UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA

CÂMPUS DE BAURU

EVERTON CAMOLEZE DE ARAUJO

INFRAESTRUTURA AVANÇADA DE MEDIÇÃO PARA GESTÃO INTELIGENTE DE GÁS NATURAL EM CLIENTES INDUSTRIAIS

BAURU

2023

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EVERTON CAMOLEZE DE ARAUJO

INFRAESTRUTURA AVANÇADA DE MEDIÇÃO PARA GESTÃO INTELIGENTE DE GÁS NATURAL EM CLIENTES INDUSTRIAIS

Trabalho de dissertação apresentado à Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy
Orientador

Bauru
2023

A663i Araujo, Everton Camoleze de
Infraestrutura avançada de medição para gestão inteligente de gás natural em clientes industriais / Everton Camoleze de Araujo. -- Bauru, 2023
113 p. : il., tabs., fotos

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

1. Internet das Coisas. 2. Rede LoRaWAN. 3. Infraestrutura de Medição Avançada. 4. Medição de Gás Natural. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A tecnologia proposta neste trabalho poderá otimizar o serviço de distribuição, medição e faturamento de gás natural à sociedade através de um melhor controle dos insumos. Desta forma, o usuário de gás natural poderá entender seu perfil de consumo e com isso reduzir possíveis consumos desnecessários e as empresas de distribuição de gás poderão realizar a compra do insumo com maior assertividade. A tecnologia também irá contribuir com a redução de emissão de gases poluentes na atmosfera através de envios remotos dos dados, pois no modelo tradicional de faturamento, o leiturista se desloca de carro até cada ponto de medição.

POTENCIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The technology proposed in this work can optimize the service of distribution, measurement and billing of natural gas to society through better control of gas. In this way, natural gas users will be able to understand their consumption profile and thereby reduce possible unnecessary consumption and gas distribution companies will be able to purchase the gas more assertively. The technology will also contribute to reducing the emission of polluting gases into the atmosphere through remote data transmission, as in the traditional billing model, the technician travels by car to each measurement point.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE EVERTON CAMOLEZE DE ARAÚJO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 24 dias do mês de fevereiro do ano de 2023, às 10:00 horas, no(a) Sala de Reuniões do 5º Andar (da Unesp de Sorocaba/SP), realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de EVERTON CAMOLEZE DE ARAÚJO, intitulada **INFRAESTRUTURA AVANÇADA DE MEDIÇÃO PARA GESTÃO INTELIGENTE DE GÁS NATURAL DE CLIENTES INDUSTRIAIS**. A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automacao / Instituto de Ciencia e Tecnologia UNESP Campus de Sorocaba, Prof. Dr. DHIEGO FERNANDES CARVALHO (Participação Presencial) do(a) Departamento de Eng. Controle e Automação / Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Sorocaba - ICTS, Prof. Dr. ALAN KARDEK RÊGO SEGUNDO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação (DECAT) / Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

RESUMO

Os serviços de fornecimento e gestão de insumos como água, energia elétrica e gás são chamados de *utilities*. Um dos maiores desafios existentes dentro deste setor está no desenvolvimento de métodos robustos, escaláveis e de baixo custo para a realização massiva do faturamento de clientes. Com o avanço da Internet das Coisas (IoT), uma Infraestrutura de Medição Avançada (AMI) é a base para qualquer solução de gestão inteligente de *utilities*. Uma AMI une elementos de hardware (medição remota), de comunicação sem fio de longa distância e de software (visualização de dados). O foco deste trabalho consiste no estudo e desenvolvimento de uma AMI para gestão inteligente de gás natural de clientes industriais usando IoT. A arquitetura da AMI consiste num módulo eletrônico de aquisição de dados, comunicação usando *LoRaWAN* para medição remota e numa plataforma de gestão inteligente do consumo de gás natural. O módulo remoto desenvolvido é responsável por coletar os dados de processo do equipamento fiscal de medição de gás natural e transmitir esses dados via rede *LoRaWAN* para uma plataforma de gestão. A gestão inteligente inclui o monitoramento contínuo de variáveis, controle supervisório, detecção de anomalias e notificação de alarmes. Resultados experimentais demonstraram que a rede *LoRaWAN* é adequada para medição remota fiscal de gás natural e a gestão inteligente é capaz de analisar dados históricos de consumo e detectar comportamentos atípicos, como por exemplo, fraudes e vazamentos.

Palavras-chave: Internet das Coisas, Medição de Gás Natural, Rede *LoRaWAN*, Infraestrutura de Medição Avançada, Corretor de Volume de Gás Tipo PTZ.

ABSTRACT

Services for supplying and managing inputs such as water, electricity and gas are called utilities. One of the biggest challenges within the utilities sector is the development of robust, scalable and low-cost methods for massive customer billing. With the advancement of the Internet of Things (IoT), an Advanced Metering Infrastructure (AMI) is the foundation for any intelligent utility management solution. An AMI brings together hardware (remote measurement), long-distance wireless communication, and software (data visualization) elements. The focus of this work is the study and development of an AMI for intelligent management of natural gas for industrial customers using IoT. The AMI architecture consists of an electronic module for data acquisition, communication using LoRaWAN for remote measurement and an intelligent management platform for natural gas consumption. The developed remote module is responsible for collecting process data from the natural gas measurement equipment and transmitting this data via the LoRaWAN network to a management platform. Intelligent management includes continuous variable monitoring, supervisory control, anomaly detection and alarm notification. Experimental results demanded that the LoRaWAN network is suitable for remote fiscal measurement of natural gas and that intelligent management is able to analyze historical consumption data and detect atypical behavior, such as fraud and leaks.

Keywords: Internet of Things, Natural Gas Measurement, LoRaWAN Network, Advanced Measurement Infrastructure, PTZ Type Gas Volume Corrector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corretor de volume de gás tipo PTZ instalado em uma linha com medidor de vazão com totalização de volume do tipo turbina 18
Figura 2 - Gráfico do tempo da vida útil da bateria e alcance 22
Figura 3 - Alcance e Largura de banda de redes de comunicação 22
Figura 4 - Arquitetura da rede *LoRaWAN* 24
Figura 5 - Criptografia da rede *LoRaWAN*: Chaves de segurança utilizadas ... 27
Figura 6 - Cobertura rede *LoRaWAN* no Brasil 28
Figura 7 - Hidrômetros convencionais com sensor instalado 30
Figura 8 - Concentrador *LoRaWAN* instalado 32
Figura 9 - Projeto de leitura remota de consumo de gás - Comgás 33
Figura 10 - Sensor instalado em um medidor de volume de gás tipo diafragma 34
Figura 11 - Análise de perfil de consumo de um cliente de gás natural 35
Figura 12 - Teste em bancada da solução 36
Figura 13 - Sensor de leitura de ponto de teste de proteção catódica 37
Figura 14 - Instalação do sensor em campo 38
Figura 15 - Dados coletados remotamente 39
Figura 16 - Transmissor de pressão 46
Figura 17 - Termoresistências 47
Figura 18 - Corretor de volume de gás tipo PTZ modelo Corus da marca *Itron* 50
Figura 19 - Corretor de volume de gás tipo Computador de Vazão modelo Floboss da marca Emerson 50
Figura 20 - Redundância na correção do volume de gás natural 51
Figura 21 - Processo de correção de gás natural - Fluxograma 51
Figura 22 - Arquitetura proposta da solução 52
Figura 23 - Variáveis de processo lidas em campo 53
Figura 24 - Coleta e envio dos dados de processo 54
Figura 25- Recebimento e análise dos dados coletados em campo 54
Figura 26 - Elevação de tensão 55
Figura 27 - Alimentação elétrica dos dispositivos 56
Figura 28 - Conexão para comunicação Modbus RTU 56
Figura 29 - Coleta de pulsos 57
Figura 30 - Medição de tensão da bateria 57
Figura 31 - Payload das variáveis de processo organizado através de aliás ... 57
Figura 32 - Separação dos dados de processo através do alias 58
Figura 33 - Dashboard da solução 58
Figura 34 - ESP-32 pinout 59
Figura 35 - Radioenge pinout 60
Figura 36 - Tela inicial do software Wincor 61
Figura 37 - Software ModScan 62
Figura 38 - Radioenge - Software MOTE 62
Figura 39 - Software Modbus Slave 63
Figura 40 - Alimentação elétrica do módulo desenvolvido 65
Figura 41 - Coleta de pulsos pelo ESP-32 66
Figura 42 - Divisor de tensão 66

Figura 43 - Comunicação Modbus RTU - Conversão de níveis de sinais 67
Figura 44 - Teste de validação da leitura Modbus RTU pelo ESP-32 67
Figura 45 - Comunicação serial entre o ESP-32 e o Radioenge 68
Figura 46 - Ligação física do módulo desenvolvido 68
Figura 47 - Módulo remoto protótipo 69
Figura 48 - Infraestrutura avançada de medição (AMI) para gestão inteligente de gás natural em clientes industriais 69
Figura 49 - Solução instalada em campo 70
Figura 50 - Consulta dos dados e seus endereços pelo ModScan 71
Figura 51 - Configuração do Radioenge 72
Figura 52 – Mapa dos Gateways próximos ao local de testes 74
Figura 53 - Criação do dispositivo na plataforma ProIoT 75
Figura 54 - Dispositivo cadastrado na plataforma ProIoT 75
Figura 55 - Criação de variáveis dentro da plataforma ProIoT 76
Figura 56 - Payload atribuído às variáveis do projeto 77
Figura 57 - Dashboard desenvolvido - Dados Gerais do Cliente 79
Figura 58 - Dashboard desenvolvido - Painel de Alarmes 79
Figura 59 - Dashboard desenvolvido - Dados em Tempo Real 80
Figura 60 - Dashboard desenvolvido - Análise Histórica do Cliente 81
Figura 61 - Simulador de vazão desenvolvido para testes 82
Figura 62 - Pontos de teste selecionados na curva de erro do medidor de vazão com totalização de volume 83
Figura 63 - Faixa mínima de vazão gerado pelo simulador e lido pelo PTZ e pela solução criada 83
Figura 64 - Testes realizados simulando a vazão mínima do medidor 84
Figura 65 - Vazão próxima a 100 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada 84
Figura 66 - Testes realizados simulando operação em 10% da vazão máxima do medidor 85
Figura 67 - Vazão próxima a 250 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada 85
Figura 68- Testes realizados simulando operação em 25% da vazão máxima do medidor 86
Figura 69 - Vazão próxima a 500 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada 86
Figura 70 - Testes realizados simulando operação em 50% da vazão máxima do medidor 87
Figura 71- Vazão próxima a 750 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada 87
Figura 72- Testes realizados simulando operação em 75% da vazão máxima do medidor 88
Figura 73 - Vazão próxima a 1000 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada 88
Figura 74 - Testes realizados simulando operação em 100% da vazão máxima do medidor 89
Figura 75 - Teste de alarme - consumo de gás abaixo da faixa mínima do medidor 92

Figura 76 - Teste de alarme - consumo de gás dentro da faixa do medidor 92
Figura 77 - Teste de alarme - consumo de gás acima da faixa máxima do medidor 93
Figura 78 - Teste de alarme - medidor inoperante no processo..... 93
Figura 79 - Teste de alarme - Monitoramento de pressão 94
Figura 80 - Lacre metrológico instalado na tampa do PTZ..... 95
Figura 81 - Sensor instalado para detecção da tampa aberta do PTZ 95
Figura 82 - Teste de alarme - Abertura da tampa do PTZ..... 96
Figura 83 - Alarme de possível vazamento 97
Figura 84 - Dados de consumo de gás inseridos no simulador..... 99
Figura 85 - Dados de consumo de gás recebidos no *dashboard* da solução criada 99
Figura 86 - Sobreposição entre os dois dados..... 99
Figura 87 - Esquemático do circuito..... 111
Figura 88 - PCB da placa desenvolvida: Vista inferior e vista superior 112
Figura 89 - Invólucro do circuito eletrônico..... 113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre *LPWANs* 23
Tabela 2 - Instrumentação para medição fiscal de gás natural e norma/portaria aplicável 44
Tabela 3 - Comparativo entre PTZ e Computador de Vazão (CV) 49
Tabela 4 - Mapeamento dos dados do PTZ dentro da memória do dispositivo 70
Tabela 5 - Configuração do módulo LoRaWAN 72
Tabela 6 - Variáveis de processo configuradas e atribuição do Aliás para método de separação do payload 76
Tabela 7 - Dados considerados no teste operacional de validação da solução 90
Tabela 8- Dados coletados no teste operacional de validação da solução 90
Tabela 9 - Faixas das variáveis para cálculo de Z com base na NX19 110

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Unesp	Universidade Estadual Paulista
LPWAN	Low Power Wide Area Network
IoT	Internet of Things
AMI	Advanced Metering Infrastructure
GPRS	General Packet Radio Service
AUIN	Agência Unesp de inovação
RTU	Remote Terminal Unit
LAN	Local Area Network
PAN	Personal Area Network
ABP	Activation by Personalization
OTAA	Over the Air Personalization
REI	Redes Elétricas Inteligentes
AGA	American Gas Association
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15
1.1. JUSTIFICATIVA 17
1.2. OBJETIVOS 19
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO 19
2. CONCEITOS RELACIONADOS 21
2.1. REDES *LPWAN* 21
2.2.*LORAWAN* 23
2.2.1. Arquitetura de Rede 24
2.2.2. Características de Rede 24
2.2.3 Rede Neutra *LoRaWAN* ATC 27
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 29
3.1. MEDIÇÃO REMOTA DE HIDRÔMETROS 30
3.2. MEDIÇÃO REMOTA DE ENERGIA ELÉTRICA 31
3.3. MEDIÇÃO REMOTA DE GÁS EM CLIENTES RESIDENCIAIS 33
3.4. TELEMETRIA EM PONTOS DE TESTE DE PROTEÇÃO CATÓDICA 35
3.5. APLICAÇÃO DA REDE LORAWAN NA EUROPA 39
3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 40
4. CORREÇÃO DE VOLUME DE GÁS 43
4.1. MEDIÇÃO FISCAL DE GÁS NATURAL 43
4.1.1. Medição de Pressão 45
4.1.2. Medição de Temperatura 46
4.1.3. Medição da Composição Físico Química do Gás Natural 47
4.1.4. Corretores de Volume de Gás Natural 48
5. MATERIAIS E MÉTODOS 52
5.1. PROPOSTA DO TRABALHO 52
5.2. MÉTODOS CONSIDERADOS 55
5.3. *HARDWARE E SOFTWARE* 59
6. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS 64
6.1. MÓDULO REMOTO 64
6.2. ANÁLISE DA COMUNICAÇÃO *LORAWAN* 70
6.3. INTERFACE DE MONITORAMENTO E GESTÃO 75
6.4. VALIDAÇÃO OPERACIONAL 82
6.5. ANÁLISE DE DADOS E GESTÃO INTELIGENTE DE GÁS 91
6.5.1. Análise do perfil de consumo 91
6.5.2. Detecção de violação física do PTZ 94

6.5.3. Detecção de possível vazamento 96
6.5.4. Monitoramento do consumo contratado 97
6.6. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 100
7. CONCLUSÕES 102
REFERÊNCIAS 104
8. APÊNDICES 108
8.1. ANEXO 1 - GRANDEZAS ENVOLVIDAS E EQUACIONAMENTOS GERAIS 108
8.2. ANEXO 2 - CIRCUITO ELETRÔNICO DO MÓDULO REMOTO 111
8.3. ANEXO 3 - PCB DO CIRCUITO ELETRÔNICO 112
8.4. ANEXO 5 - INVÓLUCRO DO MÓDULO DESENVOLVIDO 113

INTRODUÇÃO

A necessidade de melhoria de tarefas cotidianas é um dos fatores que mais impulsiona o ser humano a trabalhar no desenvolvimento de novas tecnologias e quando se fala em avanço tecnológico, as 4 revoluções industriais que ocorreram foram fundamentais para o avanço tecnológico até o patamar atual. Iniciada na Inglaterra em meados de 1760, a primeira revolução industrial causou profundas transformações sociais e econômicas e rapidamente foi disseminada ao restante do mundo. Como principal característica, tem-se a troca de atividades realizadas puramente de maneira artesanal, as quais passaram a ser realizadas com o auxílio de máquinas a vapor, otimizando-se assim o tempo de execução e aumentando a escala de produção (SOUSA, 2021).

Quase 1 século adiante, entre os anos de 1850 e 1870, a segunda revolução industrial também teve seu início na Inglaterra e posteriormente se estendeu ao resto do mundo. Desta vez, o avanço tecnológico deu-se pela utilização do petróleo e da eletricidade para alavancar os processos produtivos e introduzir a automatização de processos, aumentando-se ainda mais a autonomia, tempo e escalabilidade de produção nas indústrias (SOUSA, 2021).

Iniciada em meados do século XX no período pós segunda guerra mundial, a terceira revolução industrial é caracterizada pela inserção tecnológica dentro do campo científico, em que avanços significativos foram dados dentro das indústrias e dos processos produtivos a partir da robótica, informática, eletrônica, telecomunicações, genética, dentre outras áreas de pesquisa. Nesta etapa, produtos e serviços nunca antes imaginados passam a ser possíveis de serem produzidos e ofertados, o que também abre espaço para que a mão de obra possa se qualificar a fim de liderar as etapas de produção, comercialização e gestão de pessoas dentro das empresas (SOUSA, 2021).

Segundo o professor alemão Klaus Schwab, atualmente vive-se a quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0. Como característica, esta revolução não se define em apenas uma tecnologia ou campo de aplicação, mas sim como a convergência de diversas tecnologias e conceitos como a Internet das Coisas (*Internet of Thing*s, ou IoT), a Computação em Nuvem e o Big Data, entre outros (PERASSO, 2016).

Na Indústria 4.0, é sabido que a geração e aquisição de dados, impulsionados pelas novas tecnologias de comunicação sem fio na IoT são de grande importância, tanto quanto a inteligência para interpretação e aplicação desses dados. Com os dados massivos e disponíveis em tempo real através das infraestruturas de IoT, viabiliza-se e facilita-se a realização de análises históricas e otimizações em processos e sistemas (PEREIRA, et al., 2018).

Considerando também a expansão das redes de comunicação sem fio LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), um campo que tem ganhado grande foco no desenvolvimento de soluções utilizando os recursos de IoT é o setor de utiilities. Nesse segmento de utilitiies, atrelado aos avanços proporcionados pela IoT, uma Infraestrutura Avançada de Medição (*Advanced Metering Infrastructure*, ou AMI) é a base para qualquer solução de gestão inteligente de insumos como água, energia, gás, entre outros. Essas novas AMI congregam a automação da medição remota de medidores e de infraestruturas de comunicação com o processamento e análise de dados geograficamente distribuídos usando técnicas avançadas e recursos de Computação em Nuvem (AMERICAN TOWER DO BRASIL, 2021).

No campo de medição de gás natural, a aplicação de AMI pode trazer potenciais benefícios que justificam a sua implementação. Como exemplos, podem ser citados: a análise mais assertiva do perfil de consumo de um determinado cliente a fim de entender o seu comportamento e prever soluções energéticas, o faturamento remoto do consumo de gás que atualmente é realizado fisicamente, a detecção de medidores que operam fora das faixas de medição e também a detecção de fraudes e vazamentos de gás natural (CHAUDHARI, et al., 2020).

Um dos grandes desafios encontrados pelas empresas de *utilities* para realização do faturamento de seus clientes está na aplicação de uma solução massiva, robusta, confiável, simples e de baixo custo para que esta operação seja realizada. É sabido que o faturamento de clientes vem sendo realizado a décadas na grande parcela dos casos de forma tradicional, em que é necessária a visita em cada ponto de medição para que os valores apresentados nos medidores sejam coletados. Dentro do segmento industrial, outro fator que pode agravar o problema no faturamento é o controle de acesso que as empresas

possuem, o que pode aumentar significativamente o tempo de acesso ao medidor para coleta dos dados de faturamento.

Um método que tem sido aplicado em alguns tipos de clientes consiste na integração de um dispositivo eletrônico com tecnologia de comunicação celular ao medidor. Este dispositivo pode coletar os dados de processo, os quais são enviados a uma base através de redes de comunicação GPRS, 3G ou 4G. O problema desta solução é que geralmente os dispositivos considerados não são nativamente criados para esta aplicação, o que elevava seu custo de implementação. Outro fator que inviabilizava a aplicação em massa é o alto custo envolvido na contratação de redes celulares em aplicações massivas. Desta forma, este método usualmente é considerado em clientes estratégicos, em que o consumo de uma determinada fonte é elevado ou o acesso ao medidor possui barreiras físicas ou administrativas (LORA ALLIANCE, 2021).

1.1. JUSTIFICATIVA

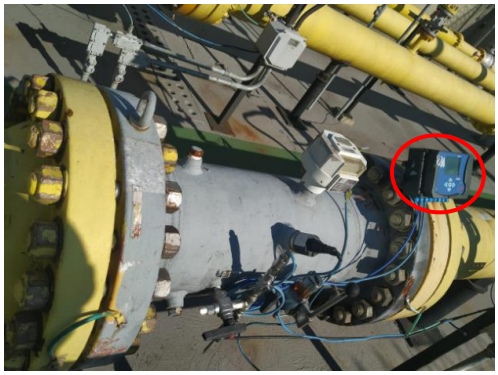
As ferramentas de IoT têm ganhado grande destaque nas aplicações dentro da área de *utilities*, pois o modelo tradicional de faturamento de um cliente consiste em uma pessoa visitar fisicamente cada medidor de consumo, seja ele de gás, eletricidade ou água, para coletar manualmente os valores apresentados no *display*. Além do alto custo envolvido e na complexidade logística dessa operação, um possível fator de erro existente está na interpretação da informação coletada, pois o número apresentado no *display* pode ser lido incorretamente devido à disposição deste medidor ou até mesmo as condições físicas que ele possui.

Com o avanço e massificação das *LPWAN*, atualmente tem-se um cenário de mercado favorável às aplicações em *utilities*, pois o custo destas tecnologias e o consumo de bateria são relativamente baixos, o que viabiliza a sua implementação por empresas fornecedoras (concessionárias), as quais possuem milhões de clientes espalhados em amplas regiões. Com isso, atualmente é possível instalar AMI nestes medidores de consumo para que a coleta dos dados seja realizada remotamente. Como principal ganho, neste novo modelo, tem-se o monitoramento constante do medidor, o que permite, além de realizar o faturamento mensal, realizar a análise de perfil de consumo deste

cliente, possibilitando o entendimento ao tipo de usuário que está conectado à rede e também verificar possíveis fraudes ou vazamentos (para os casos de água e gás) (LORA ALLIANCE, 2021).

Referente à medição de gás natural, dado que o volume medido pode sofrer alteração de acordo com a pressão, temperatura e sua composição físico-química, um procedimento comum de ser realizado em sua medição fiscal é a correção do volume de gás. Essa correção utiliza o volume medido pelo medidor (grandeza física expressa em m^3) e o converte para o volume nas condições de base (grandeza física expressa em Nm^3). Na medição de gás natural no setor industrial, dentre os instrumentos que podem ser utilizados para realizar esta operação, um que possui grande aplicação é o corretor ou conversor de volume de gás tipo PTZ (ou apenas PTZ), do qual um exemplo é apresentado na Figura 1. Esse equipamento é conectado aos instrumentos de medição de pressão, temperatura e vazão alocados no local de custódia do cliente para a correção do volume de gás natural medido (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2017).

Figura 1 - Corretor de volume de gás tipo PTZ instalado em uma linha com medidor de vazão com totalização de volume do tipo turbina



Fonte: Elaborada pelo Autor, 2022

Na medição de gás natural em clientes industriais, o faturamento é realizado através da coleta de dados dos corretores de volume de gás e ele pode ocorrer de duas maneiras: a primeira delas consiste na visita mensal de um leiturista no ponto de medição e através do auxílio de um computador, a coleta dos dados é realizada para faturamento. A segunda forma é realizando a coleta dos dados de forma remota, em que o corretor de volume de gás é instalado junto a um modem (o qual pode considerar as redes de comunicação GPRS, 3G, 4G ou satélite) e

as informações são enviados de forma remota para que os dados de faturamento possam ser utilizados. Devido ao alto custo na implementação desta infraestrutura, esta topologia somente é adotada em clientes estratégicos.

Como parte do projeto de pesquisa, desenvolvimento e inovação, realizado entre a Unesp Sorocaba, a Companhia de Gás de São Paulo - Comgás e a Agência Unesp de inovação (AUIN), este trabalho propõe uma alternativa para medição remota e gestão de dados de corretores de volume de gás natural através de recursos de Internet das Coisas. A solução proposta consiste em um módulo eletrônico que será acoplado ao PTZ para leitura e coleta das variáveis de processo relacionadas ao processo de distribuição de gás natural, envio das informações coletadas através da rede de comunicação *LoRaWAN,* armazenamento, gerenciamento e exibição dos dados na plataforma *ProIot*.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma AMI que seja capaz de coletar os dados de equipamentos de medição fiscal de gás natural, transmitir esses dados através de uma rede sem fio de longa distância, armazenar, gerenciar e analisar os dados coletados através de uma plataforma de IoT, a fim de agregar valor ao modelo de negócio.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi distribuído conforme a estrutura apresentada a seguir:

O capítulo 1 teve como função introduzir o tema deste estudo e sua ideia principal a fim de auxiliar o leitor na compreensão dos demais capítulos deste documento;

O capítulo 2 apresenta os conceitos relacionados ao estudo, em que as principais características das redes de comunicação foram introduzidas, com ênfase na rede *LoRaWAN*, objeto de estudo deste.

O capítulo 3 aborda o estado da arte das tecnologias emergentes que têm sido consideradas para faturamento e monitoramento de processos dentro das empresas de *utilities*. Neste capítulo, estão apresentados alguns projetos que têm sido desenvolvidos por universidades e empresas;

O capítulo 4 apresenta as características gerais do gás natural e as principais tecnologias existentes em mercado para leitura das variáveis de processo e correção do volume medido para que o faturamento seja realizado;

O capítulo 5 exibe todos os materiais considerados para o desenvolvimento da solução. Também são mostrados os métodos adotados e ferramentas aplicadas para que a arquitetura proposta seja desenvolvida.

