry Pi é necessário reconstruí-la para que a mesma possa ser visualizada pelo operador através da Internet. O algoritmo de recebimento do vetor unidimensional e reconstrução da imagem em matriz em escala de cinza também é apresentado no Apêndice 9.2.

Nessa camada também ocorre algumas etapas de processamento de imagem para obter-se a informação se há ou não vazamento no sistema automaticamente. O primeiro passo da análise é a aplicação de um mapeamento de cores na imagem em escala de cinza. A escolha do mapa de cores pode variar de programador para programador, assim como os tipos de sistema em análises. Para o sistema hidráulico em estudo foi escolhido o tipo `Colormap_jet` (vide Anexo 4), recomendado para o mapeamento de calor.

Após a coloração da imagem é aplicado uma máscara para futura seleção da região de interesse da imagem capturada baseado na cor que representará a área em estudo. A máscara funciona como se fosse um filtro. Ela filtrará tudo que esteja fora da área analisada e manterá a frequência da cor escolhida para identificação da região de interesse. O reconhecimento da área por meio da cor facilita, em seguida, a aplicação da técnica de segmentação por similaridade.

Um das principais abordagens por similaridade é a baseada em limiares (*Thresholding*) (NEVES; PELAES, 2001). Matematicamente, a técnica de limiarização pode ser descrita como uma técnica de processamento de imagens na qual uma imagem de entrada $f(x, y)$ de N níveis de cinza produz à saída uma imagem $g(x, y)$, chamada de imagem limiarizada, cujo o número de níveis de cinza é menor que N (NEVES; PELAES, 2001). Normalmente, $g(x, y)$ apresenta dois níveis de cinza, sendo:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x, y) \geq T \\ 0, & \text{se } f(x, y) < T \end{cases}$$

onde: os pixels rotulados com 1 correspondem aos objetos e o 0 ao fundo; T é um valor de tom de cinza predefinido denominado limiar. Portanto, esta técnica permite a binarização da imagem.

Uma imagem binária é uma imagem composta de pixels que podem ser exatamente uma de duas cores. Isso significa que cada pixel é armazenado como um único bit 0 ou 1. As imagens binárias podem ser armazenadas na memória como *bitmaps* (*arrays* compactados de bits). Uma imagem de 640×480 requer 37,5 kB de armazenamento (SHAPIRO, 2002).

Com o intuito de identificar tanto a tubulação quanto o surgimento de vazamento na imagem adota-se a técnica de contornos. Os contornos são como uma curva que une todos os

pontos contínuos (ao longo do limite), tendo a mesma cor ou intensidade. Logo, essa técnica permitirá encontrar um objeto branco, neste caso tubulação ou vazamento, em um fundo preto.

Após isso, é efetuado um filtro para identificar a quantidade de contornos encontrados na imagem definidos a partir de uma área mínima e máxima de pixels. Essas áreas com contornos que foram localizadas na imagem são listadas e ordenadas. Essa lógica se aplicará duas vezes, sendo a primeira com o intuito de localizar a tubulação na imagem e a segunda para identificar vazamentos próximos a tubulação.

Na primeira etapa, para encontrar a tubulação parte-se da premissa de que a área da imagem é maior que a área da tubulação e como deseja-se apenas a área dos tubos e suas regiões próximas, então a seleção da área menor significará a tubulação. Além disso, identificar áreas menores como esta, previne que outros objetos que fazem parte da imagem no interfira na sua seleção. Já na análise da segunda imagem limitada pelo tamanho da tubulação identificada, é selecionado novamente o contorno de menor área, significando agora o vazamento.

Contudo, para garantir que essa área identificada seja de fato um fluido, aplica-se a técnica de detecção por bordas Canny. As propriedades dos objetos, tais como as características geométricas e físicas, são passadas à imagem pois ocasionam variações nos tons de cinza da imagem. Dessa forma, para se detectar e extrair informações dos objetos aplica-se a técnica de detecção de bordas de Canny, que se baseia nos critérios de detecção e localização. Estes critérios estão sujeitos ainda a um terceiro, conhecido como injeção de resposta múltipla, que força o processo a detectar uma única borda onde existe somente uma borda verdadeira (VALE; POZ, 2002).

Portanto, a aplicação dessa técnica permite a suavização dos ruídos e localização as bordas dos contornos, para isso é necessário a repetição da etapa de aplicação de máscara e contorno, para que seja possível a detecção e seleção das áreas correspondente ao vazamento.

Posteriormente, por meio do protocolo de rede *Secure Socket Shell* (SSH) ocorre a conexão com um repositório *online*. Neste caso, o repositório foi criado no GitHub para armazenamento dos dados. O objetivo do protocolo SSH é permitir aos administradores uma maneira segura de acessar um computador remoto. Ele estabelece uma conexão segura entre duas partes (cliente e servidor). A conexão entre o cliente e o servidor ocorre em três etapas: verificação do servidor pelo cliente; geração de uma chave de sessão para criptografar toda a comunicação e autenticação do cliente. O protocolo usa criptografia simétrica, criptografia assimétrica e *hash* para proteger a transmissão de informações (MAHESHWARI, 2017).

A tecnologia de Nuvem (*Cloud*) representa a entrega de recursos computacionais e capacidade de armazenamento como um serviço para usuários finais. Os usuários finais acessam aplicativos por meio de navegadores Web ou aplicativo móvel, enquanto os dados de software e usuários estão localizados em servidores remotos. Existem três tipos de tecnologia de Nuvem: Software como Serviço (SaaS), Plataforma como Serviço (PaaS), Infraestrutura como Serviço (IaaS) (LEKIC E GARDASEVIC, 2018).

A base da tecnologia Cloud é composta de diferentes tecnologias de TI ligadas a uma entidade lógica e funcional. No modelo *Cloud Computing* distinguem-se duas partes do sistema: o *front-end*, que é uma parte do usuário e inclui todas as partes da infraestrutura controlada pelo usuário, bem como a maneira como o usuário acessa o serviço; e o *back-end*, que inclui uma infraestrutura de provedores de nuvem (LEKIC E GARDASEVIC, 2018).

A finalização da camada “Plataforma IoT” da arquitetura de monitoramento IoT para detecção de vazamento, descrita na Seção 2.3 dá-se através de uma página web criada por meio da plataforma Vercel. O Vercel é uma plataforma para a hospedagem de sites estáticos e aplicações que utilizam *frameworks front-end*, permitindo a hospedagem de projetos de maneira gratuita. O usuário pode desenvolver, testar e distribuir seus próprios aplicativos, que são executados na infraestrutura de um provedor de serviços em nuvem.

Portanto, com a plataforma Vercel é possível acessar o repositório criado e hospedar as imagens do repositório na internet. Por fim, por meio do acesso ao site desenvolvido (<https://pipecom.vercel.app/>), pode-se obter a informação se há ou não vazamento na tubulação, além do recebimento da imagem capturada para validação visual da mensagem. A criação dessa interface é desenvolvida utilizando as linguagens de marcação e estilização, como o HTML5 e CSS3, enquanto o algoritmo que recebe e exibe os dados do sistema IoT é escrito com a linguagem Javascript. Todos os algoritmos relacionados no desenvolvimento da plataforma são descritos nos Apêndices de 9.4 a 9.7.

5 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são apresentados todos os detalhes do projeto desde o planejamento, seguido pelo detalhamento da arquitetura, detalhes de montagem, implementação e teste do protótipo final.

5.1 Planejamento e execução

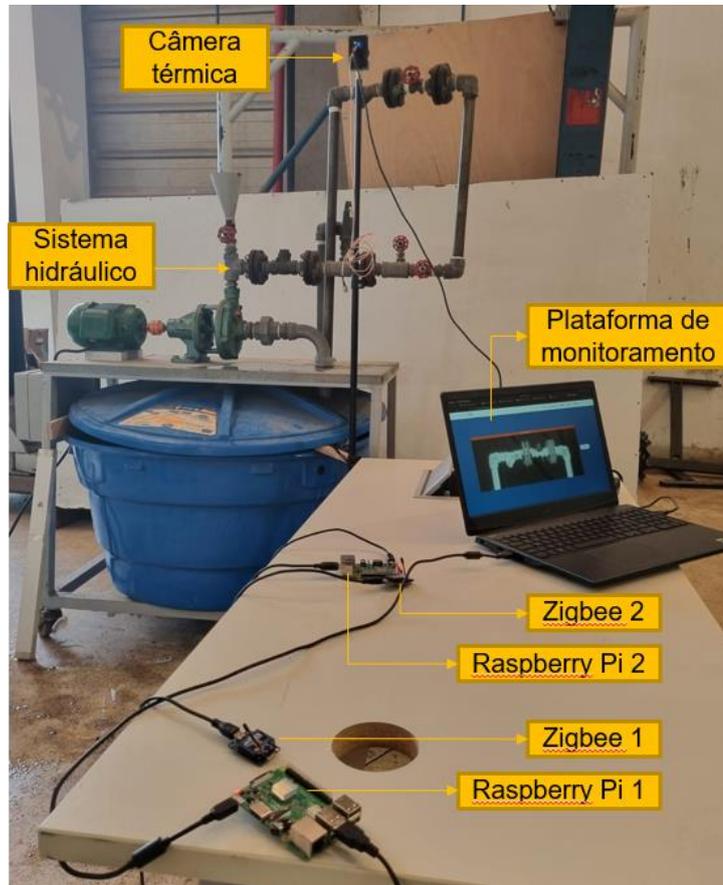
A etapa de planejamento do desenvolvimento da PoC para realização dos experimentos foi organizada e executada da seguinte forma:

