



**INSTITUTO
FEDERAL**
Paraíba

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Campus João Pessoa

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação

Nível Mestrado Profissional

ÁTILA DE SOUZA MEDEIROS

**MONITORAMENTO E MEDIÇÃO DE ÁGUA EM UM
CAMPUS INTELIGENTE COM PLATAFORMAS DE IOT**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOÃO PESSOA

2023

Átila de Souza Medeiros

**Monitoramento e medição de água em um campus inteligente
com plataformas de IoT**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia da Informação, pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB.

Orientador: Prof^o. D.Sc. Ruan Delgado Gomes.
Coorientador: Prof^o. D.Sc. Anderson Fabiano
Batista Ferreira da Costa.

João Pessoa

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

M488m Medeiros, Átila de Souza.
Monitoramento e medição de água em um campus inteligente com plataformas de IoT/ Átila de Souza Medeiros. – 2023.
132 f. : il.
Dissertação (Mestrado -Tecnologia da Informação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação, João Pessoa, PB, 2023.
Orientador: Prof^o. D.Sc. Ruan Delgado Gomes.
Coorientador: Prof^o. D.Sc. Anderson Fabiano Batista Ferreira da Costa.

1. Medição inteligente de água 2. Metrologia - tecnologias 3. Dojot 4. Plataforma IoT 5. LoRa® I. Título

CDU 628.17:004(043)

Lucrecia Camilo de Lima

Bibliotecária - CRB 15/132



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO

ÁTILA DE SOUZA MEDEIROS

**MONITORAMENTO E MEDIÇÃO DE ÁGUA EM UM CAMPUS INTELIGENTE COM PLATAFORMAS
DE IOT**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologia da Informação, pelo Programa de Pós- Graduação em Tecnologia da Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB - Campus João Pessoa.

Aprovado em 15 de fevereiro de 2023

Membros da Banca Examinadora:

Dr. Ruan Delgado Gomes

IFPB - PPGTI

Dr. Anderson Fabiano Batista Ferreira da Costa

IFPB - PPGTI

Dra. Luciana Pereira Oliveira

IFPB - PPGTI

Dr. José Antônio Cândido Borges da Silva

IFPB - Campus Campina Grande

Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

UFPB

João Pessoa/2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ruan Delgado Gomes**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/02/2023 17:00:19.
- **Luciana Pereira Oliveira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/02/2023 17:02:52.
- **Anderson Fabiano Batista Ferreira da Costa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/02/2023 17:16:30.
- **Jose Antonio Candido Borges da Silva** PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/02/2023 12:41:02.
- **Abel Cavalcante Lima Filho**, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL, em 02/03/2023 15:35:55.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/02/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 388753

Verificador: 14cb8bed69

Código de Autenticação:



*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

RESUMO

A escassez de recursos hídricos é uma realidade que assola diversos países no mundo e tende a se agravar nos próximos anos em virtude do crescimento populacional, das mudanças climáticas e da má gestão dos sistemas de distribuição de água, principalmente em países subdesenvolvidos, no qual os índices de perdas de água potável nesses sistemas são alarmantes. No Brasil, dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) informam que o indicador médio de perda de água potável não contabilizada ou perdida na distribuição em 2021 chegou ao impactante índice de 40,14%, ou seja, a cada 100 litros de água tratada, mais de 40 litros são desperdiçados ao longo do sistema de distribuição de água. Uma saída para melhorar a gestão dos recursos hídricos e reduzir indicadores de perdas em sistemas de distribuição de água está em soluções IoT (*Internet of Things*) de sistemas de monitoramento e “medição inteligente de água” (*Smart Water Metering*), no qual medidores inteligentes de água (*Smart Water Meters*) permitem o monitoramento e a medição em tempo real de diversos parâmetros do sistema, como por exemplo: pressão, vazão e qualidade da água, como também possibilitam o acionamento de válvulas e bombas hidráulicas de forma remota e automática. Com isso, o uso de soluções IoT vem ganhando cada vez mais destaque e popularidade tanto no âmbito comercial quanto no âmbito acadêmico, no qual as universidades desempenham um papel fundamental na busca por novas soluções e desenvolvimento de aplicações inteligentes baseadas em tecnologias de IoT, em um processo que interconecta pessoas, serviços, processos e coisas, tornando as universidades em *Campi* Inteligentes. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta os resultados de uma solução de medição inteligente de água, baseada em tecnologias de IoT de baixo custo, que foi implantada no *Campus* Campina Grande do IFPB, como um projeto piloto e uma iniciativa para torna-lo um *campus* inteligente (*Smart Campus*). O artefato desenvolvido se destaca pelo uso da tecnologia LoRa® e do *middleware* Dojot na camada de aplicação, em vez de soluções na nuvem, com uma comunicação bidirecional através do LoRa® *gateway* Dragino LG02. Ademais, foram realizadas adaptações de metodologias metroológicas estabelecidas em normas brasileiras vigentes para calibração do sensor de vazão do medidor inteligente de água desenvolvido, o cálculo do índice de desempenho do medidor e da incerteza da medição. Os resultados obtidos com a solução desenvolvida demonstram um índice de desempenho da medição de 97,83% e uma margem de erro de indicação menor do que $\pm 2\%$ para as faixas de vazão calibradas para o sensor de vazão (FS400A) utilizado. A comunicação LoRa® se mostrou estável com índice médio de indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI) no *gateway* de -89 dBm e uma taxa de perda de pacote de 0,35%. O Dojot, embora seja uma solução relativamente nova no mercado, se comportou de forma satisfatória, dando indícios de que pode ser utilizada como uma ferramenta de produção em um futuro próximo, sendo uma opção viável para um *campus* inteligente.

Palavras-chaves: Medição Inteligente de Água; LoRa®; Dojot; IoT.

ABSTRACT

The scarcity of water resources is a reality that affects many countries in the world and tends to worsen in the coming years due to population growth, climate change and poor management of water distribution systems, especially in underdeveloped countries, in which the rates of loss of potable water in these systems are alarming. In Brazil, data from the National Sanitation Information System (SNIS) report that the average indicator of unaccounted for or lost drinking water loss in distribution in 2021 reached the impressive rate of 40.14%, that is, for every 100 liters of treated water, more than 40 liters are wasted along the water distribution system. A way to improve management of water resources and reduce indicators of losses in water distribution systems is in IoT (Internet of Things) solutions for monitoring systems and “intelligent measurement of water” (Smart Water Metering), in which smart water meters (Smart Water Meters) allow real-time monitoring and measurement of various system parameters, such as for example: pressure, flow and water quality, as well as enabling the activation valves and hydraulic pumps remotely and automatically. Therefore, the use of solutions IoT is gaining more and more prominence and popularity both in the commercial field and in the academic scope, in which universities play a fundamental role in the search for new solutions and development of intelligent applications based on IoT technologies, in a process that interconnects people, services, processes and things, making universities in Smart Campi. In this context, this paper presents the results of a smart water metering solution, based on low-cost IoT technologies, which was implanted in the IFPB Campina Grande Campus, as a pilot project and an initiative to make it an intelligent campus (Smart Campus). The artifact developed stands out for its use of LoRa® technology and Dojot middleware at the application layer, instead of solutions at the cloud, with two-way communication through the LoRa® gateway Dragino LG02. Furthermore, adaptations of metrological methodologies established in Brazilian standards were carried out current regulations for calibrating the flow sensor of the smart water meter developed, the calculation of meter performance index and measurement uncertainty. The obtained results with the developed solution demonstrate a measurement performance index of 97.83% and a margin of indication error of less than $\pm 2\%$ for the calibrated flow ranges for the flow sensor (FS400A) used. The LoRa® communication proved to be stable with an index average received signal strength indicator (RSSI) on the gateway of -89 dBm and a 0.35% packet loss rate. Dojot, although a relatively new solution in the market, behaved satisfactorily, giving indications that it can be used as a a production tool in the near future, being a viable option for a campus intelligent.

Key-words: Smart Water Metering; LoRa®; Dojot; IoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais tecnologias utilizadas na “medição inteligente de água”. Fonte: Adaptado de (SINGH; AHMED, 2020)	24
Figura 2 – LoRa® X LoRaWAN® em relação a camada de rede ISO/OSI. Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2019).	32
Figura 3 – Distribuição de frequência dos canais (<i>Uplink x Downlink</i>) na banda AU 915 MHz. Fonte: (ALLIANCE, 2019).	32
Figura 4 – Arquitetura Publish/Subscribe (Pub/Sub). Fonte: (HIVEMQ, 2015).	36
Figura 5 – Exemplo de estrutura de tópico MQTT. Fonte: (HIVEMQ, 2015).	36
Figura 6 – Arquitetura de microsserviço do <i>middleware</i> Dojot. Fonte: (DOJOT, 2020).	38
Figura 7 – Exemplo de comunicação interna entre os componentes DeviceManager e DataBroker através de tópicos Kafka. Fonte: (DOJOT, 2020).	39
Figura 8 – Diagrama de pinagem do WIFI LoRa® 32. Fonte: (HELTEC, 2021).	41
Figura 9 – Síntese dos conceitos e fundamentos da <i>Design Science</i>	49
Figura 10 – Etapas do método DSR x Abordagem Científica X Saídas das Etapas	50
Figura 11 – Sensor de fluxo FS400A G1. Fonte: Adaptado de (HAOYU, 2021)	56
Figura 12 – Curva característica do sensor de fluxo FS400A G1 (Equação 1).	57
Figura 13 – Arquitetura de rede do SMMIA. Fonte: Autoria própria.	65
Figura 14 – Instalação do "medidor inteligente de água" no cavalete de entrada de água do <i>campus</i> (perspectiva vertical). Fonte: Autoria própria.	66
Figura 15 – Instalação do medidor inteligente de água no cavalete de entrada de água do <i>campus</i> (perspectiva horizontal). 1- Válvula de abertura manual; 2 - filtro de água; 3 - válvula reguladora de pressão com manômetro analógico e sensor eletrônico de pressão; 4 - sensor de vazão; 5 válvula solenoide; 6 - válvula de retenção de água. Fonte: Autoria própria.	67
Figura 16 – Diagrama esquemático de interconexão hidráulica e elétrica do medidor inteligente de água no cavalete de entrada de água do <i>campus</i> . Fonte: Autoria própria.	67
Figura 17 – Caixa do SMMIA. Fonte: Autoria própria.	70
Figura 18 – Arquitetura do LoRa® <i>gateway</i> Dragino LG02. Fonte: (DRAGINO, 2020).	71
Figura 19 – Interface de configuração e visualização de dados em tempo real, versão 1 no Dojot. Fonte: Autoria própria.	72
Figura 20 – Interface de configuração e visualização de dados em tempo real, versão 2 no Dojot. Fonte: Autoria própria.	74
Figura 21 – Configurações da máquina virtual no VMware ESXi. Fonte: Autoria própria.	75
Figura 22 – Visualização dos <i>containers</i> no Portainer. Fonte: Autoria própria.	76
Figura 23 – Alocação de disco após a instalação do Dojot. Fonte: Autoria própria.	77

Figura 24 – Dashboard de visualização da base de dados no Mongo Express. Fonte: Autoria própria.	78
Figura 25 – <i>Dashboard</i> de <i>buckets</i> do InfluxDB. Fonte: Autoria própria.	79
Figura 26 – <i>Dashboard</i> do pgAdmin. Fonte: Autoria própria.	79
Figura 27 – <i>Dashboard</i> de <i>containers</i> no InfluxDB. Fonte: Autoria própria.	81
Figura 28 – <i>Dashboard</i> de <i>containers</i> no InfluxDB. Fonte: Autoria própria.	82
Figura 29 – <i>Dashboard</i> de visualização de dados no MongoDB Express . Fonte: Autoria própria.	82
Figura 30 – Cenário da comunicação LoRa®. Fonte: Autoria Própria.	84
Figura 31 – Setup de configurações do LoRa® <i>gateway</i> Dragino LG02. Fonte: Autoria Própria.	85
Figura 32 – <i>Script</i> MQTT do <i>gateway</i> Dragino LG02. Fonte: Dragino	86
Figura 33 – Configurações de canais no LG02 (A) e exemplo de código para envio de pacote LoRa® (B). Fonte: Autoria Própria.	86
Figura 34 – Característica da potência do sinal recebida no <i>gateway</i> Dragino LG02. Fonte: Autoria Própria.	87
Figura 35 – Protótipo inicial. Fonte: Autoria própria.	90
Figura 36 – Caracterização do perfil de consumo do campus com protótipo inicial. Fonte: Autoria própria.	90
Figura 37 – Caracterização do perfil de consumo do campus com protótipo final. Fonte: Autoria própria.	91
Figura 38 – Comparação do volume total contabilizado entro o SMMIA e o hidrometro SAGA da CAGEPA com o solenoide desenergizado. Fonte: Autoria própria.	92
Figura 39 – Caracterização da pressão no cavalete de entrada de água do <i>campus</i> . Fonte: Autoria própria.	94
Figura 40 – Caracterização da pressão no cavalete de entrada de água do <i>campus</i> . Fonte: Autoria própria.	94
Figura 41 – Diagrama de uma instalação para calibração por pesagem (método estático (1C), alimentação por bombeamento direto). Fonte: ABNT NBR ISO 4185:2009.	95
Figura 42 – Diagrama da bancada adaptada para calibração do sensor de vazão FS400A G1"(método estático, alimentado por pressurização direta). Fonte: Autoria Própria.	97
Figura 43 – Bancada adaptada ao método estático 1C da ABNT NBR ISO 4185:2009. Fonte: Autoria Própria.	98
Figura 44 – Fluxograma do processo de medição. Fonte: Autoria Própria.	98
Figura 45 – Comportamento da pressão estática na bancada adaptada com pressurizador configurado em 1,0 bar. Fonte: Autoria Própria.	99

Figura 46 – Comportamento da pressão estática na bancada adaptada com pressurizador configurado em 1,5 bar. Fonte: Autoria Própria.	99
Figura 47 – Comportamento da pressão estática na bancada adaptada com pressurizador configurado em 2 bar. Fonte: Autoria Própria.	100
Figura 48 – Comportamento da pressão estática na bancada adaptada. Fonte: Autoria Própria.	101
Figura 49 – Imagens de medição da pressão estática no manômetro analógico. Fonte: Autoria Própria.	101
Figura 50 – Erro de indicação da balança. Fonte: Autoria Própria.	102
Figura 51 – Gráfico do erro de indicação obtido no processo de calibração. Fonte: Autoria Própria.	103
Figura 52 – Resumo das medições. Fonte: Autoria Própria.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre alcance de sinal e consumo energético das tecnologias de rede sem fio.	31
Tabela 2 – Características de propagação de sinal LoRa® em relação ao Fator de Espalhamento (SF).	33
Tabela 3 – Características dos trabalhos relacionados.	45
Tabela 4 – Requisitos de <i>hardware</i> para instalação do Dojot.	54
Tabela 5 – <i>Setup</i> inicial da camada física LoRa®.	55
Tabela 6 – Parâmetros para determinação do erro de indicação e IDM.	58
Tabela 7 – Lista de ferramentas, materiais e dispositivos utilizados.	63
Tabela 8 – Atributos da aplicação SMMIA configurados no dispositivo 41719c do Dojot.	73
Tabela 9 – Dados de métricas de serviços do Dojot extraídos da ferramenta " <i>docker stats</i> ".	83
Tabela 10 – Faixas de vazão de ensaio.	88
Tabela 11 – Consumo médio de água do <i>campus</i> no ano de 2022 em metros cúbicos. . .	88
Tabela 12 – Acompanhamento das soluções (SAGA e SMMIA) na totalização do volume total contabilizado (m3).	92
Tabela 13 – Exemplo dos demais parâmetros coletados durante a calibração do sensor de vazão.	104
Tabela 14 – Fatores de correção (M) da calibração utilizados.	104
Tabela 15 – Resultado ensaio curva de erro para vazão de 250 l/h ou 4,167 l/min.	106
Tabela 16 – Resultado ensaio curva de erro de indicação para vazão de 450 l/h ou 7,5 l/min.	107
Tabela 17 – Resultado ensaio curva de erro de indicação para vazão de 700 l/h ou 11,667 l/min.	107
Tabela 18 – Resultado ensaio curva de erro de indicação para vazão de 1000 l/h ou 16,667 l/min.	108
Tabela 19 – Resultado ensaio curva de erro de indicação para vazão de 1325 l/h ou 22,083 l/min.	108
Tabela 20 – Exemplo do cálculo do IDM para as três primeiras medições.	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESBE	Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
ANA	Agência Nacional das Águas
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
API	Application Programming Interface
AWS	Amazon Web Services
CoAP	Constrained Application Protocol
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimentoem Telecomunicações
CR	Code Rate
CSS	ChirpSpread Spectrum
DC	Direct Current
DDS	Data Distribution Service
DE	Diâmetro Externo
DS	Design Science
DSR	Design Science Research
EMA	Erro Máximo Admissível
ESP32	Espressif 32
FSK	Frequency-shift keying
GUM	Guia para Avaliação da Incerteza daMedição
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I/Os	Input / Output
IDM	Índice de Desempenho do Medidor
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IoT	Internet of Things
IPF	Índice de Perda de Faturamento
ISO	International Organization for Standardization
ITB	Intituto Trata Brasil
JWT	JSON Web Token
Li-Po	Polímero de Lítio
LoRa®	Long Range
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regiona
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MVP	Minimum Viable Product
NBR	Norma Brasileira
OLED	Organic Light Emitting Diode
ONU	Organização das Nações Unidas
PHY	Physical Layer
PWAN	Low Power Wide Area Networks
QoS	Quality of Service
RAM	Random Access Memory
REST	Representational State Transfer
RTM	Regulamento Técnico Metrológico
SF	Spread Spectrum
SI	Sistema Internacional
Siga	Sistema de Gerenciamento de Água
SMMIA	Sistema de Monitoramento e Medição Inteligente de Água
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
SoC	System on Chip
SWG	Smart Water Grid

SWM	Smart Water Management
TCP	Transmission Control Protocol
URL	Uniform Resource Locator
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
WRI	World Resources Institute
WWDR	World Water Development Report

LISTA DE SÍMBOLOS

a_i	Metade da faixa estimada de um componente da incerteza, associada com a estimativa da entrada x_i
c	Combinada
c_i	Coefficiente de sensibilidade usado para multiplicar a incerteza na estimativa da entrada, x_i , para obter a incerteza da estimativa da saída, y
c_i^*	Coefficiente de sensibilidade relativo utilizado para multiplicar a incerteza relativa na estimativa da entrada, x_i , com o objetivo de se obter o efeito relativo de uma mudança relativa na grandeza de entrada, na incerteza relativa da estimativa da saída y
EP	Erro ponderado
f	Relação funcional entre estimativas do mensurando, y , e estimativas da entrada, X_i , da qual y depende
h	Hora
i	Da i -ésima entrada
K	Fator de abrangência empregado para calcular a incerteza expandida U
L	Litro
m^3	Metro cúbico
N	Da N ésima entrada
n	Da n ésima observação
Q	Vazão expressa em metros cúbicos por segundo, nas condições de escoamento
$S(\bar{X})$	Desvio-padrão experimental da média aritmética \bar{X}
U	Incerteza Expandida
U^*	Incerteza Expandida Relativa
$u(x)$	Incerteza Padrão
u_c	Incerteza Combinada

$u_c(y)$	Incerteza-padrão combinada relativa, associada com a estimativa da saída y
$u_c^*(y)$	Incerteza-padrão combinada, associada com a estimativa da saída y
$u(X_i)$	Incerteza-padrão associada, com a estimativa da entrada, x_i
$u(\bar{X}_i)$	Desvio-padrão da média de medições repetidas
x	De x
\bar{x}	Média aritmética ou média de n observações repetidas, x_m , de grandezas variando aleatoriamente, x
x_i	Estimativa da grandeza de entrada, X_i
x_m	m ésima observação de uma grandeza aleatória, x
Δx_i	Incremento em x_i usado para a determinação numérica do coeficiente de sensibilidade
y	Estimativa do mensurando, Y
Δy	Incremento em y encontrado na determinação numérica do coeficiente de sensibilidade mudança relativa na grandeza de entrada, na incerteza relativa da estimativa da saída y
$\partial y / \partial x_i$	Derivada parcial com relação à grandeza de entrada x_i da relação funcional f entre o mensurando e as grandezas de entrada
®	Marca Registrada
™	Marca Comercial
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação e Definição do Problema	20
1.2	Objetivos	25
1.2.1	Objetivo geral	25
1.2.2	Objetivos específicos	25
1.3	Estrutura do Documento	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Metrologia	27
2.1.1	Sistema de Medição	27
2.1.2	Medição	27
2.1.3	Incerteza da Medição	29
2.1.4	Modelo de Medição ou Modelo Matemático	30
2.1.5	Calibração, Verificação e Validação	31
2.2	Redes LPWAN (Low Power Wide Area Network)	31
2.2.1	LoRa®	32
2.3	Protocolos de Camada de Aplicação IoT	34
2.3.1	MQTT (<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>)	35
2.4	Middleware IoT	37
2.4.1	Dojot	37
2.5	Sistemas Embarcados	41
2.5.1	WIFI LoRa® 32	41
2.6	Trabalhos Relacionados	42
3	METODOLOGIA	47
3.1	Contribuições da Pesquisa	47
3.2	Aplicabilidade	47
3.3	Método	47
3.3.1	Método <i>Design Science Research</i>	48
3.3.2	Plano de Ação de Desenvolvimento e Implantação do Artefato	53
3.3.2.1	<i>Instalação e configuração do middleware Dojot</i>	54
3.3.2.2	<i>Desenvolvimento do software embarcado</i>	54
3.3.2.3	<i>Testes, verificação de sensores e comunicação com o Dojot</i>	55
3.3.2.4	<i>Caracterização do perfil de consumo de água do campus</i>	55
3.3.2.5	<i>Ensaio para calibração do sensor de fluxo</i>	56
3.3.2.6	<i>Cálculo da incerteza da medição e índice de desempenho do medidor</i>	58

3.3.2.7	Montagem e instalação do protótipo	62
3.3.2.8	Monitoramento do sistema de medição inteligente de água	62
3.4	Ferramentas, Dispositivos e Materiais Utilizados	63
4	RESULTADOS	64
4.1	Protótipo SMMIA	64
4.1.1	Arquitetura da Solução	65
4.1.1.1	Camada Física	65
4.1.1.2	Camada de Rede	70
4.1.1.3	Camada de Aplicação	71
4.2	Middleware Dojot	74
4.2.1	Avaliação Antes da Coleta de Dados	75
4.2.2	Avaliação Após a Coleta de Dados	80
4.3	Comunicação LoRa®	84
4.4	Caracterização do Perfil de Consumo	88
4.5	Calibração do Sensor de Vazão	95
4.6	Índice de Desempenho da Medição - IDM, e Incerteza da Medição . . .	105
5	CONCLUSÕES	111
5.1	Trabalhos Futuros	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
	APÊNDICES	122
	APÊNDICE A – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DO IDM . . .	123
	APÊNDICE B – MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DOS PARÂMETROS AUXILIARES NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR FS400A	127

1 INTRODUÇÃO

A água, o elemento mais precioso e essencial à vida terrestre, está em risco; é o que aponta a organização não governamental ambientalista *World Resources Institute* (WRI), por meio do seu projeto global de monitoramento e mapeamento de riscos hídricos: o *Aqueduct Water Risk Atlas*¹ (WRI, 2021). Ainda de acordo com (WRI, 2021), “mais de 1 bilhão de pessoas já vivem atualmente em regiões de escassez de água, e cerca de 3,5 bilhões podem sofrer escassez de água até 2025”. No Brasil, segundo (ANA, 2020), “cerca de 22 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens em 2019, no qual aproximadamente 94% das pessoas afetadas pela seca vivem na região Nordeste”.