No capítulo 6, as etapas realizadas para o desenvolvimento do projeto estão detalhadas juntamente com os resultados obtidos. Neste capítulo, está apresentada uma visão mais concreta do dispositivo desenvolvido, juntamente com suas principais funcionalidades e resultados obtidos nos testes de validação.

O capítulo 7 resume o que foi abordado no andamento do projeto e também apresenta os principais ganhos e lições aprendidas durante o seu desenvolvimento.

1. CONCEITOS RELACIONADOS

Como principal característica da quarta revolução industrial, a utilização da Internet das Coisas (IoT) para gerenciamento e monitoramento de atividades têm se massificado ao longo do tempo. Cada vez mais têm sido desenvolvidas novas tecnologias que são capazes de otimizar processos simples, os quais anteriormente eram inviáveis tecnologicamente e/ou financeiramente de serem automatizados. Visando este cenário, uma característica que um sistema deve considerar em sua construção é a rede de baixa potência para tráfego dos dados coletados, as quais são conhecidas como *LPWAN* (PEREIRA, 2018).

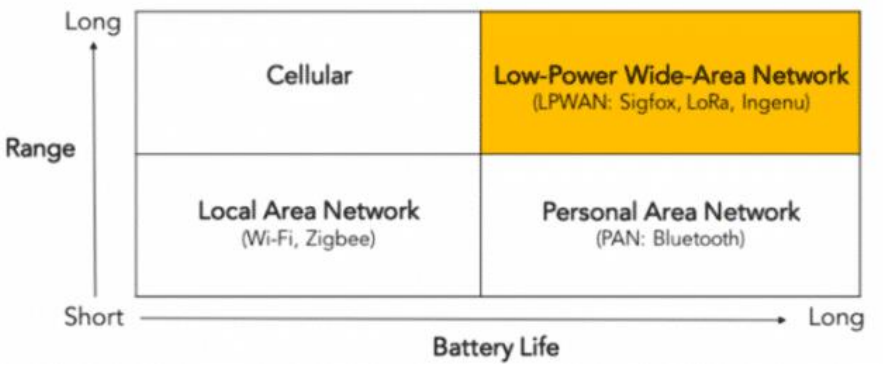
A organização sem fins lucrativos *LoRa Alliance*, iniciada no ano de 2015 através da parceria entre pesquisadores da área da Internet das Coisas, foi a responsável pela criação da rede *LoRaWAN*, uma rede de comunicação que cada vez mais têm ganhado destaque quanto a sua utilização em Internet das Coisas, dado seu baixo consumo de bateria para transportar dados, sua capacidade de envio de informações coletadas em campo, seu grande alcance e seu baixo custo (LORA ALLIANCE, 2021).

Ao contrário do que se pensa, o principal ganho na utilização destes tipos de tecnologia não está na coleta de grandes volumes de dados, mas sim no seu entendimento e correta interpretação, para que assim decisões assertivas possam ser tomadas. Pensando neste aspecto, diversas empresas atualmente vêm trabalhado no desenvolvimento de plataformas de aplicação para que nelas os dados coletados possam ser consumidos da melhor maneira possível (COELHO, et al., 2020).

2.1. REDES *LPWAN*

As *LPWAN* (EGLI, 2015) são redes dedicadas a aplicações que necessitam enviar pequenos pacotes de informações constantemente e com uma baixa potência de consumo, possibilitando que a utilização de baterias seja considerada, conforme apresentado na Figura 2. Nela, a *LPWAN* é comparada com as redes celulares, as LAN (*Local Area Network*, ou rede de comunicação local) e as redes PAN (*Personal Area Network*, ou rede de comunicação pessoal).

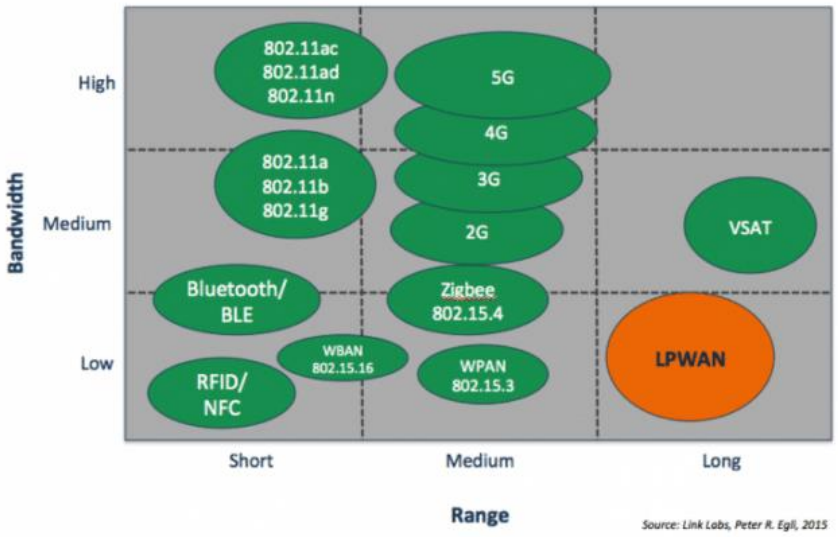
Figura 2 - Gráfico do tempo da vida útil da bateria e alcance



Fonte: (MELO, 2017)

Outra característica de uma *LPWAN* é o fato de ela possibilitar que um número elevado de dispositivos seja conectado a ela, possibilitando assim a massificação de tecnologias e a aplicação em soluções de Internet das Coisas. Conforme apresentado na Figura 3, é possível verificar que as *LPWAN* possuem longo alcance e baixa largura de banda, quando comparadas a outros tipos de redes de telecomunicações (SOLAGNA, 2020).

Figura 3 - Alcance e Largura de banda de redes de comunicação



Fonte: (MELO, 2017)

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as principais redes de comunicação existentes com foco na Internet das Coisas: *SigFox, LoRaWAN*, *Nb-IoT, LTE-Cat-1* e *LTE-Cat-M*, que são tecnologias em ascensão que vêm

cada vez mais sendo estudadas, testadas e massificadas em todo o mundo (TELECO, 2019).

Tabela 1 - Comparativo entre *LPWANs*

Rede	Alcance (km)	Banda	Taxa dados (máx)	Duração média bateria (anos)	Max mensagens diária	Modulação	Espectro licenciado
SigFox	1	900 *MHz*	12 *bytes*	20	140	*UNB, GFSK, BPSK*	Não
LoRaWAN	15	915 *MHz*	50 *Kbps*	9	ilimitado	*SS Chirp*	Não
NB-IoT	20	700 *MHz*	20 *Kbps*	10	ilimitado	*OFDMA*	Sim
LTE-Cat-1	-	-	10 *Mbps*	-	Ilimitado	*OFDMA*	Sim
LTE-Cat-M	50	-	1 *Mbps*	1,5	ilimitado	*OFDMA*	Sim

Fonte: (TELECO, 2019)

2.2.*LORAWAN*

A rede *LoRaWAN* refere-se a rede de comunicação de longo alcance utilizada em sistemas de Internet das Coisas e seu nome tem como origem as palavras *Long* e *Range*, ou seja, grande alcance. Na camada física, ela utiliza a modulação de rádio tipo CSS (do inglês *Chirp Spread Spectrum*, ou espectro de propagação de *Chirp*), tipo de modulação similar a modulação tipo FSK (do inglês *Frequency Shift Keying*, ou frequência por chaveamento). Porém, além de possuir baixo consumo operação, este método possibilita à rede *LoRaWAN* grande alcance quanto a sua comunicação e robustez contra interferências (BERNI, et al., 1973).

Estudos apontam que um único gateway instalado é capaz de gerar cobertura de sinal em cidades, ou em grandes extensões territoriais, alcance que é afetado

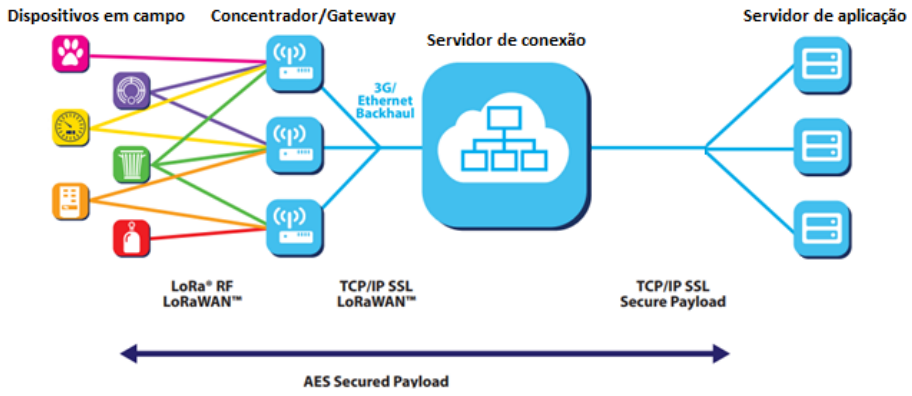
diretamente de acordo com a característica do local em que a rede está presente e deve ser avaliado previamente.

2.2.1. Arquitetura de Rede

A rede *LoRaWAN*, assim como as demais *LPWAN*, utiliza topologia em estrela de comunicação, ou seja, nesta topologia todos os dispositivos que estão conectados à rede estão diretamente ligados aos gateways. Conforme é possível verificar na Figura 4, cada dispositivo fica conectado a diversos gateways que estão distribuídos na área de cobertura da rede, facilitando assim o envio de informações coletadas pelos dispositivos, que poderá desmembrar a informação em pequenos pacotes.

Estes pacotes podem ser recebidos por gateways distintos e enviados ao servidor de conexões através de rede celular, satélite, ethernet ou *wi-fi*. Uma característica importante da rede é que os dispositivos se comunicam de forma assíncrona, ou seja, ele é capaz de se comunicar com o gateway assim que ele possuir dados disponíveis.

Figura 4 - Arquitetura da rede *LoRaWAN*



Fonte: (LORA ALLIANCE, 2021)

2.2.2. Características de Rede

Os dispositivos que operam com a rede *LoRaWAN* recebem uma classificação de acordo com o seu grau de eficiência, o qual é dividido em três categorias: A, B e C. Os dispositivos classe A os mais eficientes, possuindo como

características principais a vida útil da bateria e a latência da rede para *downlink* e os dispositivos classe C os menos eficientes. Além disso, outras características podem ser destacadas para cada classe de dispositivo.

- Classe A: Comumente operados a bateria, possuem comunicação bidirecional com recepção após transmissão.
- Classe B: Comumente operados a bateria, possuem comunicação bidirecional com janelas de recepção agendadas.
- Classe C: Comumente operados com o auxílio de fontes externas de energia, são dispositivos aptos apenas a receber dados do gateway.

A rede *LoRaWAN* utiliza duas camadas de segurança em sua arquitetura, sendo elas a da rede, que tem como função a garantia da autenticidade do dispositivo na rede, e a camada de rede e aplicação, a qual possui a função de garantir que a operadora da rede não tenha acesso aos dados que estão sendo transportados nesta rede. Para isso, é utilizada a criptografia AES com a troca de chaves através da utilização de um identificador IEEE EUI64. Para isso, ela utiliza as chaves de sessão de rede (NwkSKey) e chaves de sessão de aplicação (AppSKey).

Atualmente a rede *LoRaWAN* está disponível em diversos países e sua frequência de comunicação pode variar de acordo com o cenário existente em cada um deles. No Brasil, a rede *LoRaWAN* refere-se a um protocolo de comunicação não licenciado pela Anatel e sua frequência de comunicação é de 915 MHz, a mesma utilizada na Austrália (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INTERNET DAS COISAS, 2021).

No tráfego de dados, 2 termos são largamente utilizados: o *downlink* e o *uplink*. Os *downlinks* referem-se aos dados (ou *payloads*) que são enviados da plataforma para o(s) dispositivo(s), enquanto os *uplinks* referem-se aos dados (ou *payloads*) que são enviados do dispositivo para a plataforma. Em termos comparativos, pode-se associar um *downlink* a um *download* de dado que é enviado de um servidor para um computador e um uplink a um upload de dado que é enviado de um computador para um servidor. É necessário saber o consumo de dados que o dispositivo irá requisitar no *downlink* e no *uplink* a fim de realizar a contratação assertiva do pacote com a empresa provedora.

Referente a ativação de segurança, para que os dispositivos possam enviar os dados ao servidor de rede, é necessário realizar a criação deste dispositivo dentro da plataforma. Dentre os métodos de ativação do dispositivo, pode-se escolher entre o método ABP (*Activation By Personalization*, ou ativação personalizada) e o OTAA (*over the air activation*, do inglês ativação pelo ar).

No método ABP é mais simplificado de ativação, em que o dispositivo pode ser ativado rapidamente, porém ele apresenta menor segurança do que o método OTAA. Nele, os IDs e chaves são personalizadas e a ativação deve ser realizada para cada dispositivo, em que são geradas chaves de criptografia (NwkSKey e AppSKey) no servidor de aplicação, os quais devem ser inseridos nos dispositivos. Mesmo sendo um processo de ativação mais simples, para casos de projetos massificados, ele acaba sendo mais trabalhoso dado a necessidade de configuração manual dos dispositivos.

O método OTAA é mais seguro, em que a parametrização para provisionamento dos dispositivos é feita de forma automática. Além de um método mais seguro, o OTAA é capaz de armazenar múltiplas “identidades” para o mesmo dispositivo, possibilitando assim a troca dinâmica entre redes durante o seu tempo de operação. Neste método, devem ser informadas as chaves DevEUI, um AppEUI e a AppKey que correspondem a aplicação a qual o dispositivo pertence.

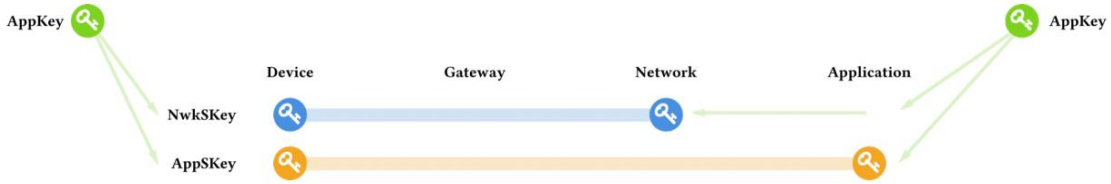
A rede *LoRaWAN* possui criptografia de segurança para o tráfego de seus dados. De forma resumida, o dado pode ser enviado para o gateway e para o servidor de aplicações, porém somente será possível fazer a leitura e interpretação da informação transportada dentro do servidor de aplicação. Para isso, a rede *LoRaWAN* conta com três chaves de 128 bits cada, sendo elas:

- AppKey: Esta chave somente é conhecida pelo dispositivo e pelo servidor de aplicações, utiliza o algoritmo AES-128 e somente é disponível quando a ativação de segurança é realizada pelo modo OTAA.
- NwkSKey: Esta chave também utiliza o algoritmo AES-120 e é conhecida pelo dispositivo e pelo servidor de conexões e possui a finalidade de criptografar e descriptografar as informações relacionadas a integridade do pacote transportado.

- AppSKey: Esta chave utiliza o algoritmo AES-CMAC e é conhecida pelo dispositivo e pelo servidor de aplicações. Ela possui como função a criptografia e descriptografia dos *payloads* do pacote transportado.

A Figura 5 apresenta uma ilustração do funcionamento geral das chaves de criptografia AppKey, NwKSkey e AppsKey dentro da rede *LoRaWAN*.

Figura 5 - Criptografia da rede *LoRaWAN*: Chaves de segurança utilizadas



Fonte: (LORA ALLIANCE, 2021)

2.2.3 Rede Neutra *LoRaWAN* ATC

A *American Tower* é a proprietária independente e operadora de torres de comunicação líder do mercado nacional, em que além de alugar espaços em torres para as empresas de telecomunicação, também conta com a rede de Internet das Coisas na tecnologia *LoRaWAN*, além de serviços que aprimoram a cobertura de redes sem fio.

Ela implementou a cobertura da rede *LoRaWAN* em todos os estados brasileiros, disponibilizando concentradores e gateways para a conexão com os dispositivos instalados em campo e disponibilizando o servidor de conexão. Caso o usuário opte pela cobertura privada da rede *LoRaWAN*, ele pode contratar o serviço ofertado pela empresa. Na Figura 6 é possível analisar o mapa da cobertura da rede *LoRaWAN* que a empresa fornece ao Brasil (AMERICAN TOWER DO BRASIL, 2021).

Figura 6 - Cobertura rede *LoRaWAN* no Brasil

Fonte: (AMERICAN TOWER DO BRASIL, 2021)

Em teoria, todo o usuário da rede *LoRaWAN* deve ter um acesso no servidor de conexões, porém, devido ao modelo de negócio da empresa, a *American Tower* decidiu pela realização de parceria com empresas de tecnologia onde estas atuam na disponibilização do acesso aos servidores para os usuários. Estas empresas parceiras por sua vez disponibilizam ao usuário final o acesso ao seu servidor, o qual possui a função de gerenciar a conectividade e os dispositivos instalados, possibilitando ações como: verificação da qualidade de rede no local, rastreio do dispositivo, acionamento e desativação do dispositivo.

Ressalta-se que este modelo somente é considerado caso a rede *LoRaWAN* seja fornecida pela empresa *American Tower*. Caso o usuário deseje, ele pode optar por outro provedor de cobertura de rede ou até mesmo criar sua rede proprietária. Para a presente aplicação, dado que as estações de medição de gás natural estão espalhadas em diversos pontos da região metropolitana de São Paulo, optou-se pela utilização da cobertura provida pela American Tower, evitando-se assim a necessidade de criação de infraestrutura de rede própria.

Posteriormente, os dados são enviados as plataformas de aplicação, em que nelas o usuário pode realizar as mais diversas ações com os dados coletados, como por exemplo, a implantação de algoritmos de aprendizado de máquinas para realização de categorização de dados, redução de dimensionalidade, predição de comportamento etc.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma contribuição do avanço da indústria 4.0 é a possibilidade de se implementar soluções robustas para aplicações em que anteriormente não se via viabilidade em sua aplicação devido a relação entre o custo de implementação e os potenciais benefícios que ela poderia gerar. Agora, além do baixo custo da comunicação que as *LPWANs* possuem para transportar grande quantidade de informações, a disponibilidade dos dispositivos eletrônicos a um custo relativamente baixo e o baixo consumo de bateria também têm contribuído para o aumento de soluções de engenharia para aplicações que até então não se via a necessidade ou viabilidade de implementação (MARCOS, 2020).

Dentro do setor de *utilities*, para que o modelo tradicional de coleta de dados de consumo dos clientes seja substituído, são necessários recursos que possam coletar as informações em campo de forma segura e com baixo consumo de bateria a fim de viabilizar a sua implementação (NUGROHO , et al., 2019). Considerando que as empresas do setor possuem uma quantidade enorme de clientes, o custo da tecnologia e da sua comunicação deve ser baixo, além possibilitar que novos tipos de análises (as quais não eram possíveis com apenas 1 dado mensal) sejam realizadas a fim de entender o real cenário de perfil de consumo de um determinado cliente ou grupo de clientes (SCHREIBER, 2018).

Com isso, as universidades e empresas vêm abrindo espaço para pesquisas relacionadas as tecnologias existentes de Internet das Coisas e suas aplicações, assim como diversas empresas também estão abrindo novos departamentos a fim de ofertar aos seus clientes soluções inteligentes, robustas, massivas e com uma condição comercial atrativa.

Nesta área de atuação, algumas particularidades devem ser consideradas como pré-requisitos básicos na implementação de projetos, como por exemplo, a forma de capturar os dados em campo, a periodicidade de coleta e envio de dados e a qualidade de comunicação do protocolo considerado.

3.1. MEDIÇÃO REMOTA DE HIDRÔMETROS

Uma das principais necessidades dentro do setor de *utilities* é a captura de informações através de aparelhos que por muitas vezes não possuem algum tipo de dispositivo eletrônico acoplado para disponibilização destas informações. Desta forma, um desafio recorrente está na captura de sinais pulsados para transformação deste sinal em uma informação útil, em que se deve acoplar um sensor com o posicionamento e sensibilidade adequados a fim de garantir que os sinais gerados sejam capturados sem nenhuma perda.

Uma aplicação realizada consiste em instalar AMI em hidrômetros convencionais que são instalados nas portas das residências para realização da leitura e faturamento do consumo de água conforme a Figura 7 (SOUSA, et al., 2018). O AMI contempla um leitor de pulsos que é incrementado a cada metro cúbico lido pelo medidor. Estes incrementos, por sua vez, são registrados no dispositivo instalado e enviados através de rede *LoRaWAN* ou *Nb-Iot* para a base de dados.

Figura 7 - Hidrômetros convencionais com sensor instalado

Fonte: (SOUSA, et al., 2018)

Como principais resultados, o projeto mapeou os seguintes ganhos:

- Realizar levantamento das tecnologias disponíveis em hidrômetros comerciais;
- Desenvolver a arquitetura para a rede de comunicação;
- Propor o desenvolvimento de uma plataforma para coleta e gerenciamento de dados;

- Desenvolver um sistema para disponibilização dos dados coletados;
- Auxiliar na rápida detecção de irregularidades de consumo e de vazamentos de água.

O estudo propôs a consideração de 2 redes de comunicação para o projeto: a rede *LoRaWAN* e a rede *Nb-Iot* (do inglês *Narrow Band IoT*), no qual foi evidenciado que as duas tecnologias de comunicação atenderiam aos requisitos do projeto e os *payloads* gerados são enviados corretamente para a base de dados.

Ao final do estudo, foi concluído que é possível reduzir o tempo para detecção de irregularidades no fluxo de água no campus, como por exemplo vazamentos ou uso indevido do recurso. Considerando a proposta do estudo, em que a periodicidade da medição ocorre a cada 6 horas, estima-se que a aplicação desta tecnologia pode reduzir a perda de recursos hídricos de 22% para 14%, totalizando uma economia de 7% em relação ao cenário anterior ao estudado.

3.2. MEDIÇÃO REMOTA DE ENERGIA ELÉTRICA

Referente a qualidade da comunicação, deve-se sempre avaliar se os critérios considerados em uma implementação específica atendem aos requisitos mínimos necessários desta aplicação. O alcance do sinal, assim como a sua disponibilidade e velocidade de tráfego são fatores que devem ser avaliados a fim de garantir que os requisitos de projeto sejam atendidos neste quesito, gerando confiabilidade na comunicação e informação recebida.

Estas avaliações foram consideradas no projeto de comunicações de redes elétricas inteligentes em áreas suburbanas e rurais (SILVA, 2019), o qual utilizou a rede *LoRaWAN* para realizar o monitoramento de redes elétricas inteligentes de uma malha. O gateway foi implementado em campo conforme a Figura 8, na qual a infraestrutura necessária foi montada a fim de avaliar as características da rede *LoRaWAN* e sua viabilidade em aplicações em REI (Redes Elétricas Inteligentes) em áreas afastadas de grandes centros urbanos.

Figura 8 - Concentrador *LoRaWAN* instalado

Fonte: (SILVA, 2019)

A implementação considerou a avaliação de aspectos na operação de redes de comunicação aplicadas às REI e os resultados obtidos mostraram que o protocolo de comunicação *LoRaWAN* atende quanto aos seguintes aspectos:

- Alcance e cobertura da rede *LoRaWAN*
- Intensidade de sinal e razão sinal-ruído
- Disponibilidade e confiabilidade de comunicação

Além desta verificação, o projeto também contribuiu para a definição dos seguintes aspectos:

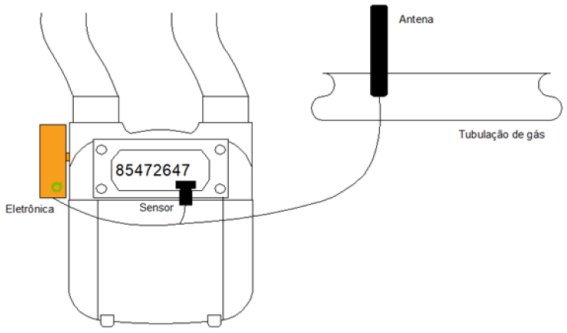
- Definição de um sistema de comunicação para as REI;
- A definição dos critérios a serem considerados na seleção de redes de comunicação aplicadas em Internet das Coisas;
- A apresentação inédita do uso de uma nova tecnologia para este tipo de aplicação;
- Definição da especificação técnica completa da solução;
- Definição dos padrões corporativos;
- A seleção de diversas topologias de rede a fim de melhorar o desempenho do sistema;
- Avaliação de novos equipamentos e softwares para comunicação de redes de Internet das Coisas.

O resultado deste estudo mostra a viabilidade da implementação da rede *LoRaWAN* e a importância de avaliar os requisitos técnicos de rede que serão considerados de acordo com a aplicação.

3.3. MEDIÇÃO REMOTA DE GÁS EM CLIENTES RESIDENCIAIS

A Companhia de Gás de São Paulo (Comgás) tem desenvolvido um projeto de leitura remota dos dados relacionados ao consumo de gás natural de clientes residenciais que possuem na entrada da casa medidores do tipo diafragma conforme a Figura 9 e Figura 10. A arquitetura do projeto consiste em um sensor que é capaz de coletar os pulsos gerados pelo medidor de gás, que podem ser magnéticos ou do tipo indutivos. Este sensor, por sua vez, está conectado a um circuito embarcado que é capaz de realizar o incremento e armazenamento das informações e ao final do dia, através de 1 único envio de dados, as 24 leituras são disponibilizadas através da rede de comunicações *LoRaWAN*.