- **Aquisição de um sistema hidráulico fechado:** a definição de um sistema hidráulico com tubulações e dispositivos semelhantes aos campos terrestres de petróleo é uma tarefa importantíssima, pois é através dessa estrutura que é possível simular vazamentos e, então, avaliar a capacidade de detecção do sistema de monitoramento IoT desenvolvido.
- **Desenvolvimento de um dispositivo IoT:** nessa etapa busca-se obter os materiais/dispositivos (câmeras térmicas, microcomputadores e módulos de comunicação) para construção de um dispositivo IoT, visando a coleta dos dados do sistema monitorado.
- **Configuração dos equipamentos/dispositivos:** após a obtenção de todos os equipamentos, é necessário configurar os equipamentos e dispositivos para que cada um desempenha sua função e objetivos dentro da arquitetura IoT projetada.
- **Integração das camadas:** essa etapa é a fase de garantir que os dispositivos estão se comunicando entre si e desempenhando suas ações corretamente. Para isso, são realizados testes sequenciais para identificação do fluxo de dados entre as interfaces dos subsistemas.
- **Análise do sistema:** a última etapa é avaliar os resultados obtidos para análise do conceito desenvolvido.

5.2 Arquitetura da PoC

Na Figura 14 é representada a montagem do sistema de monitoramento para detecção de vazamento, próximo ao sistema hidráulico utilizado para simulação dos vazamentos.

Figura 14. PoC



Fonte: Autoria própria

Uma montagem típica de campo, com uma câmera Flir, dois Raspberry e cinco nós Zigbee para comunicação a grandes distâncias custaria aproximadamente R\$ 16 mil reais, sendo que a câmera Flir tem o maior custo unitário (R\$ 14 mil). Considere-se ainda que o preço destes hardwares é muito sensível à quantidade adquirida. O custo de um sistema para todo um campo de produção ou conjunto de campos pode cair muito.

Antes da realização do processo de integração das camadas, foram realizados testes de funcionamento do sistema hidráulico e foi observado que os pontos de conexões de ligação e válvulas apresentavam vazamentos quando em funcionamento, portanto, o único momento que não há vazamento é quando ele está desligado. Todavia, não foi realizado nenhuma alteração no sistema hidráulico para um controle de vazamento.

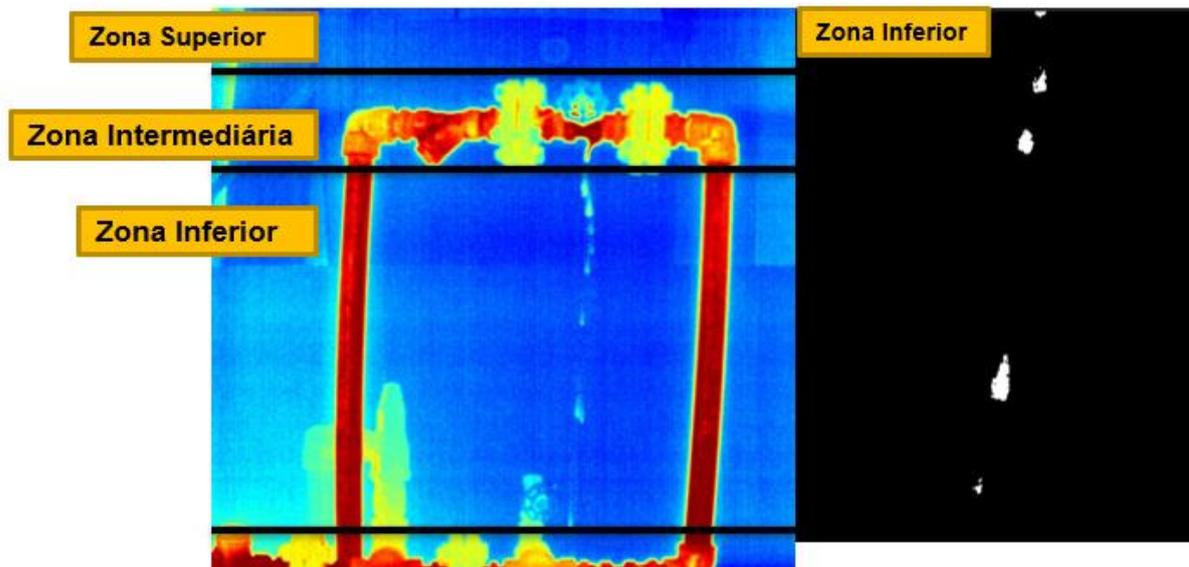
5.3 Processo de integração das camadas

Após o processo de configuração de cada dispositivo, realizou-se testes sequenciais com o intuito de integração de todas as camadas da arquitetura IoT. O primeiro teste foi realizado com a câmera infravermelha. Era necessário o entendimento de como ela realizava a captura da imagem termal, e se realmente com o tipo de câmera adquirida, ela seria capaz de identificar algum tipo de vazamento presente no sistema.

Com as primeiras imagens capturadas, matematicamente não foi possível distinguir os valores das radiações infravermelhas emitida pela tubulação, o fluido e o ambiente. Observou-se a água e o sistema hidráulico monitorado encontravam-se em equilíbrio com o ambiente e a câmera utilizada não é capaz fazer a distinção térmica. Para a obtenção de melhores resultados da amplitude de radiação térmica foi necessário o uso de um ebulidor de 2000 W para o aumento da temperatura do fluido.

O tanque d'água do sistema hidráulico continha cerca de 120 litros d'água. Foi necessário aguardar aproximadamente uma hora para aquecer água numa temperatura próxima dos 40 °C. Nessa temperatura já se sentia a água com um calor considerado para captura de novas fotos. Na Figura 15 mostra-se uma fotografia do sistema com vazamento capturado pela câmera *Flir ADK Thermal Vision* com a temperatura da água de 40 °C.

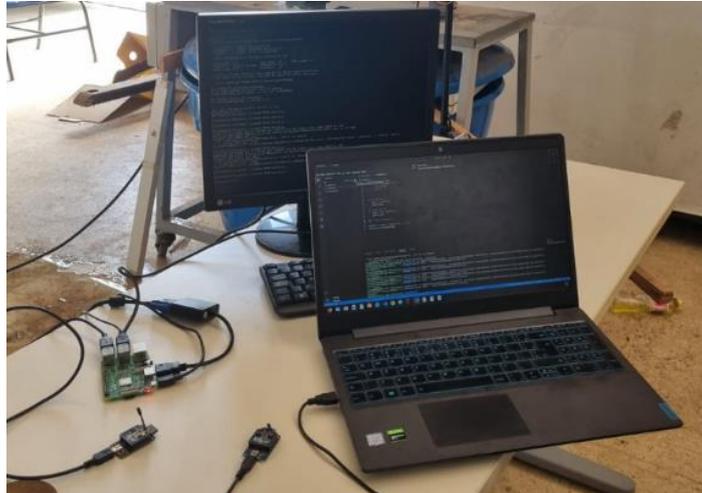
Figura 15. Aplicação da técnica de segmentação por limiarização na imagem capturada.



Fonte: Autoria própria

O próximo teste foi a configuração dos módulos de Comunicação Xbee S2 e suas disposições no sistema, conforme observado na Figura 16.

Figura 16. Teste de configuração dos módulos Xbee S2



Fonte: Autoria própria

Com a criação do repositório, configurações das chaves do SSH e o desenvolvimento da página web, foi possível analisar o recebimento e armazenamento dos códigos e imagem. Na Figura 17 retrata-se a página web de acesso para o monitoramento do sistema hidráulico em análise.

Figura 17. Página Web em desenvolvimento do SDV denominada “Pipecom Bahia”.



Fonte: Autoria própria

5.4 Testes finais

Após a conclusão de desenvolvimento de todas as camadas e as suas integrações, foi possível a realização das etapas de testes finais para verificação da integridade do sistema, assim como avaliá-lo o quão é preciso, confiável e robusto. Os testes tinham duas finalidades: a primeira, avaliar distância máxima que a câmera poderia estar em relação ao sistema hidráulico a ponto do dispositivo IoT ser capaz de identificar a tubulação e detectar algum tipo de vazamento; a segunda, avaliar o tempo de transmissão das imagens através dos módulos de comunicação Zigbee.