Neste cenário de iminente escassez dos recursos hídricos, as cidades enfrentam enormes desafios para gerenciar seus recursos naturais vitais, forçando-as a se reinventarem e criarem soluções tecnológicas otimizadas e sustentáveis para se tornarem “cidades inteligentes” (ou *Smart Cities*) (RUSSO; RINDONE; PANUCCIO, 2014; EC, 2021). As *Smart Cities* podem ser definidas como grandes centros urbanos que utilizam tecnologias inovadoras na gestão pública, como também em suas infraestruturas, para melhorar aspectos socioeconômicos de uma região, visando o desenvolvimento urbano sustentável e planejado em prol da qualidade de vida dos cidadãos (VERSTAEVEL; BOES; GLEIZES, 2017; NEVES et al., 2017).

Diversas soluções desenvolvidas para as *Smart Cities* nascem em campi universitários, em que de acordo com (MOTTA; LIMA; CUNHA, 2018), o “limite físico do *campus* não é mais definido e são projetados edifícios com funções mistas, podendo ser utilizada tanto pela comunidade acadêmica quanto pela população”, o que para (VERSTAEVEL; BOES; GLEIZES, 2017) os tornam verdadeiros laboratórios vivos e parceiros ideais para cidades que buscam explorar e promover iniciativas de cidades inteligentes.

Segundo (NEVES et al., 2017), o “modelo de uma *Smart City* pode ser escalado e adaptado para as universidades”, criando o conceito de “*campus* inteligente” ou *Smart Campus*”, no qual as instituições adotam tecnologias de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) para criar aplicações inteligentes, servindo como verdadeiros bancos de testes (OBERASCHER et al., 2022), voltadas ao controle e monitoramento remoto das instalações e serviços do *campus* como, por exemplo, serviços de energia elétrica, iluminação, água, estacionamento, entre outros, proporcionando o desenvolvimento sustentável, reduzindo custos e desperdícios (FACENS, 2020).

No contexto das aplicações inteligentes, a medição inteligente de água (ou *Smart Water Metering*) surge como uma aplicação baseada em tecnologias IoT, que visam minimizar a escassez hídrica dos grandes centros urbanos por meio da leitura remota e automática de pontos

¹ Disponível em: ATER RISK ATLAS.. Acessado em: 25 de ja. de 2023.

de medições estratégicos nos sistemas de distribuição de água, principalmente na entrada de casas, indústrias e escritórios comerciais, por meio de medidores inteligentes de água (ou *Smart Water Meters*) (LALLE et al., 2020).

Os medidores inteligentes de água são dispositivos microcontrolados acoplados a sensores que monitoram o fluxo de água remotamente em tempo real, de forma automática ou sob demanda, que utilizam geralmente tecnologias de redes de longa distância e baixa potência (*Low Power Wide Area Networks* - LPWANs) – na qual se destacam as tecnologias Narrowband IoT (NB-IoT), Sigfox e Long Range (LoRa®) (LALLE et al., 2019) – para enviar as informações a uma central de processamento local ou na nuvem, em que “os clientes podem tomar decisões inteligentes analisando seu consumo de água e as concessionárias podem melhorar seus serviços explorando as informações fornecidas pelos medidores” (LALLE et al., 2020).

Estes medidores inteligentes são componentes essenciais dos sistemas de gestão inteligente de água (*Smart Water Management* - SWM) ou redes inteligentes de água (*Smart Water Grid* - SWG), no qual o acesso a dados e informações relacionadas à água em tempo real é fundamental para construir estratégias sofisticadas para a gestão da água e, conseqüentemente, contribuir para a redução da escassez hídrica nos centros afetados (MATTOS, 2018). As SWG são definidas por (MARTYUSHEVA, 2014) como “uma rede bidirecional em tempo real com sensores e dispositivos que monitoram contínua e remotamente o sistema de distribuição de água”. Já um SWM, de acordo com (YI et al., 2018), é caracterizado pelo “uso de soluções integradas de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) em tempo real, como sensores, monitores, sistema de informação geográfica (GIS) e mapeamento de satélite e outras ferramentas de compartilhamento de dados na gestão da água”, ou seja, são conceitos correlatos.

Com isso, percebe-se que a complexidade dessas soluções necessitam de uma infraestrutura relativamente robusta para suportar o volume de dados gerados, assim como uma boa plataforma (*middleware* local ou na nuvem), com um conjunto de serviços avançados para gerenciar todo o ecossistema IoT. Atualmente encontram-se disponíveis no mercado diversas soluções de *middlewares* para IoT gratuitos e de código aberto, com propósitos diferentes, como por exemplo, Kaa IoT, ThingSpeak, DeviceHive, Zetta, Dojot, entre outras. (MANKAD; AROLKAR, 2020) ressalta que há vários pesquisadores trabalhando na área de suporte a aplicativos de medição inteligente em diferentes *frameworks* e que o “desenvolvimento e implantação de *frameworks* baseados em IoT para medidores inteligentes foram propostos e implementados por muitas organizações como, Maven Systems, Sensus, WebNMS e muito mais”.

No Brasil, diversas universidades como a UFCG, Facens, UFRN, Unicamp, entre outras, já implementam soluções de “medição inteligente” em seus *Smart Campi*, além de diversas concessionárias de água do país já terem iniciado projetos para realizar a medição inteligente de água, como por exemplo a companhia de saneamento básico do estado de São Paulo – Sabesp, que já instalou 7,5 mil medidores inteligentes de água, operando através da rede Sigfox da WND Brasil (PAIVA, 2019).

Embora as aplicações IoT de água inteligente (*Smart Water - SW*) venham crescendo nas universidades, ainda existe uma baixa adesão desses sistemas no âmbito das organizações educacionais, no qual os principais obstáculos para adoção de medidores inteligentes nessas organizações são os fatores tecnológicos, ambientais e por último, fatores organizacionais (ADAMS; JOKONYA, 2022).

Neste contexto, visando não apenas contribuir para a redução do consumo de água do *campus* e conscientizar a comunidade para a importância da gestão dos recursos hídricos, o trabalho desenvolvido nesta dissertação consistiu-se no desenvolvimento, implantação e avaliação de uma solução de medição inteligente de água implantada no *campus* Campina Grande (PB) do IFPB, utilizando a tecnologia LoRa® em conjunto com a plataforma Dojot², como projeto piloto de uma iniciativa para tornar o "*campus* inteligente" (*Smart Campus*).

1.1 Motivação e Definição do Problema

Dados do Relatório Mundial das Nações Unidas (ONU) sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (*World Water Development Report – WWDR*, 2021) — desenvolvido por mais de 20 de agências do Sistema ONU em um esforço internacional denominado ONU-Água (UN-Water) — apontam que o consumo de água potável no mundo aumentou aproximadamente 6 vezes no último século e continua a avançar a uma taxa de 1% ao ano desde a década de 80, fruto do crescimento populacional, da expansão da agricultura (responsável por 69% do consumo de toda a água doce do planeta), do setor industrial (19%), do crescimento econômico e da própria alteração do padrão de consumo humano (12%) (KONCAGÜL; TRAN; CONNOR, 2021).

Durante o mesmo período, a qualidade da água diminuiu em regiões da Ásia, África e América do Sul e, o estresse hídrico³ aumentou, afetando mais de 2 bilhões de pessoas ao redor do planeta (KONCAGÜL; TRAN; CONNOR, 2021). Além disso, “cerca de 1,6 bilhão de pessoas enfrentam escassez “econômica” de água, o que significa que, embora a água possa estar fisicamente disponível, não existe infraestrutura necessária para que as pessoas tenham acesso a essa água” (KONCAGÜL; TRAN; CONNOR, 2021) *apud* (AGRICULTURE, 2007).

Corroborando com as informações acima, dados do relatório Diagnóstico Temático: Serviços de Água e Esgoto, Visão Geral, de 2022, elaborado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional/Secretaria Nacional de Saneamento, demonstram que a média nacional de perda nos sistemas de distribuição de água em 2021 foi de 40,3% (SNIS, 2022), ou seja, para cada 100 litros de água tratada, mais de 40 litros de água é desperdiçada ao longo do caminho e não chegam ao consumidor final, o que representa uma perda de 168,66% acima do índice considerado ideal

² Disponível em: Dojot. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

³ O termo estresse hídrico é utilizado para descrever um cenário no qual, em uma determinada região, a demanda por água é maior do que a sua disponibilidade e capacidade de renovação. Fonte: (SUÇUARANA, 2021)

(15%) pelo relatório, gerando um impacto financeiro estimado em R\$ 12 bilhões de reais por ano (ITB, 2020b).

Na cidade de Campina Grande (PB), o índice de perda de água em 2021, de acordo com dados extraídos da plataforma "Painel de Indicadores" do sítio governamental SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS⁴, foi de 27,54%, índice inferior à média geral do estado da Paraíba (35.38%) (SNIS, 2021).

Além dos altos índices de perdas nos sistemas de distribuição de água, o relatório PERDAS DE ÁGUA 2020 (SNIS 2018): DESAFIOS PARA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E AVANÇO DA EFICIÊNCIA DO SANEAMENTO BÁSICO ressalta que “a maior parte das empresas não mede as perdas de água de maneira consistente, do modo que, por exemplo, não são divulgados indicadores que reflitam de maneira independente as perdas físicas e comerciais” (ITB, 2020a).

Nesse contexto, entende-se por perdas físicas ou reais, toda água desperdiçada (nos mais diversos processos), tratada ou não, que é disponibilizada para distribuição e não chega ao consumidor, ou seja, a água é desperdiçada ao longo do trajeto por motivos diversos, como por exemplo, vazamentos provocados por excesso de pressão (SNIS, 2018).

Já as perdas comerciais ou aparentes (também identificado nos relatórios citados por Índice de Perda de Faturamento - IPF), são falhas nos sistemas de medição (ocasionadas por erro humano ou mecânico) que não registram o consumo real do usuário (SNIS, 2018), onerando o faturamento das concessionárias de água, além de aumenta a necessidade de captação dos mananciais, o que impacta diretamente na eficiência das companhias (EOS, 2019).

Entre as principais causas de perdas aparentes estão:

“falhas decorrentes de erros de medição (hidrômetros inoperantes, com submedição, erros de leitura, fraudes, equívocos na calibração dos hidrômetros), ligações clandestinas, *by pass* irregulares nos ramais das ligações (conhecidos como “gatos”), falhas no cadastro comercial e outras situações”. (BRASIL, 2019)

No Brasil, o “indicador médio de perdas de faturamento total foi 38,64% em 2021, uma pequeno retrocesso frente aos 40,89% observados em 2020” (SNIS, 2022), em que presume-se que a submedição (parcela do volume entregue ao consumidor final, que não é registrado pelo medidor) seja responsável por 4% a 22% da perda de faturamento. (SNIS, 2018)

Diversos fatores que colaboram para a submedição já foram identificados na literatura, como por exemplo:

“dimensionamento incorreto (capacidade e/ou classe metrológica), tecnologia inadequada do medidor, instalação inadequada (inclinação do hidrômetro no cavalete, hidrômetro sujeito a esforço mecânico, choques/vibrações e intempéries), regime de vazões do ramal predial afetado pelo abastecimento indireto,

⁴ Disponível em: Painel de Saneamento. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

com ação da boia da caixa d'água prejudicando a medição em vazões muito baixas (período noturno e/ou vazamentos internos)". (SNIS, 2018)

Ainda de acordo com (SNIS, 2018), outros fatores como “deficiências na manutenção da rede de distribuição (o que provoca a existência de partículas sólidas, notadamente partículas de ferro que podem danificar o hidrômetro e/ou interferir na sua sensibilidade), bem como deficiência no programa de manutenção e substituição de hidrômetros”, contribuem para o aumento da submedição.

Além disso, (AESB, 2015) informa que os “medidores velocimétricos de classe B ⁵, extensamente utilizados no país, tem se mostrado pouco eficientes em baixas vazões e perdem capacidade com poucos anos de uso”, ou seja, mesmo em equipamentos novos, os medidores apresentam erros de leitura e, com o passar do tempo, a margem de erro tende a aumentar com o desgaste do equipamento, levando a índices de erro que podem extrapolar os indicadores definidos em normas técnicas.

No Brasil, o órgão balizador de normas técnicas referentes à hidrômetros e equipamentos de medição é o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), que através da PORTARIA Nº 155, DE 31 DE MARÇO DE 2022, institui o REGULAMENTO TÉCNICO METROLÓGICO - RTM, que estabelece requisitos técnicos e metrológicos para os medidores utilizados para medir o volume de água potável fria e água quente até 15m³/h. O RTM preconiza, entre outros, os índices de erro máximo admissível (EMA) de leitura de $\pm 5\%$ para vazões baixas (faixa inferior de medição) e $\pm 2\%$ para vazões de trabalho nominal (faixa superior de medição) em equipamentos novos e, para equipamentos usados, os valores são de $\pm 10\%$ para vazões baixas e $\pm 5\%$ para vazões de trabalho nominal (BRASIL, 2022).

Visando reduzir os indicadores apresentados anteriormente e promover melhorias na infraestrutura do saneamento básico do Brasil, o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) lançou a portaria Nº 490, DE 22 DE MARÇO DE 2021 que estabelece indicadores que deverão ser cumpridos pelos municípios de todo país para reduzir as perdas de água até 2034, tendo como meta, o índice máximo permitido de 25% de perdas nos sistemas de distribuição de água dos municípios (BRASIL, 2021). Ainda de acordo com a portaria, os municípios devem se adequar e buscar soluções para reduzir as perdas, intervindo no que couber, na “setorização e zonas de medição e controle; macromedição e pitometria no sistema distribuidor; micromedição; e implantação, ampliação ou melhoria do controle operacional” (BRASIL, 2021).

No âmbito do IFPB, *campus* Campina Grande (PB), a micromedição é realizada através de um hidrômetro ultrassônico do fabricante ViewShine, modelo U-WR-S DN15⁶, de responsabilidade da concessionária de água estatal CAGEPA, instalado na entrada do *campus* na rua

⁵ Quanto maior a classe, mais preciso e eficiente é o hidrômetro, como por exemplo, um hidrômetro Classe C é melhor do que o Classe B, e assim sucessivamente.

⁶ Para especificações técnicas do produto e mais informações, consulte o site do fabricante, disponível em: Viewshine.

Tranqüilino Coelho Lemos, 671 - Dinamérica, em 2022 (última substituição do equipamento), em que o registro do consumo é realizado de forma manual por um agente da CAGEPA *in loco*, embora o dispositivo esteja preparado comunicação com e sem fio: saída de pulso de dois fios/três fios, LoRaWAN, NB-IoT.

Além disso, todo gerenciamento hidráulico do *campus* é realizado de forma manual, por meio de um operador que controla a abertura de válvulas e acionamento de bombas para encher reservatórios do tipo caixa d'água distribuídos ao longo do *campus*, no qual muitas vezes as válvulas não são fechadas em tempo hábil e o desperdício de água é gerado com o transbordamento dos reservatórios.

Diante do exposto, fica evidente que o mau uso da água associado à falta de manutenção em estruturas e equipamentos hídricos, assim como medições imprecisas, acarretam enormes danos econômicos, sociais e ambientais em todo país, logo, necessitam de melhorias e avanços tecnológicos para uma maior precisão nas medições e uma melhor gestão dos recursos hídricos, contribuindo assim, para redução das perdas de água e conseqüentemente amenizar a escassez hídrica.

Nesse contexto, visando mitigar os problemas apresentados, as tecnologias de IoT surgem como principal expoente na otimização dos sistemas de distribuição de água. No campo da micromedição, as soluções IoT de medição inteligente de água começam a emergir e diversas propostas são encontradas atualmente na literatura. Porém, como é uma área relativamente nova no campo de pesquisa, ainda não existe um padrão definido, logo, “o principal desafio para a medição inteligente de água com IoT é ter uma estrutura padronizada para conectar qualquer medidor de água existente a uma rede IoT” (MANKAD; AROLKAR, 2020).

Essa constatação é facilmente visualizada na revisão sistemática apresentada por (SINGH; AHMED, 2020) e corroborada por (ADAMS; JOKONYA, 2022), no qual os autores fazem um levantamento na literatura sobre as principais tecnologias de comunicação, sensores, controladores, plataformas na nuvem, e parâmetros utilizados para a medição de diversas propriedades da água analisadas nos sistemas de medição inteligente de água utilizando tecnologias de IoT. A consolidação desse levantamento é apresentada na Figura 1.

Sensores	Tecnologia de Comunicação	Controladores	Plataformas na Nuvem
<ul style="list-style-type: none"> • Ultrassônico • Temperatura • Ph • Turbidez • Salinidade • Oxigênio dissolvido 	<ul style="list-style-type: none"> • Ethernet • WLAN • Bluetooth • LoRa • NB-IoT • BLE • ZigBee 	<ul style="list-style-type: none"> • Raspbeery Pi • Arduino • AtMega • 8051 • PIC • Beagleboard • Netuino 	<ul style="list-style-type: none"> • FreeBoard • ThingsBoard • ubidots • Thingstream • WolkAbout • ThingSpeak • TheThings.IO

Figura 1 – Principais tecnologias utilizadas na “medição inteligente de água”. Fonte: Adaptado de (SINGH; AHMED, 2020)

Na Figura 1 percebe-se claramente que há uma grande diversidade de tecnologias de IoT utilizadas no desenvolvimento de soluções de medição inteligente de água. É importante ressaltar que o estudo apresentado por (SINGH; AHMED, 2020) aborda apenas as principais tecnologias, e soluções de plataformas IoT baseadas em infraestrutura locais (*edge computing*) não foram citadas nesse estudo.

Mediante esta breve contextualização acerca da motivação e do problema de pesquisa, as seguintes Questões de Pesquisa (QP) podem ser levantadas:

- QP01 - O medidor inteligente de água desenvolvido será capaz de medir com a precisão e requisitos estabelecidos em normas vigente?
- QP02 - A pressão da água na entrada do sistema de distribuição de água do *campus* está em conformidade com as normas vigentes?
- QP03 - O *middleware* Dojot pode ser utilizado com uma ferramenta de produção no atual estágio de desenvolvimento da ferramenta?
- QP04 - A tecnologia LoRa® será capaz de apresentar um desempenho de comunicação com baixa taxa de perdas de pacotes para o cenário da aplicação?
- QP05 - É possível calibrar um sensor de vazão com resultados satisfatórios, dentro da margem de erro de indicação estabelecido em norma, com uma bancada de calibração não certificada?

A relevância do assunto em estudo se dá não apenas no âmbito das perdas nos sistemas de distribuição de água interna do *campus* ocasionadas por erro de leitura no equipamento de mensuração do consumo com a informação do volume micromedido, como também, no âmbito social, uma vez que visa diminuir as perdas de água e conscientizar a comunidade acadêmica para importância da gestão eficiente dos recursos hídricos, além de contribuir com o desenvolvimento

de sistemas de medição inteligente de água utilizando tecnologias IoT de baixo custo como ferramentas para o gerenciamento e planejamento do controle das perdas de água de um *Smart Campus*.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um artefato (protótipo) para Medição Inteligente de Água (*Smart Water Metering*) baseado em plataformas de IoT de baixo custo para mensurar o consumo geral de água do *campus* Campina Grande (PB) do IFPB, de maneira remota e automática.

1.2.2 Objetivos específicos

Abaixo, os objetivos específicos da pesquisa:

- Instalar e configurar a plataforma Dojot (*middleware* IoT);
- Realizar ensaio para calibração e verificação de sensores;
- Desenvolver protótipo de medidor inteligente de água;
- Instalar protótipo no cavalete de entrada de água do *campus*;
- Avaliar o desempenho da comunicação LoRa, do Dojot e do medidor inteligente de água;
- Verificar se a solução apresenta índices de medições compatíveis com normas brasileiras vigentes para validar a solução.

1.3 Estrutura do Documento

Estruturalmente, o documento encontra-se organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2, é apresentada uma breve explicação sobre:

- Metrologia, no qual são abordados os conceitos chave para uma melhor compreensão sobre o processo de medição e sua complexidade;
- Redes LPWAN, com foco na tecnologia LoRa®;
- Protocolos da Camada de Aplicação IoT, com ênfase no protocolo MQTT;
- Middlewares IoT, descrevendo a arquitetura da plataforma Dojot;
- Sistema Embarcados, abordando sumariamente as características do WIFI LoRa® 32 e,

- Trabalhos Relacionados, na qual é apresentada uma série de artigos que representam o estado da arte relacionado ao tema em estudo.

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, bem como, as contribuições da pesquisa e a aplicabilidade da solução desenvolvida, como também, a heurística de desenvolvimento do artefato e as ferramentas, dispositivos e materiais utilizados.

Apresenta-se no Capítulo 4, os resultados obtidos durante os ensaios de desenvolvimento do artefato, respondendo as questões de pesquisa levantadas.

Finalizando o documento, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais fundamentos teóricos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Uma rápida explanação sobre Metrologia, Redes LPWAN, Protocolos de Camada de Aplicação IoT, Middleware IoT e Sistemas Embarcados são apresentados a seguir. Ainda nesta seção, são apresentados os Trabalhos Relacionados com o tema em estudo, em que são discutidos artigos recentes sobre o tema.

2.1 Metrologia

A Metrologia é a ciência das medidas e suas aplicações, que “engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação” (INMETRO, 2012b). De acordo com (MENDES; ROSÁRIO, 2020), a “metrologia existe para sustentar um acordo universal para as unidades de medida, ou seja, a existência de uma padronização dos valores”. Logo, é de suma importância entender os conceitos básicos dessa ciência e os termos empregados em metrologia, pois, são necessários para interpretação e especificação de resultados de medição.

As definições e terminologias apresentadas a seguir são extraídas dos documentos: Vocabulário Internacional de Metrologia - VIM (2012) e Guia para Avaliação da Incerteza da Medição - GUM (2008), publicados pelo Inmetro.

2.1.1 Sistema de Medição

De acordo com (INMETRO, 2012b), entende-se por Sistema de Medição, um:

“conjunto de um ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de naturezas especificadas”.

Ainda de acordo com (INMETRO, 2012b), “um sistema de medição pode consistir em apenas um instrumento de medição” (instrumento de medição indicador), ou seja, equipamento que fornece um sinal de saída contendo informações sobre o valor da grandeza medida, como por exemplo, voltímetro (grandeza medida: tensão), termômetro (grandeza medida: temperatura) etc.

2.1.2 Medição

Medição é definido por (INMETRO, 2012a) como um conjunto de procedimentos que tem por objetivo “determinar o valor do mensurando, isto é, o valor da grandeza específica a ser

medida. Uma medição começa, portanto, com uma especificação apropriada do mensurando, do método de medição e do procedimento de medição”.

Já em (INMETRO, 2012b), medição é o “processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza”. O método de medição é a uma “descrição genérica de uma organização lógica de operações utilizadas na realização de uma medição” (INMETRO, 2012b), ou seja, uma sequência lógica de procedimentos para conhecermos o valor de uma dada grandeza.

A forma como uma grandeza pode ser mensurada (método de medição) se dá principalmente de duas maneiras (MENDES; ROSÁRIO, 2020):

1. Direta: consiste na utilização de um instrumento para obter o resultado de uma única grandeza envolvida no processo;
2. Indireta: consiste na medição de uma ou mais grandezas por meio de modelos matemáticos.

Essas formas de medição devem seguir um procedimento de medição, ou seja, a “descrição detalhada de uma medição de acordo com um ou mais princípios de medição e com um dado método de medição, baseada num modelo de medição e incluindo todo cálculo destinado à obtenção de um resultado de medição” (INMETRO, 2012b).

Ao final desse processo, temos o resultado de uma medição, que é “geralmente expresso por um único valor medido e uma incerteza de medição” (INMETRO, 2012b). O resultado pode ser expresso como um único valor, caso a incerteza de medição seja considerada desprezável para alguma finalidade. Porém, é sabido que todo processo de medição contém falhas ou imperfeições que dão origem a um erro no resultado da medição, e, esse erro contém dois componentes:

- Aleatório: “presumivelmente se origina de variações temporais ou espaciais, estocásticas ou imprevisíveis, de grandezas de influência” (INMETRO, 2012a), e não é passível de compensação, embora tenha seu efeito minimizado aumentando o número de observações, em que a esperança ou valor esperado do erro tende a zero.
- Sistemático: análogo ao erro aleatório, o erro sistemático também não pode ser eliminado do processo de medição, porém, também pode ser minimizado, principalmente “se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição e, se for significativo com relação à exatidão requerida da medição, uma correção ou fator de correção pode ser aplicado para compensar o efeito” (INMETRO, 2012a), em que após esta correção, a esperança ou valor esperado do erro provocado por um efeito sistemático seja próximo de zero.