Figura 9 - Projeto de leitura remota de consumo de gás - Comgás



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Dentre as principais vantagens que este projeto possui, podem ser destacados:

- Aumento dos dados disponíveis, passando de 1 dado mensal coletado através da visita ao local e verificação do medidor para 720 dados mensais através do envio de dados via rede *LoRaWAN*;
- Possibilidade de acompanhamento em tempo real do consumo de gás do cliente, possibilitando a ação em possíveis casos de vazamento de gás ou de fraudes;
- Maior conforto ao usuário, dado que não será mais necessário o agendamento de visitas e liberação de acesso aos medidores de volume de gás;

- Verificação de clientes que não estão sendo faturados devido ao travamento mecânico do medidor;
- Possibilidade de disponibilizar os dados de consumo aos usuários, visando o entendimento do seu perfil de consumo em relação a tarifa a ser paga.

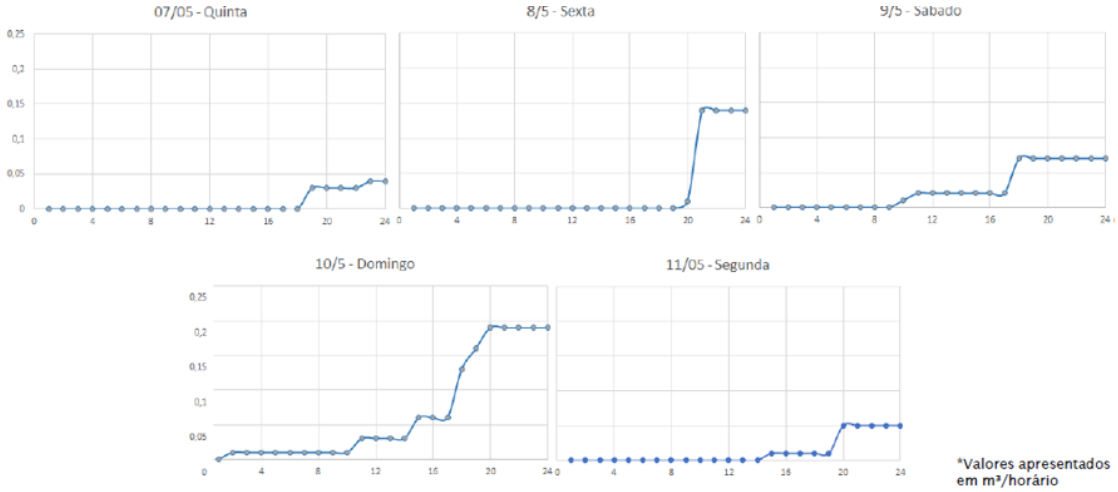
Figura 10 - Sensor instalado em um medidor de volume de gás tipo diafragma

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

No primeiro ano da implementação, a região selecionada foi o Vale do Parnaíba e nela foram instalados cerca de 70.000 sensores em medidores do tipo diafragma utilizados em medição individualizada. Com os dados coletados, além do faturamento mensal dos clientes, os estudos iniciais já puderam detectar alguns clientes que possuíam o medidor travado, o que ocasionava no não faturamento do volume de gás consumido pelos usuários.

Outro aspecto relevante que pode ser detectado foi a possibilidade de determinar o perfil de consumo de cada usuário, como por exemplo o cenário apresentado na Figura 11, em que um cliente foi analisado em um período de 5 dias e nesta análise. Nela é possível estimar que se trata de um cliente que possivelmente passa o dia todo fora durante a semana, utilizando o gás natural apenas para preparar uma refeição noturna e tomar banho. Durante o final de semana, é evidenciado um aumento no tempo e no consumo de gás natural, o que torna possível estimar possíveis eventos realizados na residência, como por exemplo, jantares, almoços e churrascos.

Figura 11 - Análise de perfil de consumo de um cliente de gás natural



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A utilização desta informação abre várias possibilidades antes não existentes no método tradicional de leitura de consumo de gás em clientes residenciais. Por exemplo, analisando o perfil de consumo, é possível ofertar aplicativos a gás natural de acordo com a necessidade de cada usuário.

3.4. TELEMETRIA EM PONTOS DE TESTE DE PROTEÇÃO CATÓDICA

Dado que existem trechos em que a tubulação de distribuição de gás é metálica, torna-se importante a prevenção da corrosão externa a fim de garantir a integridade do ativo. Dentre os recursos utilizados para proteção catódica, atualmente existe um mecanismo que, de forma genérica, injeta uma tensão negativa (entre -0,85 e -4,0 VDC) na tubulação a fim de garantir que a tubulação não sofrerá o efeito da corrosão externa. Para verificar se esta ação está sendo realizada corretamente, existem pontos de teste em que o operador mede a tensão aplicada e compara com os valores de referência.

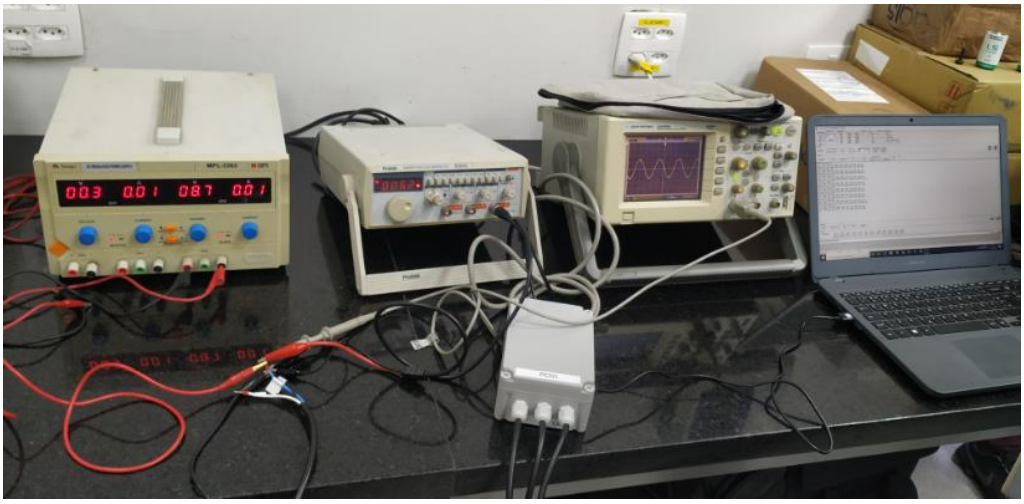
As variáveis que são medidas estão descritas a seguir e tradicionalmente esta medição é realizada através da visita de um técnico ao local com as ferramentas adequadas.

- Leitura do valor de tensão mínima em corrente contínua: Consiste no menor valor de tensão (CC) medido no período de coleta.

- Leitura do valor de tensão predominante em corrente contínua: Consiste na moda do valor de tensão (CC) medido no período de coleta.
- Leitura do valor de tensão máxima em corrente contínua: Consiste no maior valor de tensão (CC) medido no período de coleta.
- Leitura do valor de tensão em corrente alternada: Consiste no valor médio de tensão (CA) coletado no período de coleta.
- Leitura da corrente no ponto comum de interligação: Consiste no valor de corrente (CC) coletado no ponto comum de interligação dos pontos de teste.
- Leitura do potencial off: Consiste na medição da curva de descarga de tensão (CC) quando o circuito retificador é aberto (durante um período de 300 ms), ou seja, retirado do circuito de proteção.

A Comgás tem trabalhado em um projeto que visa a substituição do método tradicional de leitura de pontos de teste de proteção catódica por um sensor que é instalado e realiza a medição periódica das variáveis. O projeto iniciou-se em 2019 e através da parceria com outras empresas de tecnologia, foi possível realizar os testes em bancada conforme a Figura 12, simulando-se as situações existentes em campo e validar que os dados coletados estavam dentro de uma precisão aceitável para a aplicação.

Figura 12 - Teste em bancada da solução

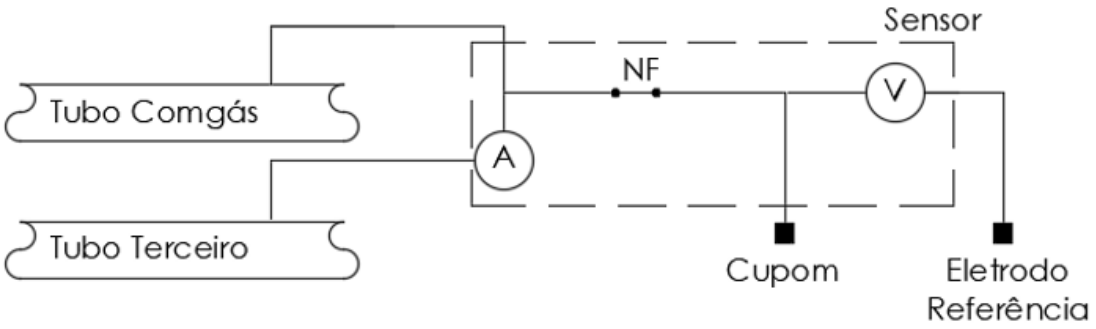


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

De forma resumida, conforme a Figura 13, o sensor que foi desenvolvido seria capaz de realizar a medição dos valores predominantes, mínimos e máximos de tensões contínuas e alternadas entre o cupom e o eletrodo de referência que estão instalados no local. Ele também é capaz de realizar a abertura de um contato normalmente fechado (NF) e medir qual é o nível de tensão no instante t=300 ms, tempo que, segundo as boas práticas de proteção catódica, é o tempo em que se pode verificar a tensão de potencial off do sistema.

Outra grandeza que foi será medida é a corrente elétrica que transita entre a tubulação da Comgás e a do terceiro (que em muitos casos são interligadas). Essa medição de corrente tem como objetivo verificar se o sistema de proteção catódica da Comgás está protegendo o seu sistema ou o do terceiro, através da análise do sentido da corrente elétrica.

Figura 13 - Sensor de leitura de ponto de teste de proteção catódica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Após a validação em bancada, o sensor foi montado em um invólucro adequado para o campo e sua instalação foi realizada em alguns pontos de teste, conforme a Figura 14. Através da rede *LoRaWAN*, os dados foram coletados e enviados a um servidor de aplicações.

Com isso, foi possível avaliar de uma forma mais assertiva os dados, dado que eles estavam sendo coletados com maior frequência do que no método tradicional, em que 1 medição deve ocorrer a cada 2 meses em cada ponto de teste.

Figura 14 - Instalação do sensor em campo

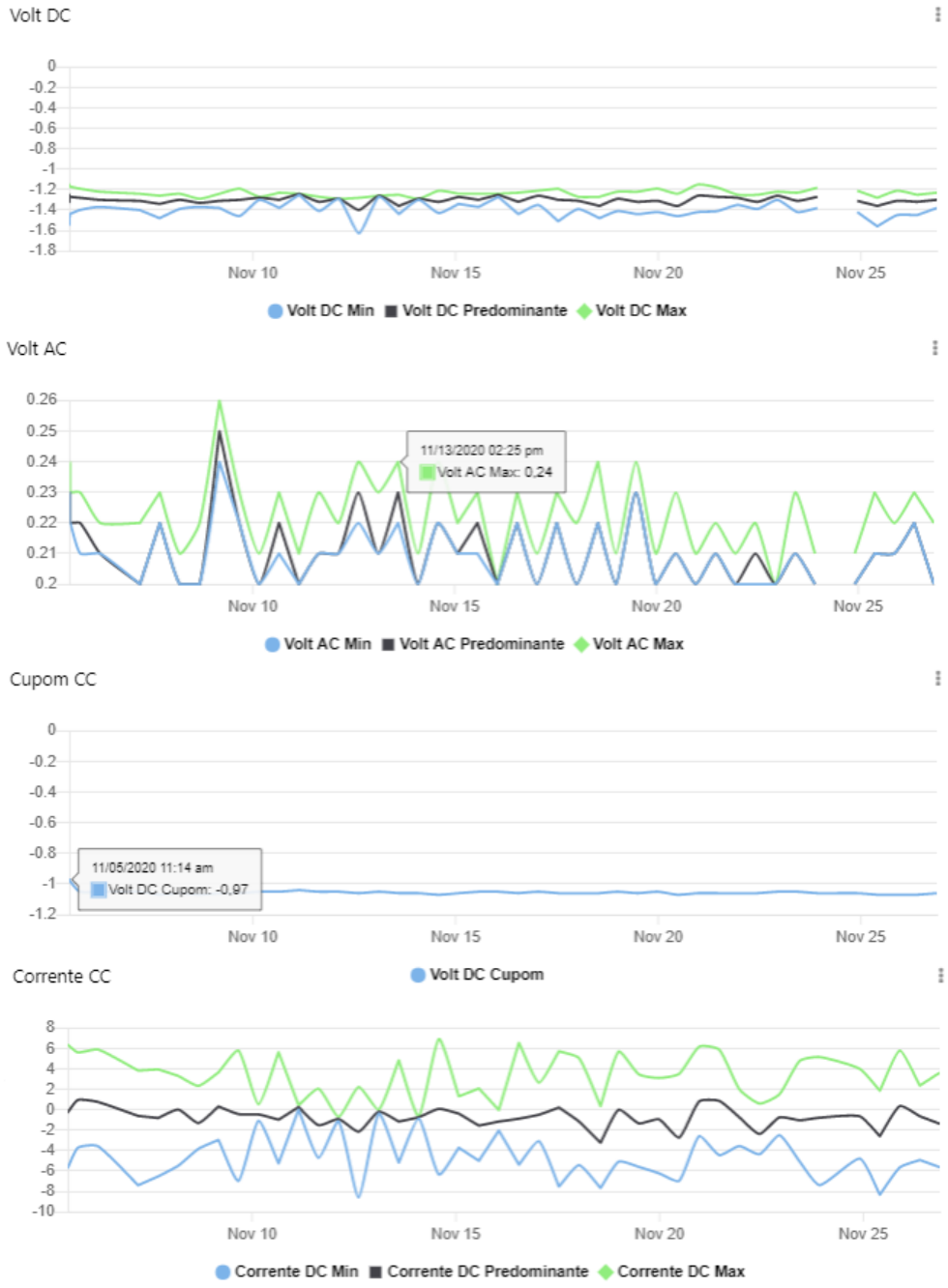
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Além da visão de inovação, o projeto pode agregar ao negócio da empresa e dentre os potenciais ganhos mapeados no projeto, podem ser destacados:

- Maior disponibilidade de dados coletados, dado que antes tinha-se 1 amostra de dados a cada 2 meses e agora pretende-se coletar o dado diariamente, gerando 60 dados no mesmo período, número 60 vezes superior.
- Eficiência na operação, pois agora o técnico que era dedicado para realização das leituras agora poderá focar em outras atividades relacionadas a proteção catódica.
- Economia financeira através do custo da comunicação mensal da rede *LoRaWAN*, considerada baixa em relação ao custo da visita periódica do técnico para coleta dos dados.
- Possibilidade de analisar possíveis anomalias no sistema de forma rápida e simples através dos dados que serão coletados diariamente.

A Figura 15 possibilita a visualização dos dados que foram coletados no período de testes.

Figura 15 - Dados coletados remotamente



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2022

2.5. APLICAÇÃO DA REDE LORAWAN NA EUROPA

As aplicações de recursos de Internet das Coisas e *LPWAN* dentro da área de *utilities* já é uma realidade consolidada quando observado o cenário Europeu. Como justificativas que contribuem para esse avanço, pode se citar a grande densidade populacional: lá têm-se pequenas regiões com grande número de

residências e indústrias localizadas próximas umas das outras, o que facilita a implementação de gateways e repetidores de rede. Em cenário nacional, tem-se uma vasta área territorial e em diversos cenários, as indústrias e residências estão localizadas a grandes distâncias, tornando a implementação da rede *LoRaWAN* mais complexa e cara.

Como exemplo de casos de sucesso existentes na Europa, tem-se a empresa Sueca *Netmore*, que está atuando na implementação de rede *LoRaWAN* na França a fim de otimizar os processos de medição e monitoramento de água. Além de faturamento de clientes, a solução também está sendo utilizada para controle de vazamento, monitoramento de bueiros e levantamento de perfis de consumo para aprimoramento de recursos hídricos do país. Dado o aumento crescimento de demanda no setor de água, a solução inicialmente focou neste nicho, porém ela também está sendo implementada nas áreas de gás, aquecimento urbano e eletricidade (Smart Energy, 2023).

Como próximo passo, a empresa pretende realizar a expansão para outros países europeus, como Suécia, Reino Unido, Irlanda e Espanha. Este trabalho de massificação tem sido possível através de parcerias entre diversas entidades e empresas, como provedores de plataformas, desenvolvedores de soluções e empresas do ramo imobiliário. Atualmente a solução desenvolvida conta com cerca de 360.000 dispositivos conectados e comunicando constantemente, atuando na medição do recurso hídrico.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se uma mudança crescente nos métodos de realização das atividades de coletas de dados dentro do setor de *utilities*, em que diversos benefícios têm sido explorados. Um deles está na maior disponibilidade de dados, que possibilita o entendimento do perfil de consumo de um determinado cliente e o que a alteração deste perfil de consumo pode significar dentro do negócio da empresa.

Um aspecto importante que deve ser levado em consideração é o custo envolvido neste processo. Anteriormente, a implementação deste tipo de solução possuía um custo elevado para as empresas, dado que os sensores geralmente eram fornecidos somente pelos fabricantes dos equipamentos e as tecnologias

de comunicação existentes eram limitadas. Desta forma, a implementação de projetos de forma massiva era quase que impossível dentro das empresas de *utilities* e a consideração de visitas mensais de um leiturista era a melhor solução para a época.

Porém, com a Internet das Coisas, têm-se três pilares principais que permitem estudos e implementações de soluções massivas aplicadas em diversas localidades com um preço viável. O primeiro é a gama de dispositivos eletrônicos disponíveis em mercado. O segundo é o surgimento de empresas que têm como objetivo o fornecimento de mão de obra qualificada para desenvolver soluções de IoT. O terceiro é disponibilidade de novas tecnologias de comunicação existentes.

No aspecto de desenvolvimento do hardware, dado que muitos instrumentos de medição utilizados na área de *utilities* não possuem circuitos eletrônicos acoplados, pois seus projetos foram desenvolvidos antes da disponibilização dos recursos IoT, um desafio existente está na forma para obtenção da informação de campo. Usualmente, deve-se coletar os sinais de pulsos gerados para que eles sejam convertidos em informações relacionadas aos consumos dos medidores.

Na área de comunicação de dados, deve-se sempre avaliar as características do protocolo de comunicação considerado a fim de garantir que o protocolo suporte o tamanho e quantidade dos *payloads* gerados diariamente, assim como o alcance, a disponibilidade e intensidade do sinal.

Para o projeto que foi desenvolvido, os estudos previamente apresentados auxiliam na determinação de quais métodos deverão ser considerados a fim de coletar as informações necessárias e na avaliação de quais características da rede *LoRaWAN* deverão ser consideradas. Com isso é garantir que os dados sejam coletados de forma segura, confiável e ininterrupta (SOUZA, 2018).

Além da coleta e envio de dados referentes ao consumo de volume de gás que os clientes industriais possuem, este trabalho também tem como objetivo a análise destes dados, campo que atualmente tem sido pouco explorado. Dentre os ganhos nestas análises, o entendimento do perfil de consumo é o foco a ser explorado, e a partir dele será possível avaliar se os medidores instalados em campo estão corretamente dimensionados, se eles operam dentro das faixas nominais de operação e detectar possíveis falhas operacionais.

Com uma base sólida de dados, foi possível criar uma assinatura deste medidor em relação a sua rotina de consumo de gás natural e esta assinatura dará respaldo para que possíveis vazamentos ou fraudes no sistema possam ser detectados remotamente.

3. CORREÇÃO DE VOLUME DE GÁS

Neste capítulo está apresentada a teoria envolvida na correção do volume de gás natural, as tecnologias disponíveis em mercado para medição de todas as variáveis necessárias para este processo e as normas vigentes para regulamentação desta prática.

Os medidores de vazão com totalização de volume utilizados para medição fiscal de gás natural medem o volume de gás natural nas condições de temperatura e pressão da linha (ou condição de operação), grandeza é expressa em metro cúbico (m^3). No entanto, devida a característica de compressibilidade dos gases, as características e valores de volume de gás natural devem ser considerados na condição de base para que o faturamento da quantidade correta de gás consumida seja efetivamente cobrado. Este volume é expresso em metro cúbico normatizado, ou normal metro cúbico (Nm^3).

4.1. MEDIÇÃO FISCAL DE GÁS NATURAL

Medição fiscal de um fluído, ou transferência de custódia, refere-se à medição realizada em um ponto de entrega no qual é possível realizar a transação comercial deste fluído, ou seja, a mudança do proprietário do fluído é realizado e o seu faturamento é feito de acordo com a quantidade que é fornecida. Este processo é realizado com a utilização de equipamentos que atendam a uma série de requisitos mínimos metrológicos a fim de garantir que a venda e compra estão sendo realizadas de forma justa.

No caso dos medidores de vazão com totalização de volume de gás, o principal fator que deve ser analisado é o erro que o princípio de funcionamento do medidor considerado pode gerar na medição (CONAUT, 2021). O mesmo se aplica para os transmissores de pressão e de temperatura, os quais são integrados nos casos em que aplica a correção do volume de gás. Já os corretores de volume de gás devem ser certificados pelas entidades responsáveis quanto ao algoritmo que é utilizado para realização do cálculo de correção. Isso garante que além de atender aos critérios válidos metrologicamente, a alteração de parâmetros no cálculo a fim de adulterar o resultado final não seja possível.

Para cada tipo de instrumento existem uma série de normas e portarias vigentes para ser considerada, contendo os principais aspectos que o instrumento deve possuir a fim de garantir uma medição dentro dos parâmetros mínimos aceitáveis metrologicamente. Cabe ao responsável pelo instrumento garantir que ele atenda todas as normas e portarias aplicáveis a fim de fornecer confiança ao seu cliente e contar com o respaldo normativo nos casos em que o consumidor questiona se o valor faturado do fluído está correto em relação ao seu consumo dentro de um período.

A Tabela 2 apresenta alguns dos principais instrumentos utilizados para realização do faturamento de gás natural juntamente com as normas e portarias aplicáveis dentro do território nacional.

Tabela 2 - Instrumentação para medição fiscal de gás natural e norma/portaria aplicável

Instrumento	Norma/portaria aplicável
Medidor tipo diafragma	OIML R 137 - partes 1 e 2 (INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY, 2012) Portaria nº 150 INMETRO de 03/05/2020 (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECN, 2020)
Medidor tipo rotativo	Portaria nº 150 INMETRO de 03/05/2020
Medidor tipo turbina	A.G.A. Report nº7 (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2006) Portaria nº150 INMETRO de 03/05/2020
Medidor tipo ultrassônico	A.G.A. Report nº9 (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2017) Portaria nº150 INMETRO de 03/05/2020
Medidor tipo coriólis	A.G.A. Report nº11 (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2013) Portaria nº150 INMETRO de 03/05/2020
Placa de orifício	A.G.A. Report nº3 (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 2013)
Transmissor de pressão	ABNT NBR 14978 partes 2 e 5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020) ABNT NBR 16607 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017)
Transmissor de temperatura	ABNT NBR 14978 partes 2 e 5
Corretor de volume tipo PTZ	ABNT NBR 14978 partes 1, 2, 4 e 5
Corretor de volume tipo computador de vazão	ABNT NBR 14978 partes 1, 3, 4 e 5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Vale ressaltar que para os casos que possuem portaria de aprovação INMETRO, a própria entidade certificadora emite um laudo atestando que o instrumento atende aos critérios descritos na portaria e que ele é apto a operar para a medição fiscal dentro do Brasil. Para instrumentos que não possuem portaria de aprovação vigente, os requisitos técnicos descritos em outras normas podem ser verificados através de testes realizados em laboratórios capacitados.

Como boa prática, orienta-se a consideração de laboratórios que possuem a certificação ISO 17025 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), certificação que atesta que o laboratório atende aos mínimos requisitos e boas práticas para execução das suas três principais atividades: calibração de instrumentos (ou seja, o ajuste do equipamento com base em uma grandeza padronizada), ensaio de instrumentos (ou seja, técnicas de medição que comprovam que um instrumento está dentro dos padrões técnicos) e a amostragem seguida de ensaio (ou seja, a coleta de uma amostra significativa dentro de uma população de instrumentos para que esta amostra seja submetida ao ensaio, aprovando ou reprovando toda a população a qual ela pertence).

Ressalta-se que para os medidores que medem a variável de processo vazão, basta realizar a integralização desta variável no tempo a fim de se obter o volume computado pela medição, conforme a Equação 1.

$$Volume = \int_{t0}^{t1} Q.dt \qquad 1$$

Onde:

Q= Vazão medida pelo medidor

t0= instante inicial da medição

t1= instante final da medição

4.1.1. Medição de Pressão

A medição de pressão aplicada a correção de volume de gás natural consiste em um sensor que é acoplado na rede de distribuição e coleta os valores de pressão absoluta da rede. Este sensor por sua vez, pode ser acoplado a um

transmissor que converte o sinal elétrico gerado em informação referente a pressão do processo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020).

Figura 16 - Transmissor de pressão

Fonte: (ARAUJO, et al., 2017)

Conforme a ABNT NBR 16607, é recomendado sempre que possível a consideração da medição da pressão através de transdutores de pressão absoluta. Porém, uma alternativa pode ser considerada: a medição de pressão pode ser realizada através de transdutores de pressão absolutos para pressões de até 21 bar(a) e para casos em que a pressão absoluta é superior a 21 bar(a), é permitida a utilização de transdutores de pressão do tipo manométrica. Porém, para o caso de consideração de medição de pressão manométrica, deverá ser realizada a parametrização a fim de que a pressão atmosférica seja somada ao valor medido.

4.1.2. Medição de Temperatura

Para a medição de temperatura aplicada a correção de volume de gás natural, considera-se o método imersível (ou intrusivo), ou seja, o sensor deve ser inserido dentro da tubulação. Para isso, usualmente utiliza-se termoresistências (também conhecidas como RTD, do inglês *resistance temperature detector*) PT100 ou PT1000 e a Figura 17 apresenta alguns exemplos que são considerados para a medição da temperatura do gás natural (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020).