A câmera foi posicionada em diferentes pontos ao longo do galpão onde se encontra o sistema hidráulico. Ao fazer um mapeamento preliminar do espaço interno, foram escolhidas as distâncias de 10 m, 25 m e 40 m, pois se referem as distâncias consideradas como mínimas, média e máxima do galpão. Esse posicionamento é demonstrado nas figuras 18, 19 e 20, respectivamente.

Figura 19. Câmera posicionada à 10 m do sistema hidráulico.



Figura 18. Câmera posicionada à 25 m do sistema hidráulico.



Figura 20. Câmera posicionada à 40 m do sistema hidráulico.

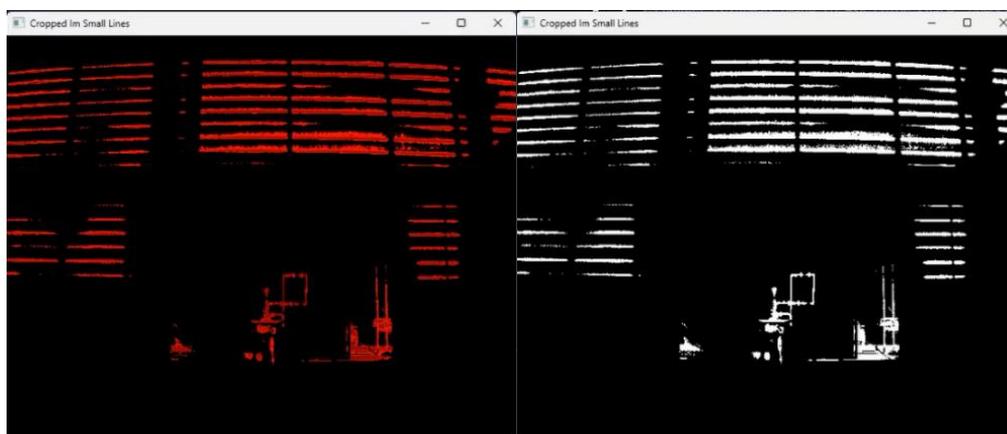


Fonte: Autoria própria

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como descrito na seção anterior foram efetuadas fotografias do sistema hidráulico em três distâncias distintas. Como resultado, pode-se observar que a posição da câmera a dez metros do sistema hidráulico foi a máxima distância possível de visualizar a tubulação nitidamente na imagem e detectar que de fato o sistema estava com vazamento, considerando-se tratar de tubulações de apenas 19 mm (3/4") de diâmetro. Nas Figuras 21, 22 e 23 é demonstrado o resultado da aplicação das técnicas de processamento de imagem da imagem captura a 10 metros do sistema hidráulico.

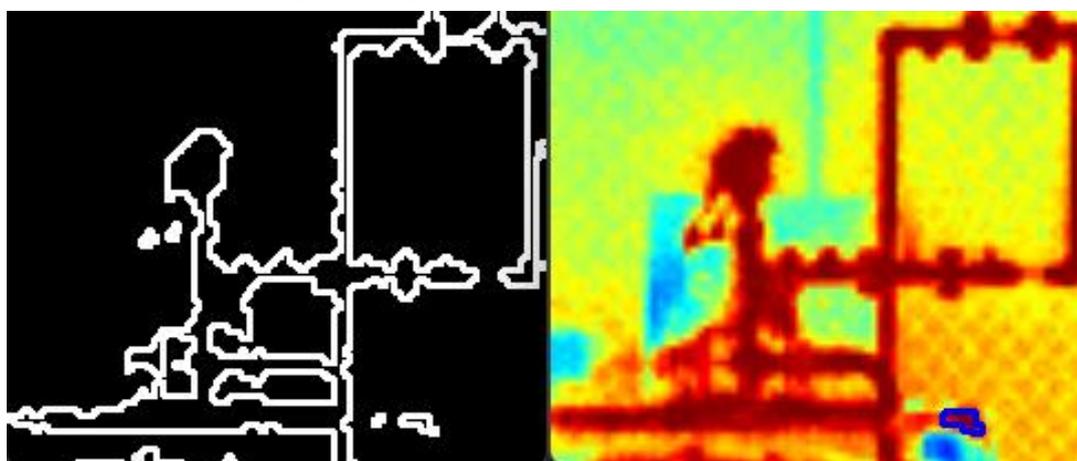
Figura 21. Criação da máscara com base na faixa de cor vermelha.



Fonte: Autoria própria

Na imagem à esquerda da Figura 22 nota-se que o algoritmo foi capaz de contornar todos os pontos de vazamento, entretanto, como resposta final da seleção dos pontos, infelizmente o algoritmo não permitiu a seleção de mais de um vazamento, embora realizado o contorno de todos os vazamentos, como demonstrado na imagem à direita da Figura 22 que apenas um contorno foi selecionado, em azul.

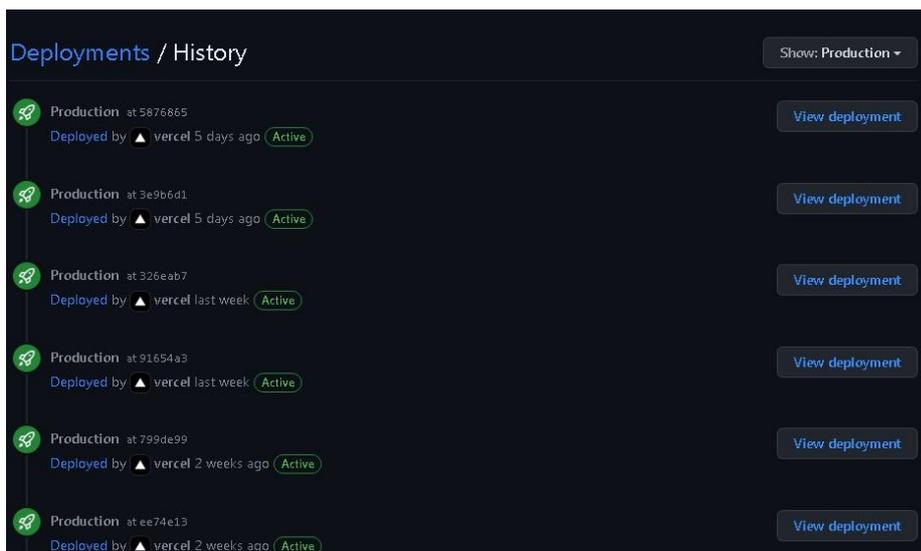
Figura 22. Aplicação da técnica de contornos e borda



Fonte: Autoria própria

A não seleção de todos os pontos não significa que o método por imagem termal não seja capaz de detectar múltiplos vazamentos, isso indica que algoritmo desenvolvido necessita de melhoria na sua logica de programação. Contudo, a seleção apenas de um vazamento para de um mesmo local com vários vazamentos já permite o envio da informação para o Github e consequentemente a atualização da informação na plataforma, como demonstrado na Figura 23.

Figura 23. Envio automático das atualizações do Github para a plataforma Vercel.



Fonte: Aatoria própria

Logo em seguida, a imagem da capturada do sistema com a informação de que há vazamento encontra-se disponível no site de monitoramento do sistema, como visualizado na Figura 24.

Figura 24. Recebimento da imagem com vazamento no site de monitoramento



Fonte: Aatoria própria

O tempo de envio e recebimento de imagem do dispositivo IoT ao *Gateway* foi de aproximadamente 40 minutos. Nesta PoC não se utilizou nenhuma técnica de compressão de imagem explícita. Nota-se que provavelmente a aplicação de técnicas de compressão de imagens ou outros mecanismos de transmissão de imagens em redes de sensores baseado em Zigbee pode ser uma boa solução para redução desse tempo de transmissão. Contudo a simples lógica de transmissão de imagem adotada garantiu uma transmissão confiável e em tempo real, não ocorrendo perdas de pacotes enviados.

Além disso, observou-se que se o sistema em monitoramento necessita da variação do posicionamento da câmera, o algoritmo de processamento de imagem precisa ser desenvolvido de maneira que seja capaz de identificar automaticamente essa variável de distância. Isto interfere diretamente no cálculo de área para localização da tubulação por basear-se no tamanho da matriz da imagem. Uma proposta de solução seria que a escolha de uma câmera capaz de identificar a distância, ou aplicação de sensores de distâncias ou que no desenvolvimento do código seja aplicado alguma técnica para identificação da variação da distância.

No mercado há diversos modelos e tecnologias. Ao escolher uma câmara infravermelha, há vários fatores que importa ponderar. Desde logo, convém ter em conta a aplicação prevista para o equipamento, pois, por exemplo, os requisitos de uma câmara destinada a detecção de vazamento serão necessariamente diferentes de uma câmara que irá ser usada em veículos, que é o caso da câmara utilizada na PoC. O modelo FLIR ADK™ foi desenvolvido para sistemas avançados de assistência ao motorista (ADAS) e veículos autônomos (AV) com objetivo de detecção de pedestres.