(INMETRO, 2012a) ainda ressalta que “frequentemente, os instrumentos e sistemas de medição são ajustados ou calibrados utilizando-se padrões de medição e materiais de referência

para eliminar os efeitos sistemáticos; entretanto, as incertezas associadas a esses padrões e materiais ainda devem ser levadas em conta”.

2.1.3 Incerteza da Medição

De acordo com (INMETRO, 2012a),

“Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física deve-se sempre dar alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou numa norma. É, portanto, necessário que exista um procedimento que seja de pronta aplicação, fácil compreensão e ampla aceitação para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza”.

Assim, (INMETRO, 2012a) define formalmente incerteza de medição como “parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando”. Já em (INMETRO, 2012b), incerteza de medição é definida como “parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”.

Em termos gerais, a incerteza de medição engloba muitos componentes, como por exemplo, componentes de erros sistemáticos. De acordo com (INMETRO, 2012a), “alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados de séries de medições e podem ser caracterizados por desvios-padrão experimentais”, ou ainda, “outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvios-padrão, são avaliados por meio de distribuições de probabilidade supostas, baseadas na experiência ou em outras informações” (INMETRO, 2012a).

Assim, a incerteza de medição pode ser classificada como:

Incerteza-Padrão: “incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio-padrão” (INMETRO, 2012a). Incerteza Definicional: “Componente da incerteza de medição que resulta da quantidade finita de detalhes na definição de um mensurando” (INMETRO, 2012a).

Além disso, a incerteza da medição pode ser avaliada com:

- Tipo A: “método de avaliação de incerteza pela análise estatística de séries de observações” (INMETRO, 2012a).
- Tipo B: outros meios que não estatísticos, como por exemplo, avaliação baseada na informação (INMETRO, 2012a):
 - associada a valores publicados por autoridade competente;
 - associada ao valor de um material de referência certificado;

- obtida a partir de um certificado de calibração;
- relativa à deriva¹;
- obtida a partir da classe de exatidão dum instrumento de medição verificado e,
- obtida a partir de limites deduzidos da experiência pessoal.

Para se obter um resultado mais detalhado da incerteza da medição, os métodos de avaliação podem ser combinados ou expandidos, o que é denominado por (INMETRO, 2012a), como:

- Incerteza-padrão Combinada: “Incerteza-padrão obtida ao se utilizarem incertezas-padrão individuais associadas às grandezas de entrada num modelo de medição” (INMETRO, 2012b).
- Incerteza Expandida ou Incerteza Global: “Produto de uma incerteza-padrão combinada por um fator maior do que o número um” (INMETRO, 2012b).

A incerteza expandida pode ser obtida através de um fator de abrangência (k , tipicamente na faixa de 2 a 3) multiplicado pela incerteza-padrão combinada (INMETRO, 2012a).

2.1.4 Modelo de Medição ou Modelo Matemático

Na perspectiva de (INMETRO, 2012a),

“O modelo matemático da medição, que transforma o conjunto de observações repetidas no resultado de medição, é de importância crítica porque, além das observações, ele geralmente inclui várias grandezas de influência que são conhecidas de forma inexata. Essa falta de conhecimento contribui para a incerteza do resultado da medição, assim como também contribuem as variações das observações repetidas e qualquer incerteza associada ao próprio modelo matemático”.

Assim, modelo de medição ou modelo matemático é definido em (INMETRO, 2012b), como a “relação matemática entre todas as grandezas que se sabe estarem envolvidas numa medição”, e pode ser utilizado para calcular a incerteza de medição. (INMETRO, 2012a) ressalta que “uma vez que o modelo matemático pode ser incompleto, todas as grandezas relevantes devem ser variadas até a maior extensão prática possível de modo que a avaliação da incerteza possa ser baseada, tanto quanto possível, nos dados observados”. Ainda de acordo com (INMETRO, 2012a), “o modelo matemático deve ser revisado sempre que os dados observados, incluindo o resultado de determinações independentes do mesmo mensurando, demonstrarem que ele está incompleto”.

¹ Medida de desvio que, com o decorrer do tempo, certo instrumento ou aparelho passa a apresentar face ao seu padrão de funcionamento normal. Fonte: (DERIVA, 2021)

Para auxiliar a análise do modelo matemático, um “experimento bem projetado pode facilitar sobremaneira avaliações confiáveis da incerteza e é uma parte importante da arte de medição” (INMETRO, 2012a).

2.1.5 Calibração, Verificação e Validação

O resultado de uma calibração é “a relação entre as leituras de um instrumento de medição, ou sistema de medição, e os valores indicados pelo padrão” (MENDES; ROSÁRIO, 2020), ou seja, em termos práticos, a comparação entre o valor medido pelo instrumento a ser calibrado com o valor de instrumento já calibrado e certificado, ou ainda, comparado com um padrão rastreado ao Sistema Internacional (SI) (LIRA, 2018).

Em (INMETRO, 2012b), o conceito de calibração é definido como:

“Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação”.

Já a verificação, é definida como “fornecimento de evidência objetiva de que um dado item satisfaz requisitos especificados” (INMETRO, 2012b), e a validação é a “verificação na qual os requisitos especificados são adequados para um uso pretendido” (INMETRO, 2012b).

2.2 Redes LPWAN (Low Power Wide Area Network)

As redes sem fio de baixa potência e longo alcance (*Low Power Wide Area Network* - LPWAN) são conjuntos de tecnologias, em essência, voltadas para aplicações de baixo consumo energético e baixo custo, o que se encaixa perfeitamente com a proposta de Internet das Coisas (IoT) (LALLE et al., 2019). Ainda de acordo com (LALLE et al., 2019), as tecnologias LPWAN surgiram para superar a questão energética das redes celulares e o problema de alcance das redes de curto alcance, como pode ser observado na comparação de dados contidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre alcance de sinal e consumo energético das tecnologias de rede sem fio.

Tecnologia	Classificação da Tecnologia	Alcance do Sinal	Consumo Energético Estimado (Potência de Transmissão)
Bluetooth 4.0	Curto Alcance	10 m	2,5 mW
Wi-Fi 6	Curto Alcance	50 m	80 mW
3G/4G	Celular	5 km	5000 mW
LoRa®	LPWAN	2-5 km (Urbano) 5-15 km (Rural) 15 km (Linha de Visada Direta)	20 mW

Fonte: Adaptado de (LORA, 2018).

As principais tecnologias LPWAN apontadas por (LALLE et al., 2019) são: LoRa®, Narrowband - IoT (NB-IoT) e SigFox. Neste trabalho utilizou-se a tecnologia LoRa® como meio

de comunicação entre dispositivos finais e a aplicação (*middleware* Dojot) através de um LoRa® gateway. Suas principais características são brevemente apresentadas na subseção a seguir.

2.2.1 LoRa®

LoRa®, acrônimo de “longo alcance” (*Long Range*), é uma das tecnologias LPWAN mais promissoras no campo IoT. Para (ORTIZ et al., 2019), LoRa® se destaca pela “redução na complexidade do *hardware*, a diminuição do tamanho dos cabeçalhos e da complexidade da rede em termos de saltos e endereçamento, viabilizando uma comunicação bidirecional simples, com o uso de uma infraestrutura mínima e com baixo consumo de energia”.

Os termos LoRa® (camada física) e LoRaWAN® (protocolo de rede) são frequentemente usados de forma intercambiável. No entanto, referem-se a tecnologias distintas, pois operam em camadas de rede diferentes (SEMTECH, 2019), conforme apresentado na Figura 2. As características do protocolo LoRaWAN® não serão abordadas neste documento.

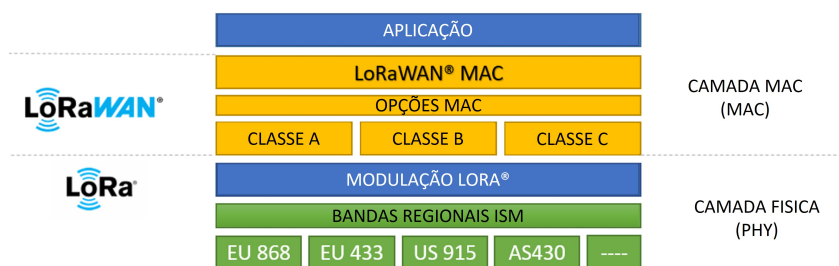


Figura 2 – LoRa® X LoRaWAN® em relação a camada de rede ISO/OSI. Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2019).

A camada física (PHY) utiliza uma técnica de modulação de espalhamento espectral (*Spread Spectrum*) proprietária, criada pela empresa Semtech, que deriva da técnica CSS (*Chirp Spread Spectrum*), no qual opera com canais de largura de banda fixa de 125 kHz ou 500 kHz (para canais *uplink*) e 500 kHz (para canais *downlink*) (SEMTECH, 2019), na banda ISM (*Industrial Sientific and Medical*) de 915-928 mHz (AU915-928), homologada para região brasileira pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), por meio do ATO N° 14448, de 4 de dezembro de 2017 (ANATEL, 2017). A distribuição de frequência dos canais (*uplink* × *downlink*) pode ser observada na Figura 3.

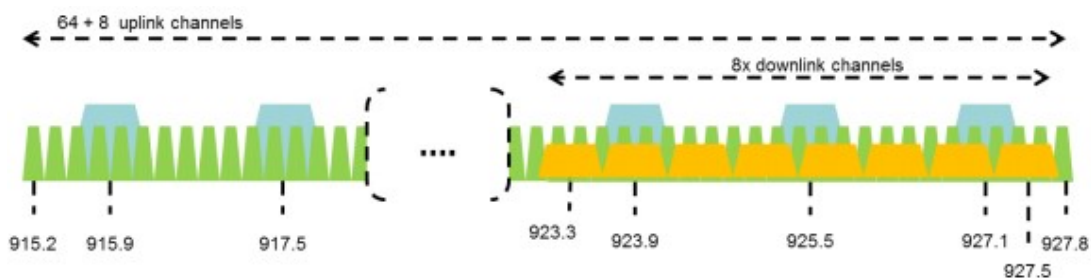


Figura 3 – Distribuição de frequência dos canais (*Uplink x Downlink*) na banda AU 915 mHz. Fonte: (ALLIANCE, 2019).

É importante ressaltar que as características de modulação LoRa® variam de região para região e são definidas pela LoRa Alliance®, por meio do documento *LoRaWAN® Regional Parameters*². Outra característica da modulação da camada física LoRa® é o código de espalhamento aplicado ao sinal de dados original, denominado de fator de propagação ou fator de espalhamento (SF). O LoRa® fornece 6 parâmetros SF (SF7 a SF12), que possibilita ajustar a propagação do sinal, ou seja, o alcance do sinal, porém, quanto maior o fator (alcance do sinal), menor a taxa de bits (SEMTECH, 2019).

Um exemplo dessa relação está contido na Tabela 2, que considera um *payload* de 11 *bytes* para um canal de *uplink* de 125 MHz, e os quatro primeiros valores de SF (SF7 a SF10). Outra característica apresentada na tabela é o tempo de propagação da informação no ar (*Time on Air -ToA*), também conhecido como ciclo de trabalho ou ciclo de serviço, definido por (LORA, 2018) como “a proporção de tempo durante o qual um componente, dispositivo ou sistema é operado”.

Tabela 2 – Características de propagação de sinal LoRa® em relação ao Fator de Espalhamento (SF).

SF	Taxa de Bits	Alcance do Sinal	Tempo de Propagação no Ar (ToA)	Sensibilidade do Receptor (RX) em dBm
SF10	980 bps	8 km	371 ms	-137,5
SF9	1760 bps	6 km	185 ms	-135,0
SF8	3125 bps	4 km	103 ms	-132,5
SF7	5470 bps	2 km	61 ms	-130,0

Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2019; LALLE et al., 2020).

O LoRa® também possui mecanismos de identificação e correção de erros, implementados através de redundância nas mensagens, em que é definido um conjunto de *bits* para esse propósito, também conhecido como taxa de código (*Code Rate - CR*). (ORTIZ et al., 2019; SEMTECH, 2019).

As principais características do LoRa®, segundo (SEMTECH, 2015), são:

- **Largura de banda escalável:** A modulação LoRa® é escalonável em largura de banda e frequência, podendo ser facilmente adaptada para qualquer modo de operação com apenas algumas alterações de parâmetros de configuração.
- **Envelope constante/baixo consumo de energia:** o LoRa® utiliza a técnica de modulação de envelope constante (na qual todas as informações residem na fase do sinal, não na amplitude) o que pode ser utilizado por amplificadores de potência (PA) padrões do mercado, sem nenhuma modificação, o que barateia o custo do hardware. Além disso, o conjunto de técnicas permite um baixo consumo energético, o que permite a criação de dispositivos operados por bateria que podem durar até 10 anos.

² Disponível em: RP2-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters

- **Alta Robustez:** Devido ao produto $Bandwidth \times Time$ (largura de banda \times tempo) ser maior que 1 ($BT > 1$) e sua natureza assíncrona, o LoRa® é muito resistente a interferências dentro e fora de banda.
- **Resistente a problemas de atenuação por multipercurso e desvanecimento:** o *chirp* (sinal no qual a frequência aumenta ou diminui com o tempo) utilizado na modulação ocupa uma largura de banda relativamente larga (*broadband*) e, portanto, LoRa® oferece um bom nível de imunidade a trajetórias múltiplas (*multipath*) e atenuação (*fading*), tornando-o ideal para uso em ambientes urbanos e rurais.
- **Resistente a efeito Doppler:** O efeito *Doppler* (fenômeno físico que altera a percepção da frequência ondulatória no receptor quando o emissor ou o receptor se desloca em relação ao outro em um movimento contínuo) causa um pequeno deslocamento de frequência do pulso LoRa®, que introduz um deslocamento relativamente insignificante na frequência de banda base. Essa tolerância de deslocamento de frequência atenua a necessidade de *hardware* extra, tornando o LoRa® ideal para *links* de comunicação de dados móveis, como por exemplo, sistemas de monitoramento sem fio de pressão de pneus de um carro;
- **Longo alcance:** o conjunto de técnicas de modulação do LoRa® permitem um alcance 4 vezes maior se comparado a outras tecnologias de modulação, como o FSK (*Frequency-shift keying*), para uma mesma potência de transmissão e taxa de bits fixa;
- **Capacidade de rede aprimorada:** O esquema de modulação Semtech LoRa® emprega fatores de propagação (SF) ortogonais que permitem que vários sinais de propagação sejam transmitidos ao mesmo tempo e no mesmo canal sem alterar a sensibilidade do receptor;
- **Variação/Localização:** Uma propriedade inerente do LoRa® é a capacidade de discriminar linearmente entre erros de frequência e tempo. LoRa® é a modulação ideal para aplicações de radar e, portanto, é ideal para aplicações de alcance e localização, como serviços de localização em tempo real.

2.3 Protocolos de Camada de Aplicação IoT

Os dispositivos IoT se comunicam usando protocolos padrões da indústria. De maneira geral, um protocolo é um conjunto de regras que determina como os dados são tabulados e compreendidos por dispositivos em um processo de comunicação. No contexto IoT, os protocolos garantem que as informações de um dispositivo ou sensor sejam lidas e compreendidas por outros dispositivos, *gateways* ou serviços (MICROSOFT, 2021; KONDORO et al., 2021).

Na camada de aplicação IoT, os seguintes protocolos se destacam (KONDORO et al., 2021):

- AMQP (*Advanced Message Queuing Protocol*);
- CoAP (*Constrained Application Protocol*);
- DDS (*Data Distribution Service*);
- MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*).

Cada um dos protocolos listados atende a um conjunto de requisitos específicos e não necessariamente são protocolos concorrentes, logo, a correta seleção do protocolo é fundamental para lograr êxito na implantação de um projeto IoT (HERRERO, 2021; YUGHA; CHITHRA, 2020). Neste trabalho, é proposta a utilização do protocolo MQTT. Suas principais características são descritas na subseção a seguir.

2.3.1 MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*)

MQTT é um protocolo padronizado pela OASIS cujo objetivo é facilitar a comunicação entre dispositivos IoT. De acordo com a documentação atual (versão 5.0) das especificações do protocolo, elaborado pela OASIS (BANKS et al., 2019), o MQTT é um protocolo leve, de código aberto, simples e fácil de implementar, que transporta mensagens do tipo publicação/assinatura (também conhecido como *publish/subscribe*), o que o torna ideal para uso em muitas situações, incluindo ambientes restritos, como para comunicação em contextos máquina a máquina (M2M) e IoT, ou seja, é adequado para dispositivos com restrições de recursos e que usam tecnologias de comunicação com baixa taxa de bits e alta latência (MILEVA et al., 2021).

Segundo (HIVEMQ, 2015), a arquitetura *publish/subscribe* desvincula o cliente que envia uma mensagem (o editor) do cliente ou clientes que recebem as mensagens (os assinantes), ou seja, a comunicação entre os dispositivos finais não é direta e necessita de um intermediário (denominado *broker*) para gerenciar a troca de informações, como pode ser observado no exemplo da Figura 4, no qual um *endpoint* transmite uma mensagem contendo a informação da velocidade do veículo (*publish 70 mph*) para o tópico (ou assunto) “*speed*”, e o *broker* (*software* HiveMQ) se encarrega de distribuir a mensagem entre os assinantes do tópico (representado na figura pelo dispositivo móvel e o computador). Para que essa comunicação seja possível, é necessária a conexão prévia das partes com o *broker*.

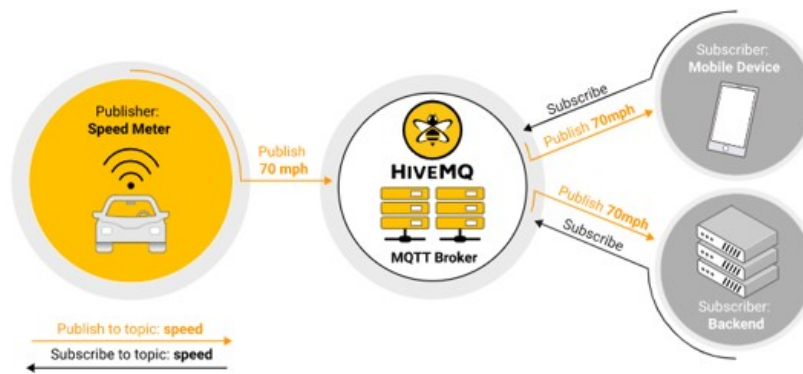


Figura 4 – Arquitetura Publish/Subscribe (Pub/Sub). Fonte: (HIVEMQ, 2015).

Um tópico refere-se a uma *string* UTF-8 (semelhante a uma URL - *Uniform Resource Locator*) que o *broker* usa para filtrar mensagens para clientes conectados e pode conter um ou mais níveis, em que cada nível do tópico é separado por uma barra (separador de nível de tópico), como esboça a Figura 5.



Figura 5 – Exemplo de estrutura de tópico MQTT. Fonte: (HIVEMQ, 2015).

No exemplo de estrutura de tópico apresentada na Figura 5, a *string* pode ser interpretada como um tópico em que faz-se uma alusão a compartimentos de uma casa (sala de estar do térreo) em que se pretende monitorar a temperatura (atributo) do ambiente. Essa estrutura de tópico além de ser de fácil interpretação não sobrecarrega a aplicação (HIVEMQ, 2015). É importante ressaltar que a estrutura do tópico pode variar de aplicação para aplicação e a documentação do desenvolvedor deve ser consultada previamente.

O MQTT utiliza o protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*) na camada de transporte para fornecer conexões ordenadas, sem perdas e bidirecionais. De acordo com (BANKS et al., 2019), suas principais características são:

- Suporte para três níveis de Qualidade de Serviço (QoS);
- Possui mecanismos de notificação quando há perda na conexão;
- Baixa sobrecarga (*overhead*) na rede;
- Comunicação assíncrona;
- É agnóstico de dados, ou seja, o editor decide se quer enviar (publicar) dados binários, dados de texto ou até mesmo XML (*Extensible Markup Language*) ou JSON (*JavaScript Object Notation*) completos.

(MILEVA et al., 2021) ressalta que “embora o MQTT v5.0 tenha herdado muito do seu antecessor, ou seja, o v3.1.1, ambas as versões não são, em princípio, compatíveis. Isso é causado pela diferente estrutura de mensagens, bem como recursos adicionais que foram introduzidos na nova versão”.

2.4 Middleware IoT

Middleware é definido por (VIKASH; MISHRA; VARMA, 2021), como um conjunto de componentes de software que opera em uma camada intermediária entre o sistema operacional e a interface de aplicativo do usuário final, como também fornece uma camada comum de abstração de software para aplicação distribuída.

No contexto IoT, o *middleware* reduz a complexidade do ecossistema e fornece um ambiente com um conjunto de recursos (serviços) que facilitam o desenvolvimento de aplicações de forma ágil. Nesse contexto, diversas soluções de *middleware* são encontradas atualmente no mercado e podem ser classificadas de acordo com sua arquitetura, que pode ser monolítica (todo o sistema está estruturado em uma grande aplicação) ou baseada no novo paradigma de microsserviços (todo o sistema é decomposto em pequenos componentes independentes, que podem ser interligados para compartilhar serviços) (BENAYACHE et al., 2019).

Neste trabalho, é proposto o uso do *middleware* Dojot, baseado no novo paradigma de microsserviços. Suas principais características são apresentados na subseção a seguir.

2.4.1 Dojot

O Dojot foi lançado em 2017 com o objetivo de desenvolver e demonstrar tecnologias para as cidades inteligentes e IoT pela Fundação CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações). Trata-se de um *middleware* de código aberto que utiliza tecnologias no estado da arte e possui uma arquitetura baseada em microsserviços (DOJOT, 2017). Seus componentes estruturais podem ser observados na Figura 6.

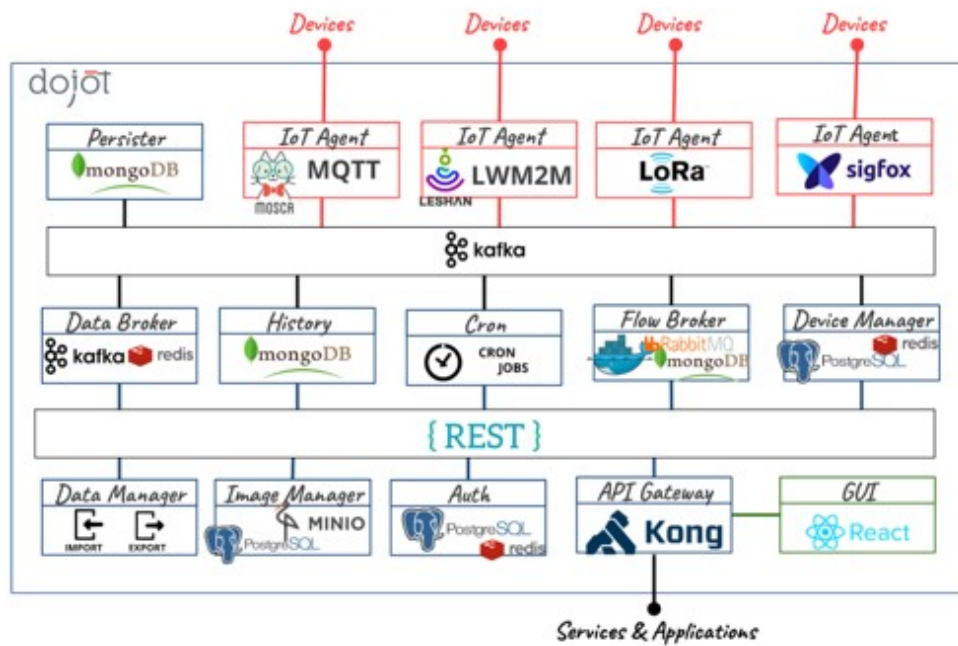


Figura 6 – Arquitetura de microsserviço do *middleware* Dojot. Fonte: (DOJOT, 2020).