Figura 17 - Termoresistências

Fonte: (ARAUJO, et al., 2017)

Para os PT100, esta nomenclatura dá-se pelo motivo de que as termoresistências feitas de platina (Pt) possuem a resistência de 100 Ω a uma temperatura de 0ºC e para os PT1000, a nomenclatura dá se pelo motivo de que as termoresistências de platina possuem uma resistência de 1000Ω a uma temperatura de 0ºC (ARAUJO, et al., 2017).

A termoresistência deve então ser ligada a um transmissor ou a outro elemento que seja capaz de relacionar a variação da resistência com temperatura do processo que será medida. No caso dos PTZs e computador de vazão, os próprios instrumentos são capazes de associar tal grandeza com a temperatura do processo e para este tipo de medição.

4.1.3. Medição da Composição Físico Química do Gás Natural

A análise cromatográfica refere-se ao processo físico-químico de separação de uma determinada amostra, no qual os seus constituintes são distribuídos em uma fase estacionária e em uma fase móvel. Na cromatografia gasosa, a amostra (que é a fase móvel) a ser analisada é carregada por um gás de arraste através da coluna cromatográfica, em que diferenças entre a interação dos constituintes da amostra com o material que compõe a coluna (que é a fase estacionária) faz com que cada constituinte percorra esta coluna em um tempo diferente. Isso torna possível a separação entre cada componente da amostra e, após percorrerem a coluna, os compostos de interesse dentro da amostra são detectados por um detector específico. Ou seja, para que a análise cromatográfica seja realizada corretamente, deve-se saber quais os compostos que estão sendo analisados dentro de uma amostra.

Para a análise físico química do gás natural, o cromatógrafo deve possuir 3 colunas cromatográficas e a separação do gás é realizado com base nas normas ISO 6974 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2018) e NBR 14903 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), enquanto os cálculos envolvidos são realizados com base nas normas 6976 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2016) e 15213 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

A primeira coluna a ser considerada é referente a detecção de gases inertes. Nesta coluna, analisa-se unicamente a presença de CO2 e N2 no gás natural. A segunda coluna considerada é dedicada a detecção de hidrocarbonetos leves, ou seja, ela é capaz de detectar metano (C1), etano (C2), propano (C3), butano (C4) e pentano (C5). A terceira coluna considerada é dedicada a detecção de hidrocarbonetos pesados, ou seja, nela é possível detectar desde o hexano (C6) até hidrocarbonetos mais pesados.

Ressalta-se que para o gás natural, o sistema de cromatografia também conta com um analisador de umidade e um analisador de oxigênio, dois parâmetros normativos importantes na determinação da qualidade da amostra do gás natural analisado.

4.1.4. Corretores de Volume de Gás Natural

Referente a correção de volume de gás natural, atualmente 2 tipos de equipamentos são utilizados para esta função: os PTZs e os computadores de vazão. A consideração destes tipos de equipamentos deve-se pelo fato de que os algoritmos que realizam o cálculo passam por verificação e aprovação de instituições reconhecidas metrologicamente a fim de garantir a veracidade dos dados que serão disponibilizados.

As demais características construtivas dos instrumentos, como por exemplo precisão dos elementos de medição, classe de proteção eletromagnética, tamanho de memória, tipo de entradas e saídas disponíveis, dentre outros também são verificados e no Brasil, a norma ABNT NBR 14978 apresenta todos os requisitos mínimos que os PTZs e Computadores de vazão devem possuir. Como referência, a Tabela 3 apresenta uma comparação entre os dois tipos de instrumentos.

Tabela 3 - Comparativo entre PTZ e Computador de Vazão (CV)

Função	PTZ	CV
Saídas de alarme	✓	✓
Alimentação principal com bateria interna	✓	
Alimentação externa (Corrente contínua)	✓	✓
Comunicações (TIA /EIA232F, TIA/EIA 485F etc)	✓	✓
Composição química detalhada do gás		✓
Propriedades físicas do gás	✓	✓
Banco de dados (logging)	✓	✓
Entrada de densidade		✓
Display	✓	✓
Medição múltipla de vazão (mais de um tramo de medição)		✓
Cálculo de energia		✓
Alimentação externa para os transdutores		✓
Entrada de vazão (analógica)		✓
Entrada de vazão (pressão diferencial)		✓
Entrada de vazão pela de saída integralizada		✓
Entrada de vazão por pulsos processados	✓	✓
Interface para sistemas supervisórios	✓	✓
Teclado local	✓	✓
Comparação de medição entre mais de um medidor		✓
Curvas de correção do medidor		✓
Entrada e saída ótica	✓	
Entrada para transmissor de pressão		✓
Pressão (entrada dupla e comparação cruzada)		✓
Duas entradas para medição de pulsos processados		✓
Instalação em área classificada	✓	✓
Conexão com transdutores inteligentes		✓
Alimentação solar	✓	✓
Entrada para transmissor de temperatura		✓
Temperatura (entrada dupla e comparação cruzada)		✓
Entrada para sensor de temperatura (RTD 100 ou 1 000)	✓	✓
Dispositivo indicador local	✓	✓
Senha de acesso em múltiplos níveis		✓

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020)

Em resumo, nos corretores de volume de gás são inseridos os pulsos de volume de gás, os valores de pressão e de temperatura e alguns parâmetros físico-químicos de uma amostra coletada e analisada laboratorialmente através

do sistema de cromatografia. Ressalta-se que tais variáveis podem mudar de acordo com o critério selecionado para determinação do fator de compressibilidade do gás natural.

Pela vantagem comercial, usualmente são considerados PTZs (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020) para a realização do faturamento de clientes por parte das empresas de distribuição de gás natural conforme a Figura 18.

Figura 18 - Corretor de volume de gás tipo PTZ modelo Corus da marca *Itron*

Fonte: (ITRON, 2014)

Para clientes mais estratégicos ou em pontos de entrega entre a provedora de gás natural e a empresa que distribui o gás natural, conforme a Figura 19 usualmente são considerados os computadores de vazão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020), dado sua maior robustez operacional.

Figura 19 - Corretor de volume de gás tipo Computador de Vazão modelo Floboss da marca Emerson

Fonte: (EMERSON, 2022)

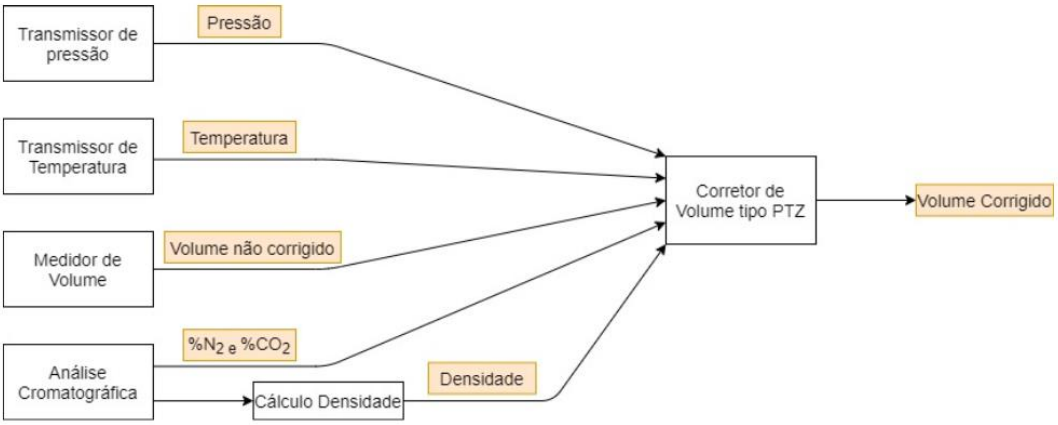
Em casos mais específicos, pode se considerar a redundância na correção do volume de gás através da instalação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020) de um PTZ e da instalação de um corretor de volume de gás tipo computador de vazão para medir o mesmo tramo de medição, conforme a Figura 20. Essa opção é viável nos casos em que a medição é considerada crítica e não se pode haver indisponibilidade dos dados por falha de um corretor de volume de gás.

Figura 20 - Redundância na correção do volume de gás natural

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Com base na teoria apresentada envolvendo todos os aspectos técnicos que devem ser considerados no processo de correção de volume de gás natural, de forma genérica, o com base na AGA NX19 pode ser representado conforme a Figura 21.

Figura 21 - Processo de correção de gás natural - Fluxograma



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

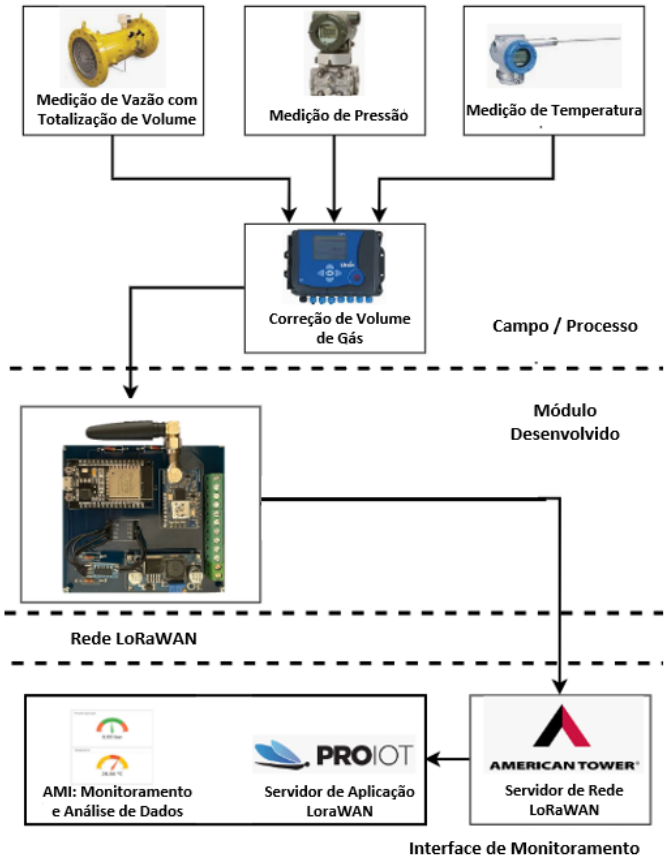
4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta sessão estão apresentados os materiais e métodos considerados para o desenvolvimento do trabalho que foi realizado e ela está dividida em 3 etapas: proposta do trabalho, métodos considerados e *Hardware* e *Software*.

5.1. PROPOSTA DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento e aplicação de uma AMI em sistemas de medição de gás natural dentro do segmento industrial. Além de coletar e enviar os dados gerados em campo para uma plataforma, também foram realizadas avaliações destes dados a fim de entender o comportamento dos clientes e implementar ferramentas que auxiliem na detecção de comportamentos atípicos no processo. A arquitetura proposta neste trabalho é exemplificada conforme a Figura 22.

Figura 22 - Arquitetura proposta da solução

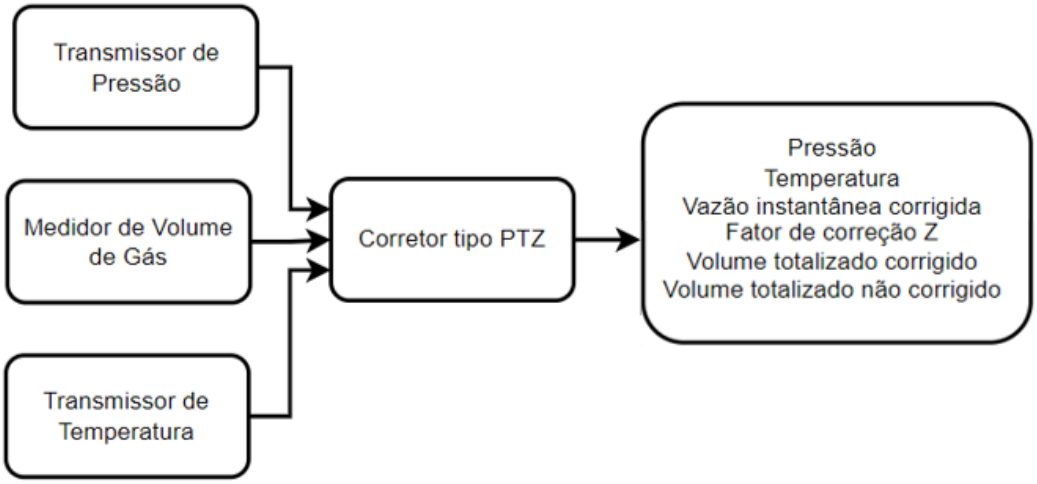


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Na arquitetura da Figura 22, têm-se separadas as três camadas principais de atuação da solução: a integração em campo do módulo desenvolvido com os instrumentos existentes, a comunicação sem fio realizada através do protocolo de comunicação *LoRaWAN* e o servidor que suporta a interface desenvolvida para análise e monitoramento dos dados de processo coletados em campo.

Conforme a Figura 23, os dados gerados pelo medidor vazão com totalização de volume de gás e pelos transmissores de pressão e temperatura são enviados ao PTZ para que ele realize os cálculos de correção de volume de gás e disponibilize todos os dados de processo que são utilizados neste projeto: pressão, temperatura, vazão corrigida, fator de correção, fator Z, volume totalizado corrigido e não corrigido.

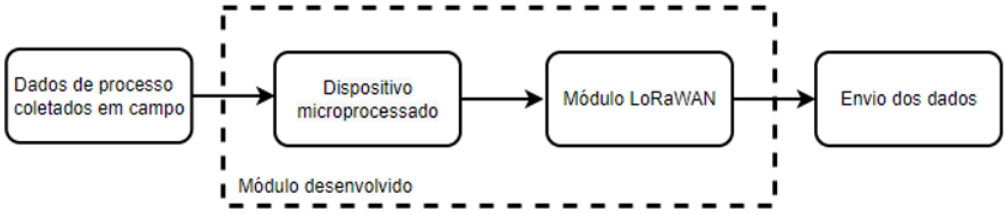
Figura 23 - Variáveis de processo lidas em campo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Um dispositivo microcontrolado é responsável pela leitura das variáveis de processo que são fornecidas pelo PTZ e pela organização das informações para criação do *payload*, o qual é enviado para o módulo *LoRaWAN*, que utiliza a cobertura privada provida pela empresa *American Tower* do Brasil, conforme a Figura 24.

Figura 24 - Coleta e envio dos dados de processo

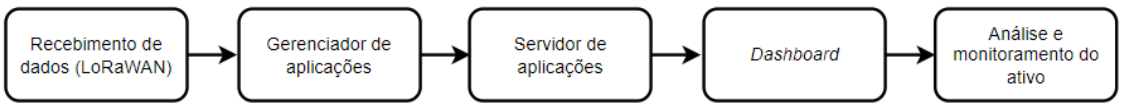


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Conforme a Figura 25, os dados enviados são recebidos dentro do gerenciador de aplicações da *American Tower* e posteriormente são enviados ao servidor de aplicações da *ProIoT*, a qual possui diversos pacotes de assinatura anual do serviço de conectividade. Esta etapa do processo permite o acesso aos dados coletados em campo para criação de um *dashboard* para monitoramento e análise das informações geradas. A escolha da plataforma *ProIoT* neste projeto deu-se pelos seguintes aspectos:

- Possibilidade de contratação de apenas 1 pacote de comunicação;
- Disponibilidade de recursos dentro da plataforma para tratamento do *payload* recebido de campo;
- Existência de recursos de criação de variáveis sintéticas, ou seja, a criação de variáveis provenientes de outras variáveis de processo (ou o conjunto de mais variáveis avaliadas em conjunto);
- Possibilidade de criação de *dashboards* customizados para exibição de dados instantâneos, históricos e alarmes de processo;
- Não há a necessidade de encaminhamento dos *payloads* para outras plataformas de gerenciamento de dados;
- Todas as funções descritas acima são fornecidas através da contratação do pacote de comunicação, sem custos adicionais.

Figura 25- Recebimento e análise dos dados coletados em campo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Dentro do *dashboard* além dos dados de processo que são capturados, outras informações também são monitoradas a fim de contribuir com a avaliação do ciclo de vida do ativo em campo. Foram criados alarmes de processo para faixas de medição fora dos limites estabelecidos pelo fabricante, pois quando o medidor opera nestas faixas, o erro gerado na medição pode estar superior aos limites estabelecidos pela regulamentação vigente.

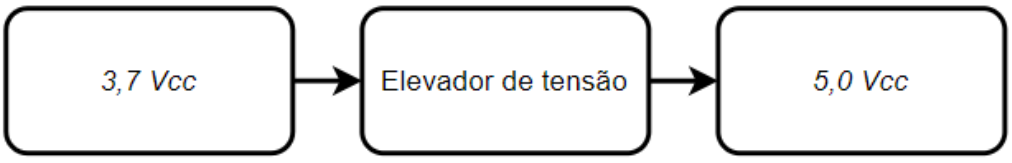
Para garantir que o instrumento não é acessado por pessoas não autorizadas, foi criado um alarme de detecção da abertura da tampa do PTZ. A fim de detectar possíveis vazamentos de gás natural, também foi implementado um recurso que monitora a vazão de gás natural no local e, caso o consumo seja baixo e constante, esta ferramenta é capaz de determinar se existe um possível ponto de vazamento de gás natural no local.

5.2. MÉTODOS CONSIDERADOS

Para a aplicação deste projeto, foram verificadas as opções de dispositivos e tecnologias disponíveis em mercado que apresentavam três das principais características consideradas nas soluções de IoT: baixo custo, baixo consumo elétrico e alta confiabilidade operacional.

Para alimentar eletricamente todos os componentes do módulo criado, foi considerada a bateria existente no PTZ, a qual tem o nível de tensão de 3,7Vcc e dado que existem dispositivos que são alimentados com 5Vcc, tornou-se necessário a consideração de um dispositivo para elevação de tensão conforme a Figura 26.

Figura 26 - Elevação de tensão

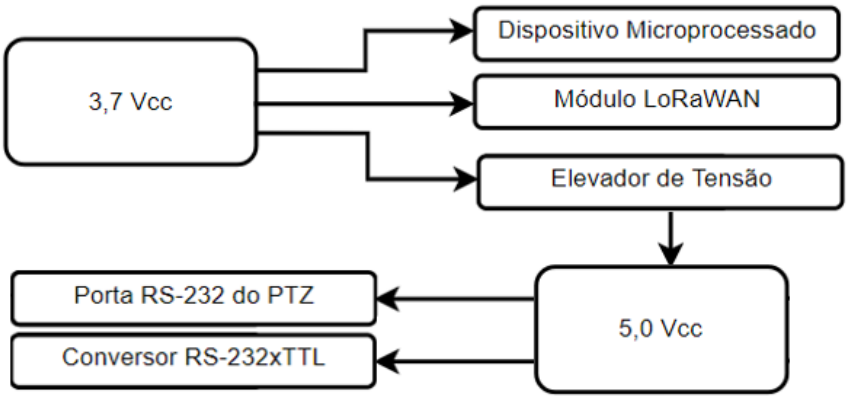


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Conforme a Figura 27, o dispositivo microcontrolado, o módulo *LoRaWAN* e o elevador de tensão foram alimentados com a tensão proveniente da bateria do

PTZ, enquanto a porta RS-232 do PTZ, utilizada para realizar a comunicação *Modbus RTU* e o conversor de nível lógico foram alimentados com 5Vcc.

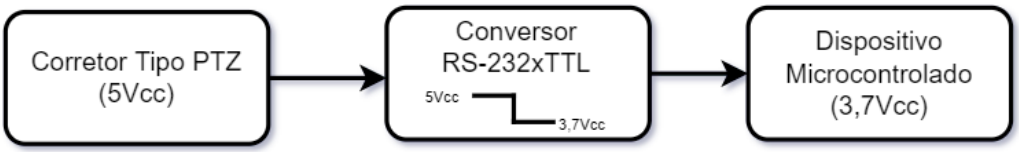
Figura 27 - Alimentação elétrica dos dispositivos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Para coletar os dados gerados pelo PTZ, foram utilizados 2 métodos de comunicação: através de sinal pulsado e através do protocolo *Modbus RTU*. Para aquisição dos dados de pressão, temperatura, vazão corrigida, fator de correção e fator Z, a comunicação *Modbus RTU* foi realizada através da porta de comunicação RS-232 do PTZ (dispositivo escravo) e a porta serial do dispositivo microcontrolado (dispositivo mestre). Dado que os níveis lógicos do PTZ e do dispositivo microcontrolado são diferentes, no qual o PTZ é alimentado com tensão de 5Vcc e o dispositivo microcontrolado é alimentado com tensão de 3,7Vcc, a integração de um conversor foi necessária conforme a Figura 28.

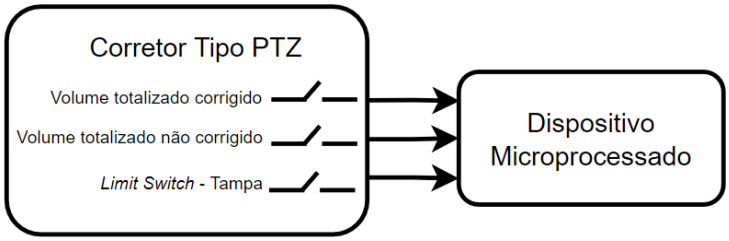
Figura 28 - Conexão para comunicação *Modbus RTU*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Para a coleta dos sinais pulsados dos volumes totalizados corrigidos e não corrigidos do PTZ e para o detector de abertura da tampa do instrumento, conforme a Figura 29, o dispositivo microcontrolado considerado utilizou 3 canais digitais para que a coleta destas variáveis de processo possa ser realizada.

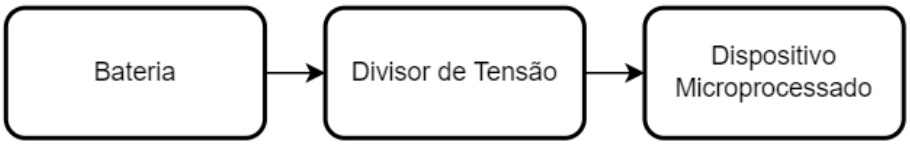
Figura 29 - Coleta de pulsos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Para monitoramento dos níveis de tensão recebidos pela bateria do PTZ, um medidor de tensão também foi implementado através de divisor de tensão por resistores, conforme a Figura 30. Este recurso tem como função principal evitar possíveis falhas operacionais devido ao baixo nível de bateria do instrumento.

Figura 30 - Medição de tensão da bateria



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Os dados coletados pelo dispositivo microcontrolado foram agrupados em 1 único *payload*, que possui 1 *aliás* para cada variável de processo. Este *alias* tem como função determinar em qual parte do *payload* o dado referente a uma variável específica de processo está alocado, conforme exemplificado na Figura 31. Para envio dos *payloads* gerados, o dispositivo microcontrolado e o módulo *LoRaWAN* irá utilizar um canal de comunicação serial e esta informação é retransmitida através do protocolo de comunicação *LoRaWAN* para o gerenciador de aplicações.

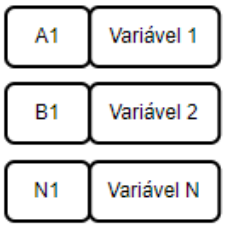
Figura 31 - *Payload* das variáveis de processo organizado através de *aliás*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Para envio dos dados, optou-se pela contratação de conectividade ofertada pela empresa *ProIoT* e o pacote de contratação de rede *LoRaWAN* selecionado foi o G, que permite até 4.800 *uplinks*/mês e 240 *downlinks*/mês, além do acesso a plataforma de gestão de ativos, onde foi possível criar um *dashboard* para que os dados coletados em campo sejam monitorados e analisados.

Dentro do gerenciador de aplicações, o módulo desenvolvido foi cadastrado com as informações necessárias para que a comunicação *LoRaWAN* seja realizada e os dados de processo recebidos para análise e monitoramento. Após o cadastro do dispositivo, o *payload* recebido foi dividido através dos *alias* considerados conforme a Figura 32 e, desta forma, as variáveis de processo estarão aptas a serem inseridas no *dashboard*.

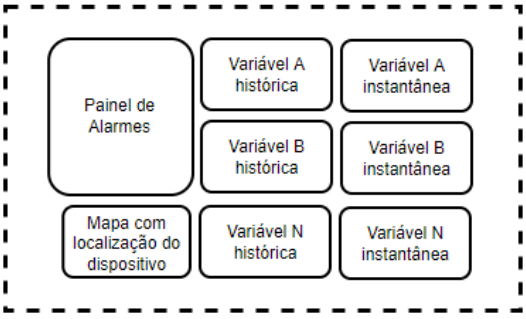
Figura 32 - Separação dos dados de processo através do alias



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Com as variáveis de processo disponibilizadas no gerenciador de comunicações, realizou-se a criação do *dashboard* geral do projeto, no qual estão exibidos todos os dados de processo em formato instantâneo e histórico, assim como a geolocalização do dispositivo, os alarmes de processo existentes e demais recursos criados conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 - *Dashboard* da solução



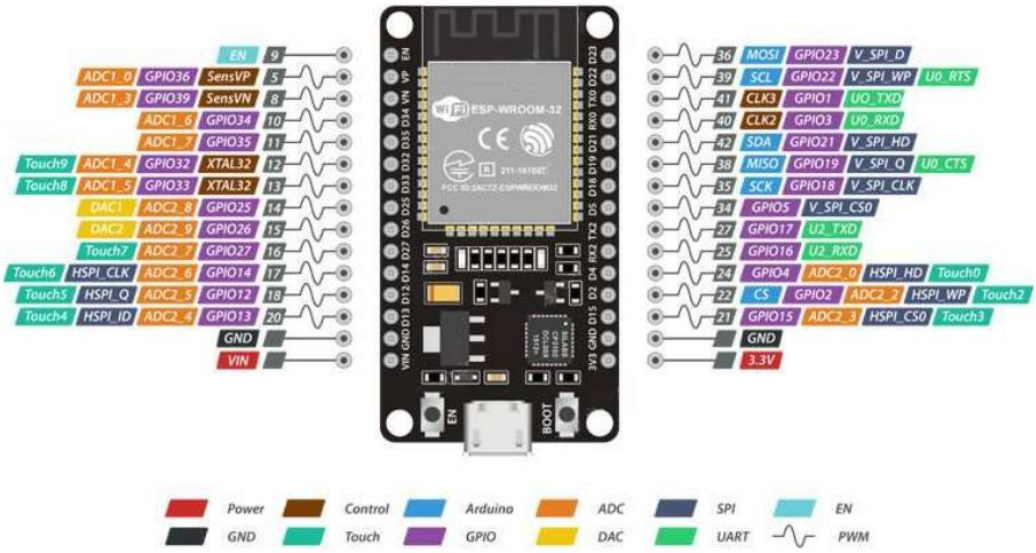
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

5.3. *HARDWARE E SOFTWARE*

Como citado anteriormente, o avanço da tecnologia possibilitou a comercialização de dispositivos eletrônicos que possuem um baixo custo e pouco consumo de bateria, fatores fundamentais que permitiram a expansão das soluções de IoT. Desta forma, a solução proposta neste trabalho considerou algumas destas tecnologias disponíveis em mercado, as quais podem viabilizar a implementação massiva da solução desenvolvida.