Apesar de ser uma câmara projetada para ser uma maneira econômica de desenvolver a próxima geração de visão térmica automotiva, ter robustez com classificação IP67, possuindo um bom design para condução em qualquer clima. Com as interfaces GMSL e USB, e permitindo uma fácil instalação através do sistema de plug-and-play. Mesmo atendendo os requisitos de aplicações dos testes dessa pesquisa, acredita-se que a utilização de uma câmara especialmente desenvolvida para detecção de vazamento, se teria obtido resultados ainda melhores.

Talvez não tivesse sido necessário, por exemplo, o aquecimento da água para uma boa aquisição de imagem. Caracterizando a aplicação da técnica de termografia infravermelha ativa, ou seja, o objeto inspecionado está em equilíbrio com o ambiente em que ele se encontra e uma fonte de estímulo externa é usada para aquecer ou resfriar o mesmo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora numerosos estudos de pesquisa tenham sido realizados na área de detecção de vazamentos em oleodutos, verificou-se com a revisão da literatura que ainda existe uma carência de uso da tecnologia Internet das Coisas para detecção e localização de vazamentos de oleodutos em campos de produção de petróleo terrestres. Portanto, o objetivo principal desta dissertação foi propor um sistema de monitoramento baseado na Internet das Coisas para detecção de vazamentos em oleodutos tempo real. Para tal, uma prova de conceito foi projetada para análise do sistema apresentado.

Observou-se que os campos de produção de petróleo terrestres são locais usualmente remotos, com acesso limitado, onde ainda se encontram muitas áreas limitadas de comunicação e infraestrutura de telecomunicações. A implementação de um sistema de monitoramento nesses locais exige soluções de telecomunicações que garantam cobertura em áreas remotas e de difícil acesso, além de proporcionarem comunicações seguras e confiáveis.

A determinação de um método de detecção de vazamento para prover um mecanismo de detecção de vazamento confiável e aplicável foi possível através da definição dos requisitos desejáveis para o sistema de monitoramento. O sistema proposto monitora através dos dispositivos IoT, basicamente câmeras infravermelhas associadas a sistemas com capacidade de processamento, armazenamento e comunicação em ambiente IoT. A solução proposta tem também a vantagem de não demandar a necessidade de coleta de informação das propriedades físicas do fluido, do material dos dutos ou parâmetros do processo.

O uso da rede de comunicação Zigbee para comunicação entre os dispositivos dispostos em malha permite a criação de uma ampla cobertura mesmo utilizadas em locais mais remotos, proporcionando adicionar quantos dispositivos se queira à rede com um baixo custo e baixo consumo de energia. Os resultados obtidos através da PoC desenvolvida são a demonstração de que é possível e plausível um sistema de monitoramento de detecção visual automática de vazamentos baseado na IoT.

Além disso, com a PoC foi permitido verificar que o sistema proposto oferece benefícios como a detecção em tempo real, monitoramento contínuo e análise de dados para tomada de decisões mais assertivas. A PoC demonstrou que o desenvolvimento de um sistema de monitoramento IoT para detecção de vazamento de petróleo pode ter um impacto significativo na redução do impacto ambiental e os custos implicados, inclusive de multas, cada vez mais representativas.

Como proposta de trabalhos futuros correlacionados, a aplicação do sistema proposto em condições reais de operação nos campos de produção de petróleo terrestres, para uma quantificação da solução, assim como a verificação da influência das condições da superfície da área de teste, a radiação solar, a cobertura de nuvens e a temperatura ambiente.

É recomendado esforços de pesquisa e testes focados utilizando técnicas de processamento de imagem através de técnicas de inteligência artificial para otimização de detecção e localização mais precisos. A construção de um banco de dados, para disponibilidade de dados de vazamento para treinar e validar os modelos, proporcionaria um impacto positivo na prevenção do problema no setor de óleo e gás e na disponibilidade de dados historiados para gerenciamento preditivo dos sistemas de produção no que tange a vazamentos. Por fim, a aplicação do sistema IoT proposto na integração com sensores e atuadores já existentes nos oleodutos, atendendo por completo as necessidades atuais de monitoramento e controle de diferentes dispositivos das operadoras.

Apesar de não ter sido proposto um sistema de controle nessa PoC, nota-se que a implementação da arquitetura do sistema sugerido pode contribuir na identificação de vazamentos remotamente e tomar medidas para contê-los, minimizando o impacto negativo no meio ambiente e os custos implicados, inclusive de multas, cada vez mais representativas. Assim, o SDV proposto possibilita que supervisores em estações remotas e trabalhadores de campo monitorem o status de funcionamento de oleodutos por meio de computadores, *tablets* ou *smartphones*, independentemente do local em que se encontram.

Consequentemente, obtém-se segurança na operação de linhas de produção de petróleo e dos profissionais envolvidos, na certeza de uma maior assertividade de dados para a melhor tomada de decisão, oferecendo benefícios como a detecção em tempo real, monitoramento contínuo e análise de dados para tomada de decisões mais assertivas, garantindo assim, a redução dos riscos e impactos sociais, econômicos e ambientais.

Além dos benefícios diretos para os ODS 6, 7, 12 e 15 a implementação de sistemas de monitoramento para detecção de vazão também contribui indiretamente para outros objetivos de desenvolvimento sustentável. Por exemplo, a redução de vazamentos e perdas podem diminuir os acidentes industriais e os riscos para a saúde humana, apoiando o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar). Além disso, ao adotar práticas mais sustentáveis, as empresas podem melhorar sua reputação e imagem corporativa, contribuindo para o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 17 (Parcerias e meios de implementação).

Portanto, espera-se que este projeto possa contribuir cientificamente com pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de sistemas de monitoramento baseado na Internet das Coisas para detecção de vazamentos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABA, E. N. et al. **Petroleum pipeline monitoring using an internet of things (IoT) platform.** SN Applied Sciences, v. 3, n. 2, 2021.
- ADEGBOYE, M. A.; FUNG, W. K.; KARNIK, A. **Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: Principles and approaches.** Sensors (Switzerland), v. 19, n. 11, 2019.
- ALI, A. et al. **Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey.** Journal of Network and Computer Applications, v. 83, p. 124-139, 2017.
- AMARAL, Bruno do. **TIM realiza testes de longa distância de NB-IoT no interior de Goiás.**
- ALJUAID et al. **Comparative Review of Pipelines Monitoring and Leakage Detection Techniques.** International Conference on Computer and Information Sciences. October 2020
- ARIARATNAM, S.T., CHANDRASEKARAN, M., 2010. **Development of a free-swimming acoustic tool for liquid pipeline leak detection including evaluation for natural gas pipeline applications.** Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), Washington DC.
- BASTOS, Vinicius. **Como funciona o Zigbee, Bluetooth, BLE e BT Mesh.** Quero Automação. Disponível em < <https://queroautomacao.com.br/como-funciona-o-zigbee-bluetooth-ble-e-bt-mesh/>> Acessado em 04/03/2023.
- BORGES, Roberto E.P. **Sistema Inteligente para apoio à decisão na operação de uma malha de escoamento de petróleo.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo (PPGCEP) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFNR). 2013. Disponível em < https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/13001/1/SistemaInteligenteApoio_Borges_2014.pdf > Acessado em 01/10/2021.
- BOND, Leonard J. **Fundamentals of Ultrasonic Inspection.** ASM Handbook, volume 17, Nondestructive Evaluation of Materials. 2018 ASM International.
- ANP - SIM (Superintendência de Infraestrutura e Movimentação). **Manual de Comunicação de Incidentes em Instalações de Movimentação e Armazenamento de Petróleo, Seus derivados, Biocombustíveis e Gás Natural.** Versão 1, 2020.
- ANP. **Relatório Anual de Segurança Operacional.** Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca->

[operacional-e-meio-ambiente/relatorios-anuais-de-seguranca-operacional](#)>. Acesso em: 10 abril 2023.

ANP - RTDT (**Regulamento Técnico de dutos terrestres para movimentação de petróleo, derivados e gás natural**). Regulamento Técnico ANP Nº 2/2011. Resolução de Diretoria nº 98, de 2 de fevereiro de 2011

BHASKARAN, P. E. et al. **IoT Based monitoring and control of fluid transportation using machine learning**. Computers and Electrical Engineering, v. 89, n. November 2019, p. 106899, 2021.

BOLLER, C. et al. **Enciclopedia of Structural Health Monitoring**. Ed. John Wiley and Sons, 1ª edição, Nova York, 2009.