A arquitetura é composta por vários componentes, em que cada um desses elementos é composto por um ou mais microsserviços que executam em um ambiente virtualizado (*container* Docker ou Kubernetes). A comunicação interna é realizada por dois tipos de mensagens: tópicos Kafka (estrutura de dados análoga a “uma pasta em um sistema de arquivos, e os eventos são os arquivos nessa pasta” (KAFKA, 2017), no qual deve conter um *subject* e um *tenant*, como pode ser observado no exemplo da Figura 7) e requisições HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) REST (*Representational State Transfer*). O componente Data Broker (*software* Apache Kafka + Redis) fornece dois serviços: gerenciamento de mensagens do tipo *subject* e tópicos do Kafka, além de conexões socket.io e dados em tempo real (lida com o roteamento de dados). O API Gateway (*software* Kong) gerencia o fluxo de mensagens (requisições HTTP REST) entre serviços externos e internos do Dojot (DOJOT, 2020).

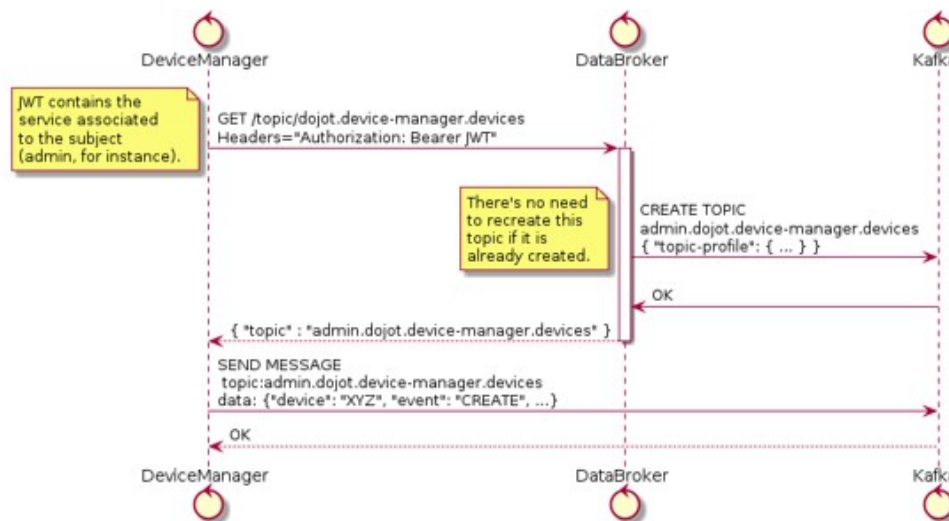


Figura 7 – Exemplo de comunicação interna entre os componentes DeviceManager e DataBroker através de tópicos Kafka. Fonte: (DOJOT, 2020).

No exemplo mostrado na Figura 7, o componente DeviceManager precisa publicar uma mensagem sobre um novo dispositivo, no qual envia uma solicitação ao DataBroker (que consulta o componente Auth para autorização), indicando qual *tenant* (dentro do *JSON Web Token - JWT*) e qual *subject* (`dojot.device-manager.devices`) deseja usar para enviar a mensagem.

O Apache Kafka é uma “plataforma distribuída de transmissão de dados que é capaz de publicar, subscrever, armazenar e processar fluxos de registro em tempo real” (HAT, 2021). O Kong é um *gateway* de APIs RESTful otimizado para operar em arquiteturas de microsserviços e sistemas distribuídos, desenvolvido para processar altas taxas de informações em tempo real com latência muito baixa, podendo ser implementado em infraestruturas locais ou na nuvem (NADA, a).

Na ponta da comunicação com os dispositivos finais encontram-se os agentes IoT, em que atualmente o software implementado na versão 0.6.0 do Dojot é o VerneMQ. O IoT *Agent* também é responsável por traduzir as mensagens dos *endpoints* em mensagens Kafka e vice-versa (DOJOT, 2020). Embora a figura ilustre outros agentes, apenas o módulo com suporte ao protocolo MQTT é implementado, contudo, o Dojot fornece API (*Application Programming Interface*) para desenvolvimento de novos agentes IoT. O VerneMQ é um *broker* (intermediário) que gerencia mensagens de publicação/assinatura MQTT e fornece recursos relacionados à escalabilidade e confiabilidade (VERNEMQ, 2021).

O formato padrão de mensagem MQTT usado pela Dojot (VerneMQ) é uma estrutura de dados JSON do tipo “chave-valor” (é possível traduzir qualquer formato para esse esquema utilizando fluxos) e devem seguir os seguintes requisitos, de acordo com (DOJOT, 2020):

- A assinatura do tópico para publicação (*publisher*) deve assumir o padrão: `<tenant>:<device-id>/attrs` (por exemplo: `admin:efac/attrs`);

- O tópico de subscrição (*subscriber*) deve conter o seguinte formato: `<tenant>:<device-id>/config` (por exemplo: `admin:efac/config`);
- A identificação do usuário deve conter a mesma assinatura do tópico: `<tenant>:<device-id>` (por exemplo: `admin:efac`);
- O corpo da mensagem (*payload*) deve ser um JSON com cada chave sendo um atributo do dispositivo cadastrado no Dojot (por exemplo: `"temperature": 10.5, "pressure": 770`).

Os demais componentes da arquitetura são:

- Auth: responsável pelo gerenciamento, autenticação e autorização do usuário. É invocado pelo Kong sempre que uma solicitação é recebida por um dispositivo IoT registrado (DOJOT, 2020);
- DeviceManager: armazena e recupera informações de dispositivos e modelos (*templates*) no banco de dados PostgreSQL, além de algumas informações estáticas sobre estes através de mensagens Kafka (DOJOT, 2020);
- Persister: é o componente responsável por armazenar os dados enviados pelos *endpoints* no banco de dados MongoDB, o qual sempre que uma nova mensagem é recebida, os dados são armazenados no documento referente ao ID do dispositivo (DOJOT, 2020);
- History: componente que realiza a interface de acesso ao MongoDB, ou seja, é responsável por consultar e retornar as informações de um dispositivo do banco de dados (DOJOT, 2020) e,
- Flowbroker: é um serviço baseado no *front end* Node-RED, mas usa seu próprio motor para processar as mensagens, ou seja, lida com fluxos (CRUD e execução de fluxo) e fornece um editor de fluxo baseado em navegador que facilita a transferência de fluxos usando a ampla gama de blocos de funções (módulos) disponíveis na interface (DOJOT, 2020).

MongoDB é um banco de dados de documentos que utiliza estrutura de dados semelhantes ao JSON (acrônimo de *JavaScript Object Notation*). Sob a perspectiva de (MONGODB, 2021) “esta é a maneira mais natural de pensar sobre dados, e é muito mais expressiva e poderosa do que o modelo tradicional de linha/coluna”.

Outro ponto importante observado na arquitetura do Dojot é a implementação do *software* Redis em alguns microsserviços (Data Broker, Device Manager e Auth), utilizado para otimizar o processo de armazenamento dos dados e reduzir a latência na comunicação interna entre os componentes, uma vez que, é um banco de dados do tipo chave-valor que executa diretamente na memória RAM (*Random Access Memory*), podendo funcionar como cache de dados, realizar gerenciamento de sessões *publish/subscribe* e classificações (AWS, 2021).

2.5 Sistemas Embarcados

Para (MORAES; ALMEIDA; SERAPHIM, 2016), sistemas embarcados são “sistemas eletrônicos microprocessados que, após serem programados, possuem uma função específica que geralmente não pode ser alterada”. Ainda de acordo com (MORAES; ALMEIDA; SERAPHIM, 2016), outra característica dos sistemas embarcados são “a restrição de recursos, tanto computacionais: memória e processamento, quanto físicos: número de terminais e interfaces de exibição/entrada de dados”.

Neste trabalho é proposta a utilização da plataforma WiFi LoRa® 32 para a construção do sistema embarcado, de modo a controlar os sensores e atuadores do medidor inteligente de água. Suas características são descritas sumariamente na subseção a seguir.

2.5.1 WIFI LoRa® 32

O WIFI LoRa® 32 é um kit de desenvolvimento fabricado pela empresa *Heltec Automation*TM, projetado para desenvolver aplicações IoT para ambientes inteligentes (cidades, casas, fazenda etc.), que integra um SoC (*System on Chip* ou Sistema em um Chip) ESP32 (do fabricante *Espressif Systems*), módulos LoRa® SX127x (do fabricante Semtech), sistema de gerenciamento de baterias Li-Po (polímero de lítio) e um *display* OLED (*Organic Light Emitting Diode*) de 0,96" (HELTEC, 2018). Na Figura 8 é mostrado seu diagrama de pinagem e as funções associadas a cada pino.

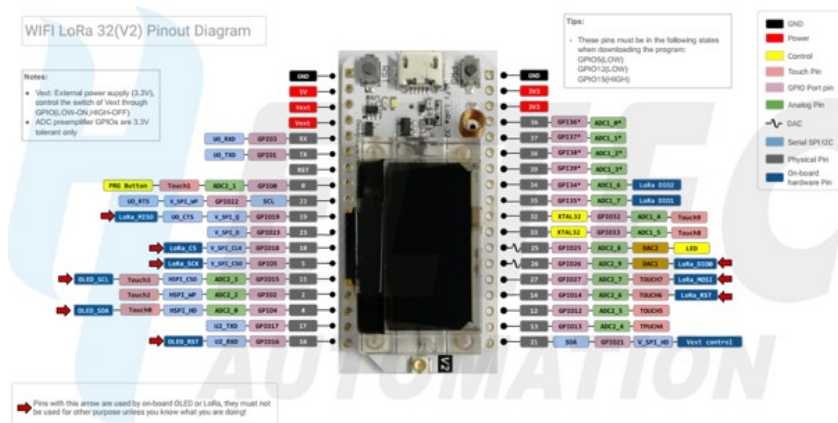


Figura 8 – Diagrama de pinagem do WIFI LoRa® 32. Fonte: (HELTEC, 2021).

Já o ESP32 é descrito por (BERTOLETI, 2019), como um combo de chips que “oferece conectividade (Wi-Fi e *Bluetooth*, com frequência 2,4GHz), poder computacional (CPU + memórias), I/Os, RTC, suporte à comunicações diversas (SPI, I²C, I²S, etc.), suporte à operação *Low-Power* e blocos de hardware dedicados à segurança em um único chip”, logo, se mostra uma solução compacta com diversos recursos importantes para o desenvolvimento de aplicações IoT.

2.6 Trabalhos Relacionados

Nesta seção, são apresentados seis trabalhos relacionados ao tema em estudo, que fornecem uma visão do estado da arte e o potencial da aplicabilidade da “medição inteligente de água” encontrada atualmente na literatura.

A primeira proposta (YE et al., 2021) apresenta uma solução de hidrômetro com arquitetura híbrida de medição (mecânico e eletrônico), como uma proposta para utilização em *Smart City*, substituindo os hidrômetros convencionais. Com uma abordagem mais ampla, o segundo trabalho (SARAVANAN; DAS; IYER, 2017) apresenta um projeto piloto de implantação de uma rede inteligente de água (*Smart Water Grid*) em uma vila na Índia. Na terceira proposta (BRANDÃO, 2019) é apresentado um trabalho de desenvolvimento de um protótipo de medidor inteligente de água (*Smart Water Meter*) de baixo custo, para fins de micromedição do consumo final em um campus universitário. O quarto trabalho (WISINTAINER, 2020) demonstra a viabilidade de um medidor inteligente de água para medição do consumo de água através de protótipo desenvolvido com dispositivos IoT operando em rede SigFox. As duas últimas propostas (RAY; GOSWAMI, 2020; NADIPALLI et al., 2021) são análogas do ponto de vista do conjunto de tecnologias IoT utilizadas, porém o escopo da última proposta se diferencia por apresentar uma solução voltada para uso consciente da água no âmbito residencial. A seguir são fornecidos mais detalhes de cada trabalho.

Em (YE et al., 2021) os autores propuseram uma nova abordagem de sistema de medição inteligente de água (*Smart Water Metering System - SWATS*) para cidades inteligentes baseado na tecnologia LoRa®, na plataforma STM32 (microcontrolador de 32-bits da família Arm® Cortex®-M) e em um sensor de indução em conjunto com algoritmo de detecção para monitorar e mapear o relógio analógico do medidor inteligente de água proposto. O ponto alto do trabalho é a implementação de um algoritmo para redução de erro de leitura ocasionado por altas pressões ou altos fluxos de água em hidrômetros mecânicos, em um fenômeno conhecido por flutuação de pressão, o que pode ser aproveitado para testes futuros na solução proposta neste documento. Para validar a proposta, foram realizados experimentos em diferentes condições de temperatura, pressão e qualidade da água, em uma simulação de consumo de uma residência, variando-se o fluxo e o tempo de vazão da água, bem como alterações no algoritmo de medição. Os resultados demonstraram que a diferença geral na leitura entre o relógio mecânico e o sistema eletrônico foi de 0,36%, quando utilizado o algoritmo de prevenção de vazamento de água. Porém, para utilização em cenário real a solução precisaria seguir metodologias metrológicas para garantir a qualidade da medição.

O projeto piloto demonstrado por (SARAVANAN; DAS; IYER, 2017) implementa uma solução de *Smart Water Grid* na vila de Mori, situada no delta sudeste de Andhra Pradesh, Índia. O projeto envolve o monitoramento e a medição de diversos parâmetros da qualidade da água (ORP, pH, Salinidade, Nível, Turbidez, Temperatura e Fluxo de Água) através de sensores instalados no reservatório central de água da vila e em canais de água em seu entorno. Foram

usados microcontroladores Arduino e módulos LoRa® para transmissão das informações dos sensores a um LoRa® gateway conectado à plataforma em nuvem *Ericsson Cloud*. De acordo com os autores, três objetivos foram alcançados com a implantação do sistema: melhorias na qualidade da água na região; sistema de alerta eficiente para controle de enchentes e detecção de alta salinidade da água, além de facilidade no acesso às informações da qualidade da água para os moradores da região e autoridades locais. Foi utilizada a técnica estatística de regressão logística aplicada através da ferramenta de aprendizagem de máquina WEKA para analisar os dados dos sensores armazenados na nuvem. Os resultados obtidos demonstraram que 99% dos valores são corretamente classificados para prever a potabilidade da água no tanque e canais. O destaque da solução proposta é a utilização de ferramentas de *Machine Learning* para otimizar a identificação de padrões da qualidade da água.

No trabalho apresentando em (BRANDÃO, 2019), os autores demonstram uma solução de um dispositivo de medição inteligente de água de baixo custo, visando o monitoramento automatizado de consumo em pontos de utilização do *campus* Campina Grande da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande). Foram utilizados microcontroladores Arduino e NodeMCU (do fabricante *Espressif Systems*) com sensores de fluxo de água tipo turbina. A plataforma utilizada para consolidar os dados foi o SIGA (Sistema de Gerenciamento de Água), fruto de um projeto de pesquisa realizado em parceria com o curso de Ciência da Computação da UFCG. Para avaliar a eficiência do dispositivo proposto, os medidores foram instalados em chuveiro, lavatório, mictório, bacia sanitária e pia da cozinha de um bloco do *campus*. Os resultados demonstraram que o “maior consumo foi da pia da copa 45%, seguido da bacia sanitária 43% e depois o lavatório do banheiro 12%, valores divergentes do apresentado pela literatura que são de 17%, 29%, e 6% respectivamente” (BRANDÃO, 2019). Embora o trabalho apresente dados estatísticos para efeito comparativo, a qualidade da medição pode ser questionada, uma vez que não é apresentada uma metodologia para calibração dos sensores.

Com o escopo do trabalho voltado para o desenvolvimento de um protótipo de medidor inteligente de água para uso residencial, em (WISINTAINER, 2020) é apresentada uma solução baseada em sensor de fluxo de água tipo turbina (modelo YF-S201), microcontrolador NodeMCU, sensor de pressão (modelo SKU237545) e módulo de comunicação *Sigfox Wisol WSSFM10R2 Breakout Board*. Na proposta, os autores também desenvolveram uma aplicação para processamento dos dados do medidor e visualização do consumo de água baseada nas tecnologias Node.js, banco de dados *Firebase* e no *framework Angular*. A aplicação foi hospedada na nuvem *Heroku*. De acordo com os autores, o protótipo obteve resultados satisfatórios em relação ao cálculo do consumo de água, atingindo uma precisão acima de 90% para fluxos constantes de água e uma de precisão de 99% para testes com vazões alternadas. Para chegar aos resultados apresentados, os autores realizaram 3 experimentos, em que foram realizadas 3 medições para cada volume (3L, 5L e 10L), variando-se o fluxo da água em baixa, média e alta vazão. No primeiro cenário, levou-se em consideração apenas a verificação do sensor de fluxo em fluxo de água constante. De forma análoga, no segundo experimento, levou-se em consideração o valor

da pressão para calcular a vazão. Por fim, variou-se o fluxo da água e utilizou-se a medição dos dois sensores para realizar o cálculo de consumo. Pode-se dizer que o ponto alto do trabalho está na utilização dos dados de pressão para otimizar o cálculo do consumo, em que utilizou-se o valor da pressão para criar um fator de correção no cálculo. Este é um ponto interessante e pode ser adotado na solução proposta neste trabalho.

Em (RAY; GOSWAMI, 2020) os autores propõem uma solução de medição inteligente de água baseada no dispositivo embarcado NodeMCU, em um sensor de água do tipo turbina (modelo YF-S201), uma unidade de memória e um placa de painel solar para alimentar o sistema. Os dados são transmitidos em intervalos regulares para a plataforma na nuvem *ThingSpeak* através de rede Wi-Fi. Como diferencial da proposta, a solução utiliza aprendizado de máquina (*Machine Learning*) em um modelo de regressão linear para identificar e diferenciar padrões de fluxo como fluxo normal, excessivo ou contínuo. Outra função adicionada ao sistema (utilizando a tecnologia *WebHooks* em conjunto com a plataforma IFTTT), foi a adição de um mecanismo de alerta, na qual é disparada uma notificação via *e-mail* em caso de detecção de anomalias. Porém, não são apresentados dados substanciais para comprovação da qualidade da medição.

Análoga às soluções apresentadas no parágrafo anterior, (NADIPALLI et al., 2021) também apresenta uma solução de medidor inteligente de água com o mesmo conjunto de dispositivos IoT (YF-S201 + NodeMCU), porém a plataforma em nuvem utilizada foi a *Thinger.io*. O escopo do trabalho é apresentar uma solução que visa o uso consciente da água para usuários residenciais, no qual apresenta uma *dashboard* de monitoramento em uma escala de cores na qual o usuário define suas metas de consumo (verde = consumo dentro do limite estabelecido; amarelo = consumo extrapolado, redução do fluxo da água; vermelho = consumo muito excedido, fluxo da água cortado). O trabalho não apresenta uma amostra de dados relevantes nem métodos estatísticos para uma avaliação mais precisa do sistema proposto.

A Tabela 3 contém as informações resumidas das principais características dos trabalhos de medição inteligente de água apresentados.

Tabela 3 – Características dos trabalhos relacionados.

Art.	Parâmetros Monitorados	Sensores Utilizados	Plataformas IoT (Hardware+Middleware)	Tecnologia de comunicação
(YE et al., 2021)	Vazão	Não informado	SM32	LoRa®
(SARAVANAN; DAS; IYER, 2017)	ORP pH Salinidade Nível Turbidez Temperatura Vazão	Não informado	Arduino NANO Ericsson Cloud	LoRa® (867 MHz)
(BRANDÃO, 2019)	Vazão	Não informado	NodeMCU Plataforma própria	Wi-Fi
(WISINTAINER, 2020)	Vazão Pressão	YF-S201 SKU237545	NodeMCU Wisol WSSFM10R2 Plataforma Própria	Sigfox
(RAY; GOSWAMI, 2020)	Vazão	YF-S201	NodeMCU ThingSpeak	Wi-Fi
(NADIPALLI et al., 2021)	Vazão	YF-S202	NodeMCU Thingier.io	Wi-Fi

Fonte: Autoria própria.

É importante salientar que nenhum dos estudos apresentados nesta seção descreve métodos de calibração e cálculos da incerteza de medição utilizados em normas técnicas de metrologia para validar seus sistemas de medição propostos, preocupando-se muitas vezes apenas com seu caráter tecnológico e funcional, em que boa parte das soluções não levam em consideração o perfil de consumo do usuário, as vazões típicas reais do sistema no qual serão inseridos e demais variáveis inerentes a esse tipo de aplicação.

Outra característica observada nos artigos apresentados é que os autores não levam em consideração ou pelo menos não é declarado de forma explícita o índice de incerteza da medição de seus medidores inteligentes de água, o que por si só é considerado uma medição incompleta, pois não acompanha o valor declarado da incerteza da medição (INMETRO, 2012a).

A solução desenvolvida nesta dissertação se diferencia das demais soluções apresentadas pelos seguintes pontos:

- O método para calibração do sensor de fluxo, o cálculo de incerteza da medição do medidor inteligente de água desenvolvido e o índice de desempenho do medidor (IDM) foi baseado em metodologia metrológica estabelecido em normas técnicas brasileiras e no Regulamento Técnico Metrológico (RTM) de 2022 do INMETRO;
- Utilizou-se o *middleware* Dojot (de código aberto e gratuito) na camada de aplicação, em vez de soluções na nuvem (soluções pagas), contribuindo para diminuir a latência na comunicação entre os dispositivos (o que agiliza a tomada de decisão) e economizar largura de banda da rede, além de fornecer uma interface para visualização dos dados em tempo real;
- Desenvolveu-se um medidor inteligente de água modular, que inclui sensores para verificar a vazão de água, a pressão e, a temperatura, pressão atmosférica e a umidade do ambiente,

bem como, uma válvula tipo solenoide para controlar remotamente o fluxo da água, uma válvula de retenção de água e um filtro de partículas, garantindo assim uma maior eficiência na verificação do consumo de água e,

- Utilizou-se o dev-board IoT Wi-Fi LoRa® 32 (V2) (do fabricante Heltec), operando na frequência de 917 MHz, em uma comunicação de camada física LoRa®.

3 METODOLOGIA

3.1 Contribuições da Pesquisa

Como contribuições da pesquisa, levantou-se a caracterização do perfil de consumo de água do *campus*, bem como os níveis de pressão da água na entrada do sistema de distribuição de água, sendo possível averiguar se os valores obtidos estão dentro dos limites impostos por normas brasileiras vigentes.

Outra contribuição almejada para a pesquisa é a avaliação de desempenho de comunicação da camada física da rede LoRa® em ambiente real implementado no *campus*. Além disso, validou-se o ecossistema IoT utilizado (com a utilização do *middleware* Dojot, do protocolo MQTT e da tecnologia LoRa®), facilitando o desenvolvimento de novas aplicações IoT no *campus*.

3.2 Aplicabilidade

A solução desenvolvida aplica-se não apenas no contexto do controle e gerenciamento remoto do fluxo de água em sistemas de distribuição de água de um *campus*, mas em qualquer rede de distribuição de água em que necessite coletar dados em tempo real para um controle remoto efetivo que vise a redução de perdas e uma otimização no uso dos recursos hídricos, desde que se respeite os limites da tecnologia. Ademais, a arquitetura utilizada com o uso da plataforma Dojot no centro da aplicação pode ser utilizada em qualquer contexto IoT em que se deseje monitorar e controlar serviços e instalações remotamente através de protocolos como MQTT ou HTTP, agentes de comunicação IoT já implementados no *middleware* Dojot.

3.3 Método

A pesquisa desenvolvida neste trabalho pode ser classificada como **aplicada**, pois visa solucionar um problema local do *campus* Campina Grande do IFPB.

Em relação à classificação dos objetivos, pode-se denominar como do tipo **descritiva**, pois descreve as características do sistema desenvolvido, bem como analisa estatisticamente os dados coletados através deste, ou seja, a pesquisa configura-se como uma abordagem **quantitativa**.