Como dispositivo microcontrolado, conforme a Figura 34, considerou-se o módulo ESP-32, que é um módulo de alta performance para aplicações envolvendo *wi-fi*, contando com um baixíssimo consumo de energia. Com 4 MB de memória flash, o ESP-32 permite criar variadas aplicações para projetos de IoT, acesso remoto, *webservers*, *dataloggers*, entre outros. A Figura 34 apresenta o *pinout* do ESP-32.

Figura 34 - ESP-32 *pinout*



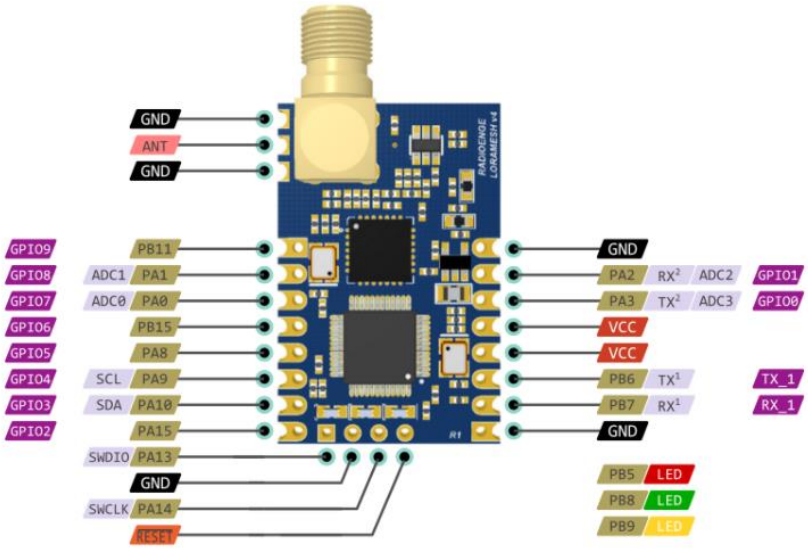
Fonte: (ELETROGATE, 2022)

Através de suas entradas e saídas, foi possível realizar a coleta dos dados em campo e o envio destes dados para o módulo *LoRaWAN*. Considerou-se 1 porta serial do dispositivo para que a comunicação através do protocolo *Modbus RTU* fosse realizada com o PTZ. Uma segunda porta serial foi utilizada para que a comunicação com o módulo *LoRaWAN* fosse estabelecida. Adicionalmente,

dois canais analógicos foram considerados, em que um canal detecta o incremento de pulsos referente ao volume totalizado corrigido e outro canal detecta o incremento de pulsos referente ao volume totalizado não corrigido medido. Um terceiro canal analógico do ESP-32 foi considerado para que o *limit switch* possa indicar a abertura da tampa do PTZ. Após o recebimento de todas as variáveis de processo, o ESP-32 ficou responsável por organizar toda a informação em um único *payload* para que o envio ocorresse ao módulo *LoRaWAN*.

Conforme a Figura 35, o módulo para comunicação *LoRaWAN* foi considerado o módulo *EndDevice LoRaWAN Radioenge* (ou apenas *Radioenge*), que tem como principal característica a otimização no uso de energia, permitindo longo alcance do sinal de rádio e ótimos aspectos técnicos da rede consumindo pouca energia. Sendo assim, este dispositivo é ideal para uso em sensoriamento remoto, controle e tráfego de dados móveis, e outras aplicações que vêm ganhando espaço com a evolução do conceito de Internet das Coisas.

Figura 35 - *Radioenge pinout*



Fonte: (ELETROGATE, 2022)

Através de 1 canal de comunicação serial, ele recebeu o *payload* gerado pelo ESP-32 e o envio desse payload foi feito através do protocolo de comunicações *LoRaWAN* para gerenciador de comunicações.

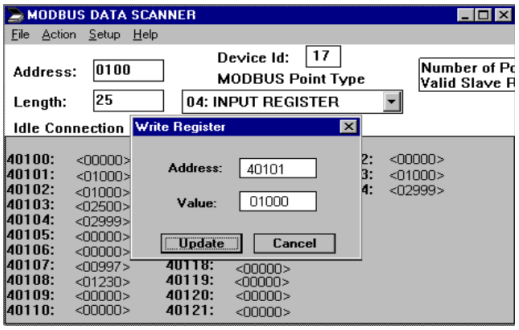
Para que um dado seja coletado através do protocolo de comunicações *Modbus RTU*, uma das premissas existentes é que o ESP-32, que atuou como mestre, indicasse qual é o endereço no qual o dado estava armazenado. Desta forma, o PTZ que atuou como escravo, enviou ao mestre somente a informação solicitada dentro do formato existente. O *software Wincor*, apresentado na Figura 36, é uma ferramenta criada pelo fabricante do PTZ para que configurações e leituras dos parâmetros e dados sejam realizadas. Com seu auxílio, o mapeamento dos endereços das variáveis dentro do mapa *Modbus RTU* pode ser realizado para todas as variáveis de processo que foram consideradas.

Figura 36 - Tela inicial do *software Wincor*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A validação deste mapeamento de variáveis foi realizada a fim de garantir que os dados coletados estavam coerentes e para isso, utilizou-se o *software ModScan*, que é uma ferramenta que funciona como um dispositivo mestre na comunicação *Modbus RTU*. Conforme a Figura 37, através da inserção dos endereços das variáveis de processo, é possível monitorá-las em tempo real no *ModScan* (MODSCAM, 2021).

Figura 37 - *Software ModScan*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Para a configuração do ESP-32, foi necessário criar um algoritmo contendo toda a lógica considerada para que a solução proposta seja executada. Para criação deste algoritmo, optou-se pela utilização do *software Arduino IDE* devido a sua facilidade de criação, validação e descarregamento de algoritmos em dispositivos microcontrolados. Ele também conta com o auxílio de diversas bibliotecas que permitem que as mais variadas aplicações sejam desenvolvidas. Este recurso foi utilizado para desenvolver e testar o algoritmo implementado na solução e através do monitor de serial, foi possível avaliar se os envios e respostas do módulo desenvolvido estão sendo realizadas conforme o esperado, a fim de validar a solução implementada.

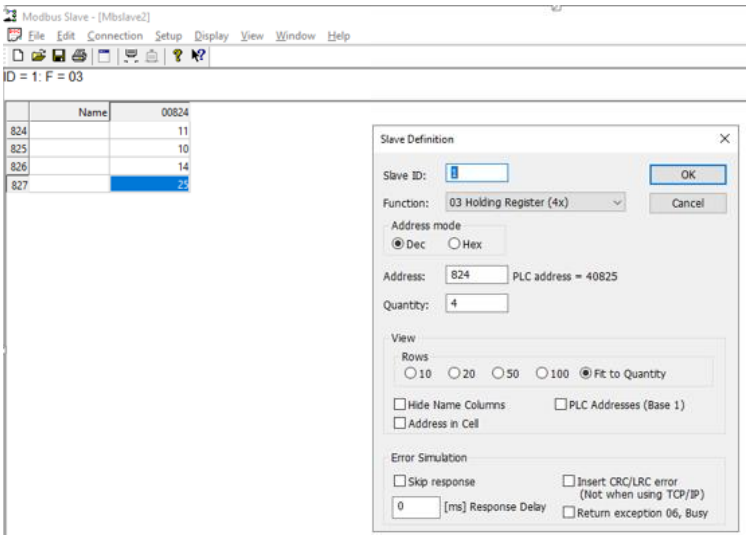
Para que a comunicação entre o ESP-32 e o módulo *LoRaWAN* fosse realizada, foi necessário atribuir as configurações de rede que foram consideradas ao *Radioenge*. Para isso, conforme a Figura 38, uma das formas de configuração é através do *software Radioenge - Software MOTE*, no qual foi possível, além de coletar os dados de fábrica do dispositivo, também configurar as demais opções das características de comunicação necessárias.

Figura 38 - *Radioenge - Software MOTE*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Após o desenvolvimento da programação para requisição dos dados do PTZ dentro do ESP-32, foi realizada a validação do algoritmo desenvolvido e para isso, utilizou-se um simulador que gerou dados de processo, os quais foram lidos através do protocolo de comunicação *Modbus RTU*. Conforme a Figura 39, o *software* considerado foi o *Modbus Slave*, ferramenta que permite simular um dispositivo escravo para comunicação *Modbus RTU*, atribuindo valores dentro dos endereços do mapa de memória. Nele foi possível configurar os dados de conexão, criar os endereços e atribuir valores a estes endereços em diversos formatos. Uma de suas funções possibilita que seja verificado o fluxo de envio e recebimento de mensagens juntamente com os dados transportados.

Figura 39 - *Software Modbus Slave*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

5. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

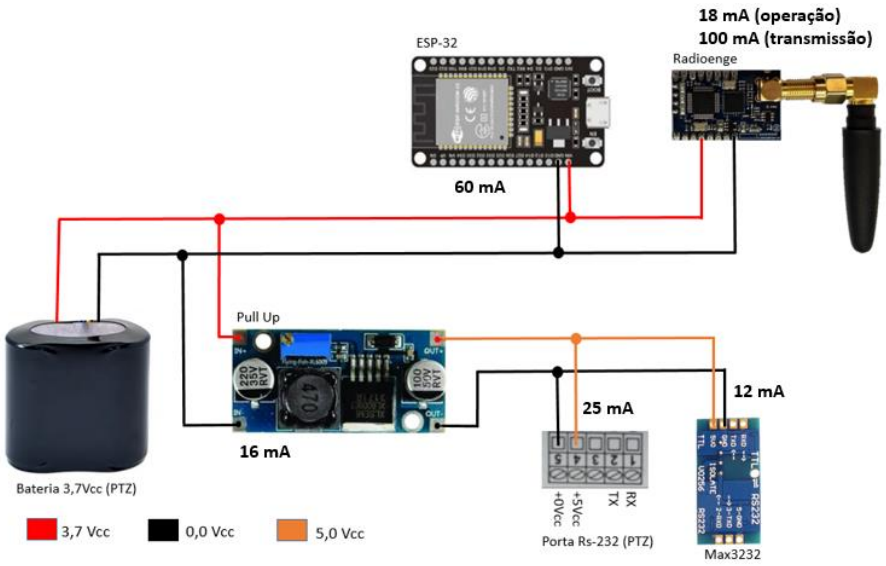
Nesta sessão estão apresentadas as etapas do desenvolvimento do trabalho proposto e seus principais resultados obtidos. Ele está dividido em 6 partes: módulo remoto, análise da comunicação *LoRaWAN*, interface de monitoramento e gestão, validação operacional, análise de dados e gestão inteligente de gás e discussões e considerações.

6.1. MÓDULO REMOTO

A proposta deste trabalho consistiu na coleta dos dados de processo armazenados no corretor de volume de gás PTZ e envio para uma plataforma de gestão da informação através de Internet das Coisas. Após o recebimento dos dados provenientes do PTZ, a AMI criada envia todas as informações que foram compiladas através da rede *LoRaWAN*. Após o recebimento das informações, elas são analisadas e disponibilizadas em um *dashboard* que apresenta a visão geral do processo em que este PTZ está instalado.

Em relação ao fornecimento de eletricidade ao módulo desenvolvido, foi considerada a bateria do PTZ como fonte de alimentação elétrica a todo o sistema. A tensão fornecida de 3,7 Vcc é utilizada para alimentar, além do próprio PTZ, o ESP-32, o *Radioenge* e o conversor *pull up* modelo XL6009E1. O conversor por sua vez, eleva a tensão de 3,7Vcc para 5Vcc para que a porta RS-232 do PTZ e o conversor Max3232 possam ser alimentados eletricamente, conforme a Figura 40. Em condições normais de operação, somando-se as correntes consumidas pelos resistores do circuito, o módulo desenvolvido consome em média 142 mA. Nos envios de dados, o módulo consome cerca de 223 mA, cenário que ocorre apenas 1 vez a cada hora.

Figura 40 - Alimentação elétrica do módulo desenvolvido

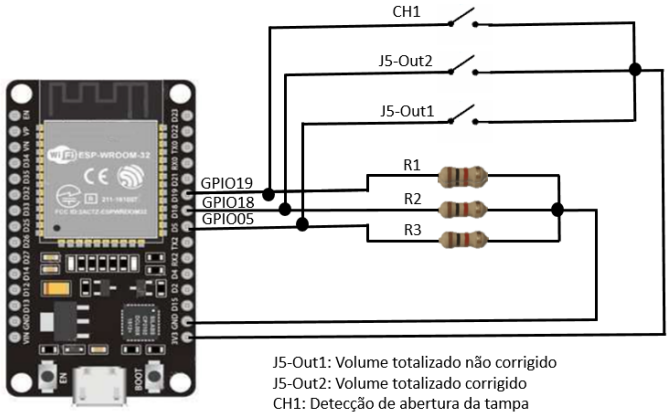


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Para coletar os valores de volume totalizado corrigido e de volume totalizado não corrigido gerados pelo PTZ, considerou-se a conexão do ESP-32 nas duas saídas pulsadas disponíveis no PTZ: a porta J5-Out1 e a porta J5-Out2. Conforme a Figura 41, a porta J5-Out1 foi interligada no GPIO05 e a porta J5-Out2 foi interligada no GPIO18 do ESP-32.

Atualmente os PTZs contém um selo físico metrológico que tem como função garantir que o instrumento não seja violado pelo usuário. Como redundância a esta proteção, implementou-se um *limit switch* dentro do PTZ, que foi conectado ao GPI19 do ESP-32. Isso garante que sempre que a porta do equipamento for aberta, um alarme seja gerado na plataforma de monitoramento de dados. Para os três leitores de sinal pulsado foi considerado um resistor de 1kΩ em cada canal.

Figura 41 - Coleta de pulsos pelo ESP-32

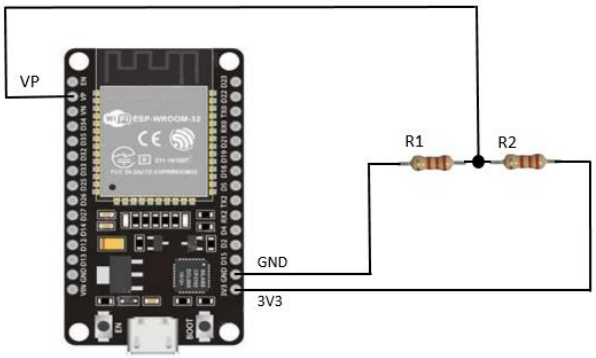


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Para medição do nível de tensão da bateria do PTZ, que alimentará o módulo desenvolvido, foi implementado o medidor de tensão conforme a

Figura 42, que considera um divisor de tensão através de 2 resistores de 2,2kΩ. O canal VP do ESP-32 recebe o sinal analógico e o converte para o valor de tensão proporcional a leitura realizada.

Figura 42 - Divisor de tensão

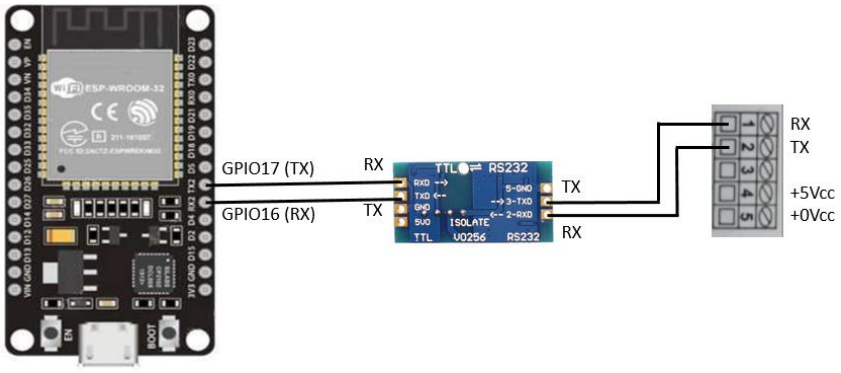


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A porta J6 do PTZ possui a função de comunicação através do protocolo de comunicação *Modbus RTU* por uma porta RS-232. Ela foi conectada ao ESP-32 através do GPIO16 e GPIO17 para que a comunicação fosse realizada e os dados das seguintes variáveis fossem capturados: pressão, temperatura, vazão corrigida, fator de correção e fator Z. Dado que os níveis de tensão entre estes dispositivos não são compatíveis, pois o PTZ opera com tensão de alimentação

de 5Vcc (mínimo) e o ESP-32 opera na solução com tensão de alimentação de 3,7Vcc, considerou-se o conversor RS-232/TTL MAX3232 conforme a Figura 43.

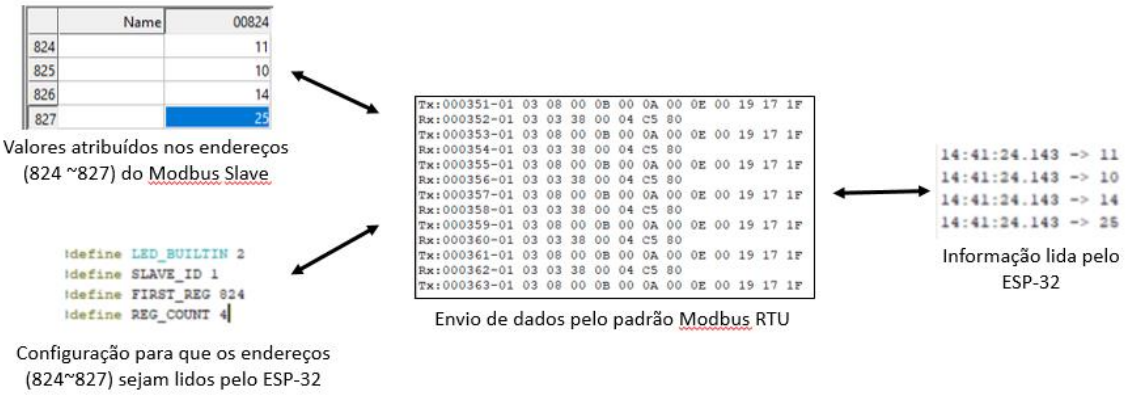
Figura 43 - Comunicação *Modbus RTU* - Conversão de níveis de sinais



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Com o objetivo de realizar a validação do método considerado para leitura de dados no protocolo *Modbus RTU*, utilizou-se *software Modbus Slave* e com ele, foi possível verificar que os dados simulados estavam sendo lidos corretamente pelo ESP-32. Conforme a Figura 44, criaram-se dados numéricos dentro de endereços específicos da tabela *Modbus* do simulador e estes endereços foram consultados pelo ESP-32.

Figura 44 - Teste de validação da leitura *Modbus RTU* pelo ESP-32

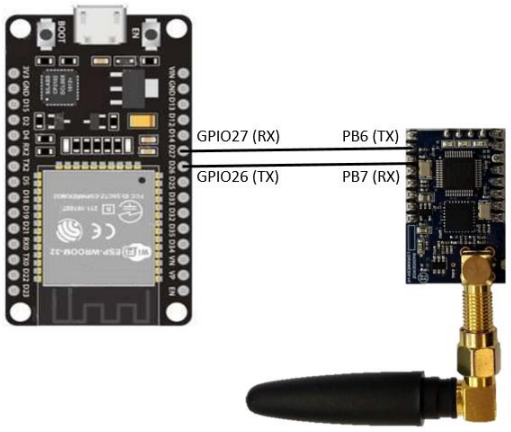


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Após coletados os dados de processo, conforme a Figura 45, o ESP-32 utilizou o GPIO26 e GPIO27 para se comunicar com o PB6 e PB7 do Módulo *Lora Mesh - Radioenge* e através da comunicação serial, os dados de processo

e alarmes foram enviados para a plataforma de gerenciamento de dados através do protocolo de comunicação *LoRaWAN*.

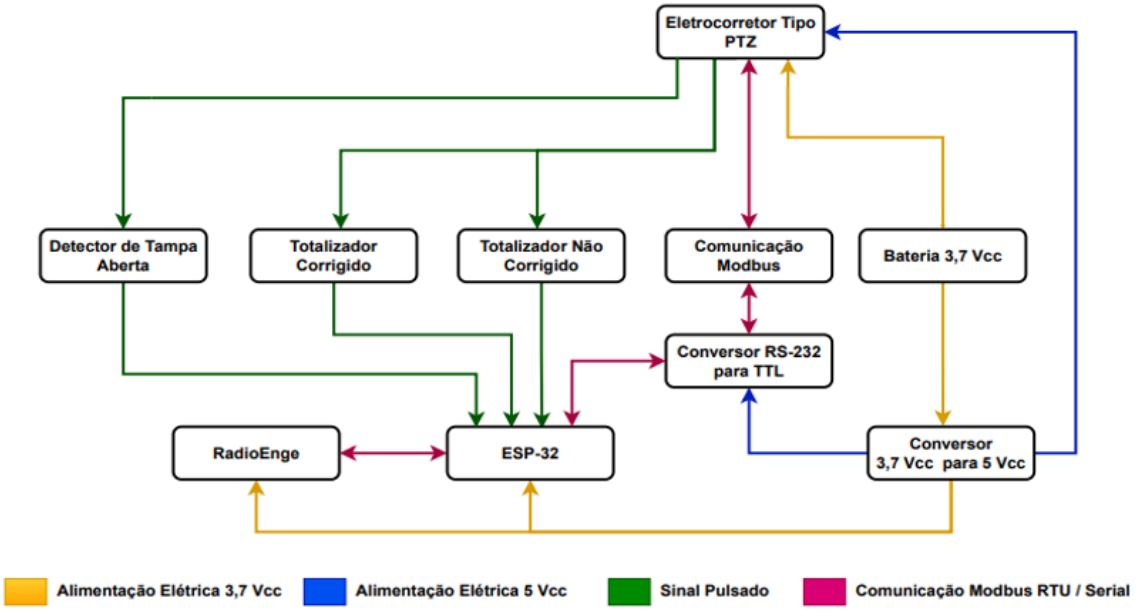
Figura 45 - Comunicação serial entre o ESP-32 e o *Radioenge*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A Figura 46 apresenta a representação de todas as ligações físicas que foram necessárias para que o módulo desenvolvido atue corretamente e ele pode ser dividido em 4 partes principais: alimentação elétrica com tensão de 3,7Vcc, alimentação elétrica com tensão de 5Vcc, coleta de dados através de sinal pulsado e coleta de dados com comunicação serial ou *Modbus RTU*.

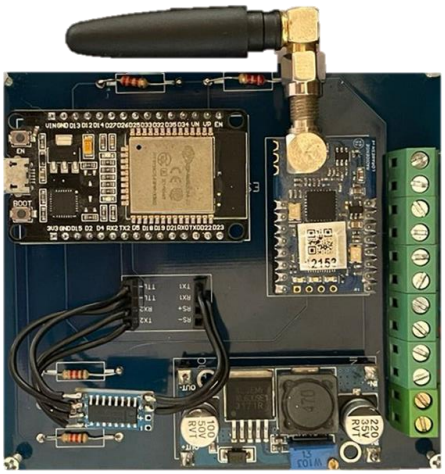
Figura 46 - Ligação física do módulo desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Após implementado e validado cada um dos métodos apresentados anteriormente, foi possível construir o modulo remoto conforme a Figura 47. Nele foram considerados bornes que auxiliam na interligação entre o PTZ e o módulo desenvolvido.

Figura 47 - Módulo remoto protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Com o módulo remoto desenvolvido, foi possível elaborar o invólucro onde ele será instalado. Para isso, considerou-se a geometria do corretor de volume PTZ a fim de encontrar um local adequado para que este invólucro seja montado no sistema existente. Conforme a Figura 48, o invólucro pode ser instalado diretamente no PTZ através de furações existentes.

Figura 48 - Infraestrutura avançada de medição (AMI) para gestão inteligente de gás natural em clientes industriais

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A Figura 49 apresenta a solução desenvolvida instalada em um processo de medição fiscal de gás natural.

Figura 49 - Solução instalada em campo

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

6.2. ANÁLISE DA COMUNICAÇÃO *LORAWAN*

Após realizada a definição das ligações físicas do módulo desenvolvido, iniciou-se o processo para mapeamento das variáveis de processo que serão coletadas da tabela *Modbus RTU* do PTZ. Para isso, a primeira etapa considerada foi a ligação do PTZ ao *software* proprietário *Wincor*, no qual as variáveis de processo existentes e seus respectivos endereços foram verificados.

Como citado anteriormente, as variáveis de processo que foram coletadas através do protocolo de comunicação *Modbus RTU* são: pressão, temperatura, vazão corrigida, fator de correção e fator Z. A Tabela 4 apresenta os endereços da tabela *Modbus* nos quais estas variáveis estão alocadas e o formato que elas possuem. Para acessar estas informações, dentro das características do protocolo de comunicação *Modbus RTU* considerou-se a leitura do tipo *Holding Register* e o *Device ID* 1.