BUZZO, Bruna. **Entenda o que é ESG e qual sua importância**. e-Cycle. Disponível em <<https://www.ecycle.com.br/esg/>> acessado em 09/07/2022.

CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves**. Editora CRC Press, ed.1, Londres, 2002.

CHEN, M. et al. **Narrow Band Internet of Things**. IEEE, 2017.

DOMÍNGUEZ-BOLAÑO et al. **An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects**. 2022. Published by Elsevier B.V.

EERC - Energy & Environmental Research Center – University of North Dakota. **Liquids gathering pipelines: A Comprehensive Analysis**. December 2015. Disponível em <<https://undeerc.org/bakken/pdfs/EERC%20Gathering%20Pipeline%20Study%20Final%20Dec15.pdf>> Acessado em 18/11/2021.

ETESCO, Gasoduto e oleoduto: Como funcionam? Atualizado em 28/09/2022. disponível em <<https://etesco.com.br/gasoduto-e-oleoduto-como-funcionam/#:~:text=Sabemos%20que%20as%20tubula%C3%A7%C3%B5es%20que,bruto%2C%20s%C3%A3o%20chamadas%20de%20oleodutos.>> Acessado em 11/06/2023.

FAHIMIPIREHGALIN et al. **Automatic Visual Leakage Detection and Localization from Pipelines in Chemical Process Plants Using Machine Vision Techniques**. 2021. Engineering.

FARAHANI, Shahin. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. 1 ed. Oxford: Elsevier, 2008.

FIRJAN – Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. **Ambiente de Negócios – Ambiente Onshore de Petróleo e Gás no Brasil**. Maio/2017. Disponível em <

<http://publicacoes.firjan.org.br/ambiente-onshore-brasil-2017/files/assets/common/downloads/publication.pdf> > Acessado em 26/01/2021.

GLISIC, B. **Sensing solutions for assessing and monitoring pipeline systems**. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2014. vol 1.

GHAVAMIAN et al. **Detection, Localisation and Assessment of Detects in Pipes Using Guided Wave Techniques: A Review**. *Sensors* 2018, 18(12), 4470;

GOLMOHAMADI, Marcia. **Pipeline leak detection**. 2015. Masters Theses. 7397. Disponível em <https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7397> Acessado em 15/03/2023.

HAO, Xu., Xu, Jingde, Li, Hui, 2016. **Summary of trace leakage detection technology for natural gas transmission pipeline based on TDLAS**. *J. North China Inst. Sci. Technol.* 13, 60–64.

HOLSTEIN, BARTH, PROBST. **Acoustic methods for leak detection and tightness testing**. 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016.

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. **Panorama Geral do Setor de Petróleo e Gás: Uma Agenda para o futuro**. Disponível em <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2023/04/panorama-geral-do-setor-og-22-03-2023-web.pdf>> Acessado em 11/08/2023.

International Pipe. Learn About the difference between oil pipe & Gas Pipe. Disponível em <https://internationalpipe.com/2021/08/11/learn-about-the-difference-between-oil-pipe-gas-pipe/#:~:text=Oil%20pipe%20transfers%20liquid%20petroleum,require%20a%20relatively%20slower%20speed.> > Acessado em 11/06/2023.

JULIÃO, Henrique. **Vivo começa operação comercial de redes NB-IoT e LTE-M**. Disponível em <https://teletime.com.br/19/03/2019/vivo-comeca-operacao-comercial-de-redes-nb-iot-e-lte-m/> Acessado em 10/01/2022.

Li, Jiakun, Jin, Weiqi, Wang, Xia, Jin, Minglei, Dun, Xiong, Chen, J., 2014. **Review of gas leak infrared imaging detection technology**. *Infrared Technol.* 36, 513–520.

Li, S.; Wen, Y.; Li, P.; Yang, J.; Yang, L. **Leak detection and location for gas pipelines using acoustic emission sensors**. In Proceedings of the 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Dresden, Germany, 7–10 October 2012; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2012; pp. 957–960.

Links Filed – W2M made easy. **Quais são os desafios da conectividade IoT?** Disponível em <https://www.linksfield.net/blog/desafios_conectividade_iot/?lang=pt-br> Acessado em 04/03/2023.

LU, H. et al. **Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: State-of-the-art.** Tunnelling and Underground Space Technology, v. 98, n. September 2019, 2020.

Loth, J., Morris, G.J., Palmer, G.M., Guiler, R., Mehra, D., 2003. **Technology assessment of on-line acoustic monitoring for leaks/infringements in underground natural gas transmission lines.** West Virginia University, USA.

MAHESHWARI, Mudit. Understanding SSH workflow. Disponível em < <https://medium.com/@hellomudit/understanding-ssh-workflow-66a0e8d4bf65>> acessado em 01/03/2023.

MANEKIYA, Mohammedhusen H.; ARULMOZHIVARMAN, P. **Leakage Detection and Estimation using IR Thermography.** International Conference on Communication and Signal Processing, April 6-8, 2016, India

MEKKI, K. et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. **ICT Express**, v. 5, n. 1, p. 1-7, mar. 2019.

MENDES, A. P. DO A. et al. **Produção de Petróleo Terrestre no Brasil.** Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/16962/3/PRArt214594_Producao_de_petroleo_terrestre_no_Brasil_P_BD.pdf>. Acessado em 26/01/2021.

MENESES, Carla G. R; Quadrado V, André. **Sensibilidade Ambiental e Estratégia de Resposta para incidentes: estudo de caso para travessia de oleoduto no Rio Piranhas-Açu/RN.** Ano 3, n. 1, p. 49-57, out.2014/mar.2015 ISSN 2316-668

MOHD Yussof, N.A.; Ho, H.W. **Review of Water Leak Detection Methods in Smart Building Applications.** Buildings 2022, 12, 1535.

MENG et al. **Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method.** Loss Prev. Process Ind. 2011, 25, 90–102. 2011. Elsevier Ltd.

PETRO & QUÍMICA. **Novas ferramentas.** Edição 295, 2007. Valete Editora Técnica Comercial Ltda. Disponível em < http://www.petroquimica.com.br/edicoes/ed_295/295_m2.html> Acessado em 15/01/2022.

PRISUTOVA et al. **Use of Fibre-Optic Sensors for Pipe Condition and Hydraulics Measurements: A Review.** CivilEng 2022, 3, 85–113. MDPI.

RIOS; DE ASSIS; SOARES. **Rede de Sensores sem Fio.** Graduação de Engenharia Eletrônica e de Computação da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disciplina Redes de Computadores I – 2018. Disponível em < <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/rssf/>> Acessado em 02/04/2023.

ROSE, J. L. **Ultrasonic Waves in Solid Media**. Editora Cambridge University Press, 1ª edição, Cambridge, 2004.

SANTIN, J., **Ultrassom, Técnica e aplicação**, pg 3-17, 2003.

SHAPIRO, Linda G. & Stockman, George C. (2002). "Computer Vision". Prentice Hall.

STUCKENBRUCK, Sidney. **Escoamento de líquidos e gases em dutos. Curso de Extensão para a Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul – SULGÁS**. Porto Alegre. 2012. Disponível em < <http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/Esc-Dutos.pdf> > Acessado em 11/06/2023.

TANIMOLA, Femi; HILL, David. **Distributed fibre optic sensors for pipeline protection**. Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 1, n. 4-5: Elsevier B.V., 2009, p. 134-143.

DO VALE, Giovane Maia do; POZ, Aluir Porfírio. **Processo de detecção de bordas de Canny**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 8, no 2, p.67-78, 2002. Disponível em < <file:///C:/Users/masca/Downloads/1421-3207-1-PB.pdf>> Acessado em 11/06/2023.

ZHANG, Jun. **Designing a Cost Effective and Reliable Pipeline Leak Detection System**. REL Instrumentation Limited, Manchester, UK. 1996.

WANG, M. L.; LYNCH, J. P.; SOHN, H. **Sensor technologies for civil infrastructures**. Volume 2: Applications in structural health monitoring. [S.l.]: Elsevier, 2014.

Wazlawick, R. **Metodologia de pesquisa para ciência da computação**. v. 2. Elsevier Brasil, 2017.

WOELLWARTH, L. **Pipeline leak detection based on thermal imaging**. Disponível em < <https://www.worldpipelines.com/product-news/28062018/pipeline-leak-detection-based-on-thermal-imaging/>> Acessado em 07/11/2021.