Quanto ao local de **obtenção das informações**, realizou-se um levantamento **bibliográfico** através de bases de dados amplamente conhecidas pela comunidade acadêmica, como por exemplo, IEEE Xplorer, Science Direct, ACM DIGITAL LIBRARY, entre outros. Em um segundo momento, realizou-se um levantamento **laboratorial**, por meio de ensaios para calibra-

ção de sensores e testes de comunicação entre o sistema embarcado, sensores e o *middleware* utilizado na solução desenvolvida. Por fim, realizou-se a coleta de **campo** de forma remota e automática, com o medidor inteligente de água instalado no cavalete de entrada de água.

A metodologia aplicada neste trabalho foi uma adaptação do método *Design Science Research* (DSR) desenvolvida por (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020), explanado brevemente na próxima seção. O uso do DSR se dá por “ter um objetivo mais amplo: gerar conhecimento que seja aplicável e útil para a solução de problemas, melhoria de sistemas existentes e criação de novas soluções e/ou artefatos” (LACERDA DANIEL PACHECO, 2013).

A tabulação dos dados se deu através de planilhas eletrônicas para uma melhor visualização dos dados coletados e facilidade para gerar gráficos, além da ferramenta Overleaf para produção textual e da própria interface de visualização dos dados do Dojot.

O Ambiente de Desenvolvimento Integrado (do inglês *Integrated Development Environment* - IDE) para programação do dispositivo final LoRa® utilizado neste trabalho, foi o *Visual Studio Code*, desenvolvido pela Microsoft em conjunto com o *framework* PlatformIO. A linguagem de programação selecionada para o desenvolvimento da aplicação foi a linguagem C, padrão de desenvolvimento do microcontrolador ESP32 integrado ao WIFI LoRa® 32. Estas ferramentas permitiram o desenvolvimento do trabalho em sua plenitude, pois, fornecessem os recursos necessários sem custos complementares.

Todo registro documental, bem como as respectivas abordagens analíticas foram organizadas em uma estrutura monográfica apresentada neste documento.

3.3.1 Método *Design Science Research*

O *Design Science Research* é um método científico que evoluiu do conceito “ciência do artificial” ou “ciência do projeto” (do inglês *Design Science* - DS) e, ganhou destaque na comunidade científica através do ganhador do Prêmio do Banco da Suécia para as Ciências Econômicas em Memória de Alfred Nobel de 1978, Herbert Simon, embora outros autores (Fuller (1965) e Gregory (1966)) tenham utilizado o termo primeiro (RODRIGUES, 2018).

Em sua obra seminal “As Ciências do Artificial” (*The Sciences of the Artificial*) de 1969, Simon consolida um arcabouço conceitual sobre o que ele denomina de “ciência do artificial”, defendendo assim a “necessidade de criar uma ciência (i.e., um corpo de conhecimento rigoroso e validado) que se dedique a propor como construir artefatos que possuam certas propriedades desejadas – isto é, como projetá-los” (RODRIGUES, 2018).

Os principais conceitos da DS, segundo (DRESCH, 2013), são apresentados de forma sistemática na Figura 9.

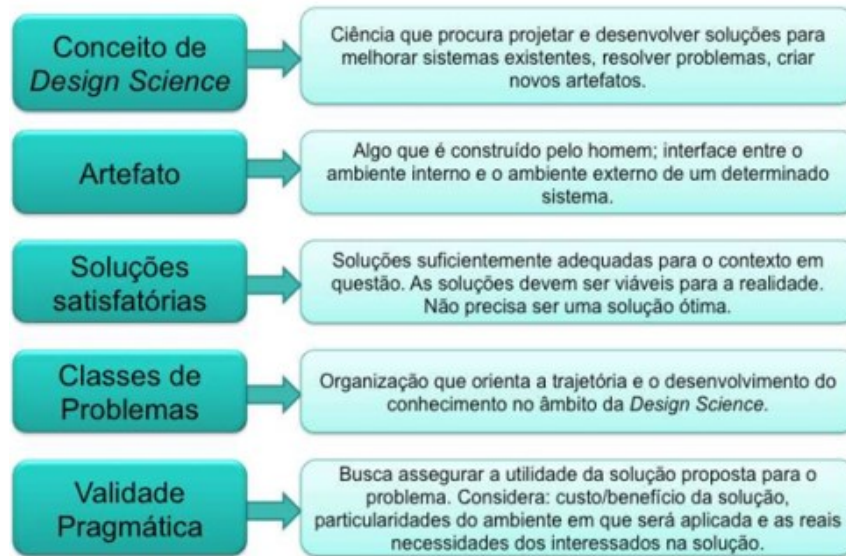


Figura 9 – Síntese dos conceitos e fundamentos da *Design Science*

Fonte: (DRESCH, 2013)

A relação entre DS e DSR é estabelecida por (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020) como:

“A *design science* é a base epistemológica quando se trata do estudo do que é artificial. A *design science research*, por sua vez, é o método que fundamenta e operacionaliza a condução da pesquisa quando o objetivo a ser alcançado é um artefato ou uma prescrição. Como método de pesquisa orientado à solução de problemas, a *design science research* busca, a partir do entendimento do problema, construir e avaliar artefatos que permitam transformar situações, alterando suas condições para estados melhores ou desejáveis. Ela é utilizada nas pesquisas como forma de diminuir o distanciamento entre teoria e prática”.

Ainda sob a ótica de (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020),

“Uma característica fundamental da pesquisa que utiliza a *design science research* como método é ser orientada à solução de problemas específicos, não necessariamente buscando a solução ótima, mas a solução satisfatória para a situação. No entanto, as soluções geradas devem ser passíveis de generalização para uma determinada classe de problemas, permitindo que outros pesquisadores e profissionais, em situações diversas, também possam fazer uso do conhecimento gerado”.

Corroborando com a citação acima, (PIMENTEL; FILIPPO; SANTORO, 2020) ressalta que na DSR “o pesquisador está comprometido com dois objetivos: (1) resolver um problema prático num contexto específico por meio de um artefato e (2) gerar novo conhecimento científico”.

Para chegar a esses objetivos, o uso de um método rigoroso faz-se necessário para operacionalizar a *Design Science*. Diversos autores formalizaram métodos DSR ao longo dos anos, como BUNGE (1980), VAN AKEN, VAISHNAVI e KUECHLER (2004), ALTURKI,

GABLE e BANDARA (2011), entre outros (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020), porém, a escolha do método DSR utilizado neste trabalho é uma adaptação da proposta DSR apresentada por DRESCH, LACERDA e ANTUNES (2015), que consiste na consolidação da proposta de vários autores em um processo bem definido, conforme ilustrado na Figura 10.

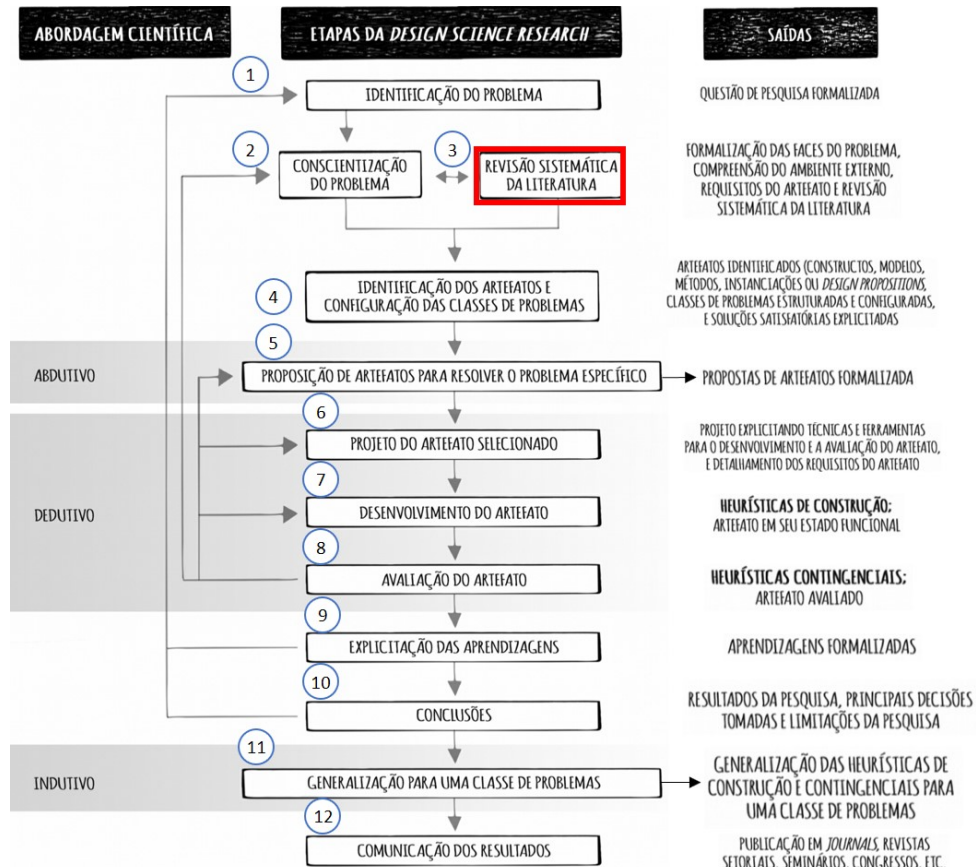


Figura 10 – Etapas do método DSR x Abordagem Científica X Saídas das Etapas . Fonte: Adaptado de (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020).

O método consiste em 12 passos bem definidos, em que ao final de cada iteração é gerada uma saída. As setas contínuas indicam a ordem direta para realização de cada um dos passos e o produto da realização destes. Um resumo da resultante da realização de cada etapa é descrito na coluna saída.

No Passo 1, **Identificação do Problema**, o pesquisador investiga um problema passível de ser resolvido com auxílio do método DSR, justificando a relevância e a importância para área em estudo, de forma clara e objetiva, buscando “encontrar resposta para uma questão importante, ou a solução para um problema prático ou para uma classe de problemas” (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020).

A etapa **Conscientização do Problema** (referente ao Passo 2), é o momento em que o pesquisador busca o máximo de conhecimento possível sobre o problema investigado, tentando obter uma compreensão ampla sobre diversos aspectos do problema, incluindo suas causas e em quais contextos são observados. O produto desta fase é o levantamento das “funcionalidades

do artefato, a performance esperada, bem como seus requisitos de funcionamento” (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020).

Seguindo o fluxo iterativo do método, o Passo 3 (em destaque vermelho na Figura 10) propõe a realização de uma **Revisão Sistemática da Literatura (RSL)**¹, pois, segundo (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020), “permite que o pesquisador faça uso de um conhecimento existente e consulte outros estudos com foco no mesmo problema ou em problemas similares aos dele”.

Nessa etapa do método, é sugerida uma adaptação na saída do processo, no qual em vez de produzir uma RSL (embora entenda-se que seja a forma mais adequada para obtenção do panorama completo acerca do problema e das possíveis soluções), é sugerido a busca por RSL recentes na literatura, uma vez que a produção de um RSL geralmente requer um tempo demasiadamente longo para produção satisfatória. Nesse sentido, foram utilizados neste trabalho RSLs disponíveis na literatura recente, que se enquadram no tema, contexto e questões de pesquisa análogas ao desenvolvido neste trabalho.

Na **Identificação dos Artefatos e Configuração das Classes de Problemas** (Passo 4) o pesquisador busca elencar, por meio da RSL realizada na fase anterior, artefatos e classes de problemas relacionados ao que ele está tentando resolver e, caso se depare com um artefato ideal para resolução do problema, sua pesquisa poderá continuar na medida em que o novo artefato traga melhores soluções em comparação aos existentes (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020).

Ainda de acordo com (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020), esta etapa “permite que o pesquisador faça uso das boas práticas e lições adquiridas e construídas por outros estudiosos. Também é uma forma de assegurar que a pesquisa que está sendo desenvolvida oferece uma contribuição relevante para uma determinada classe de problemas”.

Através da abordagem abdutiva, o Passo 5, **Proposição de Artefatos para Resolução do Problema**, se propõe a apresentar (formalizar) um artefato para resolução do problema em estudo. (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020) ressalta que este processo é essencialmente criativo, pois, “o pesquisador usará seus conhecimentos prévios, com o intuito de propor soluções robustas que possam ser utilizadas para a melhoria da situação atual”. Nesta fase, algumas soluções são apresentadas ao responsável pelo projeto da organização para seleção.

O Passo 6, **Projeto do Artefato**, é onde o pesquisador inicia a descrição e as definições de projeto da solução selecionada na etapa anterior, levando-se em consideração os requisitos estabelecidos na no Passo 2, em que as características operacionais de funcionamento, bem como, limites e relações com o ambiente externo devem ser respeitados. Vale ressaltar que, ainda nesta etapa, o pesquisador deve descrever todos os procedimentos de construção e avaliação do

¹ “Revisão Sistemática da Literatura (RSL), ou simplesmente Revisão Sistemática (RS), é um dos principais meios para sumarizar evidências de pesquisa. Fonte: (NAKAGAWA et al., 2017)

artefato, como também, o desempenho esperado (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020).

No **Desenvolvimento do Projeto** (Passo 7), o pesquisador executa o que foi estabelecido na fase anterior. Ao final desta etapa, devem ser produzidos o artefato em seu estado funcional, bem como a heurística de construção (proveniente do desenvolvimento do artefato), contribuição do método DSR para o avanço de conhecimento (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020).

A fase seguinte do método DSR demonstrado na Figura 10 é a **Avaliação do Artefato** (Passo 8). Nessa etapa, o investigador preocupa-se em observar e avaliar o funcionamento da solução proposta, averiguando se o artefato está funcionando a contento, de acordo com os requisitos pré-estabelecidos. A avaliação do artefato pode ser realizada em ambiente simulado ou real, a depender do tipo de artefato. (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020) destaca que “elementos de outros métodos de pesquisa, como a pesquisa-ação, por exemplo, poderão ser utilizados, uma vez que, muito provavelmente, haverá a necessidade de interação entre o pesquisador, os usuários e as pessoas da organização na qual o artefato está sendo instanciado”. Ainda sob a ótica de (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020), a resultante desse passo, além do artefato devidamente avaliado, é a “formalização das heurísticas contingenciais, por meio das quais o pesquisador poderá explicitar os limites do artefato e suas condições de utilização, ou seja, a relação do artefato com o ambiente externo em que irá atuar, o qual foi especificado durante a conscientização do problema”.

Na etapa de **Explicitação das Aprendizagens** (9), os pesquisadores devem relatar as dificuldades encontradas no desenvolvimento do artefato, explicando de forma concisa os pontos altos e baixos do processo de pesquisa. Segundo (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020), o “objetivo dessa etapa é assegurar que a pesquisa realizada possa servir de referência e como subsídio para a geração de conhecimento, tanto no campo prático quanto no teórico”.

Já na fase de **Conclusão** (10), os resultados do trabalho, bem como as decisões tomadas durante a execução da pesquisa devem ser apresentadas e formalizadas. (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020) ressalta que devem ser apontadas nesta etapa as limitações da pesquisa, visando orientar, inclusive, trabalhos futuros e novas ideias, onde um novo ciclo da DSR se inicia para estudar os novos problemas observados caso sejam identificados.

Finalizando o ciclo DSR apresentado, temos a **Generalização para uma Classe de Problemas** (11) e **Comunicação dos Resultados** (12). Na perspectiva de (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2020), a “generalização permite que o conhecimento gerado em uma situação específica possa, posteriormente, ser aplicado a outras situações similares e que são enfrentadas por diversas organizações”, logo, para que o conhecimento gerado seja utilizado por outros interessados na mesma temática, é necessário sua publicação no maior número de meios de informação científicas possível, como em periódicos, revistas setoriais, seminários, congressos etc.

3.3.2 Plano de Ação de Desenvolvimento e Implantação do Artefato

O desenvolvimento e implantação do artefato (passos 6 e 7 do método DSR) do Sistema de Monitoramento e Medição Inteligente de Água - SMMIA, envolve 8 fases que abordam desde a instalação e configuração de sistemas (*middleware* Dojot) ao monitoramento do artefato (Passo 8 do método DSR).

Essas etapas consistem em:

1. Instalação e configuração do *middleware* Dojot;
2. Desenvolvimento do *software* embarcado;
3. Testes, verificação de sensores e comunicação com o Dojot;
4. Caracterização do perfil de consumo de água do *campus*;
5. Ensaio para calibração do sensor de fluxo;
6. Cálculo da incerteza da medição e índice de desempenho do medidor;
7. Montagem e instalação do protótipo;
8. Monitoramento do sistema de medição inteligente de água.

É importante ressaltar que embora o *campus* Campina Grande do IFPB não possua laboratório certificado para avaliação e calibração de instrumentos de medição de água, os procedimentos metrológicos utilizados neste trabalho são baseados nas normas brasileiras (NBR) NBR ISO (*International Organization for Standardization*) 5168:2015 (Procedimento para avaliação de incertezas), NBR 15538:2014 (Medidores de água potável — Ensaio para avaliação de eficiência) e NBR 16043:2021 (Medidores para água potável fria e água quente), que se divide em 4 partes:

1. Requisitos técnicos e metrológicos (NBR 16043-1:2021);
2. Métodos de ensaio (NBR 16043-2:2021);
3. Requisitos não metrológicos não abrangidos pela ABNT NBR 16043-1 (NBR 16043-3:2021) e,
4. Requisitos de instalação (NBR 16043-4:2021).

As etapas são descritas a seguir.

3.3.2.1 Instalação e configuração do *middleware* Dojot

O Dojot é um *middleware* baseado na arquitetura de microsserviços, que funciona sobre o conceito de contêineres de aplicação, no qual pode ser instalado e configurado através da tecnologia Docker (nó único) ou Kubernetes (conjunto de nós). De acordo com a documentação do desenvolvedor (DOJOT, 2020), os requisitos de hardware para suportar 500 dispositivos com um intervalo de mensagens a cada 15 segundos estão contidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Requisitos de *hardware* para instalação do Dojot.

Implantação da Dojot	Tipo de Instalação	CPU	RAM	Espaço livre em disco
Docker	Nó único	4 Núcleos	6 GB	20 GB
Kubernetes	Master	2 Núcleos	2 GB	30 GB
Kubernetes	Worker	4 Núcleos	6 GB	40 GB
Kubernetes	Balancer	1 Núcleo	1 GB	10 GB

Fonte: Adaptado de (DOJOT, 2020)

Para o ambiente de monitoramento e “medição inteligente de água” desenvolvidos e instalados neste trabalho, bem como para o gerenciamento do ecossistema IoT, foi utilizado o Dojot versão 0.6.1 e foram utilizadas as configurações padrões do *Docker Compose* (versão *Docker Engine*; *Docker-Compose*), em que o *middleware* foi instalado em uma distribuição Linux Debian (versão 10.9.0) no servidor Lenovo (modelo ThinkSystem SR630) localizado na Coordenação de Tecnologia da Informação do *campus* Campina Grande do IFPB, em um ambiente virtualizado (*hypervisor* VMware ESXi versão 6.7) de rede privada.

Após a instalação da plataforma, simulou-se a comunicação de um dispositivo IoT através do protocolo MQTT, utilizando a ferramenta Mosquitto para subscrever (*mosquitto_sub*) e publicar (*mosquitto_pub*) informações no Dojot. Todos os procedimentos de testes estão descritos na documentação do Dojot².

3.3.2.2 Desenvolvimento do *software embarcado*

Para o desenvolvimento da aplicação para a plataforma embarcada WIFI LoRa® 32 utilizou-se a ferramenta *Visual Studio Code* em conjunto com o *plugin* PlatformIO. A linguagem de programação utilizada foi a linguagem C, com o *framework* para Arduino. As principais bibliotecas utilizadas foram:

- “FlowMeter.h”: biblioteca utilizada para calibração do sensor de fluxo;
- “DallasTemperature.h”: biblioteca específica para leitura de temperatura do sensor DS18B20;
- “Adafruit_BME280.h”: biblioteca para leitura de temperatura, umidade e pressão atmosférica do sensor BME280.

² Disponível em: Documentação do Dojot. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

A lista completa com todas as bibliotecas utilizadas, bem como o código-fonte da solução implementada está disponível no repositório do projeto³.

3.3.2.3 Testes, verificação de sensores e comunicação com o Dojot

Nesta etapa, foram realizados testes básicos para verificação dos componentes eletrônicos do artefato, em que foi possível verificar a comunicação entre os sensores e o WIFI LoRa® 32, plataforma Dojot e LoRa® gateway. O parâmetros de configuração do *Setup* inicial utilizado para comunicação de camada física LoRa® está contido na Tabela 5 .

Tabela 5 – *Setup* inicial da camada física LoRa®.

Parâmetro	Valor Configurado
Frequência	915 mHz
Potência de transmissão	14 dBm
Fator de espalhamento (SF)	7
Largura de banda	500 kHz
Taxa de código	4/5

Fonte: Autoria própria.

Uma avaliação da comunicação em ambiente real é apresentada na Seção 4.3.

3.3.2.4 Caracterização do perfil de consumo de água do campus

De acordo com (ABNT, 2014), o perfil de consumo é uma

"característica proveniente do consumo de água potável em um determinado consumidor, relacionado a vazão instantânea de operação e os volumes escoados em cada faixa de vazão por um período significativo, para um determinado grupo de consumidores, escolhidos de acordo com o seu consumo médio mensal cadastrado, pressão da rede de distribuição e regime de abastecimento (direto, indireto ou misto)".

Logo, a caracterização do perfil de consumo de água (regime de vazões × volume totalizado) e pressão é importante para o correto dimensionamento do sensor de medição. Nesta etapa, realizou-se o levantamento do perfil de consumo estabelecido no Anexo C da NBR 15538:2104.

Para isso, foi realizado o monitoramento em tempo real durante o período de sete dias, no ponto de entrada de água do *campus*, através do sensor de vazão FS400A G1 e do sensor de pressão OEM 1.2 MPa, conectados ao WIFI LoRa® 32, enviando pacotes com as informações para a plataforma Dojot a cada 15 segundos, onde os dados foram armazenados. Ainda nesta etapa, realizou-se o levantamento do histórico de consumo de água do *campus*, do período de Janeiro de 2022 a Dezembro de 2022, através da plataforma *WEB* da concessionária de água CAGEPA. Uma análise detalhada desta etapa pode ser observada na Seção 4.4 deste documento.

³ Repositório do Projeto SMMIA

3.3.2.5 Ensaio para calibração do sensor de fluxo

De acordo com (ABNT, 2014),

“Cada instrumento de medição pode introduzir incertezas. O objetivo principal da calibração é reduzir a incerteza na medição para um nível aceitável. O processo de calibração atinge este objetivo, substituindo a grande incerteza de um instrumento não calibrado pela menor combinação de incertezas do instrumento-padrão e da comparação entre este e o instrumento de medição”.

Nesse contexto, o sensor de fluxo adotado no desenvolvimento do artefato SMMIA deve ser calibrado para reduzir o erro de indicação, já que, o principal parâmetro a ser medido pelo medidor inteligente de água depende desse sensor. O FS400A G1 é um sensor de fluxo do tipo turbina, que contém em sua estrutura um sensor de efeito *hall* (montado externamente), um rotor de alta precisão provido de aletas (montado axialmente dentro do sensor), e um núcleo magnético (ímã) inserido no corpo da turbina. O fluido a ser medido, ao atravessar o sensor de fluxo, desloca o rotor que passa a girar a uma velocidade angular (rotacional) proporcional à vazão. A aleta do rotor ao se movimentar próximo do sensor de efeito *hall*, aplica uma variação de campo magnético sobre o componente, que gera uma tensão alternada (pulso) na saída (SENAI, 2015), como ilustra a Figura 11.