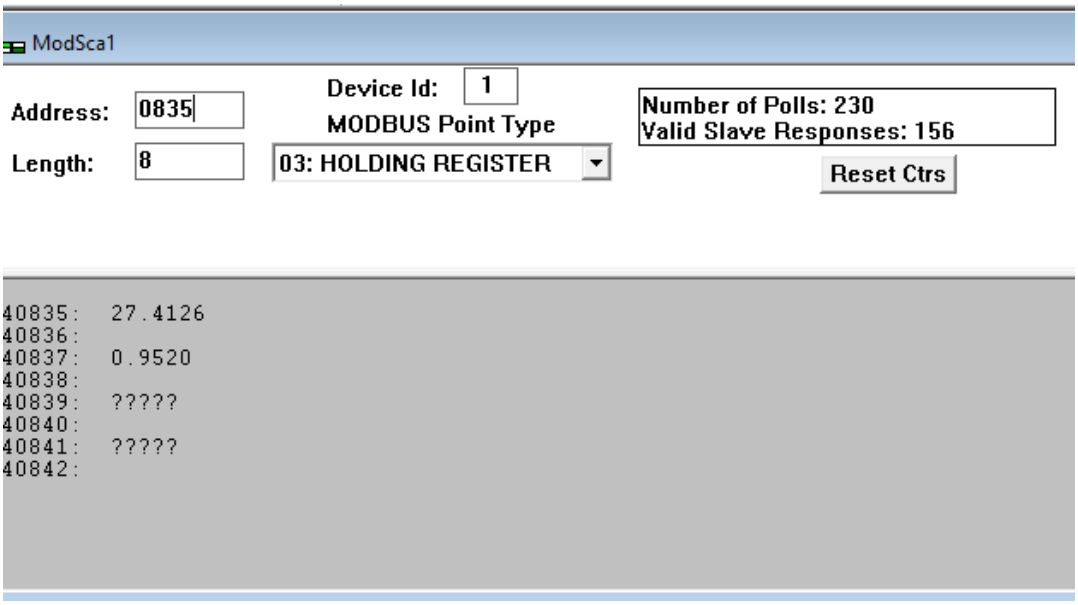
Tabela 4 - Mapeamento dos dados do PTZ dentro da memória do dispositivo

Variável	Nome	Tipo	Endereço
MFBG	Vazão instantânea convertida	*Float*	824
MTG	Temperatura instantânea	*Float*	834
MPG	Pressão instantânea	*Float*	836
MCM	Fator de correção instantâneo	*Float*	838
MZZ	Fator Z instantâneo	*Float*	840

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A fim de validar o mapeamento realizado, utilizou-se o *ModScan* para realizar a leitura instantânea do PTZ e conforme a Figura 50, foi possível confirmar que o mapeamento foi realizado corretamente e todas as variáveis de processo que foram utilizadas estão alocadas no endereço correto.

Figura 50 - Consulta dos dados e seus endereços pelo *ModScan*

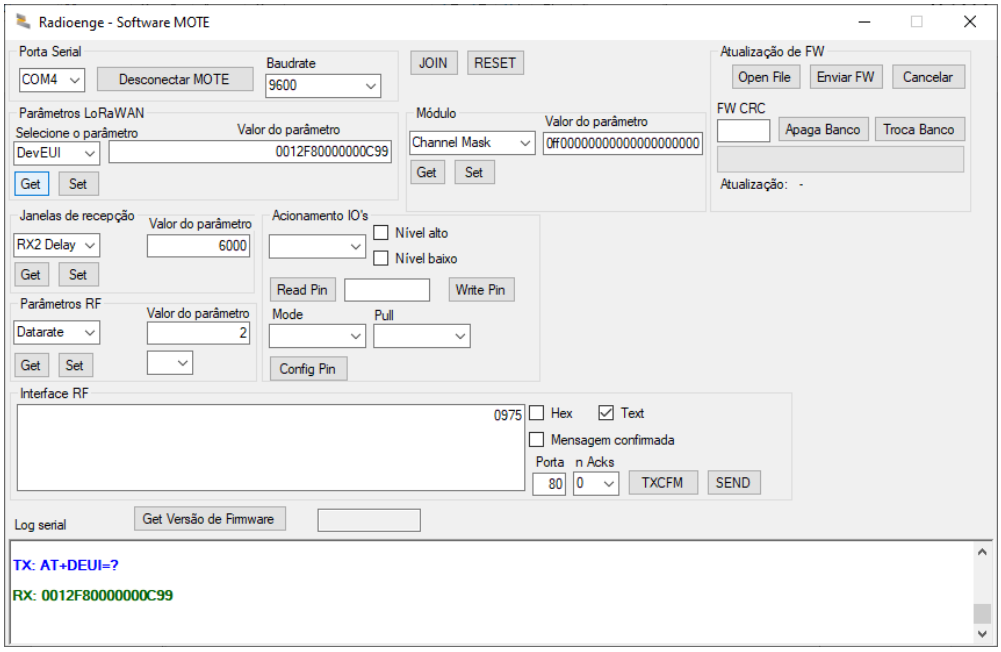


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A configuração do *Radioenge* foi realizada através do *software Radioenge-Software Mote* e conforme apresentado na

Figura *51*, foi possível coletar as informações pré-definidas do módulo e alterar diversas opções de acordo com a aplicação desenvolvida.

Figura 51 - Configuração do *Radioenge*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Os parâmetros de rede *LoRaWAN* que foram considerados para a comunicação entre o *Radioenge* e o ESP-32 e para envio dos dados do *Radioenge* para o gerenciador de aplicações estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Configuração do módulo *LoRaWAN*

Parâmetro		**Valor Considerado**	**Comentário**
Parâmetros *LoRaWAN*	*DevEui*	0012F80000000C99	Dados únicos do módulo considerado.
	AppEui	0101010101010101	
	AppKey	4607345DD2A4A0591 FFFCD162B1BB892	
	NwkSKey	F765CD8293D1CACF F0FD86DB0CE901A6	
	AppSKey	E7943E328401397ED F2DF68AFC187156	
	DevAddr	0162fff7	
Janelas de	*RX2 Frequency*	923300000	
	RX2 Datarate	8	
	Rx1 Delay	5000	
	Rx2 Delay	6000	

	JN1 Delay	5000	
	JN2 Delay	6000	
Parâmetros de RF	*Tx Power*	0	
	Datarate	3	SF9/125 *KHz* com *payload* de 115 bytes (máximo)
	ADR	0	ADR desabilitado
	SNR	0	
	RSSI	0	
Módulo	*Classe*	A	
	Join Mode	0	
	Join Status	1	
	Battery	254	
	Baudrate	9600	9600 *bps*
	Channel Mask	00ff00000000000000010000	
	N retransmission	8	
	Confirmed Message	0	
	Save From Counter	0	
	Save Auto Join	0	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Na primeira parte da validação experimental, uma análise da comunicação *LoRaWAN* da AMI foi realizada. Os seguintes requisitos para a comunicação foram definidos pela empresa fornecedora de gás:

1) frequência mínima de transmissão de dados de 1x/h (ou 24x/dia) para monitoramento contínuo e análise de dados;

2) Transmissão de todas as variáveis do processo descritas, que correspondem a um *payload* de 77 bytes por mensagem.

Considerando este *payload*, foi necessário ajustar o *DataRate* da aplicação para a opção 3, o qual possui o *Spreading Factor (SF*) 9 / 125 KHz e *payload* máximo de 115 bytes por mensagem. O módulo *LoRaWAN* teve de ser configurado com DR = 3 para permitir a transmissão do payload com as variáveis necessárias, evidenciando que a rede *LoRaWAN* pode ser aplicada na solução de AMI.

Também foi avaliado durante o desenvolvimento do trabalho a possibilidade de implementação de outra *LPWAN* junto a solução criada. Em relação a rede SigFox, suas características técnicas divergem dos requisitos deste trabalho,

dado que seu *payload* possui tamanho e frequência de envio limitado. Avaliando os aspectos técnicos, a rede *NB-IoT* atende aos requisitos do projeto, porém avaliando-se os aspectos comerciais, ela possui maior custo para utilização, onde o custo médio anual da comunicação *LoRaWAN* estava próximo ao valor mensal da rede *NB-IoT*.

Durante os testes da comunicação *LoRaWAN*, os envios de dados pelo módulo *LoRaWAN* e recebimento pela plataforma *ProIoT* foram analisados a fim de avaliar a taxa de conexões da solução. Nos testes operacionais do sistema considerou-se um período superior a 30 dias de envio de dados com envios de *payloads* a cada 10 minutos, o que totaliza mais de 4.000 envios de informação. Dado que a comunicação opera através de rádio frequência, verificou-se que a rede é sujeita a interferências externas, como por exemplo, fatores climáticos e possíveis manutenções programadas por parte da ATC. Desta forma, houveram cenários onde a taxa de comunicação variou, porém em um cenário geral, obteve-se um índice de 95% de comunicações realizadas com sucesso, comprovando sua segurança e confiabilidade para a aplicação.

No local onde os testes foram realizados, a cobertura de rede *LoRaWAN* foi provida por 2 gateways conforme a Figura 52. O primeiro gateway (G1) estava a 9,2 km de distância do módulo, o segundo gateway (G2) estava a 5,2 km de distância do módulo. Ressalta-se que a região dos testes não possui grandes zonas urbanas que poderiam contribuir significativamente com o resultado da comunicação obtido.

Figura 52 – Mapa dos Gateways próximos ao local de testes

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

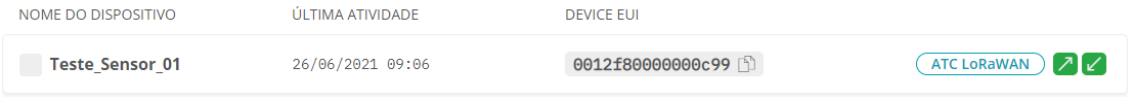
6.3. INTERFACE DE MONITORAMENTO E GESTÃO

Com o *Radioenge* devidamente parametrizado com as características necessárias para a aplicação, as informações consideradas foram atribuídas ao novo dispositivo que foi criado na plataforma *ProIoT* conforme a Figura 53 e Figura 54. Desta forma, os *payloads* gerados pelo ESP-32 foram visualizados dentro do servidor de aplicações.

Figura 53 - Criação do dispositivo na plataforma *ProIoT*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

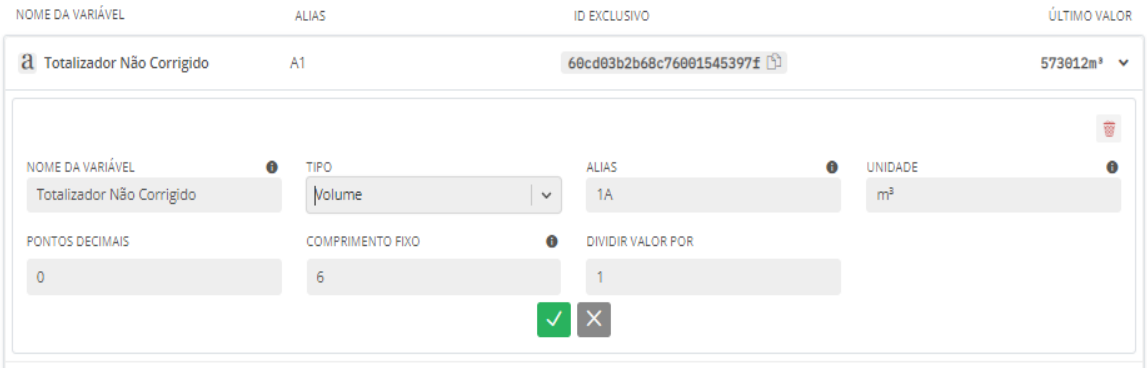
Figura 54 - Dispositivo cadastrado na plataforma *ProIoT*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A etapa seguinte consistiu na criação de todas as variáveis de processo dentro da plataforma *ProIoT* e conforme a Figura 55, para a criação de cada variável, é necessário atribuir a ela um alias, um nome, um tipo, o tamanho desta variável e a sua unidade de medida.

Figura 55 - Criação de variáveis dentro da plataforma *ProIoT*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Para a criação de todas as variáveis da aplicação dentro da plataforma *ProIoT*, considerou-se os parâmetros descritos na Tabela 6 e desta forma, o *payload* que foi enviado pelo dispositivo possui um padrão fixo a fim de possibilitar que os dados recebidos fossem atribuídos corretamente a todas as variáveis de processo que estão sendo monitoradas.

Tabela 6 - Variáveis de processo configuradas e atribuição do *Aliás* para método de separação do *payload*

Variável	**Tipo**	***Aliás***	**Unidade**	**Pontos Decimais**	**Tamanho (bytes)**	**Divisor**
Totalizador corrigido	Volume	G1	Nm^3	0	7	1
Totalizador não corrigido	Volume	A1	m^3	0	7	1
Vazão corrigida	-	B1	Nm^3/h	2	4	1
Temperatura	Temperatura	C1	ºC	2	5	1
Pressão	Pressão	D1	Bar	2	4	1
Fator de correção	-	E1	-	2	4	1
Fator Z	-	F1	-	2	4	1
Tampa	-	H1	-	0	1	1
Latitude	-	I1	º	6	9	1000000
Longitude	-	J1	º	6	9	1000000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Com esta configuração, foi possível enviar *payloads* a fim de validar que o formato que será considerado estava sendo interpretado corretamente. No

exemplo a seguir, enviou-se o *payload* “**A1**573012**B1**0.00**C1**0.00**D1**0.00**E1**0.00**F1**0.00**G1**2121130**H1**0**I1**-23402399**J1**-47381682” e a plataforma registrou os valores das variáveis conforme a Figura 56.

Para a criação do *dashboard* da solução, considerou-se alguns recursos gráficos de análise de dados existentes dentro da plataforma *ProIoT* e as telas criadas foram divididas em três categorias: dados gerais do cliente, painel de alarmes, dados em tempo real e análise histórica do cliente.

Figura 56 - *Payload* atribuído às variáveis do projeto

NOME DA VARIÁVEL	ALIAS	ID EXCLUSIVO	ÚLTIMO VALOR
Totalizador Não Corrigido	A1	60cd03b2b68c76001545397f	573012m³
Vazão	B1	61f9540d5c7387001fb5a3a9	0.00m³/h
Temperatura	C1	61f954713cb124002082d742	0.00°C
Pressão	D1	61f955f494c6a0002026705b	0.95bar
Fator Correção	E1	61f9560e5c7387001fb5a3ab	0.00-
Fator Z	F1	61f956283cb124002082d744	0.00-
Totalizador Corrigido	G1	61fa920594c6a000202670c2	2121130Nm³
Tampa	H1	61fa92253cb124002082d7db	0-
Latitude	I1	61fb29bb3cb124002082d846	-23.402399°
Longitude	J1	61fb29d53cb124002082d847	-47.381682°

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Conforme a Figura 57, os dados gerais do cliente apresentam as informações relevantes sobre a instalação física, como o tipo de medidor instalado, a geolocalização deste cliente e o consumo mensal de gás natural contratado.

O painel de alarmes apresenta cinco avaliações que, em caso de operação fora do padrão existente, gera o alarme ao usuário conforme a Figura 58. Os alarmes são referentes as faixas de pressão e vazão de operação, a detecção de possíveis vazamentos no local, a detecção de abertura indevida da porta do PTZ e a avaliação de consumo de gás em relação ao valor contratado mensal.

O painel de dados em tempo real apresenta os dados que foram coletados em campo conforme a Figura 59 e nele é possível verificar os dados referentes

as variáveis de pressão, temperatura, vazão corrigida, volume totalizado corrigido e não corrigido, fator de correção de volume de gás e fator Z.

O painel de análise histórica do cliente apresentado na Figura 60 mostra as variáveis de processo dos últimos 30 dias de operação. Este painel analisa o comportamento de um determinado cliente em relação ao seu perfil de consumo de gás. É possível avaliar possíveis reduções de consumo de gás provenientes de paradas de manutenção, finais de semana ou até mesmo aumentos não programados na demanda de gás natural.

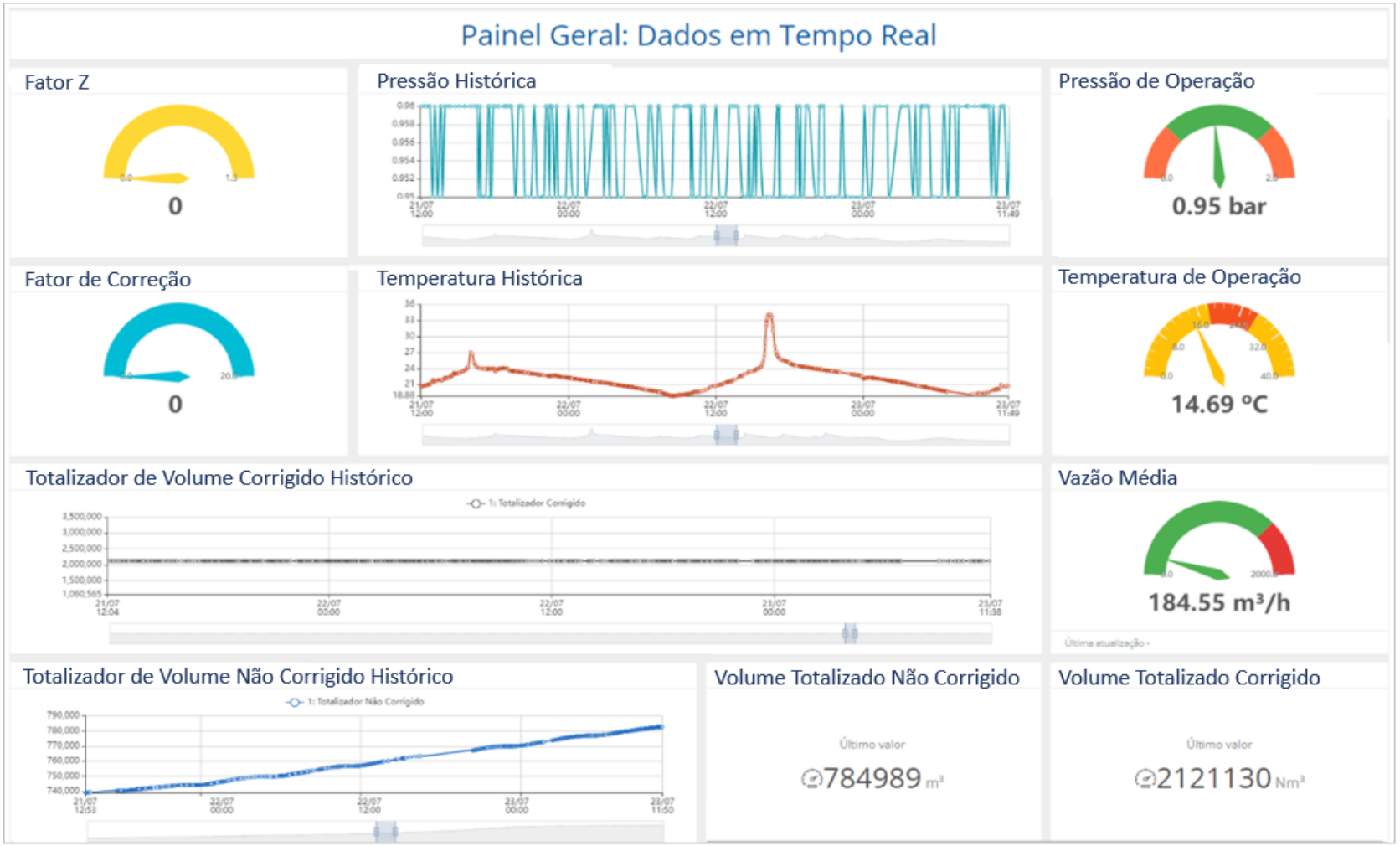
Figura 57 - *Dashboard* desenvolvido - Dados Gerais do Cliente

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 58 - *Dashboard* desenvolvido - Painel de Alarmes

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 59 - *Dashboard* desenvolvido - Dados em Tempo Real



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

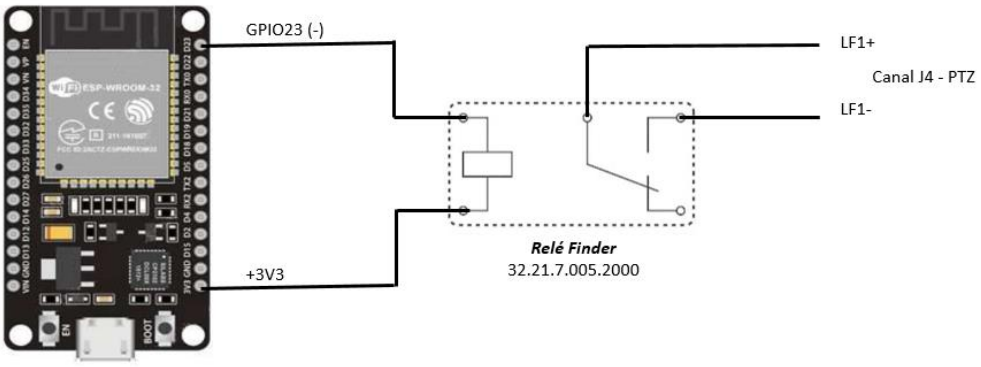
Figura 60 - *Dashboard* desenvolvido - Análise Histórica do Cliente

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

6.4. VALIDAÇÃO OPERACIONAL

A fim de realizar a validação de que a solução criada está operando conforme desejado, uma série de testes de estresse foram feitos, onde os dados gerados pelo PTZ foram lidos pela solução desenvolvida durante grandes períodos. Para isso, considerando que o medidor de vazão de gás com totalização de volume gera sinal pulsado proporcional ao volume medido, criou-se o simulador de vazão apresentado na Figura 61, onde o ESP-32 executa o comando para energização da bobina do relé, que por sua vez irá gerar sinais pulsados.

Figura 61 - Simulador de vazão desenvolvido para testes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

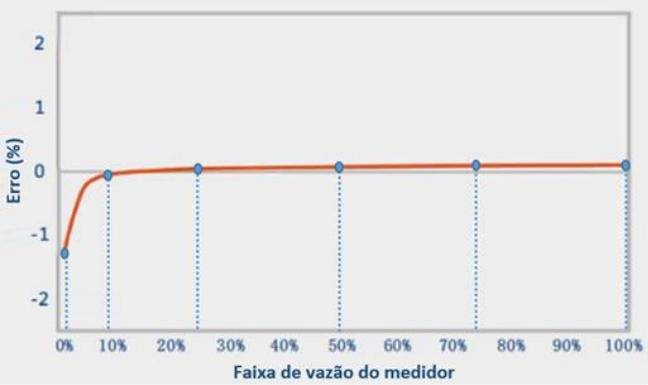
Para simular os valores desejados de vazão de processo, o algoritmo criado e instalado no ESP-32 comanda o relé conforme a Equação 2

$$tempo\ de\ chaveamento\ (s) = \frac{360}{vazão\ desejada\ (m^3/h)} \qquad 2$$

Foram realizados testes de operação na faixa de medição do medidor, onde foram selecionados 6 pontos da curva de calibração padrão do instrumento conforme Figura 62. O objetivo principal deste teste é avaliar e garantir que a leitura realizada não está perdendo algum dado gerado pelo canal pulsado do PTZ. Para este teste considerou-se as condições de um medidor de volume de

gás com totalização de volume do tipo G600, o qual possui a faixa mínima de operação de 4,41 m³ e a faixa máxima de 1000 m³.

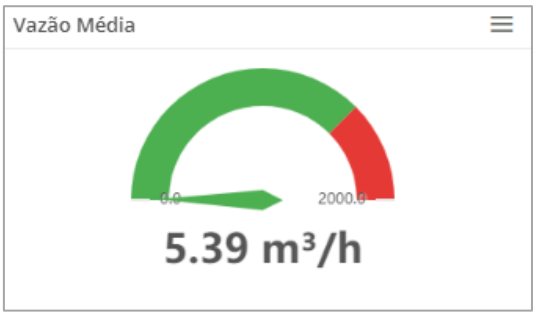
Figura 62 - Pontos de teste selecionados na curva de erro do medidor de vazão com totalização de volume



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

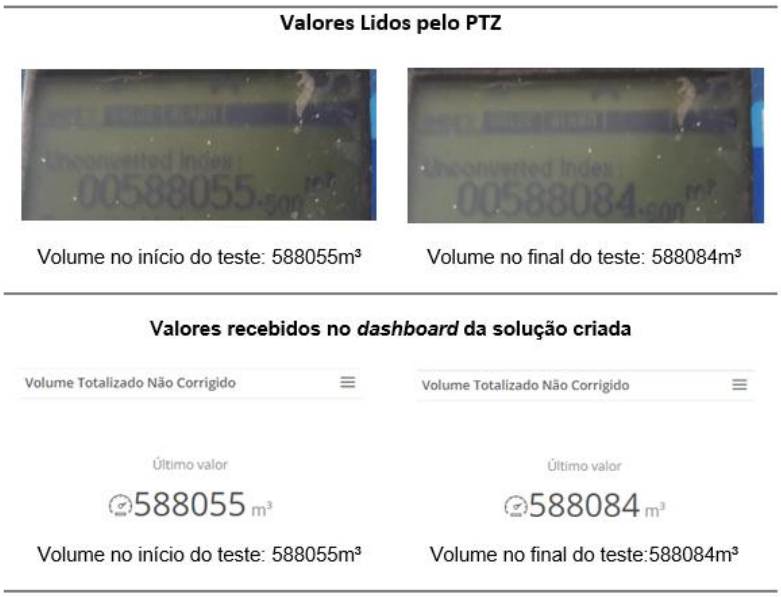
O primeiro consistiu no PTZ recebendo os pulsos gerados pelo simulador durante o período de 5 horas na condição onde o medidor operaria próximo a sua faixa mínima de operação, que é de 5,41 m³/h, conforme Figura 63. Ao final do período de teste, foi possível verificar que os dados apresentados pelo PTZ convergiam com os dados apresentados no *dashboard* da solução conforme a Figura 64.