9 ANEXOS

9.1 Descrições técnicas da câmera *Flir ADK Thermal Vision*

- Formato de matriz: 640×512
- Formato de dados Seleccionável por software: TIFF de 16 bits (formato de sensor bruto) ou 8 bits compactados
- FOV – Horizontal: 24°
- Opções de taxa de quadros: Full Frame (30 e 60 Hz seleccionáveis), 9 Hz opcional
- Tamanho do pixel: $12 \mu\text{m}$
- Banda Espectral: 8-14 microns (LWIR)
- Detector de imagem térmica: Boson™ – microbolômetro de VOx
- Sensibilidade Térmica: $< 50 \text{ mK}$
- Tensão de entrada Câmera: 5 VDC (USB2) ou 24 VDC (GMSL); aquecedor de janela: 12 VDC (USB2) ou 24 VDC (GMSL)
- Consumo de energia: 1 W (sem aquecedor); $\sim 4 \text{ W}$ em média e 12 W no máximo (com aquecedor)
- Dimensões (L x A x P): $35 \times 40 \times 47 \text{ mm}$ ($1,38 \times 1,57 \times 1,8 \text{ pol.}$)
- Peso: $\sim 100 \text{ g}$ (3,5 onças)
- Proteção Ambiental: IP67
- Temperatura de operação: -40°C a $+75^\circ\text{C}$ (-40°F a $+167^\circ\text{F}$)
- Choque: 1.500 G a 0,4 ms
- Proteção solar: Sim (o sol não danifica o sensor)

9.2 Descrições técnicas do *Raspberry Pi 3 Model B*

- Processador Broadcom BCM2837 64bit ARMv8 Cortex-A53 Quad-Core
- Clock 1.2 GHz
- Memória RAM: 1GB
- Adaptador Wifi 802.11n integrado (trabalha na frequência de 2.4 Ghz)
- Bluetooth 4.1 BLE integrado
- Conector de vídeo HDMI
- 4 portas USB 2.0
- Conector Ethernet
- Interface para câmera (CSI)
- Interface para display (DSI)
- Slot para cartão microSD
- Conector de áudio e vídeo
- GPIO de 40 pinos
- Número de homologação Anatel: 04908-17-10629
- Dimensões: 85 x 56 x 17mm

9.3 Descrições técnicas do módulo Zigbee XBee S2

- Modelo: XBee Series 2 OEM RF
- Alcance interno/urbano: de até 40 m
- Alcance externo: até 120 m
- Saída de potência de transmissão (selecionável por software) 2mW (+3dBm)
- Taxa de dados de RF 250.000 bps
- Taxa de dados da interface serial (selecionável por software) 1200 - 230400 bps (taxas de transmissão não padrão também suportadas)
- Sensibilidade do receptor -95 dBm (taxa de erro de pacote de 1%)
- Tensão de alimentação 2,8 – 3,4 V
- Corrente Operacional (Transmitir) 40mA (@ 3,3 V)
- Corrente Operacional (Recepção) 40mA (@ 3,3 V)
- Corrente de desligamento < 1 uA @ 25 °C
- Banda de frequência operacional geral ISM 2,4 GHz
- Dimensões 0,960" x 1,087" (2,438cm x 2,761cm)
- Temperatura de Operação -40 a 85° C (industrial)
- Opções de antena chicote integrado, chip, RPSMA ou conector U.FL
- Topologias de rede suportadas ponto a ponto, ponto a multiponto, ponto a ponto e malha
- Número de canais (selecionável por software) 16 canais de sequência direta
- Opções de endereçamento PAN ID e endereços, IDs de cluster e endpoints (opcional)

10 APÊNDICES

10.1 Algoritmo de captura, envio e recebimento dda imagem

```
import numpy as np
from PIL import Image
import serial
import os
import cv2 as cv
import time

directory = r'Your directory here'
os.chdir(directory)

webcam = cv.VideoCapture(0)
ret, frame = webcam.read()
cv.imwrite("Foto.jpg", frame)
webcam.release()

# Carregar a imagem
image = Image.open('Foto.jpg')
image = image.resize((640, 512))
# Converter a imagem para escala de cinza
gray_image = image.convert('L')

# Converter a imagem para uma matriz
gray_matrix = np.array(gray_image)

# Converter a matriz em um vetor unidimensional
gray_vector = gray_matrix.ravel()

# Função para reconstruir a imagem a partir do vetor unidimensional
def reconstruct_image(vector, width, height):
    # Reshape do vetor para a dimensão original
    reshaped_vector = vector.reshape((height, width))

    # Converter a matriz para uma imagem PIL
    reconstructed_image = Image.fromarray(reshaped_vector.astype(np.uint8),
mode='L')

    return reconstructed_image

# Obter as dimensões originais da imagem
width, height = gray_matrix.shape

# Porta serial
port = '/dev/ttyUSB0' # Substitua pela porta serial correta
```

```
# Converter o vetor em bytes
dados = gray_vector.tobytes()

tamanho_pacote = 50

# Envia cada pacote sequencialmente
with serial.Serial(port, baudrate=9600) as ser:
    for i in range(0, len(dados), tamanho_pacote):
        pacote = dados[i:i+tamanho_pacote]
        ser.write(pacote)
        time.sleep(2)

# Limpar o terminal
print("\033c")
print("Dados enviados com sucesso!")
```

10.2 Algoritmo de processamento da imagem capturada

```
import cv2
import numpy as np

# Ler a imagem da câmera de infravermelho
image = cv2.imread('data/leak_25m-5.jpg', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)

# Aplicar o mapa de cores Jet,
# leia mais sobre ColorMaps no OpenCV
aqui: https://docs.opencv.org/4.x/d3/d50/group\_\_imgproc\_\_colormap.html
colormap_image = cv2.applyColorMap(image, cv2.COLORMAP_JET)

# Definir os limites inferiores e superiores para a cor vermelha no espaço de
cores HSV
lower_red = np.array([0, 100, 100])
upper_red = np.array([0, 255, 255])

# Converter a imagem do mapa de cores para o espaço de cores HSV, o OpenCV usa
a escala HSV para essa operação
hsv_image = cv2.cvtColor(colormap_image, cv2.COLOR_BGR2HSV)

# Criar uma máscara para selecionar a faixa de cor vermelha
# leia mais sobre cv2.inRange()
aqui: https://docs.opencv.org/3.4/da/d97/tutorial\_threshold\_inRange.html
mask = cv2.inRange(hsv_image, lower_red, upper_red)

# Aplicar a máscara à imagem do mapa de cores, operação AND entre a imagem e a
máscara
# leia mais aqui,
https://docs.opencv.org/3.4/d0/d86/tutorial\_py\_image\_arithmetics.html
red_frequency_image = cv2.bitwise_and(colormap_image, colormap_image,
mask=mask)

# Converter a imagem para escala de cinza, mais informações aqui:
https://docs.opencv.org/3.4/d8/d01/group\_\_imgproc\_\_color\_\_conversions.html#gga4e0972be5de079fed4e3a10e24ef5ef0a353a4b8db9040165db4dadb5bcefb6ea
gray_image = cv2.cvtColor(red_frequency_image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# Encontrar contornos na imagem em escala de cinza, mais informações
aqui: https://docs.opencv.org/4.x/d4/d73/tutorial\_py\_contours\_begin.html
contours, _ = cv2.findContours(gray_image, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

# Filtra os contornos com base na área mínima e máxima
area_minima = 10 # Defina um valor adequado para sua imagem pixels
area_maxima = 1000
```

```

contornos_filtrados = [cnt for cnt in contours if area_minima <
cv2.contourArea(cnt) > area_maxima]

# Ordena os contornos em ordem decrescente de área
contornos_ordenados = sorted(contornos_filtrados, key=cv2.contourArea,
reverse=True)

# Desenhar os contornos na imagem original
# veja mais aqui:
https://docs.opencv.org/3.4/dd/d49/tutorial\_py\_contour\_features.html?loclr=blogmap
x, y, w, h = cv2.boundingRect(contornos_ordenados[0])

# Recortar a imagem com base no retângulo delimitador
cropped_image = colormap_image[y:y+h, x:x+w]

# Redimensionar a imagem recortada para fins de visualização
cropped_image = cv2.resize(cropped_image, None, fx=3, fy=3,
interpolation=cv2.INTER_LINEAR)

# Se o formato da imagem for x, a tubulação foi localizada senão, não foi
localizada
if cropped_image.shape[0] > 1.2 * cropped_image.shape[1]:
    print("não foi possível localizar a tubulação")
else:
    print("tubulação localizada")

#      HORA DE ANALISAR A IMAGEM RECORTADA, QUE É APENAS A IMAGEM DO TUBO
#
# Aplicar outra máscara vermelha à imagem recortada
lower_red2 = np.array([0, 100, 100])
upper_red2 = np.array([0, 255, 255])
hsv_cropped_image = cv2.cvtColor(cropped_image, cv2.COLOR_BGR2HSV)
mask2 = cv2.inRange(hsv_cropped_image, lower_red2, upper_red2)

# Detecção de bordas Canny, leia mais aqui:
https://docs.opencv.org/4.x/da/d22/tutorial\_py\_canny.html
edges = cv2.Canny(mask2, threshold1=50, threshold2=150)

# Dilatar a imagem binária, usando a operação morfológica dilate()
# mais informações
aquí: https://docs.opencv.org/3.4/db/df6/tutorial\_erosion\_dilatation.html
edges = cv2.dilate(edges, None, iterations=1)

# Encontrar contornos na imagem de bordas, mais informações aqui:
https://docs.opencv.org/4.x/d4/d73/tutorial\_py\_contours\_begin.html