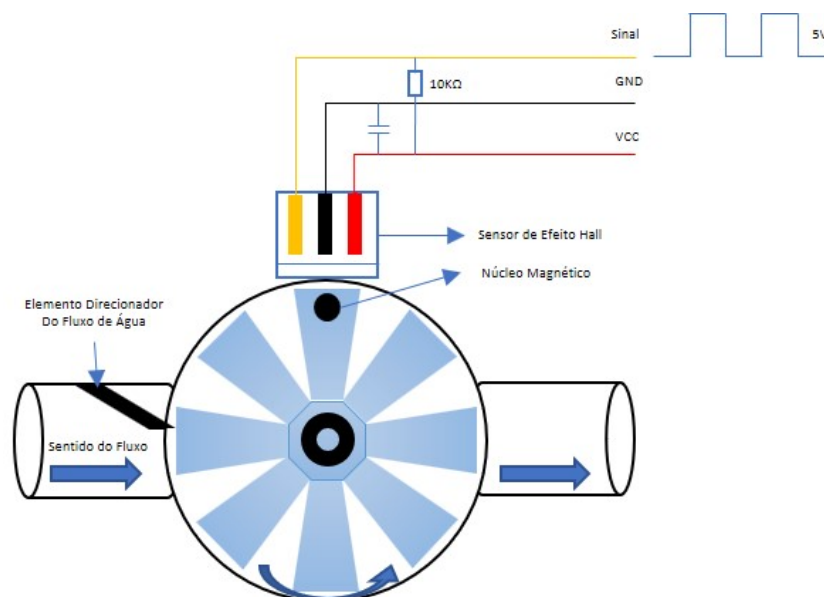


Figura 11 – Sensor de fluxo FS400A G1. Fonte: Adaptado de (HAOYU, 2021)

Cada pulso representa um volume discreto de forma que o número total de pulsos gerados em determinado período de tempo corresponde ao volume total medido pelo sensor. A esse pulso dar-se o nome de Fator de Calibração “*K*” ou coeficiente de vazão da turbina, que é dado pela Equação 1:

$$K(\text{pulso/volume}) = \left(\frac{\text{frequencia}(\text{pulso/seg})}{\text{vazao}(\text{volume/tempo})} \right). \quad (1)$$

De acordo com a documentação do sensor encontrada em (HAOYU, 2021), o fator de calibração K padrão do dispositivo é 4,8, como pode ser observado na Figura 12, que ilustra a curva característica da relação de frequência de rotação da turbina com a vazão total (em l/min) contabilizada pelo sensor.

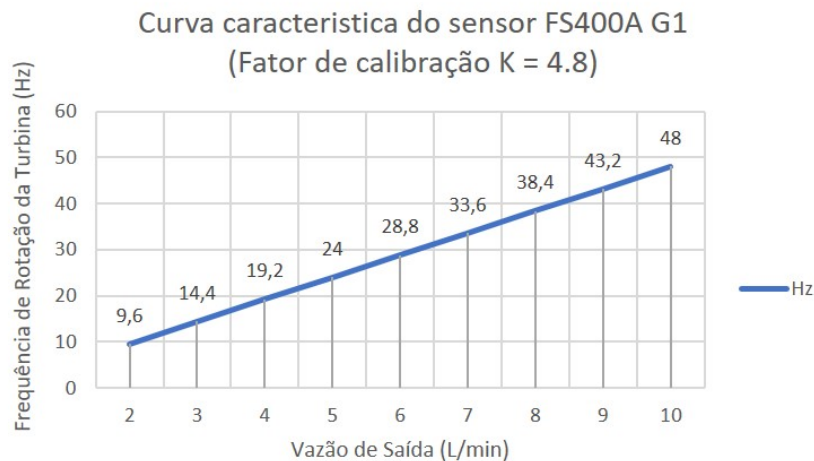


Figura 12 – Curva característica do sensor de fluxo FS400A G1 (Equação 1).
Fonte: Adaptado de (HAOYU, 2021)

Assim, um sensor de vazão deve ser calibrado com o menor erro de indicação possível para a faixa de vazão nominal (Q_n ou Q_3), ou seja, a faixa de vazão mais frequente, expressa em metros cúbicos por hora, na qual o medido deve operar dentro da margem de erro de indicação definida em norma (ABNT, 2014).

Embora na teoria os sensores de vazão do tipo turbina apresentem um comportamento linear, na prática podem ocorrer variações para diferentes tipos fluxos, em que é necessário ajustar o fator de calibração K para se obter uma leitura mais próxima da realidade.

Segundo (ABNT, 2021a), existem dois métodos de calibração para medidores de água:

- Calibração estática:

"Neste método a vazão é estabelecida abrindo uma válvula situada a jusante do medidor e é interrompida pelo fechamento da mesma válvula. A leitura do volume indicada é feita quando o medidor está estático em que mede-se o tempo entre o início do movimento de abertura da válvula e o término do movimento de fechamento. Durante o início do escoamento e durante o período que o escoamento ocorre em vazão constante, o erro de indicação do medidor varia em função da variação da vazão (curva de erros)" (ABNT, 2021a).

- Calibração dinâmica:

"A medição é efetuada quando a vazão está estabilizada. Um dispositivo direciona o escoamento para um reservatório calibrado no início da medição e diverge o escoamento de volta para a linha no final do ensaio. A leitura é efetuada com

o medidor em funcionamento, sendo a leitura sincronizada com o movimento do diversor. O volume coletado no reservatório é o volume que passou pelo medidor durante o intervalo de medição. Neste caso, a incerteza introduzida no volume coletado devido ao início e término da medição pode ser considerada não significativa, se o chaveamento em cada direção não diferir de mais de 5% e se o tempo de acionamento for inferior a 1/50 do tempo de escoamento total do ensaio” (ABNT, 2021a).

Nesta etapa, utilizou-se o método de calibração estático, uma vez que o procedimento operacional torna-se mais adequado ao modelo de bancada de calibração adaptada da norma ABNT NBR ISO 4185:2009 utilizada para este fim. A Seção 4.5 apresenta em detalhes o procedimento e os resultados obtidos nesta etapa.

O processo de calibração também é utilizado para estimar a incerteza de medição Tipo A determinada, utilizando-se a análise estatística em uma série de observações, como também o índice de desempenho do medidor (IDM), que é um “parâmetro de avaliação do desempenho do medidor que permite calcular qual é a capacidade que um equipamento qualquer tem de registrar o volume por ele escoado, baseado em um perfil de consumo” (SNIS, 2018). A subseção seguinte descreve o passo a passo para o cálculo da incerteza de medição e do IDM do artefato desenvolvida.

3.3.2.6 Cálculo da incerteza da medição e índice de desempenho do medidor

O método desenvolvido na NBR15538:2014 para o cálculo do IDM, de acordo com (SNIS, 2018),

"consiste em submeter o medidor a um ensaio em 10 vazões distintas, cada vazão representando uma faixa entre 0 e 1.500 l/h, calculando-se o erro de indicação do medidor nestas vazões para posteriormente calcular o erro ponderado, aplicando-se um determinado peso a cada faixa de vazão de acordo com a representatividade de determinada faixa de vazão no todo".

A Tabela 6 contém os valores normalizados para cada faixa de vazão utilizada e os parâmetros para determinação dos erros de indicação e cálculo do IDM, em que para medidores com $Q4 \leq 1325$ l/h, a vazão de ensaio da última faixa deve ser a Q4 (ABNT, 2014).

Tabela 6 – Parâmetros para determinação do erro de indicação e IDM.

Intervalo de Vazão (l/h)	Vazões para determinação dos Erros (l/h)	Perfil de Consumo (%)
0 a 5	2,5	4,56
5 a 15	10	6,99
15 a 30	22,5	6,83
30 a 50	40	7,34
50 a 150	100	23,21
150 a 350	250	23,92
350 a 550	450	12,27
550 a 850	700	7,29
850 a 1 150	1000	5,86
1 150 a 1 500	1325	1,73

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2014).

De acordo com (ABNT, 2014), para calcular o IDM os seguintes passos devem ser seguidos:

1. Calcular o erro ponderado (EP): “parâmetro de avaliação de desempenho, obtido pela associação entre o perfil de consumo e o erro relativo apresentado pelo medidor de água, em faixas de vazões previamente definidas, representado pela seguinte equação” (ABNT, 2014):

$$EP(\%) = \frac{\sum [(erro\ Q_x) \times (peso\ Q_x)]}{100}, \quad (2)$$

em que *peso* Q_x é o volume consumido em cada faixa de vazão/volume total consumido.

2. Calcular o índice de desempenho da medição (IDM): “valor numérico percentual que corresponde ao desempenho de um medidor de água, sob condições específicas de ensaio, obtido pela equação” (ABNT, 2014):

$$IDM = 100 + EP. \quad (3)$$

Como apresentado na Seção 2.1.3, o parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores atribuídos à grandeza submetida à medição, é chamado de incerteza da medição, e comumente é expressada da seguinte forma: (valor da grandeza medida \pm incerteza da medição) [unidade].

A seguir, são transcritos trechos da Seção 5 (Avaliação da incerteza em um processo de medição) da NBR ISO 1568 para uma melhor compreensão da relação matemática do cálculo da incerteza da medição.

“Se a relação funcional entre as grandezas de entrada X_1, X_2, \dots, X_N e a grandeza de saída Y em um processo de medição de escoamento for especificada na Equação 4:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (4)$$

então, uma estimativa de Y , denominada y , é obtida da Equação 4, utilizando as estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_n , como mostra a Equação 5:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (5)$$

Desde que as grandezas de entrada X_i sejam não correlacionadas, a incerteza total do processo pode ser encontrada, calculando e combinando a incerteza de cada um dos fatores de contribuição, de acordo com a Equação 6:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2}. \quad (6)$$

Quando o grau de interdependência é reconhecidamente pequeno, a Equação 6 pode ser aplicada mesmo se algumas das grandezas de entrada forem correlacionadas. Cada um dos componentes individuais da incerteza $u(x_i)$ é avaliado usando um dos métodos a seguir:

- avaliação do Tipo A: calculada a partir de uma série de leituras, empregando métodos estatísticos, como descrito na Seção 6 da norma;
- avaliação do Tipo B: calculada utilizando outros métodos, como avaliações de engenharia, como descrito na Seção 7 da norma.

Os coeficientes de sensibilidade c_i fornecem os elos entre a incerteza em cada entrada e a incerteza resultante na saída.”

A NBR ISO 1568, em seu Anexo A, descreve o procedimento passo a passo para o cálculo da incerteza da medição, que consiste em 8 passos:

1. Definir se a incerteza será dimensional ou adimensional: “Decidir se serão usadas estimativas das incertezas dimensionais ou adimensionais (por exemplo, ppm, porcentagem) para evitar qualquer confusão. Ao tomar esta decisão, deve se levar em consideração a recomendação da Seção 9 referente aos parâmetros com zeros arbitrários” (ABNT, 2015).
2. Definir a relação matemática: “Determinar a relação matemática entre as grandezas de entrada e a grandeza de saída, de acordo com a Equação 4” (ABNT, 2015).
3. Calcular a Incerteza-padrão: identificar as fontes de incerteza em cada uma das grandezas de entrada, que podem ser divididas arbitrariamente em categorias, como, por exemplo: incerteza na calibração, incerteza na coleta de dados, incerteza no processamento dos dados, incerteza devido aos métodos, outras fontes, em que deve-se estimar a incerteza-padrão para cada fonte. O método de cálculo para cada componente depende das estimativas das incertezas fornecidas e das distribuições de probabilidade associadas. Os dados disponíveis usualmente permitem que a incerteza-padrão seja calculada utilizando um dos métodos a seguir (ABNT, 2015).
 - Avaliações Tipo A - Desvio-padrão da média de medições repetidas, dado pela Equação 7:

$$u(\bar{X}_i) = S(\bar{X}_i). \quad (7)$$

- Avaliações Tipo B - Baseadas na experiência e avaliação subjetiva, em que tipicamente são distribuição retangular de probabilidades e/ou distribuição normal de probabilidades, dadas pelas equações 8 e 9:

$$u(X_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}. \quad (8)$$

$$u(X_i) = \frac{U}{K}. \quad (9)$$

4. Cálculo dos Coeficientes de sensibilidade: Os coeficientes de sensibilidade podem ser calculados de modo dimensional ou adimensional (depende da escolha do Passo 1), usando tanto métodos analíticos como numéricos, e são dados pelas Equações 10 e 11 (ABNT, 2015):

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_i}. \quad (10)$$

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_i} \frac{x_i}{y}. \quad (11)$$

5. Cálculo da Incerteza combinada: Verificar se algumas das entradas estão correlacionadas, caso não haja correlação, calcular a incerteza-padrão combinada da medida a partir da Equação 12 (dimensional) e Equação 13 (adimensional). “Se houver correlação, seguir o Guia apresentado no Anexo F” (ABNT, 2015).

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2}. \quad (12)$$

$$u_c^*(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i^* u^*(x_i)]^2}. \quad (13)$$

6. Grandezas de entrada não-confiáveis: “Quando forem empregadas grandezas de entrada não confiáveis, por exemplo, pequenas amostras, o procedimento do Anexo C deve ser usado para obter o fator de abrangência para o cálculo da incerteza expandida” (ABNT, 2015), demonstrada a seguir.
7. Cálculo da Incerteza expandida: de forma análoga ao Passo 5, o cálculo da incerteza expandida também é dado de forma dimensional e adimensional, através das Equações 14 e 15:

$$U = K u_c(y). \quad (14)$$

$$U^* = Ku_c^*(y). \quad (15)$$

8. Expressão dos resultados: “Os resultados calculados de acordo com este Anexo A devem ser apresentados como descrito na Seção 10” (ABNT, 2015).

Como demonstrado nos parágrafos anteriores, o cálculo da incerteza da medição é uma atividade complexa, que envolve diversos fatores e procedimentos que devem ser seguidos, como também depende da expertise do profissional e informações complementares. Nesta etapa, realizou-se apenas a avaliação Tipo A da incerteza da medição. Os detalhes desse processo são apresentados na Seção 4.6.

3.3.2.7 Montagem e instalação do protótipo

A montagem final do medidor inteligente de água desenvolvido neste trabalho baseou-se nas recomendações da norma brasileira NBR 16043-4 (no que couber), em que são definidos os seguintes critérios a jusante do medidor (ABNT, 2021b):

- um dispositivo de comprimento ajustável para facilitar a instalação e a remoção do medidor de água. Este dispositivo é especialmente recomendado para medidores com $Q3 \geq 16 \text{ m}^3/h$;
- um dispositivo que inclua uma válvula de drenagem, que possa ser usada para monitoramento de pressão, esterilização e amostragem de água;
- uma válvula de bloqueio para medidores com $Q3 > 4 \text{ m}^3/h$, que deve ser operado no mesmo sentido que a válvula a montante e,
- uma válvula de retenção, se necessário, exceto para aplicação de escoamento bidirecional.

Vale salientar que a NBR 16043-4 aborda outros critérios de instalação, como métodos para eliminar perturbações de escoamento de água em tubulações, além de outras recomendações. Na seção 4.1.1.1 são exibidas imagens do medidor inteligente de água desenvolvido e instalado no cavalete de entrada de água do *campus*.

3.3.2.8 Monitoramento do sistema de medição inteligente de água

Após a instalação do artefato, monitorou-se remotamente através das interfaces de visualização de dados do Dojot, como também realizou-se vistorias periódicas *in loco* para verificação de possíveis anomalias e vazamentos. Esta etapa refere-se ao Passo 8 (Avaliação do Artefato) do método DSR adotado. Os resultados obtidos neste passo podem ser observado nas seções 4.2 e 4.1.1.1.

3.4 Ferramentas, Dispositivos e Materiais Utilizados

A Tabela 7 contém a lista de materiais utilizados no desenvolvimento do SMMIA, relacionando o quantitativo e preço unitário estimado dos produtos.

Tabela 7 – Lista de ferramentas, materiais e dispositivos utilizados.

1	Sensor de Fluxo Tipo Turbina	FG400S A 1"	01	R\$ 135,00
2	Sensor de Pressão	OEM 1.2 MPa	01	R\$ 145,00
3	Válvula Solenóide		01	R\$ 230,00
4	Pressurizador de Água	Lorenzetti PL-20	01	R\$ 850,00
5	Válvula Reguladora de Pressão com Manômetro Analógico	Válvula 1"	01	R\$ 400,00
6	Caixa Acrílica	Caixa para medidor de luz Taf	01	R\$ 65,00
7	Válvula de passagem	DECA 1/4 volta	01	R\$ 130,00
8	Servidor de Aplicações	ThinkSystem SR630	01	Já disponível no Campus
9	Sistema Embarcado	WIFI LoRa 32 (V2)	01	R\$ 200,00
10	Válvula de retenção de ar	CONVALLIS 1"	01	R\$ 98,00
11	Filtro de Partículas	Lorenzetti Loren Acqua 10"	01	R\$ 380,00
12	Sensor de Temperatura, Umidade, e Pressão ATM.	BME 280	01	R\$ 60,00
13	Sensor de Temperatura	DS18B20	01	R\$ 25,00
14	LoRa Gateway	Dragino LG02	01	R\$ 700,00
15	Conversor ADC de 16 bits	ADS 1115	01	R\$ 90,00

Fonte: Autoria própria.

O custo estimado total do projeto, com a aquisição de sensores, equipamentos e acessórios foi de R\$ 3.508,00. Levando-se em consideração apenas os itens (1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 15) referentes ao medidor inteligente de água, o custo total estimado foi de R\$ 1.958,00. Vale ressaltar que o objetivo do projeto não foi desenvolver um medidor inteligente de água de menor custo em comparação a outras soluções já apresentadas na literatura, mas, um sistema que melhor se ajuste ao propósito geral do projeto.

Além disso, um possível produto final oriundo a partir do protótipo desenvolvido poderia ter o custo reduzido, a partir da confecção de placas de circuito impresso customizadas, e aquisição dos componentes em maior quantidade direto dos fornecedores. No entanto, essa análise de custo final está fora do escopo desta dissertação.

4 RESULTADOS

São discutidos no presente capítulo os resultados obtidos durante os ensaios executados no desenvolvimento do protótipo. Para um melhor entendimento dos resultados a serem apresentados, o capítulo foi dividido em seções visando elucidar as questões de pesquisa levantadas, bem como, alguns conceitos-chave são recapitulados.

Inicialmente, na Seção 4.1 (Protótipo SMMIA), apresenta-se o projeto do protótipo em camadas, elencando as tecnologias utilizadas em cada camada e a justificativa de suas escolhas.

Na Seção 4.2 (*Middleware Dojot*), demonstra-se os resultados quantitativos obtidos com o *middleware Dojot*, em relação ao consumo de recursos físicos da máquina virtual onde o sistema foi instalado, ilustrando alguns telas do *dashboard* do Influxdb (microserviço adicionado ao Dojot) que fornece informações de métricas do sistema sobre o consumo de memória RAM, disco, CPU, rede, entre outros.

Em seguida, na Seção 4.3 (Comunicação LoRa®), caracterizam-se os aspectos da comunicação LoRa®, apresentando o *setup* de configurações da camada física, bem como os resultados obtidos na comunicação entre WiFi LoRa® 32 (V2) da Heltec e o LoRa® *gateway* Dragino LG02, em relação aos parâmetros RSSI e percentual de pacotes perdidos.

Na seção 4.4 (Caracterização do Perfil de Consumo), apresentam-se histogramas que demonstram as vazões e as pressões típicas obtidas no cavalete de entrada de água, conforme preconiza a norma ABNT NBR 15538:2014.

Por fim, na Seção 4.5 (Calibração do Sensor de Vazão), aponta-se os passos para calibração do sensor de vazão, acompanhados do índice de desempenho do medidor de vazão FS400A utilizado no SMMIA e do índice de incerteza da medição (Seção 4.6).

4.1 Protótipo SMMIA

A presente seção discorre sobre o desenvolvimento do artefato para monitoramento e medição inteligente de água, implantado no *campus* Campina Grande do IFPB, como um projeto piloto e uma iniciativa para tornar o *campus* um “*campus* inteligente” (*Smart Campus*).

O SMMIA (Sistema de Monitoramento e Medição Inteligente de Água) é composto por uma solução de *hardware* (“medidor inteligente de água”) e *software* (*middleware Dojot*), em uma arquitetura de camadas, que visa mensurar o consumo de água do *campus* Campina Grande do IFPB de forma remota e automática, como também verificar a pressão no ponto de entrada da rede de distribuição de água do *campus*, além de medir a temperatura e a umidade do ambiente e pressão atmosférica onde o medidor inteligente de água encontra-se instalado. A seguir, é apresentada a arquitetura do artefato desenvolvido, os dispositivos e tecnologias selecionados

por camada e suas respectivas justificativas de seleção.

4.1.1 Arquitetura da Solução

O protótipo desenvolvido é baseado na arquitetura padrão de rede LoRa®/LoRa®WAN™ apresentando por (ALLIANCE, 2020), conforme ilustrado na Figura 13.

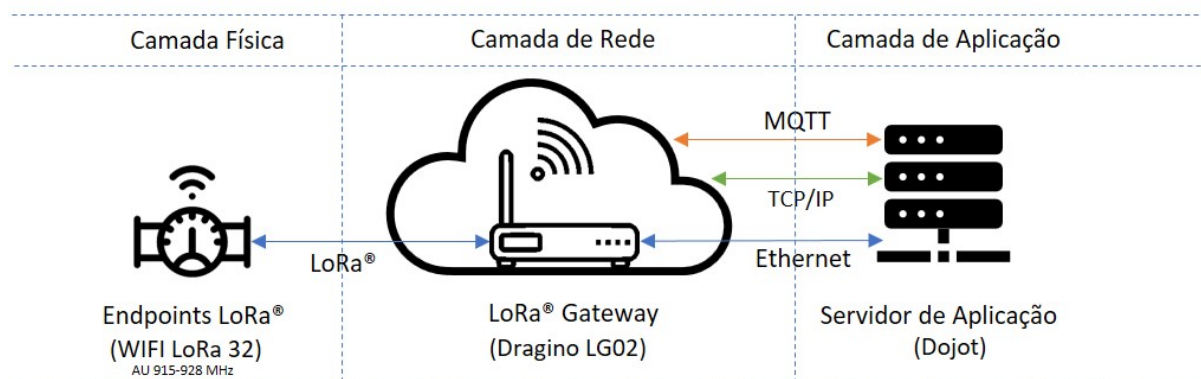


Figura 13 – Arquitetura de rede do SMMIA. Fonte: Autoria própria.

A Camada 1, ou camada física, é composta por nós sensores ou dispositivos finais (*endpoints*) LoRa®, ou seja, é onde se encontram os sensores e atuadores hídricos do sistema, conectados a um microcontrolador com transceptor LoRa® integrado. A comunicação entre os *endpoints* LoRa® e o LoRa® *gateway* ocorre pela técnica de modulação de rádio padrão da camada física da tecnologia. Para este cenário, não foi utilizado o protocolo LoRa®WAN™, uma vez que a comunicação de camada física LoRa® é suficiente para a aplicação.

A Camada 2 (ou camada de rede), é composta por um LoRa® *gateway*, dispositivo responsável por traduzir as mensagens e encaminhar para a aplicação através dos protocolos TCP/IP (camada de transporte e rede) e MQTT (camada de aplicação).

Por fim, a Camada 3 é composta por um servidor de aplicação, em que os dados enviados pelos *endpoints* LoRa® são processados, armazenados e encaminhados para as diferentes aplicações que possuem interesse em consumir os dados enviados pelos nós finais.

O modelo de três camadas garante uma maior flexibilidade no desenvolvimento, pois cada camada é independente e pode ser facilmente adaptada a novos contextos e tecnologias que venham a surgir, além de facilitar os testes e a manutenção do artefato desenvolvido.

4.1.1.1 Camada Física

Na camada física, desenvolveu-se um medidor inteligente de água (*Smart Water Meter*) modular, em que a parte "inteligente" (eletrônica e software embarcado) é separada dos sensores hídricos, conforme ilustram as Figuras 14 e 15 sob diferentes perspectivas. Os elementos do medidor no cavalete de entrada de água do *campus* foram instalados entre duas junções

hidráulicas (também conhecida como união soldável), permitindo assim uma maior flexibilidade, facilidade de manutenção e ajustes da solução.



Figura 14 – Instalação do "medidor inteligente de água" no cavalete de entrada de água do *campus* (perspectiva vertical). Fonte: Autoria própria.