Figura 63 - Faixa mínima de vazão gerado pelo simulador e lido pelo PTZ e pela solução criada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

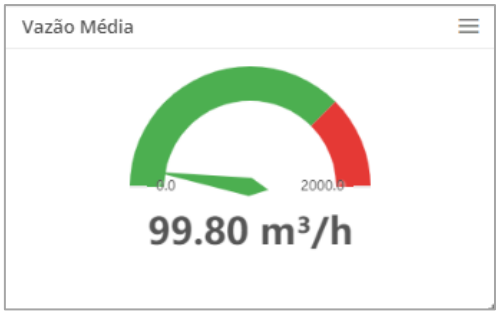
Figura 64 - Testes realizados simulando a vazão mínima do medidor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

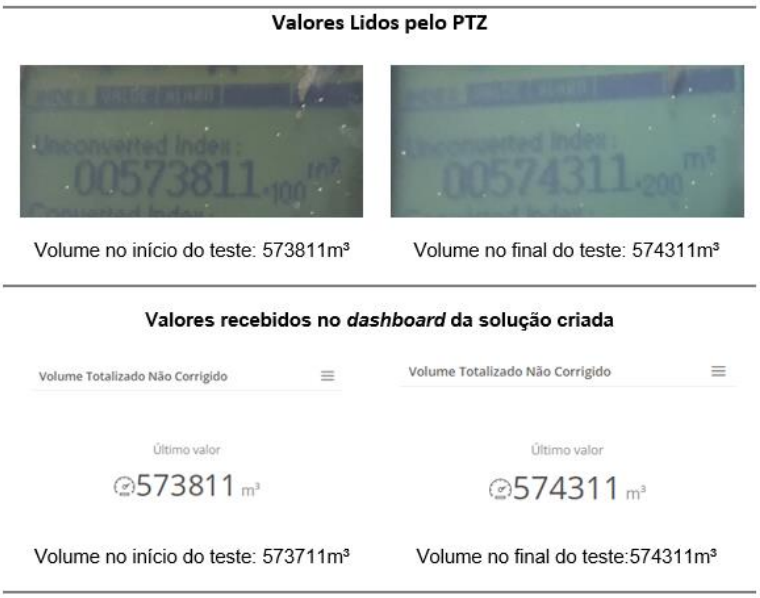
O segundo teste consistiu no PTZ recebendo os pulsos gerados pelo simulador durante o período de 5 horas na condição onde o medidor operaria próximo a 10% da sua faixa máxima, de 100 m³/h, conforme a Figura 65. Ao final do período de teste, foi possível verificar que os dados apresentados pelo PTZ convergiam com os dados apresentados no *dashboard* da solução conforme a Figura 66.

Figura 65 - Vazão próxima a 100 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

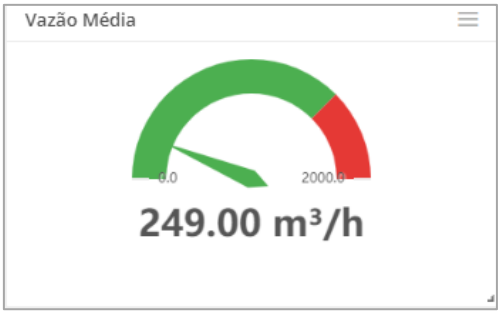
Figura 66 - Testes realizados simulando operação em 10% da vazão máxima do medidor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

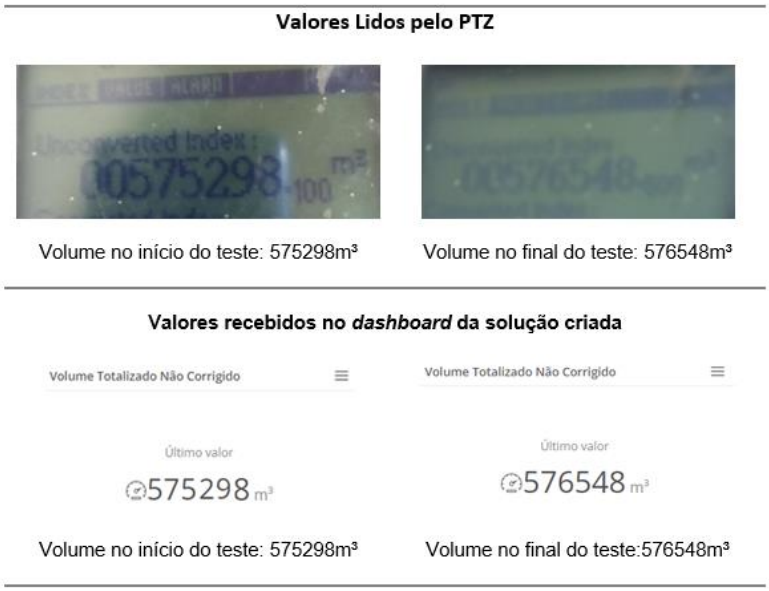
O terceiro teste consistiu no PTZ recebendo os pulsos gerados pelo simulador durante o período de 5 horas na condição onde o medidor operaria próximo a 25% da sua faixa máxima, de 250 m³/h, conforme a Figura 67. Ao final do período de teste, foi possível verificar que os dados apresentados pelo PTZ convergiam com os dados apresentados no *dashboard* da solução conforme a Figura 68.

Figura 67 - Vazão próxima a 250 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

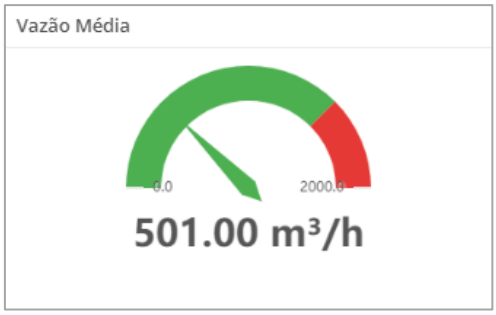
Figura 68- Testes realizados simulando operação em 25% da vazão máxima do medidor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

O quarto teste consistiu no PTZ recebendo os pulsos gerados pelo simulador durante o período de 5 horas na condição em que o medidor operaria próximo a 50% da sua faixa máxima, de 500 m³/h, conforme a Figura 69. Ao final do período de teste, foi possível verificar que os dados apresentados pelo PTZ convergiam com os dados apresentados no *dashboard* da solução conforme a Figura 70.

Figura 69 - Vazão próxima a 500 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada



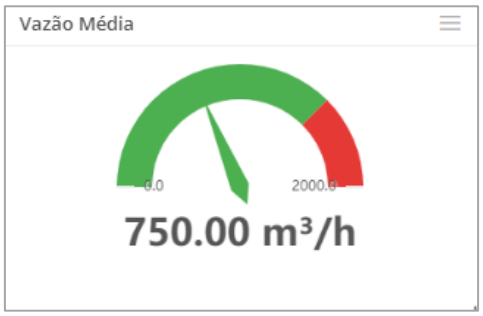
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 70 - Testes realizados simulando operação em 50% da vazão máxima do medidor

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

O quinto teste consistiu no PTZ recebendo os pulsos gerados pelo simulador durante o período de 5 horas na condição em que o medidor operaria próximo a 75% da sua faixa máxima, de 750 m³/h, conforme a Figura 71. Ao final do período de teste, foi possível verificar que os dados apresentados pelo PTZ convergiam com os dados apresentados no *dashboard* da solução conforme a Figura 72.

Figura 71- Vazão próxima a 750 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada



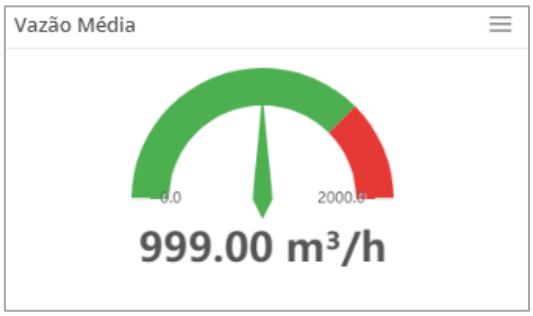
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 72- Testes realizados simulando operação em 75% da vazão máxima do medidor

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

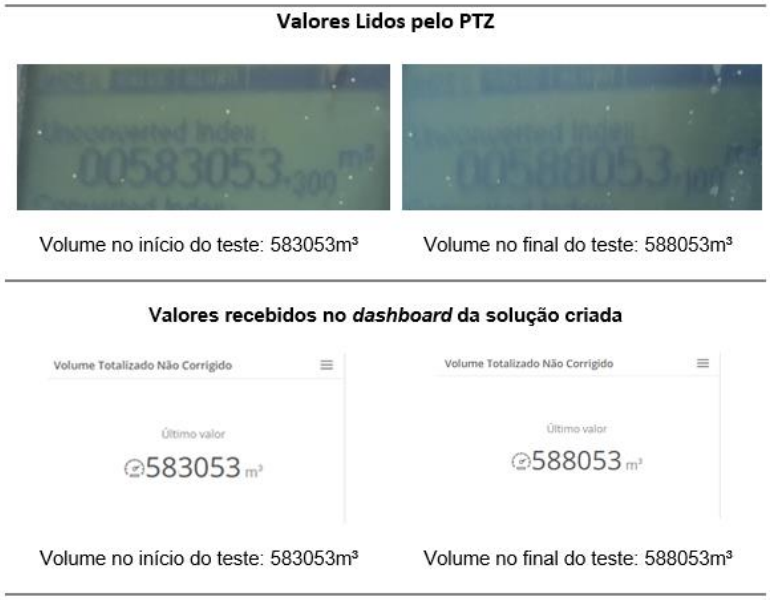
O último teste consistiu no PTZ recebendo os pulsos gerados pelo simulador durante o período de 5 horas na condição em que o medidor operaria próximo a 100% da sua faixa máxima, de 1000 m³/h, conforme a Figura 73. Ao final do período de teste, foi possível verificar que os dados apresentados pelo PTZ convergiam com os dados apresentados no *dashboard* da solução conforme a Figura 74.

Figura 73 - Vazão próxima a 1000 m³/h gerada pelo simulador e lida pelo PTZ e pela solução criada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 74 - Testes realizados simulando operação em 100% da vazão máxima do medidor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Com base nos testes realizados, foi possível validar que a solução desenvolvida está medindo corretamente os incrementos de pulsos que são gerados pelo PTZ, que são provenientes do incremento de volume de gás natural medido. O teste contemplou 6 pontos dentro de toda a faixa de operação de um medidor típico considerado na medição fiscal de gás natural. Dado que o medidor simulado gera 1 pulso a cada 0,1 m³ lido, durante todo o teste, que durou 30 horas, foram gerados 130.290 pulsos pelo simulador e nenhuma informação referente ao volume de gás computado foi perdida, comprovando que a solução criada atende quanto ao objetivo proposto neste trabalho. As informações consideradas no teste estão compiladas e apresentadas na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Dados considerados no teste operacional de validação da solução

Ponto de teste	Tempo para geração de 1 pulso (s)	Vazão média (m³/h)	Tempo Teste (horas)	Pulsos gerados pelo Simulador
Vazão mínima	66,54	5,41	5	290
10% vazão máxima	3,60	100	5	5000
25% vazão máxima	1,44	250	5	12500
50% vazão máxima	0,72	500	5	25000
75% vazão máxima	0,48	750	5	37500
Vazão máxima	0,36	1000	5	50000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Tabela 8- Dados coletados no teste operacional de validação da solução

Dados do teste	Dados do PTZ			Dados recebidos no *dashboard*			Validação da solução	
Ponto de teste	Valor totalizador de volume inicial (m³)	Valor totalizador de volume final (m³)	Valor volume computado no período (m³)	Valor totalizador de volume inicial (m³)	Valor totalizador de volume final (m³)	Valor volume computado no período (m³)	Erro entre medições de volume (%)	Comentário
Vazão mínima	588055	588084	29	588055	588084	29	0,0%	Teste satisfatório
10% vazão máxima	573811	574311	500	573811	574311	500	0,0%	Teste satisfatório
25% vazão máxima	575298	576548	1250	575298	576548	1250	0,0%	Teste satisfatório
50% vazão máxima	576696	579196	2500	576696	579196	2500	0,0%	Teste satisfatório
75% vazão máxima	579281	583031	3750	579281	583031	3750	0,0%	Teste satisfatório
Vazão máxima	583053	588053	5000	583053	588053	5000	0,0%	Teste satisfatório

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

6.5. ANÁLISE DE DADOS E GESTÃO INTELIGENTE DE GÁS

Após criado o módulo remoto, a etapa seguinte consistiu na validação das funções implementadas a fim de garantir que a solução desenvolvida está apta para a aplicação em campo. Para esta validação, considerou-se 4 testes:

- ✓ análise de perfil de consumo;
- ✓ detecção de violação física do equipamento corretor de volume PTZ;
- ✓ detecção de possível vazamento;
- ✓ monitoramento do consumo contratado de gás natural.

A análise de perfil de consumo tem como objetivo principal verificar se o medidor instalado em campo está operando dentro das faixas de vazão e pressão adequados.

A detecção de violação física do PTZ foi realizada a fim de garantir que, em caso de abertura indevida da tampa do instrumento, um alarme seja gerado no *dashboard* e possíveis tentativas de fraudes sejam constatadas.

A detecção de possível vazamento avaliará situações em que o medidor opera em faixas de vazão abaixo do valor mínimo recomendado pelo fabricante. Dado que se trata de uma aplicação para clientes industriais, a operação nestas faixas de vazão pode indicar possíveis vazamentos de gás natural no sistema.

O monitoramento do consumo contratado de gás natural irá avaliar o *dashboard* da solução durante o período de 1 mês a fim de validar que a solução é capaz de armazenar todos os dados coletados no período e que as informações apresentadas são coerentes com o cenário real.

6.5.1. Análise do perfil de consumo

Para verificação do perfil de consumo de vazão do cliente, a métrica considerada como referência é o medidor que está instalado no local, o qual possui recomendações quanto as suas faixas de operação. Sendo assim, o *dashboard* criado terá um painel de alarme que está configurado com as faixas mínimas e máximas de operação do medidor instalado. Caso a vazão de gás natural esteja fora destas faixas, o alarme é acionado para que as ações necessárias possam ser tomadas. Nos testes realizados, considerou-se a

simulação de um medidor G650, que possui a faixa mínima de medição de 5,41 m³/h e a faixa máxima de operação de 1000 m³/h.

O primeiro teste realizado para avaliação do recurso disponibilizado consistiu em simular o medidor operando em uma faixa de vazão inferior à sua faixa mínima de operação. Conforme a Figura 75, no teste realizado foi possível gerar o alarme para vazões abaixo da faixa nominal do medidor.

Figura 75 - Teste de alarme - consumo de gás abaixo da faixa mínima do medidor

Valor de vazão simulado | Alarme gerado

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

O segundo teste realizado para avaliação do alarme consistiu na simulação do medidor operando em uma faixa de vazão dentro da faixa de operação recomendado pelo fabricante. Conforme a Figura 76, no teste realizado o alarme informou que o medidor está operando corretamente em relação a sua faixa de operação.

Figura 76 - Teste de alarme - consumo de gás dentro da faixa do medidor

Valor de vazão simulado | Alarme gerado

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

O terceiro teste realizado para avaliação do alarme consistiu na simulação do medidor operando em uma faixa de vazão acima da faixa de operação recomendado pelo fabricante. Conforme a Figura 76 e Figura 77, no teste realizado foi possível gerar o alarme para vazões acima da faixa nominal do medidor.

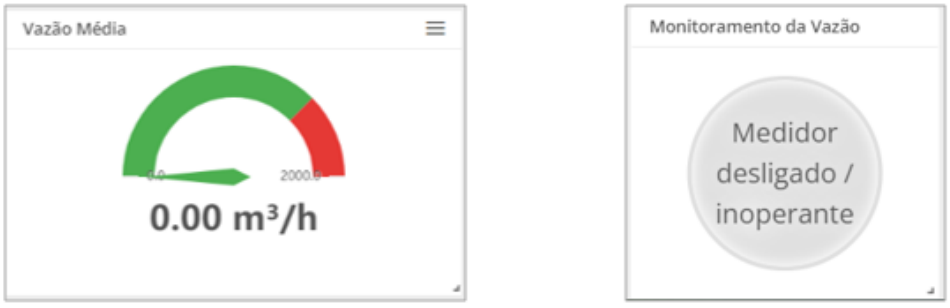
Figura 77 - Teste de alarme - consumo de gás acima da faixa máxima do medidor

Valor de vazão simulado | Alarme gerado

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

O quarto teste realizado verificou qual seria a mensagem no painel de alarme quando não houver consumo de gás natural. Conforme a Figura 78, o painel é capaz de informar quando o medidor estiver inoperante no processo.

Figura 78 - Teste de alarme - medidor inoperante no processo



Valor de vazão simulado | Alarme gerado

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Outra informação relevante no perfil de consumo de um cliente é a pressão que o gás natural é entregue a este usuário. Usualmente o processo possui um valor nominal de pressão, com uma tolerância superior e inferior de operação. A

fim de informar o usuário caso a pressão de gás seja entregue fora dessa tolerância, conforme a Figura 79, o último teste realizado validou este recurso que está disponível no *dashboard* da solução.

Figura 79 - Teste de alarme - Monitoramento de pressão

Alarme gerado em condição de baixa pressão | Informação gerada em condição de pressão dentro do range permitido | Alarme gerado em condição de alta pressão

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Através dos testes realizados foi possível validar que o alarme criado é capaz de informar ao usuário informações referentes ao perfil de consumo de gás natural. Como exemplos dos benefícios que este recurso pode trazer aos usuários, podem ser citados os aspectos abaixo:

- Caso um medidor opere em faixas superiores à vazão máxima, o tempo de desgaste de seus componentes pode ser acelerado;
- Caso um medidor opere fora da faixa de medição recomendada pelo fabricante, não há respaldo metrológico quanto a veracidade do valor medido, o qual apresentará erros de medição superiores ao estipulado pelas entidades competentes;
- Caso o medidor opere constantemente em uma faixa abaixo da vazão máxima, um medidor menor poderia ser considerado, pois além do custo menor do instrumento, o modelo menor possibilitará maior facilidade quanto as atividades de manutenção em campo.
- Em casos de fornecimento de gás em pressões fora do limite permitido, a rápida detecção da anomalia poderá ser feita, assim como todas as medidas necessárias para a sua correção.

6.5.2. Detecção de violação física do PTZ

Dado que o PTZ é um equipamento utilizado para medição fiscal, um aspecto a ser levado em consideração é as barreiras físicas a fim de garantir que o instrumento não seja violado para tentativas de fraudes. Desta forma, conforme Figura 80, todos os PTZs que são instalados em campo possuem um lacre metrológico que auxilia neste aspecto.

Figura 80 - Lacre metrológico instalado na tampa do PTZ

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Como forma de aumentar a segurança, a solução desenvolvida contemplou a instalação de um sensor *limit switch* na tampa do PTZ conforme a Figura 81 e ele é capaz de detectar a sua abertura gerar um alarme de processo ao usuário.

Figura 81 - Sensor instalado para detecção da tampa aberta do PTZ

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Durante os testes que foram realizados em bancada, conforme a Figura 82, foi possível validar que o alarme está sendo atualizado de acordo com a situação em que a tampa do PTZ se encontra.

Figura 82 - Teste de alarme - Abertura da tampa do PTZ

Tampa aberta do PTZ

Alarme gerado

Tampa fechada do PTZ

Alarme gerado

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Como principal ganho, este recurso é capaz de informar ao usuário em tempo real caso o lacre do PTZ seja violado e sua tampa aberta, possibilitando ao usuário a rápida ação contra possíveis tentativas de fraudes na medição fiscal de gás natural.

6.5.3. Detecção de possível vazamento

Um dos grandes benefícios que a solução desenvolvida disponibiliza ao usuário é o alarme para detecção de possíveis vazamentos de gás natural. Tratando-se de uma aplicação em clientes industriais que possuem como característica o elevado consumo de gás, a solução considera como possível vazamento de gás a medição de vazões abaixo da faixa mínima de operação do

medidor. Caso esse alarme seja gerado, o usuário poderá enviar uma equipe capacitada em campo a fim de avaliar o sistema e, caso aplicável, encontrar o ponto de vazamento de gás natural existente no sistema.

Conforme a Figura 83, foi simulado um valor de vazão abaixo da faixa mínima de medição do medidor considerado e o alarme indicando possível vazamento de gás natural no sistema foi gerado.

Figura 83 - Alarme de possível vazamento

Simulação de um possível vazamento | Alarme gerado

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Este recurso gerado na solução possui grande relevância para o processo, pois através do alarme gerado, pode ser verificada de forma rápida possíveis vazamentos de gás natural no processo. Com isso, o usuário ganha tempo e assertividade quanto a atuação em campo, evitando se assim possíveis acidentes e possíveis necessidades de interrupção no fornecimento de gás natural ao cliente final.

6.5.4. Monitoramento do consumo contratado

Os clientes usuários de gás natural consideram usualmente o faturamento mensal para pagamento da quantidade de gás que sua unidade consumiu. Desta forma, foi realizado o monitoramento de consumo contratado de um usuário para a validação da solução em períodos maiores.

Para isso, obteve-se os dados de consumo de um cliente aleatório e estes dados foram inseridos no simulador desenvolvido para que ele replicasse este comportamento no teste de bancada. A Figura 84 apresenta o consumo de gás no período de um mês e nele é pode-se notar que este cliente não possui cargas

consumidoras de gás natural que operem constantemente dentro do período analisado.

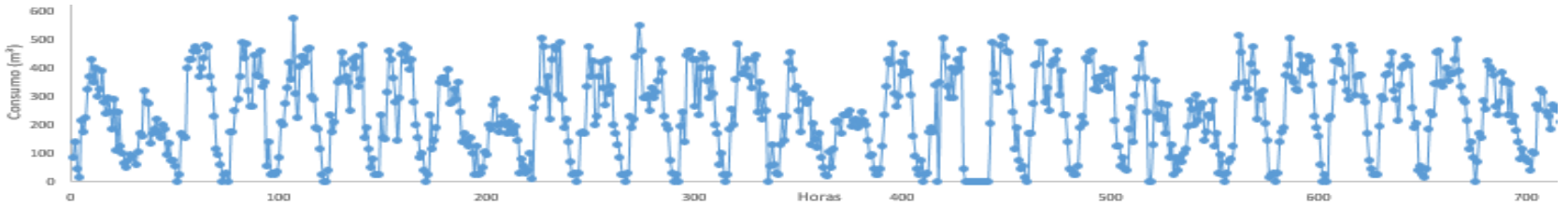
Com estes dados inseridos dentro do simulador, o teste realizado em bancada teve a duração de um mês e os dados lidos pelo PTZ foram enviados para o *dashboard* da solução criada conforme a Figura 85.

Realizando a sobreposição das duas informações, conforme a Figura 86, é possível validar que a solução foi capaz de realizar o monitoramento correto durante todo o período ao qual o teste foi submetido.

O teste realizado tinha como função principal a validação de alguns aspectos da solução, os quais são descritos a seguir:

- O módulo desenvolvido foi capaz de operar ininterruptamente, sem a necessidade de intervenção para correções de falhas;
- A comunicação *LoRaWAN* operou conforme esperado, onde os dados foram enviados ao *dashboard* da solução com a periodicidade esperada;
- O local considerado para o teste fica em uma região afastada, onde somente estão disponíveis 3 gateways *LoRaWAN*. Mesmo com esta característica, os dados trafegaram conforme desejado;
- Os dados gerados foram lidos e enviados corretamente ao *dashboard* durante todo o mês de teste, comprovando que a solução é adequada para sua função.

Figura 84 - Dados de consumo de gás inseridos no simulador

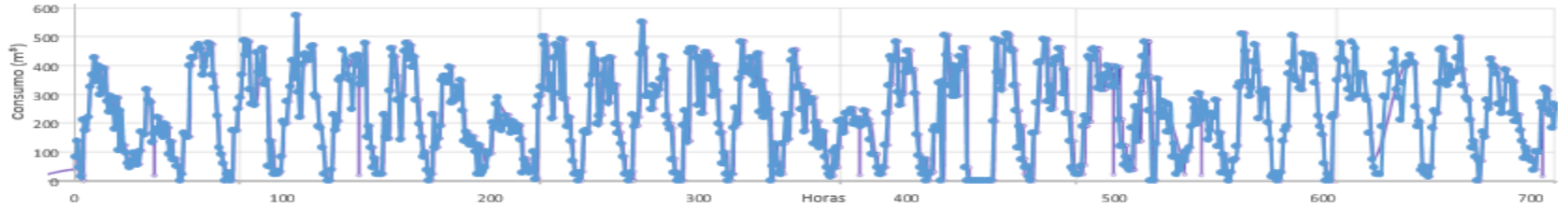


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 85 - Dados de consumo de gás recebidos no *dashboard* da solução criada

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Figura 86 - Sobreposição entre os dois dados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

6.6. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs o desenvolvimento de uma solução de AMI para medição remota de consumidores industriais de gás natural usando IoT. Para isso foi desenvolvido um módulo eletrônico remoto capaz de coletar os dados de processo necessários para o monitoramento e faturamento de um determinado consumidor industrial de gás natural. Esse módulo remoto utilizou a comunicação sem fio em longa distância através do protocolo *LoRaWAN* para transmissão dos dados de medição do processo para uma plataforma de IoT. A plataforma *ProIoT* foi utilizada para gerenciamento da comunicação, monitoramento e gerenciamento dos dados coletados dos medidores.

Em se tratando das melhorias aplicadas ao método tradicional de faturamento de gás natural, discutiu-se neste estudo a viabilidade em implementar as *LPWANs* como forma alternativa para coleta dos dados dos clientes industriais de gás natural. A rede *LoRaWAN* permitiu que a aplicação coletasse do corretor de gás tipo *PTZ* os dados das variáveis de processo de forma simples, confiável, com baixo custo envolvido e com baixo consumo elétrico, viabilizando a sua implementação de forma massiva.