```

```

contours, _ = cv2.findContours(edges, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

# Filtrar os contornos com base em sua área
min_contour_area = 10
max_contour_area = 100
filtered_contours = [cnt for cnt in contours if min_contour_area
<cv2.contourArea(cnt) > max_contour_area]

# Ordenar os contornos filtrados por área em ordem crescente
filtered_contours = sorted(filtered_contours, key=cv2.contourArea)

# Selecionar o menor contorno
if filtered_contours:
    smallest_contour = filtered_contours[0]

    # Desenhar o contorno na imagem recortada
    cv2.drawContours(cropped_image, [smallest_contour], -1, (255, 0, 0), 2)

# Exibir a imagem resultante com as linhas filtradas
cv2.imshow('Cropped Image with Small Lines', cropped_image)
cv2.imshow('Cropped Image with Circles', edges)

cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

```

10.3 Algoritmo de automatização do sistema

```
#!/bin/bash

# Execute dentro da mesma pasta.

# Executar o código Python de recebimento de imagem.

python3 image_processing.py

# Repositório Remoto
git remote set-url origin git@github.com:theussant/IC-MPDS.git

# Adicionar a imagem ao repositório Git.

git add data/reconstructed_image.jpg

# Fazer o commit da imagem.

git commit -m "Adicionando imagem recebida"

# Push para o repositório remoto

git push
```

10.4 Algoritmo da estrutura do site: home

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>IC-MPDS</title>
  <!-- Link do estilo -->
  <link rel="stylesheet" href="style.css">
  <!-- Link das caixas -->
  <link rel="stylesheet"
href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/boxicons@latest/css/boxicons.min.css">
  <!-- Icone da página -->
  <link rel="icon" type="image/png" href="/assets/duto-flaticon.png"/>
</head>

<body>
  <!-- Barra de navegação -->
  <header>
    <a href="#" class="logo"></a>
    <div class="bx bx-menu" id="menu-icon"></div>

    <ul class="navbar">
      <li><a href="#inicio">Início</a></li>
      <li><a href="verificar.html">Verificação</a></li>
      <li><a href="#galeria">Galeria</a></li>
      <li><a href="#sobre">Sobre</a></li>
      <li><a href="#contatos">Contatos</a></li>
    </ul>
  </header>

  <!-- Inicio -->
  <section class="inicio" id="inicio">
    <div class="inicio-text">
      <span>Bem-vindos!</span>
      <h1>Pipecom Bahia</h1>
      <h2>Sistema de detecção de vazamentos IoT</h2>
      <a href="verificar.html" class="btn-verificar-index">Verificar</a>
    </div>
  </section>

  <!-- Verificar -->
  <section class="verificar" id="verificar">
    <div class="heading">
```

```

        <span>Verificação</span>
        <h1>verificar vazamentos</h1>
    </div>
    <div class="container">
        <div class="verificar-img">
            
        </div>
        <div class="verificar-text">
            <h2>Informações:</h2>
            <p>Lorem Ipsum is simply text of the printing and typesetting
industry. printer took a galley and scrambled it to make a type specimen
book.</p>
            <p>It has survived not only five centuries, but also the leap
into electronic typesetting, remaining essentially unchanged.</p>
            <a href="verificar.html" class="btn-verificar">Verificar</a>
        </div>
    </div>
</section>

<!-- Sobre -->
<section class="sobre" id="sobre">
    <div class="sobre-text">
        <h2>Sobre nós</h2>
        <p>Lorem Ipsum is simply text of the printing and typesetting
industry. printer took a galley and scrambled it to make a type specimen
book.</p>
        <p>It has survived not only five centuries, but also the leap into
electronic typesetting, remaining essentially unchanged.</p>
        <a href="#" class="btn">Veja mais</a>
    </div>
    <div class="sobre-img">
        
    </div>
</section>

<!-- Contatos -->
<section class="contatos" id="contatos">
    <div class="social">
        <a href="#"><i class='bx bxl-instagram' ></i></a>
        <a href="#"><i class='bx bxl-gmail' ></i></a>
        <a href="#"><i class='bx bxl-github' ></i></a>
        <a href="#"><i class='bx bxl-linkedin' ></i></a>
    </div>
    <br>
    <div class="links">
        <a href="#">Políticas de Privacidade</a>
        <a href="#">Termos De Uso</a>
    </div>

```

```
        <a href="#">Nossa empresa</a>
    </div>
    <br>
    <p class="copy">#169; SenaiCimatec All Right Reserved.</p>
</section>

<!-- Script -->
<script src="script.js"></script>
</body>

</html>
```

10.5 Algoritmo de verificação das subpáginas do site

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
  <title>IC-MPDS: Verificação</title>
  <!-- Link do estilo -->
  <link rel="stylesheet" href="style.css">
  <!-- Link das caixas -->
  <link rel="stylesheet"
href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/boxicons@latest/css/boxicons.min.css">
  <!-- Icone da página -->
  <link rel="icon" type="image/png" href="/assets/duto-flaticon.png"/>
</head>

<body>
  <!-- Barra de navegação -->
  <header>
    <a href="#" class="logo"></a>
    <div class="bx bx-menu" id="menu-icon"></div>

    <ul class="navbar">
      <li><a href="index.html">Início</a></li>
      <li><a href="#verificar">Verificação</a></li>
      <li><a href="#galeria">Galeria</a></li>
      <li><a href="#sobre">Sobre</a></li>
      <li><a href="#contatos">Contatos</a></li>
    </ul>
  </header>

  <!-- Verificar -->
  <section class="inicio" id="inicio">
    <div class="verificar-img">
      <br>
      <div id="raw-content"></div>
      <img id="latest-image">
    </div>
    <a href="verificar.html" class="btn-verificar-index">Verificar</a>
  </section>

  <section class="verificar" id="verificar">
    <div class="heading">
      <h1>Informações:</h1>
    </div>
  </section>
</body>
</html>
```

```

    <div class="container">
      <div class="verificar-img">
        
      </div>
      <div class="verificar-text">
        <h2>Informações:</h2>
        <p>Lorem Ipsum is simply text of the printing and typesetting
industry. printer took a galley and scrambled it to make a type specimen
book.</p>
        <p>It has survived not only five centuries, but also the leap
into electronic typesetting, remaining essentially unchanged.</p>
        <a href="#" class="btn">Verificar</a>
      </div>
    </div>
</section>

<!-- Contatos -->
<section class="contatos" id="contatos">
  <div class="social">
    <a href="#"><i class='bx bxl-instagram' ></i></a>
    <a href="#"><i class='bx bxl-gmail' ></i></a>
    <a href="#"><i class='bx bxl-github' ></i></a>
    <a href="#"><i class='bx bxl-linkedin' ></i></a>
  </div>
  <br>
  <div class="links">
    <a href="#">Políticas de Privacidade</a>
    <a href="#">Termos De Uso</a>
    <a href="#">Nossa empresa</a>
  </div>
  <br>
  <p class="copy">&#169; SenaiCimatec All Right Reserved.</p>
</section>

<!-- Script -->
<script src="script.js"></script>

</body>

</html>

```

10.6 Algoritmo de personalização do visual do site

```
@import
url('https://fonts.googleapis.com/css2?family=Poppins:ital,wght@0,200;0,300;0,
400;0,500;0,600;0,700;1,200&display=swap');

* {
  margin: 0;
  padding: 0;
  box-sizing: border-box;
  scroll-padding-top: 2rem;
  text-decoration: none;
  list-style: none;
  scroll-behavior: smooth;
  font-family: "Poppins", sans-serif;
}

:root {
  --main-color:#005ea8;
  --second-color: #ffffff;
  --third-color: #0087C4;
}

section {
  padding: 50px 10%;
}

*::selection {
  color: #fff;
  background: var(--main-color);
}

img {
  width: 100%;
}

header {
  position: fixed;
  width: 100%;
  top: 0;
  right: 0;
  z-index: 1000;
  display: flex;
  align-items: center;
  justify-content: space-between;
  background-color: #fff;
  box-shadow: 0 4px 41px rgb(14 55 54 / 14%);
  padding: 15px 10%;
```

```

    transition: 0.2s;
}

.logo {
  display: flex;
  align-items: center;
}

.logo img {
  width: 105px;
  height: 35px;
}

.navbar {
  display: flex;
}

.navbar a {
  font-size: 1rem;
  padding: 11px 20px;
  color: var(--main-color);
  font-weight: 600;
  text-transform: uppercase;
}

.navbar a:hover {
  color: var(--third-color);
}

#menu-icon {
  font-size: 24px;
  cursor: pointer;
  z-index: 1001;
  display: none;
}

.inicio {
  width: 100%;
  min-height: 100vh;
  display: flex;
  flex-wrap: wrap;
  align-items:center;
  background: var(--main-color);
  gap: 1rem;
  text-align: center;
}