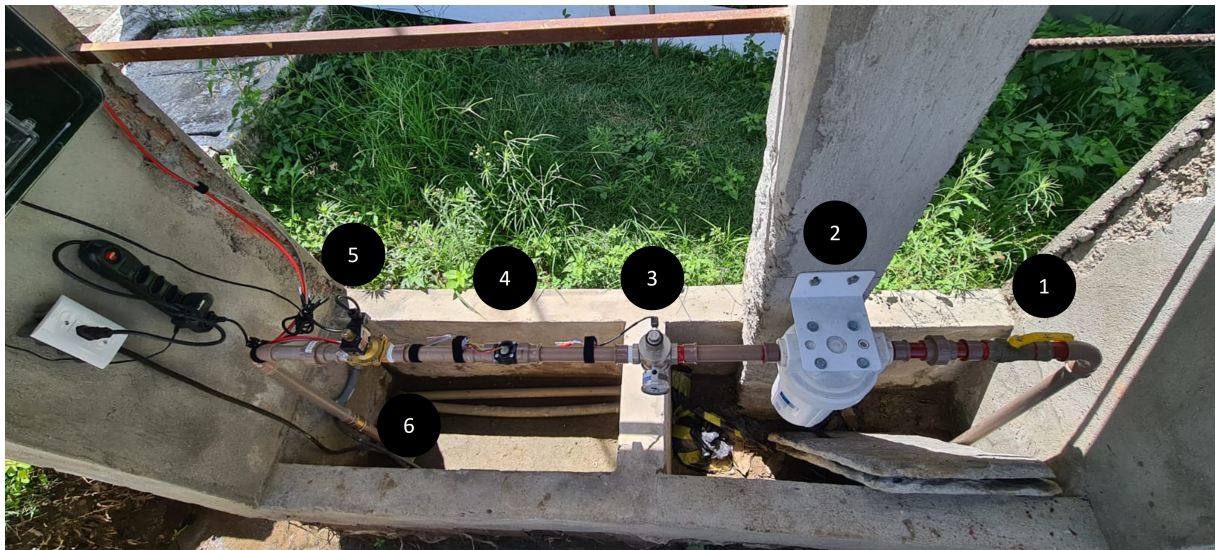


Figura 15 – Instalação do medidor inteligente de água no cavalete de entrada de água do *campus* (perspectiva horizontal). 1- Válvula de abertura manual; 2 - filtro de água; 3 - válvula reguladora de pressão com manômetro analógico e sensor eletrônico de pressão; 4 - sensor de vazão; 5 válvula solenoide; 6 - válvula de retenção de água. Fonte: Autoria própria.

Para uma visão mais detalhada da interconexão elétrica e hidráulica do sistema, ilustra-se na Figura 16 o diagrama esquemático com suas respectivas legendas.

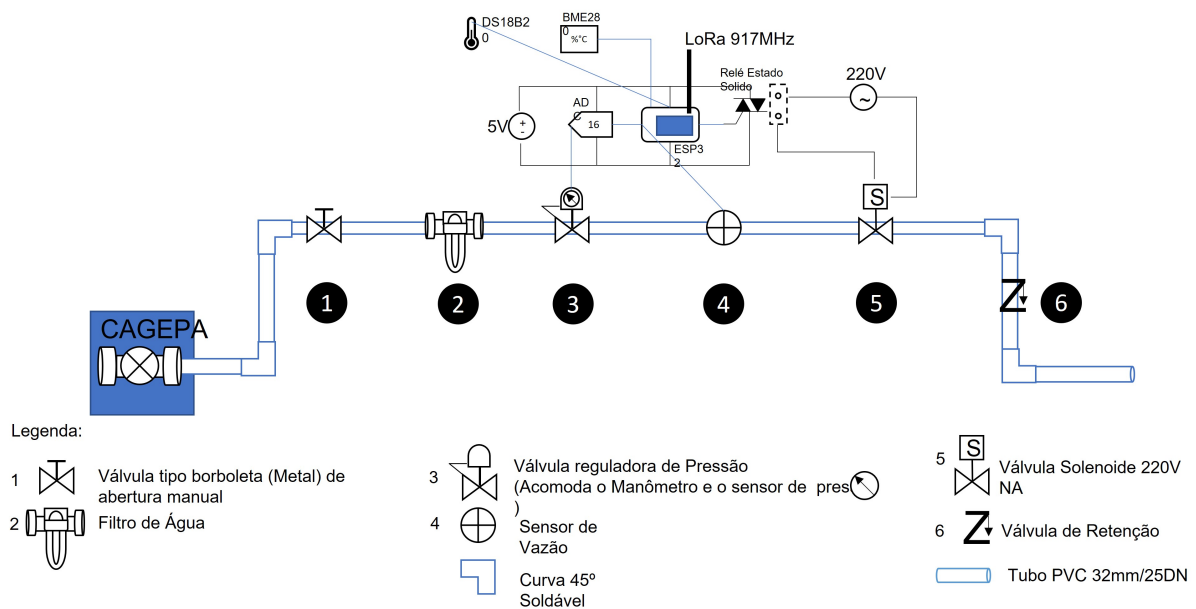


Figura 16 – Diagrama esquemático de interconexão hidráulica e elétrica do medidor inteligente de água no cavalete de entrada de água do *campus*. Fonte: Autoria própria.

A lista completa de todos os elementos que compõe a solução do medidor inteligente de água é apresentada a seguir:

1. uma Válvula hidráulica de abertura manual 1/4 de volta (metálica);

2. um sensor de fluxo de água do tipo turbina, modelo FS400A G1, com sensibilidade de medição 1-60 l/min e pressão máxima de operação de 1,2 MPa;
3. um sensor de pressão modelo OEM 1,2 MPa com uma faixa de trabalho entre 0 e 12 bar/174 psi;
4. um manômetro analógico com escala de medição de 0 a 4 bar;
5. uma válvula reguladora de pressão manual;
6. uma válvula solenoide do tipo normalmente aberta (NA) operando a 220V AC;
7. um módulo relé de estado sólido 5V de um canal para carga de até 250V AC/2A;
8. um sensor de temperatura, umidade e pressão, modelo BME280;
9. um sensor de temperatura, modelo DS18B20;
10. uma antena omnidirecional de 5 dBi;
11. um *dev-board* IoT Wi-Fi LoRa® 32 (V2) do fabricante Heltec;
12. um conversor de tensão Dc-Dc tipo *step down* com *display* LCD, modelo ZK-J5X;
13. uma caixa acrílica para acomodação da placa eletrônica;

O *dev-board* IoT WIFI LoRa® 32 (V2) do fabricante Heltec (também conhecido por ESP32 LoRa® Heltec) foi selecionado por apresentar uma solução compacta (o que facilita a prototipagem), com vários recursos de conectividade (conforme já apresentado na Seção), a um custo relativamente baixo, como também por possuir uma vasta documentação e boa disponibilidade no mercado.

Já o sensor de fluxo de água do tipo turbina, modelo FS400A G1, foi escolhido por apresentar uma alta taxa de abertura ou rangeabilidade (*turndown ratio* ou *rangeability*) de 60:1, possibilitando uma maior escala de medição se comparado a outros sensores do mesmo tipo com *turndown ratio* inferior. Ademais, o sensor oferece um custo inferior a outras soluções do mercado (como por exemplo, sensores de fluxo baseados na tecnologia ultrassom) e baixa taxa de erro de medição (± 3 a 5% por padrão), que pode ser reduzido a patamares menores quando devidamente calibrado (ver Fator de Calibração *K* na Seção 3.3.2.5) via *software* para o fluxo operacional desejado.

A válvula reguladora de pressão foi selecionada por apresentar mecanismo de ajuste manual da pressão, bem como derivações para acomodação do manômetro analógico e do sensor eletrônico de pressão, o que possibilita a verificação da pressão *in loco*, facilitando a detecção de discrepâncias de medição entre os medidores de pressão.

O sensor BME280 foi adicionado à solução para fins de acompanhamento dos níveis de temperatura, umidade e pressão dentro da caixa onde a parte eletrônica do medidor inteligente foi instalado. Já o sensor DS18B20 foi escolhido por ser blindado e suportar as intempéries do tempo, servindo para monitorar a temperatura ambiente fora da casa de máquina onde o medidor encontra-se instalado.

A válvula solenoide foi adotada para acionamento remoto e automático do sistema em caso de detecção de anomalias no fluxo de água por algoritmos de detecção de vazamento (implementação futura, com adição de novos medidores à rede de distribuição de água do *campus*), controlando a abertura ou fechando do fluxo da água e, conseqüentemente, evitando desperdícios. Além disso, poderá ser acionada remotamente através de aplicativo para celular (APP de implementação futura) para facilitar a manutenção e o controle de enchimento da caixa d'água central de distribuição de água do *campus*.

Os demais dispositivos que contemplam a solução foram adotados por suas características de usabilidade, compatibilidade com os demais elementos da solução e pela disponibilidade de mercado.

Complementando a solução, dois elementos passivos são sugeridos para melhorar a acurácia de medição do sistema:

1. um filtro de partículas de alta vazão e,
2. uma válvula de retenção (bloqueadora) de água.

A utilização destes elementos são imprescindíveis para uma medição do consumo de água mais próximo da realidade, uma vez que o filtro de partículas garante a passagem de água limpa, sem resíduos, o que aumenta a vida útil dos sensores, bem como garante que partículas como grãos de areia, argila, entre outros, não causem perturbações na medição dos sensores. Já o uso da válvula de retenção de água garante que apenas o fluxo de água seja contabilizado em um sentido, impedindo que o fluxo da água retorne e seja contabilizado.

Todos os dispositivos hidráulicos utilizados neste projeto possuem diâmetro externo (DE) de uma polegada (1 in, 32 mm ou 1", exceto o filtro de partículas, que possui um diâmetro de 1 1/2"), seguindo o padrão de tubulação hidráulica do ponto de entrada de água do *campus*.

A caixa que acomoda a parte eletrônica do sistema, é esboçada na Figura 17. O sistema é alimentado através da rede elétrica (220V AC), no qual é utilizado uma fonte de alimentação de 12V/2A para alimentar a fonte interna da caixa, em que é possível verificar a tensão e corrente de saída. A conexão da caixa e os sensores no cavalete de entrada de água do *campus* se dá através de cabos de rede Categoria 6.

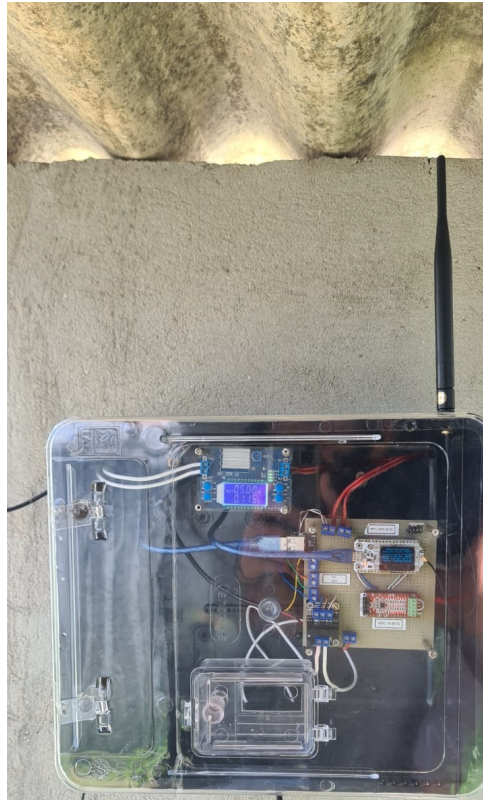


Figura 17 – Caixa do SMMIA. Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que o consumo energético do sistema se manteve praticamente constante em aproximadamente 115 mA, com picos de 120 mA a 125 mA quando em transmissão LoRa®.

Também foi implementado no sistema, o horário de fechamento (23:00) e abertura (06:00) da válvula solenoide, como uma medida protetiva de esquecimento do operador em deixar a válvula de passagem de água do cavalete aberta durante a noite, evitando assim que a caixa d'água trasborde, desperdiçando água, algo que é corriqueiro no *campus*. O código-fonte do dispositivo embarcado utilizado na solução SMMIA pode ser consultado no repositório do projeto¹.

4.1.1.2 Camada de Rede

Na camada de rede utilizou-se o LoRa® *gateway* do fabricante Dragino, modelo LG02 de canal duplo (ver Figura 18). De acordo com o fabricante, o *appliance* (solução de *hardware* + *software* integrados em uma “caixa”) utiliza uma distribuição Linux customizada para controlar diretamente dois módulos LoRa® de frequências de operação distintas (Sx1276 - 868/915MHZ e Sx1278 - 433Mhz), permitindo ao dispositivo funcionar no modo LoRa® *full duplex*.

¹ Repositório do Projeto SMMIA

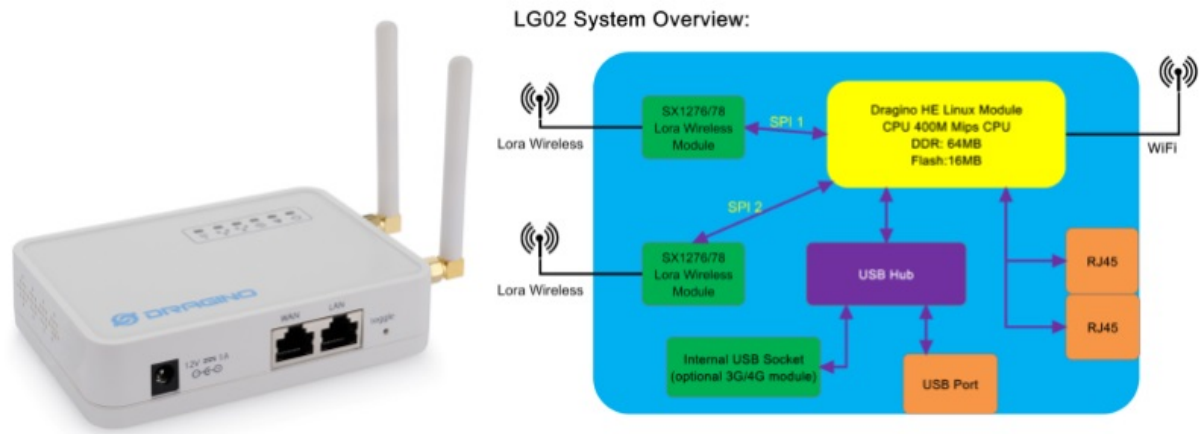


Figura 18 – Arquitetura do LoRa® gateway Dragino LG02. Fonte: (DRAGINO, 2020).

A escolha por esse dispositivo se deu por apresentar uma relação custo-benefício alinhada à realidade financeira do projeto, bem como por oferecer um conjunto de funcionalidades adequado à aplicação em desenvolvimento (como por exemplo: interface *Web* para configuração de parâmetros de camada física LoRa® e *logs* de comunicação LoRa®), o que diminui a complexidade e facilita a implementação da rede LoRa®.

O dispositivo dá suporte à conexão de até 300 dispositivos finais dependendo das configurações adotadas, o que garante uma escalabilidade para projetos futuros. Além disso, a interface de configuração é simples e amigável, com uma rápida curva de aprendizagem e uma boa documentação disponível no site do fabricante.

Na Seção 4.3 apresenta-se o *setup* de configuração do dispositivo, o *script* de funcionamento do protocolo MQTT implementado pelo fabricante e uma análise acerca do comportamento da potência de sinal (RSSI) e da taxa de perda de pacotes durante os ensaios.

4.1.1.3 Camada de Aplicação

Na camada de aplicação utilizou-se a plataforma Dojot (versão 0.6.1) desenvolvida no Brasil pelo CPqD. O Dojot é um *middleware* que fornece um conjunto de recursos avançados que simplificam o gerenciamento do ecossistema IoT, como por exemplo:

- APIs de código aberto, facilitando o acesso de aplicações externas aos recursos da plataforma;
- Gerenciamento do ciclo de vida de dispositivos finais (planejamento, configuração e monitoramento, bem como, atualizações de *firmware* de *endpoints* remotamente);
- Interface visual para construção de fluxos de dados e regras de processamento de dados em tempo real;
- Persistência dos dados;

- Dashboard com interface intuitiva para acesso aos dados em tempo real.

A opção por esta plataforma se deu por atender perfeitamente ao propósito do projeto (piloto), pois, além de ser gratuita e de código aberto, a ferramenta utiliza tecnologias no estado da arte no campo de serviços IoT, com constantes atualizações pelos mantenedores, o que faz parte da “estratégia do CPqD de dar suporte à evolução e ao aperfeiçoamento constante da plataforma Dojot, que tem como foco o estímulo à inovação aberta e à construção de um ecossistema voltado para a oferta de soluções IoT adequadas à realidade brasileira” (BIOCAM, 2018).

A ferramenta também fornece baixa complexidade de implantação e configuração, uma vez que utiliza o conceito de microsserviços, facilitando a customização e escalabilidade da aplicação sob demanda, bem como uma fácil integração com outros sistemas baseados em serviços. Um dos diferenciais da plataforma, de acordo com (CPQD, 2017), é que a ferramenta possibilita a criação do Produto Mínimo Viável (do inglês *Minimum Viable Product* - MVP), que permite ao desenvolvedor checar e validar conceitos antes do início da implementação do produto final.

O Dojot fornece duas interfaces para visualização de dados, sendo a primeira (referente ao serviço “gui”) onde configura-se os dispositivos IoT e seus atributos (lado direito da imagem), permitindo a visualização de forma rápida dos dados recebidos pela plataforma, clicando-se sobre o nome do atributo, no qual abre-se um gráfico referente as últimas 10 registros recebidos, como pode ser visualizado na Figura 19.

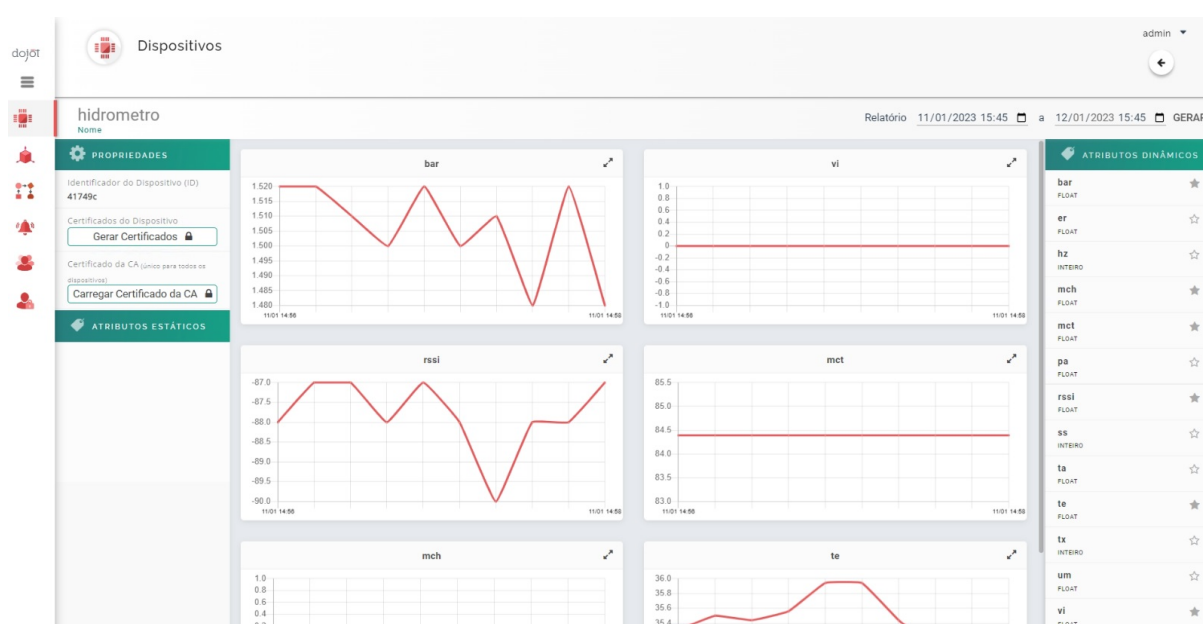


Figura 19 – Interface de configuração e visualização de dados em tempo real, versão 1 no Dojot.
Fonte: Autoria própria.

Ainda na Figura 19, pode-se visualizar o nome (hidrômetro) e o Identificador de disposi-

tivo (ID) 41719c (lado esquerdo da imagem). Os atributos da aplicação SMMIA coletados pelo Dojot são expressos em detalhes na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Atributos da aplicação SMMIA configurados no dispositivo 41719c do Dojot.

Nº	Atributo	Tipo	Descrição
1	bar	FLOAT	Pressão no cavalete de água registra pelo sensor de pressão (bar)
2	er	FLOAT	Valor do fator de correção utilizado pela biblioteca Flowmeter (%)
3	hz	INTEIRO	Quantidade de pulsos do sensor de vazão FS400A (hz)
4	mch	FLOAT	Vazão instantane em metro cúbico hora (m ³ /h)
5	mct	FLOAT	Volume total contabilizado em metro cúbico (m ³)
6	pa	FLOAT	Pressão atmosferica registrada pelo sensor BME280 (mPa)
7	rssi	FLOAT	Potência do sinal recebido no Dragino L02 (dBm)
8	ss	INTEIRO	Status do Solenoide (1 = acionado; 0 = desativado)
9	ta	FLOAT	Umidade ambiente captada pelo sensor BME280 (°C)
10	te	FLOAT	Temperatura externa registrada pelo sensor (°C)
11	tx	INTEIRO	Número de pacotes LoRa® enviados
12	um	FLOAT	Umidade ambiente captada pelo sensor BME280 (%)
13	vi	FLOAT	Vazão instantane em litros por minuto (l/min)
14	vt	FLOAT	Volume total contabilizado em litros (l)

Fonte: Autoria própria.

Vale salientar que o nome dos atributos foram abreviados em no máximo 4 caracteres, pois isso impacta no tamanho do pacote LoRa® e do JSON armazenado nos bancos de dados (MongoDB e InfluxDB), como por exemplo, o JSON escrito no formato {"vt": 10.0} apresenta uma redução de 10 bytes se comparada ao JSON escrito no formato {"volume_total": 10.0}. Tratando-se de um volume de dados intenso, a depender da aplicação, pode fazer uma diferença significativa no tempo de propagação no ar do pacote LoRa®, como também no volume de dados armazenados.

Já a segunda interface de visualização (referente ao serviço “gui_v2” do Dojot) de dados disponível no Dojot, oferece mais opções para visualização dos dados, com a possibilidade de optar sobre o tipo de gráfico (dispersão, área, tabela, geolocalização e barra), quantidade de registros a serem plotados (inclusive podendo selecionar períodos específicos) e quais atributos de um dispositivo devem ser exibidos, como ilustrado na Figura 20.



Figura 20 – Interface de configuração e visualização de dados em tempo real, versão 2 no Dojot.
Fonte: Autoria própria.

Ainda na Figura 20, observa-se que foram adicionados gráficos de visualização de temperatura (interna e externa), vazão instantânea (l/min), volume total contabilizado (m^3), pressão no cavalete de entrada de água do *campus*, potência do sinal (RSSI) recebido no Dragino L02 e pressão atmosférica. Os gráficos foram configurados para visualização dos últimos 50 registros, podendo ser editado a qualquer momento.

A seção a seguir traz mais informações sobre a plataforma Dojot e uma análise sobre o comportamento da ferramenta quanto ao consumo de recursos físicos da máquina virtual na qual foi instalada.

4.2 Middleware Dojot

Este tópico apresenta os resultados da avaliação do *middleware* Dojot em relação ao comportamento de utilização dos recursos físicos da VM e dos microsserviços que compõem a solução. Para uma melhor compreensão do comportamento da ferramenta, os dados serão expostos em duas etapas:

1. Antes da coleta de dados, ou seja, a partir da instalação e antes de iniciar o registro das métricas do sistema e do hidrômetro inteligente;
2. Após a coleta de dados, ou seja, após o registro das métricas do sistema (RAM, CPU, Rede e Disco) e do hidrômetro inteligente (pressão estática e dinâmica do cavalete de entrada de água do campus, temperatura e umidade do ambiente e vazão total e instantânea).