No aspecto de melhoria na disponibilidade de dados, a solução proposta possibilita que o usuário tenha o acesso dos dados de processo em tempo real. Isso permite que análises sejam realizadas preventivamente e não corretivamente, agregando valor ao negócio.

Além da inclusão de algumas variáveis de processo na solução, a melhoria na análise dos dados está associada na utilização das variáveis de processo já existentes para a criação de novas informações. Por exemplo, com a variável de vazão, a solução desenvolvida é capaz de gerar dados sobre o perfil de consumo de um usuário, avaliar se o medidor está operando dentro dos limites recomendados e se o consumo de gás no período está de acordo com o valor contratado.

Se comparado com os métodos tradicionais de faturamento de gás natural em clientes, a solução proposta agrega valor quanto a redução do custo envolvido, pois além de utilizar dispositivos eletrônicos acessíveis financeiramente, a rede de comunicação *LoRaWAN* possui custo mensal inferior

as redes 3G/4G, onde a contratação de um plano anual da comunicação *LoRaWAN* é similar a um plano mensal de rede 3G/4G.

Como diferencial a publicações anteriores, o foco principal deste trabalho foi na utilização das informações geradas a fim de agregar valor ao processo de faturamento de gás natural. Com os dados de processo disponíveis, com os alarmes gerados e com o dashboard criado, novas formas de atuação preventiva são possíveis, otimizando se assim o processo de medição fiscal de gás natural.

7. CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou o desenvolvimento de uma AMI para gestão inteligente de gás natural de clientes industriais. A arquitetura proposta para a AMI é simples e modular, podendo ser oferecida como um serviço, de forma flexível, escalável e customizada para cada cliente. Essa arquitetura é baseada em três elementos: módulo remoto de aquisição de dados, comunicação sem fio de longa distância usando *LoRaWAN* e interface de gestão inteligente de gás natural para clientes industriais.

O módulo remoto de aquisição de dados do processo de medição fiscal de gás natural (provenientes do equipamento corretor de volume de gás tipo PTZ) desenvolvido é simples, incorporando as funcionalidades de aquisição de dados e comunicação necessárias e permitindo ser conectado e alimentado eletricamente pelo PTZ. Este módulo é o único equipamento adicional que necessita ser alocada no cliente, o que facilita a implantação da solução de AMI. A escolha do protocolo *LoRaWAN* como solução de comunicação para a AMI foi adequada, cumprindo todos os requisitos de comunicação especificados para a AMI aplicada à clientes industriais.

O uso de soluções comerciais para a conectividade *LoRaWAN* e plataforma de IoT permitem, sem a necessidade de implantação de infraestrutura de comunicação privada, obter uma solução flexível e customizável de acordo com as necessidades de comunicação da aplicação. Essa interface opera na nuvem, facilitando seu acesso e utilização por parte dos clientes e usuários da AMI.

A interface de gestão inteligente de gás natural desenvolvida apresenta os coletados de forma amigável ao usuário, facilitando assim o entendimento sobre o comportamento do consumo de gás no cliente industrial. Além do menor custo para o monitoramento contínuo da custódia de gás natural para o cliente industrial, as funcionalidades de gestão inteligente implantadas contribuem para o avanço do modelo de negócio atualmente existente de medição, faturamento e de prevenção dos ativos envolvidos no processo de custódia de gás natural em clientes industriais.

Para validação da AMI, diversos testes experimentais realizados contemplaram todos os cenários passíveis de análise e funcionalidades implementadas. Em todos os testes realizados, a solução de AMI apresentou

adequados para a aplicação na medição fiscal de gás natural de clientes industriais.

Trabalhos futuros objetivam desenvolver novas funcionalidades de gestão inteligente de gás natural, com foco na predição de falhas em medidores e do consumo de gás do cliente.

REFERÊNCIAS

ABB. **NX19 Supercompressibility Equation using Fixed FtFp**. 2003.

LORAWAN - Roaming agora disponível em mais de 25 países. **Associação Brasileira de Internet das Coisas,** 2021. Disponível em: <https://abinc.org.br/lorawan-roaming-agora-disponivel-em-mais-de-25-paises>. Acesso em 17 de Abril de 2021.

AMERICAN GAS ASSOCIATION. **Report nº3-1: Orifice metering of natural gas and other related hydrocarbon fluids - concentric, square-edged orifice meters part 1: general equations and uncertainty guidelines.** 2013.

AMERICAN GAS ASSOCIATION. **Report nº7 - Measurement of natural gas by turbine meters.** 2006.

AMERICAN GAS ASSOCIATION**. Report nº9 - Measurement of Gas by Multipath Ultrassonic Meters.** 2017.

AMERICAN GAS ASSOCIATION;. **Par Research Project NX19.** 1956.

AMERICAN GAS ASSOCIATION;. **Report nº11: Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter.** 2013.

AMERICAN GAS ASSOCIATION;. **Report nº8 - Compressibilty Factors of Natural Gas and Other Related.** 2017.

INFRAESTRUTURA sem fio para viabilizar um mundo conectado. **American Tower do Brasil,** 2021. Disponível em: <https://americantower.com.br/pt/index.html>. Acesso em 18 de Janeiro de 2021.

ARAUJO, E., e O. L. QUIBAO. A importância do cálculo de ressonância na medição de temperatura. **Facens**, 2017. Disponível em: <http://www3.facens.br/pergamumweb/vinculos/000024/00002433.pdf>. Acesso em 18 de Maio de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14903: Gás natural — determinação da composição química por cromatografia em fase gasosa.** São Paulo, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14978 Parte 1: Conversores de volume de gás - Terminologia, classificação, faixas de medição e condições estipuladas de funcionamento.** São Paulo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15213: Gás natural e outros combustíveis gasosos - cálculo do poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa e índice de wobbe a partir da composição.** São Paulo, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;. **NBR 14978 Parte 2: Conversores de volume de gás - Tipo PTZ.** São Paulo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;. **NBR 14978 Parte 3: Conversores de volume de gás - Computadores de vazão.** São Paulo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;. **NBR 14978 Parte 4: Conversores de volume de gás - Instalação, comissionamento, validação e monitoramento da medição.** São Paulo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;. **NBR 14978 Parte 5: Conversores de volume de gás - Instrumentos de medição e sensores associados.** São Paulo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;. **NBR 16607: Fator de Conversão de Volume de Gás.** São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;. **NBR 17025: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração.** São Paulo, 2017.

BERNI, A., e W. GREGG. On the utility of chirp modulation for digital signaling. **IEEE Transactions on Communications**, 1973.

CHAUDHARI, B. S., M. ZENNARO, e S. BORKAR. LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations. **Future Internet**, 2020, 3 ed.

COELHO, A. D., B. G. DIAS, W.O. ASSIS, F. A. MARTINS, e R. C. PIRES. Monitoring of Soil Moisture and Atmospheric Sensors with Internet of Things (IoT) Applied in Precision Agriculture. **XIV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE)**, 2020.

OS 5 principais tipos de medidores de vazão. **Conaut,** 2021. Disponível em: <https://www.conaut.com.br/blog/104-os-cinco-principais-tipos-de-medidores-de-vazao>. Acesso em 19 de Maio de 2021.

EGLI, P. LPWAN - Overview of emerging Technologies for low power wide area networks in internet of things and M2M scenarios. **TMC,** 2015. Disponível em: <https://pb.net/fileadmin/TMC/2017_2018/lora.pdf>. Acesso em 20 de Junho de 2021.

CONHECENDO o ESP32 - Introdução. **Eletrogate,** 2021. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/conhecendo-o-esp32-introducao-1/>. Acesso em 10 de fevereiro de 2022.

FLOBOSS™ 107 Flow Manager. **Emerson Automation Solutions,** 2021. Disponível em: <https://www.emerson.com/pt-br/catalog/emerson-floboss-107-pt-br>. Acesso em 27 de março de 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Portaria de Aprovação nº 150**. 03 de Maio de 2020. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002638.pdf>. Acesso em 15 de Maio de 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION;. **6974 parte 1 - natural gas — determination of composition and associated uncertainty by gas chromatography — part 1: general guidelines and calculation of composition.** 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION;. **6976 natural gas — calculation of calorific values, density, relative density and wobbe indices from composition.** 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY ;. **OIML R 137 partes 1 e 2.** 2012.

CORUS - Guia de instalação versão V2.7. **Itron**, 2014. Disponível em: < https://www.accellsolutions.com/wp-content/uploads/2023/01/Accell_RF1-G6_03-21_PT_vAA_compressed.pdf>. Acesso em 21 de Outubro de 2021.

ARQUITETURA da Rede LoRaWAN. 2021. **LoRa Alliance,** 2021**.** Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/lora/arquitetura.htm>. Acesso em 20 de Maio de 2021).

WHY Utilities are choosing Smart LoRaWAN connectivity. **LoRa Alliance,** 2021. Disponível em: <https://lora-alliance.org/resource_hub/why-utilities-are-choosing-smart-lorawan-connectivity>. Acesso em 31 de Novembro de 2022.

Melo, P. Introdução ao LPWAN (Low Power Wide Area Network). **Embarcados**, 2017. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/introducao-ao-lpwan/>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2021.

MODSCAN - Configurações. **Modscam,** 2020. Disponível em: <https://software.com.br/p/modscan>. Acesso em 09 de Fevereiro de 2022.

NUGROHO C., WIBISONO G. NB-IoT Planning in Jakarta Area for Smart Meter Utilities. **IEEE**, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9074629>. Acesso em 29 de maio de 2021.

PERASSO, V. O que é a 4ª revolução Industrial e como ela deve afetar nossas vidas. **BBC**, 2016. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-37658309>. Acesso em 20 de Maio de 2021.

PEREIRA, A., e E. O. SIMONETTO. Indústria 4.0: Conceitos e perspectivas para o Brasil. **UninCor,**2018.Disponível em: <http://periodicos.unincor.br/index.php/revistaunincor/article/view/4938/pdf_808> Acesso em 20 de Junho de 2021.

PEREIRA, E. M. Plataforma Industrial de Internet das Coisas. **Faculdade de engenharia da Universidade do Porto**, 2018. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/114137>. Acesso em 12 de maio de 2021.

SCHREIBER, F. et. al. Application of the IoT Paradigm for Supervision in the Utilities Industry. **13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, 2018. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8627211>. Acesso em 27 de agosto de 2021.

SILVA, F. LoRaWAN pra comunicações inteligentes de redes elétricas inteligentes em áreas suburbanas e rurais. **UFSM**, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/19446>. Acesso em 12 de Maio de 2021.

SOLAGNA, E. A. Análise de perdas de pacotes de uma rede LoRaWAN. **UFFS**, 2020. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/1913>. Acesso em 12 de junho de 2021.

SOUSA, R. Primeira Revolução Industrial. **Brasil Escola**, 2021. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/primeira-revolucao-industrial.htm>. Acesso em 20 de Maio de 2021.

SOUSA, R. Segunda Revolução Industrial. **Brasil Escola**, 2021. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/historiag/segunda-revolucao-industrial.htm>. Acesso em 20 de Maio de 2021.

SOUSA, R. Terceira Revolução Industrial. **Brasil Escola**, 2021. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/terceira-revolucao-industrial.htm>. Acesso em 20 de Maio de 2021).

SOUSA, R., e C. MOURA. IoT aplicado ao monitoramento inteligente de distribuição de água. **Unicamp**, 2018. Disponível em: < https://smartcampus.prefeitura.unicamp.br/pub/artigos_relatorios/Rafael-IoT_Aplicado_ao _Monitoramento_Inteligente_de_Distribuicao_de_Agua.pdf>. Acesso em 10 de Setembro de 2020.

SOUZA, P. M. Análise sobre as Tecnologias Disponíveis em Rede LPWAN. **UEL**, 2018. Disponível em: <http://www.uel.br/cce/dc/wpcontent/uploads/Paulo_Preliminar.pdf>. Acesso em 07 de Junho de 2021.

GUIA de Conectividade IoT: LPWA. **Teleco**. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/lpwa.asp>. Acesso em 19 de Janeiro de 2021.

V., MARCOS. Avaliação de Dispositivos de Rastreamento em uma Rede LoRaWAN no Contexto de Cidades Inteligentes. **SBC**, 2020. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/courb/article/view/12349>. Acesso em 25 de junho de 2021.

LoRaWAN network rolls out in France. **Smart Energy,** 2022. Disponível em: < https://www.smart-energy.com/industry-sectors/smart-water/lorawan-network-rolls-out-in-france/>. Acesso em 10 de Março de 2023.

8. APÊNDICES

8.1. ANEXO 1 - GRANDEZAS ENVOLVIDAS E EQUACIONAMENTOS GERAIS

Com base na teoria clássica da termodinâmica, o equacionamento para a correção de volume de gás natural é realizado conforme a Equação 3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

$$Vb = CF \,.V \qquad 3$$

Onde:

Vb = Volume nas condições de base

CF = Fator de conversão de volume de gás

V = Volume nas condições de operação

O fator de conversão de volume do gás, por sua vez, pode ser expresso pela Equação 4:

$$CF = \frac{P}{Pb}.\frac{Tb}{T}.\frac{Zb}{Z} \qquad 4$$

Onde:

P = Pressão absoluta na condição de operação

Pb = Pressão absoluta na condição de base

Tb = Temperatura absoluta na condição de base

T = Temperatura termodinâmica (ou de operação)

Zb = Fator de compressibilidade na condição de base

Z = Fator de compressibilidade na condição de operação

Outra forma mais simplificada de expressar o fator de correção do gás é conforme a seguir:

$$CF = PF.TF.ZF \quad (5)$$

Onde:

$$PF = \frac{P}{Pb} \quad (6)$$

$$TF = \frac{Tb}{T} \quad (7)$$

$$ZF = \frac{Zb}{Z} \quad (8)$$

E o fator de compressibilidade nas condições de operação pode ser calculado conforme a Equação 9:

$$Z = \frac{Vm\ (real)}{Vm\ (ideal)} \quad (9)$$

Ou seja, o fator de compressibilidade nas condições de operação nada mais é do que a razão entre o volume de uma massa arbitrária de gás a uma pressão e temperatura especificadas e o volume de uma mesma massa de gás submetida às condições calculadas através da lei dos gases ideais. Na teoria clássica dos gases, é presumido que todo gás possui comportamento ideal e desta forma, a equação dos gases ideias sempre seria seguida:

$$P.V = n.R.T \quad (10)$$

Onde:

n= Número de mols

R= Constante universal do gás

Em gases ideais a distância entre as moléculas é grande o suficiente para que influências da atração com outras moléculas seja desprezível. Porém, no caso do gás natural que não é um gás ideal, quando as pressões de operação

aumentam ou as temperaturas de operação diminuem, as moléculas se aproximam, resultando em um volume ocupado menor que o previsto pela lei dos gases ideais. A esta característica físico-química do gás natural, é atribuído o nome de supercompressibilidade e ela deve ser compensada dentro da equação dos gases ideias através da adição do fator de compressibilidade, conforme abaixo.

$$PxV = Z.n.R.T \qquad 11$$

Em 1956 o comitê da *Pipeline Research* publicou o documento chamado *Par Research Project NX19* (ABB, 2003), o qual possui a base para a aplicação do fator de supercompressibilidade na *American Gas Association* (AGA). Neste documento, o fator de supercompressibilidade é obtido através de cinco variáveis: pressão e temperatura de operação, a densidade específica, mols percentuais de CO2, N2 do gás natural, que devem estar dentro das faixas indicados na Tabela 9.

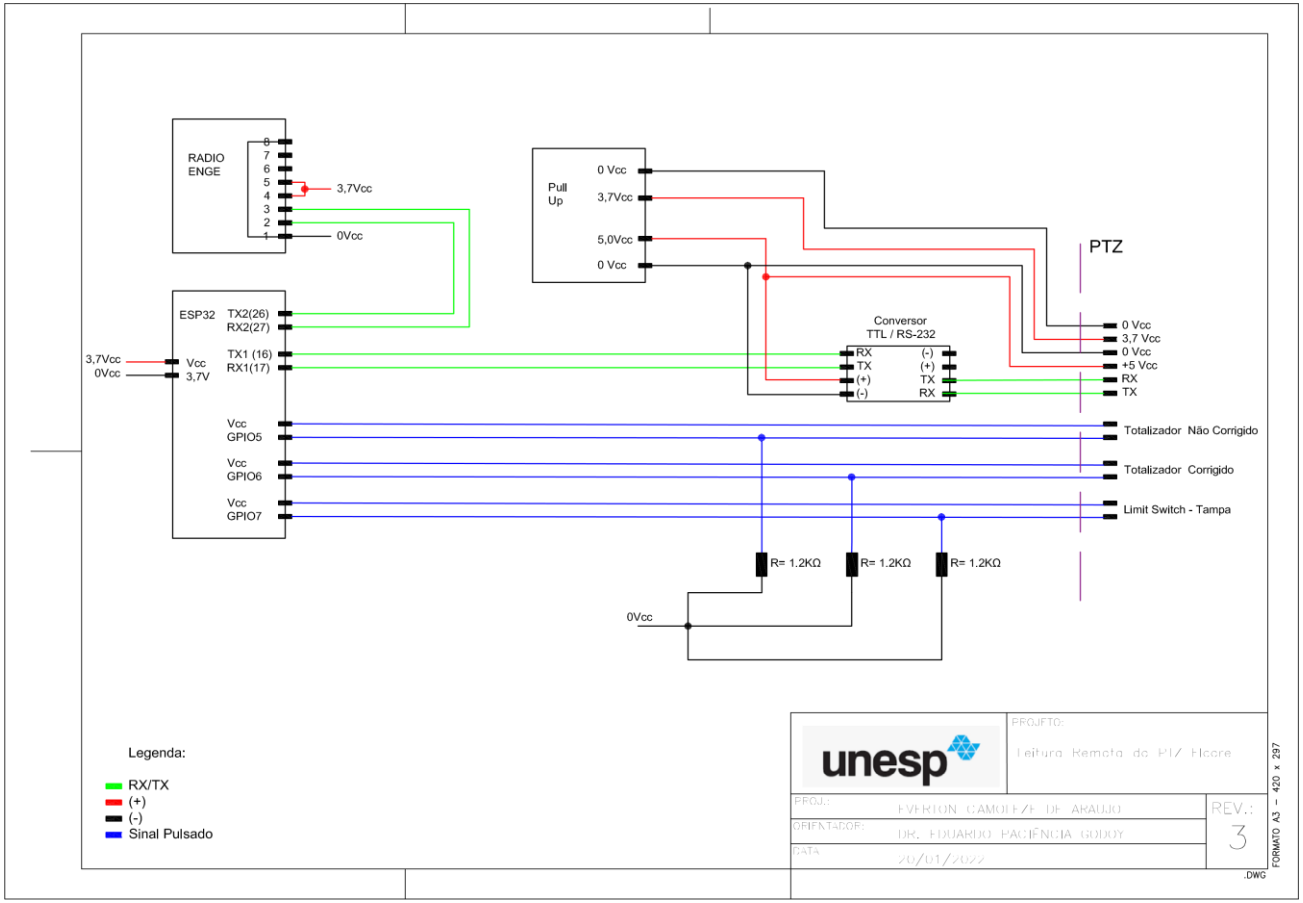
Tabela 9 - Faixas das variáveis para cálculo de Z com base na NX19

Variável	Valor inferior	Valor Superior
Pressão	0 psi	5.000 psi
Temperatura	-40 ºF	240 ºF
Densidade específica	0,554	0,750
%CO2	0%	15%
%N2	0%	15%

Fonte: (AMERICAN GAS ASSOCIATION, 1956)

8.2. ANEXO 2 - CIRCUITO ELETRÔNICO DO MÓDULO REMOTO

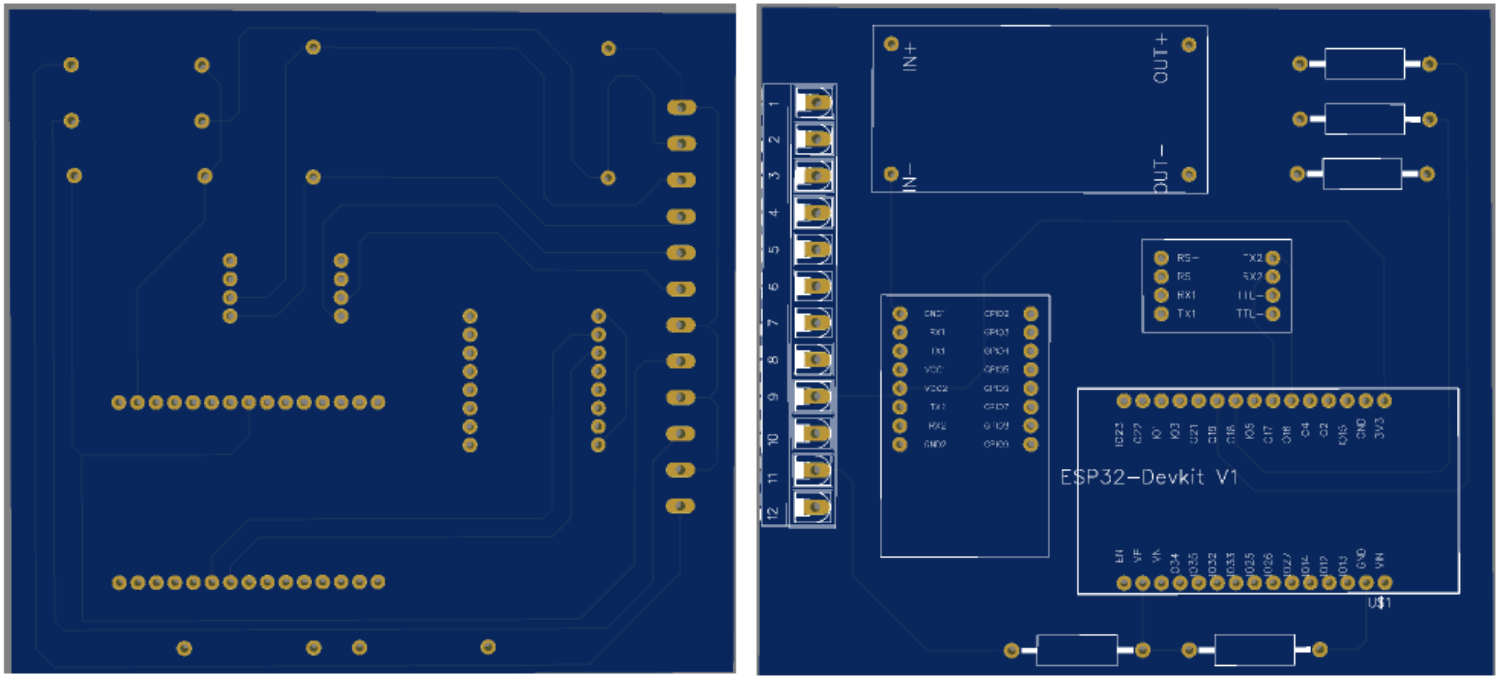
Figura 87 - Esquemático do circuito



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

8.3. ANEXO 3 - PCB DO CIRCUITO ELETRÔNICO

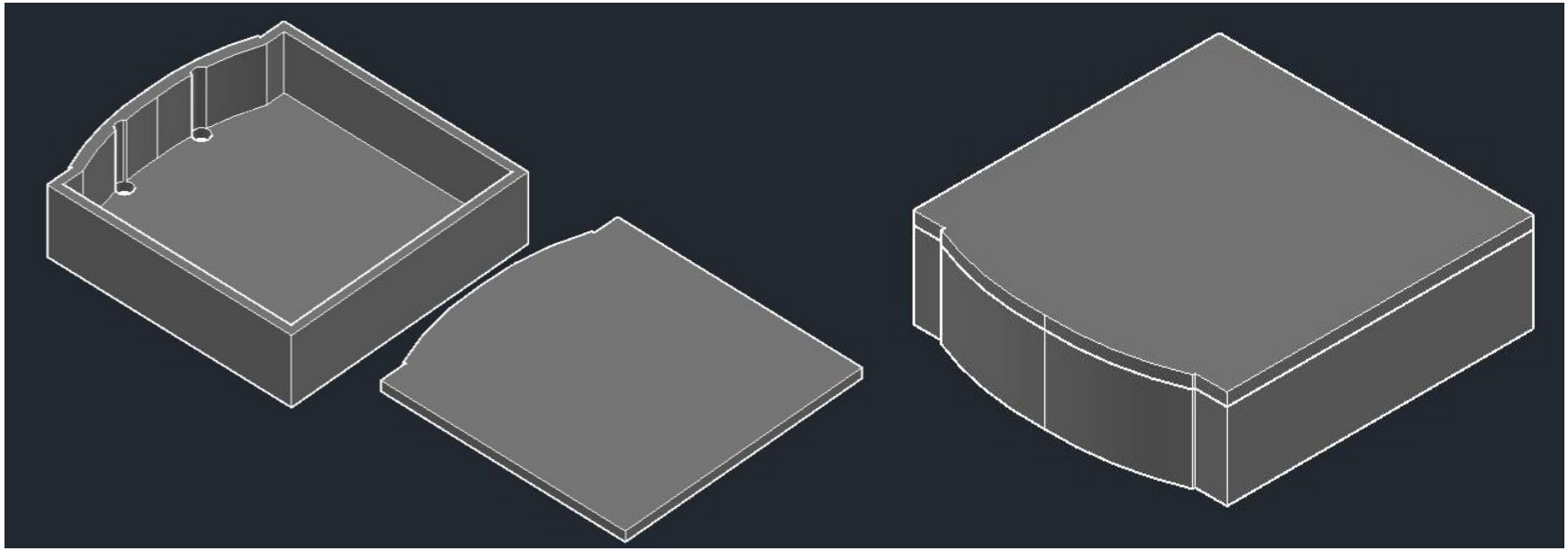
Figura 88 - PCB da placa desenvolvida: Vista inferior e vista superior



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

8.4. ANEXO 5 - INVÓLUCRO DO MÓDULO DESENVOLVIDO

Figura 89 - Invólucro do circuito eletrônico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022