```

```

.inicio-text {
  flex: 1 1 17rem;
}

.inicio-text span {
  font-size: 1rem;
  text-transform: uppercase;
  font-weight: 600;
  color: var(--second-color)
}

.inicio-text h1 {
  font-size: 3.2rem;
  color: var(--second-color);
  font-weight: bolder;
}

.inicio-text h2 {
  font-size: 1.8rem;
  font-weight: 600;
  color: var(--second-color);
  text-transform: uppercase;
  margin: 0.5rem 0 1.4rem;
}

.btn {
  padding: 7px 16px;
  border: 2px solid var(--second-color);
  border-radius: 40px;
  color: var(--main-color);
  font-weight: 500;
  background: var(--second-color);
  transition: all 0.3s ease 0s;
}

.btn:hover {
  color: #fff;
  background: var(--main-color);
}

.btn:active {
  transform: translate(10px, 10px);
  box-shadow: 0px 15px 20px #ffff;
  transition: all 0.3s ease 0s;
}

.heading {
  text-align: center;
}

```

```

    text-transform: uppercase;
}

.heading span {
    font-size: 1rem;
    font-weight: 600;
    color: var(--main-color);
}

.heading h1 {
    font-size: 2rem;
    color: var(--main-color);
}

.btn-verificar {
    padding: 7px 16px;
    border: 2px solid var(--main-color);
    border-radius: 40px;
    color: var(--second-color);
    font-weight: 500;
    background: var(--main-color);
    transition: all 0.3s ease 0s;
}

.btn-verificar:hover {
    color: var(--main-color);
    background: var(--second-color);
    border: 2px solid var(--main-color);
}

.btn-verificar:active {
    transform: translate(10px, 10px);
    box-shadow: 0px 15px 20px #ffff;
    transition: all 0.3s ease 0s;
}

.btn-verificar-index {
    padding: 7px 16px;
    border: 2px solid var(--second-color);
    border-radius: 40px;
    color: var(--main-color);
    font-weight: 500;
    background: var(--second-color);
    transition: all 0.3s ease 0s;
    padding: 0.6em 2.1em;
}

.btn-verificar-index:hover {
    color: var(--second-color);
}

```

```

background: var(--main-color);
border: 2px solid var(--second-color);
}

.btn-verificar-index:active {
  transform: translate(10px, 10px);
  box-shadow: 0px 15px 20px #ffff;
  transition: all 0.3s ease 0s;
}

.container {
  display: flex;
  flex-wrap: wrap;
  gap: 1.5rem;
  margin-top: 2rem;
}

.verificar-img {
  flex: 1 1 21rem;
}

.verificar-text {
  flex: 1 1 21rem;
  color: var(--main-color)
}

.verificar-text h2 {
  font-size: 1.2rem;
  color: var(--main-color);
}

.verificar-text p {
  margin: 0.5rem 0 1rem;
  text-align: justify;
}

.sobre {
  display: flex;
  flex-wrap: wrap;
  background: var(--main-color);
  gap: 1.5rem;
}

.sobre-img {
  flex: 1 1 17rem;
}

.sobre-text {

```

```

    flex: 1 1 17rem;
}

.sobre-text h2 {
  font-size: 1.2rem;
  color: var(--second-color);
}

.sobre-text p {
  margin: 0.5rem 0 1rem;
  text-align: justify;
  color: var(--second-color);
}

.contatos {
  display: flex;
  flex-direction: column;
  align-items: center;
}

.social a {
  font-size: 27px;
  margin: 0.5rem;
}

.social a .bx {
  padding: 5px;
  color: #fff;
  background: var(--main-color);
  border-radius: 50%;
}

.social a .bx:hover {
  background: var(--main-color);
}

.link {
  margin: 1rem 0 1rem;
}

.links a {
  font-size: 1rem;
  font-weight: 500;
  color: var(--second-color);
  padding: 1rem;
}

.link a:hover {
  color: var(--main-color);
}

```

```

}

.contatos p {
  text-align: center;
}

.copy {
  color: var(--main-color);
}

.verificar-img {
  flex: 2 2 25rem;
  margin-top: 2rem;
}

.informacao-container {
  display: flex;
  flex-wrap: wrap;
  gap: 1rem;
  margin-top: 2rem;
}

.informacao-container .box .bx {
  color: var(--main-color);
}

.informacao-container .box h2 {
  color: var(--main-color);
  font-size: 1.2rem;
  gap: 1rem;
}

.box .btn {
  color: var(--main-color);
  margin-top: 4rem;
}

.btn {
  border: 2px solid var(--main-color);
  display: flex;
  margin-top: 15px;
  margin-left: 0.3rem;
  justify-content: center;
  padding: 0.6em 2.1em;
  align-items: center;
  width: 18rem;
}

```

```

.btn:hover{
  background: var(--main-color);
  color: var(--second-color);
  border: 2px solid var(--second-color);
}
.card{
  width: 300px;
  height: 500px;
  border-radius: 15px;
  background-color: var(--second-color);
  margin: 10px;
}
.info {
  margin-left: 1rem;
  margin-top: 1rem;
}
.slides {
  display: grid;
  grid-template-columns: repeat(auto-fit, minmax(200px, 1fr));
  grid-gap: 10px;
}
#raw-content {
  color: var(--second-color);
}
/*
Media Querys:
*/
@media (max-width: 1150px){
  header {
    padding: 18px 7%;
  }
  section {
    padding: 50px 7%;
  }
  .inicio-text h1 {
    font-size: 3rem;
  }
  .inicio-text h2 {
    font-size: 1.5rem;
  }
}
@media (max-width: 991px){
  header {

```

```

        padding:18px 4%;
    }
    section {
        padding: 50px 4%;
    }
}

@media (max-width: 768px){
    header {
        padding:11px 4%;
    }
    #menu-icon {
        display: initial;
    }
    header .navbar {
        position: absolute;
        top: -500px;
        left: 0;
        right: 0;
        display: flex;
        flex-direction: column;
        background: #fff;
        box-shadow: 0 4px 4px rgb(14 55 54 / 14%);
        border-top: 2px solid var(--main-color);
        transition: 0.2s;
        text-align: left;
    }
    .navba.active {
        top: 100%;
    }
    .navbar a {
        padding: 1.5rem;
        display: block;
        color: var(--second-color);
    }
    .inicio-text span {
        font-size: 0.9rem;
    }
    .inicio-text h1 {
        font-size: 2.4rem;
    }
    .inicio-text h2 {
        font-size: 1.2rem;
    }
}

@media (max-width: 768px){
    .inicio-text {

```

```
padding-top: inherit;
}
.informacao-container .box {
margin-top: 6rem;
}
.heading h1 {
font-size: 1.5rem;
}
.heading span {
font-size: 0.9rem;
}
.sobre {
flex-direction: column-reverse;
}
}
```

10.7 Algoritmo da lógica de funcionamento do site (*back-end*)

```
// Requisição do arquivo RAW do GitHub usando a função "fetch" do JavaScript.

const user = "theussant";
const repo = "IC-MPDS";
const path = "./data";
const imageElement = document.getElementById("latest-image");

fetch(`https://api.github.com/repos/${user}/${repo}/contents/${path}`, {
  headers: {
    Accept: "application/vnd.github.VERSION.raw"
  }
})
.then(response => response.json())
.then(data => {
  const images = data.filter(item => item.type === "file" &&
item.name.match(/\.(jpg|jpeg|png|gif)$/i));
  const newestImage = images.reduce((a, b) => new Date(a.created_at) > new
Date(b.created_at) ? a : b);
  const imageUrl = newestImage.download_url;
  imageElement.src = imageUrl;
});

// Script para verificar

// ler o conteúdo do arquivo de texto usando a API Fetch
fetch('https://raw.githubusercontent.com/theussant/IC-
MPDS/master/response.txt')
.then(response => response.text())
.then(text => {
  // comparando arquivo de texto com as strings "tem vazamento" ou "não tem
vazamento"
  const cor = text.trim().toLowerCase() === 'tem vazamento' ? 'red' :
'green';

  // alterar a cor do quadrado usando a propriedade style.background
const content = document.getElementById('raw-content');
content.innerText = cor === 'red' ? 'Tem vazamento' : 'Não tem vazamento';
content.style.background = cor;
});

// Script para menu e navbar

let menu = document.querySelector('#menu-icon');
let navbar = document.querySelector('.navbar');

menu.onclick = () => {
```

```
menu.classList.toggle('bx-x');
navbar.classList.toggle('active');
}

window.onscroll = () => {
  menu.classList.remove('bx-x');
  navbar.classList.remove('active');
}
```