Os detalhes das avaliações são apresentados a seguir, na ordem mencionada anteriormente.

4.2.1 Avaliação Antes da Coleta de Dados

O *middleware* Dojot foi instalado em uma máquina virtual (VM) Debian (GNU/Linux), versão 10.9 (64 bits), gerenciada pelo *hypervisor* vSphere ESXi, versão 6.7, do fabricante VMware, sobre um *host* hospedeiro Lenovo ThinkSystem SR630, com as seguintes configurações:

- 2 Pentes de memória RAM DDR4 de 16GB, operando a 2666 MHz;
- 4 Discos de 1.00TB 7.2K 6Gbps SATA 2.5"HDD, em RAID 5, totalizando 2791.172GB disponíveis para armazenamento;
- 1 processador Intel(R) Xeon(R) Gold 6134 CPU @ 3.20GHz, com 8 núcleos;

Para a VM foram alocados 8 GB de memória RAM (2 GB a mais de memória RAM em relação a configuração mínima exigida, em virtude dos serviços extras adicionados ao Dojot), 4 processadores virtuais e 20 GB de armazenamento, conforme recomendações do desenvolvedor. Para mais detalhes consulte Requisitos de Hardware do Dojot ².

A Figura 21 ilustra a tela de configurações da VM executando o Debian no ESXi, após a instalação do Dojot, como também apresenta um gráfico de consumo de recursos em tempo real. É importante observar no gráfico o alto consumo de memória RAM (≈ 6 GB), com alguns picos de carga de CPU de aproximadamente 60% do recurso alocado. Esse comportamento é esperado, uma vez que o Dojot é um *middleware* baseado na arquitetura de microsserviços, no qual diversos contêineres (39 serviços após a customização) são executados simultaneamente para troca de informações.

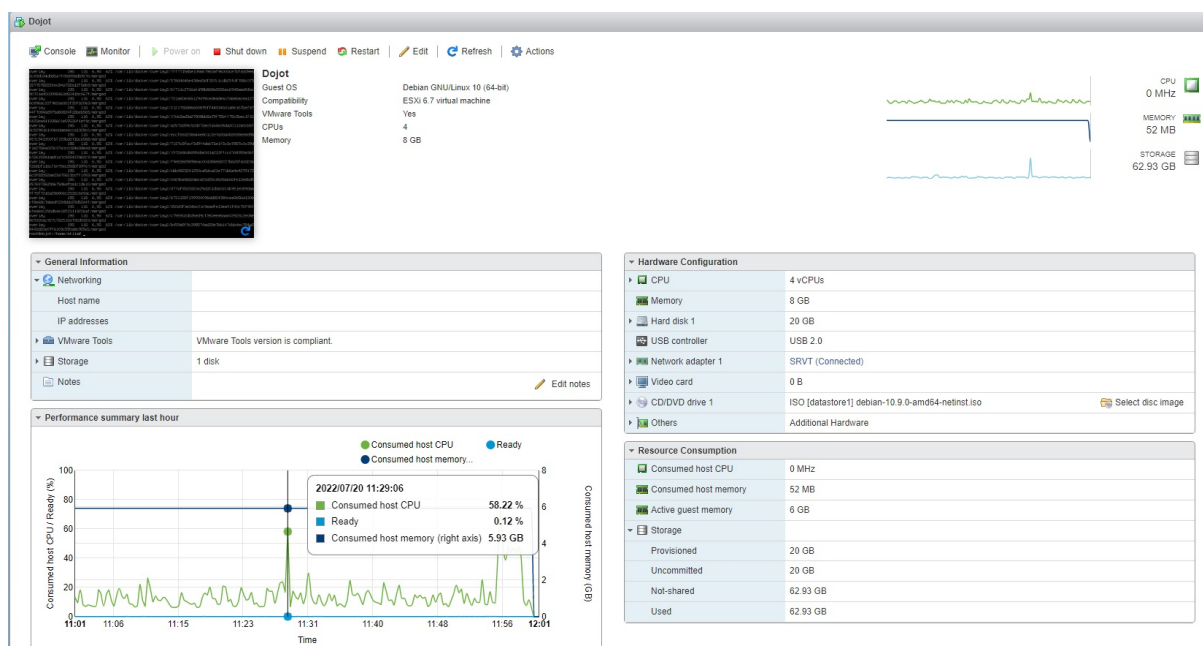


Figura 21 – Configurações da máquina virtual no VMware ESXi. Fonte: Autoria própria.

² Disponível em: Guia de Instalação do Dojot. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

O conjunto de microsserviços que compõem o *middleware* Dojot e os serviços adicionais: InfluxDB, Portainer, MongoDB Express, Telegraf e pgAdmin foram instalados através da ferramenta Docker Compose, com a customização do *compose file* "docker-compose.yml" que acompanha o repositório clonado do GitHub da plataforma (para detalhes da customização dos serviços consulte o repositório do projeto³). Estes serviços são abordados a seguir.

A Figura 22 apresenta o *dashboard* do serviço Portainer, no qual é possível verificar o comportamento de todos os serviços (*containers*) instalados e gerenciar de forma rápida (parar, reiniciar, excluir, etc.), além de acompanhar os *logs* e as métricas de cada serviço.

Name	State	Quick actions	Stack	Image	Created	IP Address	Published Ports	Ownership
dojot_influxdb_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	quay.io/influxdb/influxdb:v2.0.8	2021-10-04 11:15:01	172.18.0.38	8086:8086	administrators
dojot_v2k-bridge_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/v2k-bridge:v0.6.1	2021-10-04 11:11:27	172.18.0.21	-	administrators
dojot_apigw_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/kong:v0.6.1	2021-10-04 11:10:57	172.18.0.29	8000:8000	administrators
dojot_k2v-bridge_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/k2v-bridge:v0.6.1	2021-10-04 11:10:55	172.18.0.8	-	administrators
dojot_otagent-mqmt_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/vernemq-dojot:v0.6.1	2021-10-04 11:10:36	172.18.0.26	8883:8883 8883:8883	administrators
dojot_influxdb-storer_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/influxdb-storer:v0.6.1	2021-10-04 11:10:36	172.18.0.24	-	administrators
dojot_kafka-ws_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/kafka-ws:v0.6.1	2021-10-04 11:10:36	172.18.0.23	-	administrators
dojot_x509-identity-mgmt_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/x509-identity-mgmt:v0.6.1	2021-10-04 11:10:18	172.18.0.20	-	administrators
dojot_influxdb-retriever_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/influxdb-retriever:v0.6.1	2021-10-04 11:10:16	172.18.0.18	-	administrators
dojot_mongodb_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/mongo:3.2	2021-10-04 11:09:51	172.18.0.9	27017:27017	administrators
dojot_postgres_1	healthy	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/postgres:9.5.21-alpine	2021-10-04 11:09:50	172.18.0.5	5432:5432	administrators
dojot_mongo-express_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	mongo-express	2021-10-04 11:19:23	172.18.0.40	8081:8081	administrators
dojot_data-manager_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/data-manager:v0.6.1	2021-10-04 11:11:32	172.18.0.32	-	administrators
dojot_otagent-tesha-v0.6.1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/otagent-tesha-v0.6.1	2021-10-04 11:11:27	172.18.0.31	5683:5683 5684:5684 5685:5685 5686:5686	administrators
dojot_persist_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/persist:v0.6.1	2021-10-04 11:11:27	172.18.0.35	-	administrators
dojot_cron_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/cron:v0.6.1	2021-10-04 11:11:27	172.18.0.35	-	administrators
dojot_flowbroker_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/flowbroker:v0.6.1	2021-10-04 11:11:19	172.18.0.39	-	administrators
dojot_data-broker_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/data-broker:v0.6.1	2021-10-04 11:11:19	172.18.0.28	-	administrators
dojot_auth_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/auth:v0.6.1	2021-10-04 11:11:09	172.18.0.37	-	administrators
dojot_device-manager_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/device-manager:v0.6.1	2021-10-04 11:10:56	172.18.0.25	-	administrators
dojot_flowbroker-context-manager_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	dojot/flowbroker-context-manager:v0.6.1	2021-10-04 11:10:24	172.18.0.22	-	administrators
dojot_kafka_1	running	[Stop] [Restart] [Refresh] [Remove]	dojot	confluentinc/cp-kafka:5.5.0	2021-10-04 11:10:24	172.18.0.15	-	administrators

Figura 22 – Visualização dos *containers* no Portainer. Fonte: Autoria própria.

Em relação ao consumo de armazenamento permanente (disco), a Figura 23 ilustra como ficou a estrutura de diretórios e o percentual de uso após a instalação dos microsserviços do Dojot. Ressalta-se que durante a instalação do Debian aplicou-se o sistema de arquivos EXT4 (*third extended filesystem*, em português: terceiro sistema de arquivos estendido) em partição única, em disco virtual emulando um barramento SCSI (*Small Computer System Interface*).

³ Repositório do Projeto SMMIA

```

root@dojot:/var/lib/docker/volumes/telegraf# df -h
Sist. Arq. Tam. Usado Disp. Uso% Montado em
udev          2,9G      0  2,9G    0% /dev
tmpfs         597M     26M  571M    5% /run
/dev/sdal     19G     11G   7,3G   59% /
tmpfs         3,0G      0  3,0G    0% /dev/shm
tmpfs         5,0M      0  5,0M    0% /run/lock
tmpfs         3,0G      0  3,0G    0% /sys/fs/cgroup
tmpfs         597M      0  597M    0% /run/user/1000
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/7e1d611706665fa847f2f8dd771854cd2081135de985cf7688ef356e8bfedbb9/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/a2573d99c52d072ec5164605da20112a0cb5f3c52981610060daea4cca1328c0/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/b459a5f9c398574ad33e7bb147cbb4ec784a28442d20e07f6103c590a8c925d1/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/75a4352e34e211b480cd04594b4a77943b0386807f6699fbb9888bfd8d7cb55a/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/7ff77158be195667963af96003ce7bfa3d9e62c49db34db85af705e89adb9270/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/cbb4823241250ca5dca21e771b6a4e42791726c3f82b52ae23a70621bcff1053/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/6f711c2716af98b868e2656ec6948ae54bc90701ed003998463d5041bc467f/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/ccc58a3238a44e801c2e7a33a082658e8d9b457c941900fb159ba571bc5e568/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/83c63af773678ea72cc26a58ba68812990cd2c98278681f2fdd1d2862a37a80f/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/1baba14cc4f9e9e724eb8ae6f233ec70faaaef8a93677953a791eb1208f9fd2/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/bfbaa641e01d19bd54e847fd5703e4cc9b9f958dc380f654928d3c0b90329ccff/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/378f26629038e193accf36569e31f4d622edef9046e5d740f83c25cc549a2b5d6/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/d3b584efc7d262f6ea615e5452891c11de91f67e4084ed263b026b80e6222ab2/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/c755902db35ed9cf350eea5aa003923c2e08e8e9330ac927cf82515a7920323/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/7041a50c8f0edf9cc7096cf15e85f392221f75e9159b130e20baaf93d927/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/6329695567c24819bf44d802fb38a4cba7c42ec9206b9fe59dfb9e903f573442/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/350d3f3e34bc21c9eadfe13ea91f30c75f95f6fea84c25dbd4e18f2319226af/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/7137c8fbc5f99f4abb71e1f5c3c99870c39df1e278ea023c37a1c084e3de4d/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/7546709d8ead04895fa0b336e6d51913cb4f01f3cbe46dea7b9b1e0b485e05/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/1485e523cacb3297bd6996c1400ad334847ff2e61ff360792d431b2f4083352/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/212175b886650895ff44534b31a8e167bef8744f7084a2875a80824fd3beb565/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/1972a96d68954be341a213ffcc47d4955e36f6726159a1ae81a7c545437ab2c9/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/15fe731419379342008e4350a9e4b63b2fb29c820d340874309f45d31c8486d8/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/8d29f3048194c2eabc8c036b098976e0dbb8c584bcc786a9056ca3d2d0b005ca/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/f9c45583e98f22eb475b78faddbda72982e3a3020205efc3bdead8912a55e812/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/6731158f199934096dd824380cea0b5bd130bcf8e68c7abedf234bbb29d52e4f/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/578d4646e438ed3df357c1c2b25f4f788c07515775782224ec84a732a12f5eb9/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/0469ba96b2abed23d25c4b26b606fe12e8bd5457697362bb675d6afba1c1d610/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/892d1c57c186143f0990c10f79600abe680dfdd0a3f14eedffa1219be87200f3e/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/38a4c716f3d5958a2678ba2b7eca5c8df247f32fc967ed8a613c2012765cd18/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/e2dbbc59c99d54bc94aa9bc923b631b800e51b83779302c2f816a5ba7df207/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/f9e83689898aac004384ab8727b6d3fa0d234f2e6bf116cf6075ec858bf89f67/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/bd9d45448d16bab384836f6f8ec7b453b8b549c0b28490db50d7599ab946271/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/17cb3ad3a27088bb8a79f75bfff75c5bec1f310425ea441938601e59526f4ef9c/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/f7a2d29b5a600d03e81dd3f427f2517e1aadd374a18271394f6d6503a5aba09/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/d774f5523320425dd01db602c4b951e089da69f757f316a28e80ec2532c6e5ac/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/55a211b29250c94133d68499354da03c127b8ca97226e44df41cd7645b559be0/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/ad44356e0d5910d5202c2e1afc24a700ac6a8698d68d5dd4c3bb28493d2370/merged
overlay       19G     11G   7,3G   59% /var/lib/docker/overlay2/731a80e065129499ccedeadea1fd6beceaa1270c896ac22f9e2aa3d1f2bfb2063/merged
root@dojot:/var/lib/docker/volumes/telegraf#
    
```

Figura 23 – Alocação de disco após a instalação do Dojot. Fonte: Autoria própria.

Ainda na Figura 23, percebe-se que o espaço livre após a instalação do Dojot e serviços adicionais foi de 7,3 GB, espaço este utilizado para armazenar os dados do sistema e os dados do hidrômetro inteligente. Vale salientar que este espaço é compartilhado com todo o sistema e que a dinâmica de consumo do disco vai depender também da política de retenção de dados utilizada no Dojot, uma vez que por padrão a retenção de dados se dá por 7 dias no MongoDB.

Destaca-se que foi adicionado o serviço MongoDB Express para facilitar a gestão dos dados, uma vez que o Dojot ainda não apresenta uma interface para tal, ou seja, não é possível apagar dados ou alterar a política de retenção de dados do Dojot após a instalação. A Figura 24 apresenta um exemplo da tela de gestão do MongoDB Express, referente ao *device* ID 76107C, *tenant*⁴ admin, criado no Dojot.

⁴ Tenant, em inglês inquilino, é uma separação lógica entre recursos que podem estar associados a vários usuários. Fonte: Dojot.

Viewing Collection: admin_76107c

New Document New Index

Simple Advanced

Key Value String Find

Delete all 1 documents retrieved

_id	attr	value	device_id	ts	metadata
62d019d14bdcdb009abe8ba	psd	1.2	76107c	Thu Jul 14 2022 13:27:44 GMT+0000 (Coordinated Universal Time)	

Rename Collection

device_history: admin_76107c Rename

Tools

Export Standard Export -jsonArray Export -csv

Reindex Import -mongoexport json Compact

Delete

Figura 24 – Dashboard de visualização da base de dados no Mongo Express. Fonte: Autoria própria.

Ainda neste contexto, o serviço InfluxDB foi ativado (por padrão, encontra-se comentado no *compose file*), como uma forma de redundância, já que os dados dos dispositivos IoT são armazenados tanto no MongoDB como no InfluxDB, além de apresentar uma interface de gerência centralizada de fácil integração com outros serviços (como por exemplo o Telegraf⁵), no qual permite visualizar tanto as métricas do sistema, como dos microsserviços (*containers* Docker) e os dados dos dispositivos IoT coletados pelo Dojot, através de *dashboards* customizadas.

As políticas de retenção de dados aplicadas no InfluxDB podem ser visualizadas na Figura 25. Observa-se que foram adicionados dois *buckets*⁶:

1. *devices*: recipiente responsável por armazenar os dados dos dispositivos criados no Dojot. O tempo de retenção definido foi “ilimitado”.
2. *docker*: recipiente que armazenas as métricas do sistema e dos *containers*. A política de retenção atribuída foi de 2 dias.

⁵ Telegraf é um agente baseado em servidor para coletar e enviar todas as métricas e eventos de bancos de dados, sistemas e sensores de IoT. Escrito em Go, ele compila em um único binário sem dependências externas, e requer um consumo mínimo de memória. Fonte: Influxdata. Disponível em: Telegraf. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

⁶ Um *bucket* é um recipiente ou espaço alocado para armazenar objetos (arquivos).

Os buckets `_monitoring` e `_tasks` são reservados pelo sistema e criados automaticamente durante a instalação.

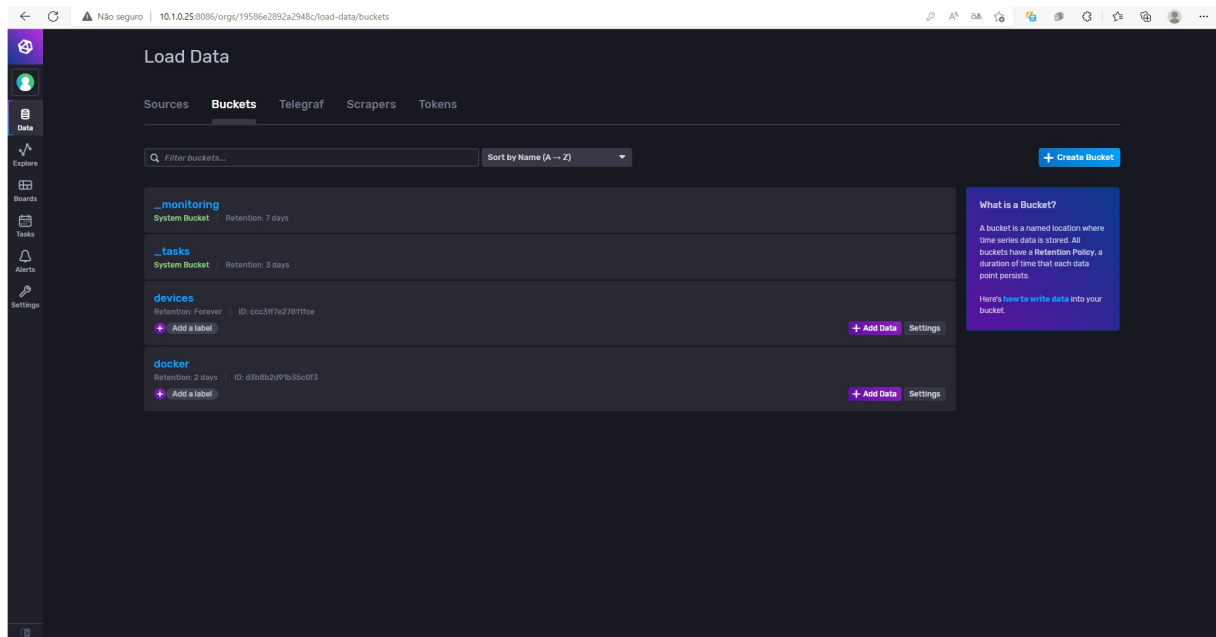


Figura 25 – Dashboard de buckets do InfluxDB. Fonte: Autoria própria.

Outro serviço adicionado ao portfólio do Dojot foi a ferramenta de gerenciamento do banco de dados PostgreSQL, o pgAdmin. Este serviço foi incluso em virtude da ausência de funcionalidade de mudança de senha de novos usuários (Tenets) após a sua criação na interface do Dojot, o que impossibilita o `login` de novos usuários. Através do pgAdmin é possível realizar a troca da senha, gerenciar a base de dados, visualizar em tempo real as métricas do banco e visualizar a estrutura completa das tabelas usadas pelo Dojot, conforme ilustra a Figura 26.

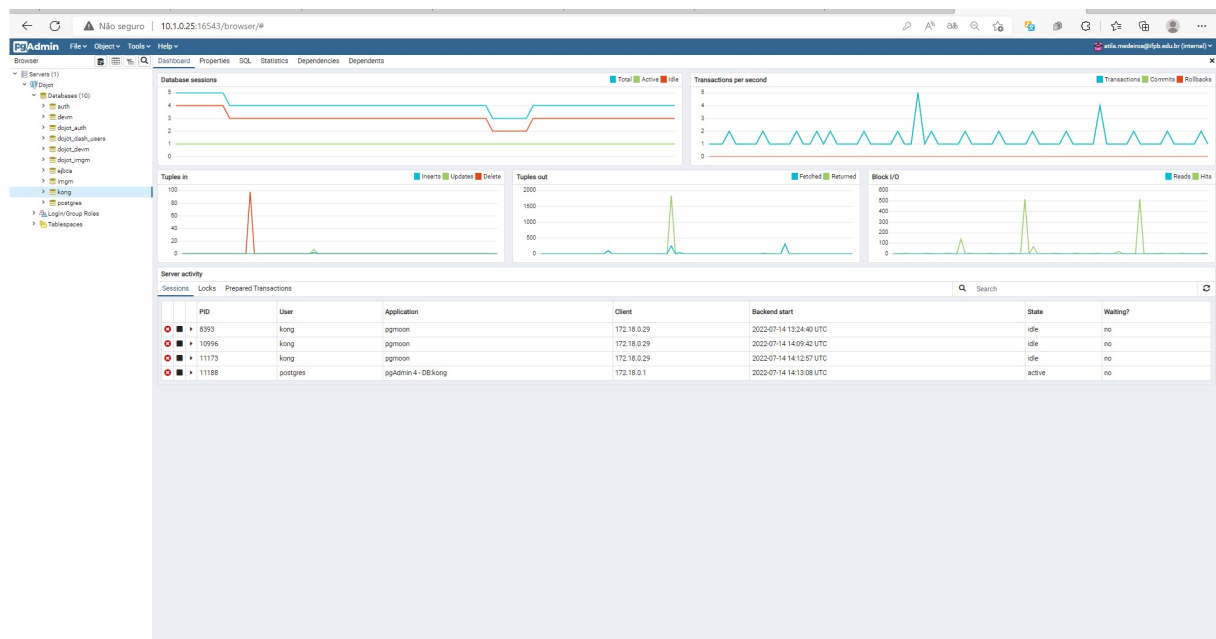


Figura 26 – Dashboard do pgAdmin. Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Avaliação Após a Coleta de Dados

Após a análise preliminar do comportamento da ferramenta Dojot depois de sua instalação e adição de serviços extras, apresenta-se a seguir os resultados observados durante a coleta de dados. Este ensaio foi dividido em duas etapas:

1. Análise das métricas do sistema: em que observou-se a estabilidade do sistema e o consumo de recursos do Dojot antes da carga de trabalho durante um período de 15 dias, ou seja, antes do fluxo de dados gerado pelo hidrômetro inteligente através da comunicação LoRa® com o *middleware*;
2. Análise da coleta de dados do hidrômetro inteligente: no qual registrou-se o consumo de disco, RAM, CPU e rede provocado pela carga de trabalho do dispositivo IoT durante o período de 7 dias, coletando dados a cada 15 s (fase de levantamento das vazões típicas).

Como reportado anteriormente nesta seção, o InfluxDB possui uma interface de gerência que possibilita a integração com a ferramenta de coleta de dados Telegraf, permitindo registrar métricas da VM e dos serviços executando no Docker através de *dashboards* customizadas com mais opções de gráficos, facilitando a observação do comportamento (consumo de recursos) de contêineres, da VM e do Dojot em uma única tela (serviço), embora seja possível analisar algumas métricas também por outras ferramentas, como o Portainer (fora do escopo deste trabalho).

Nesse sentido, apresenta-se na Figura 27 o *dashboard* “Docker” adicionado ao InfluxDB, que aborda uma série de informações relevantes tanto da VM quanto dos serviços Docker, como o consumo de disco, CPU, rede, memória RAM, tempo em execução da VM, carga de trabalho, entre outros, em que cada serviço é representado por uma cor nos gráficos exibidos, o que dificulta a visualização em uma imagem estática como a apresentada, pois, são 39 serviços em execução.

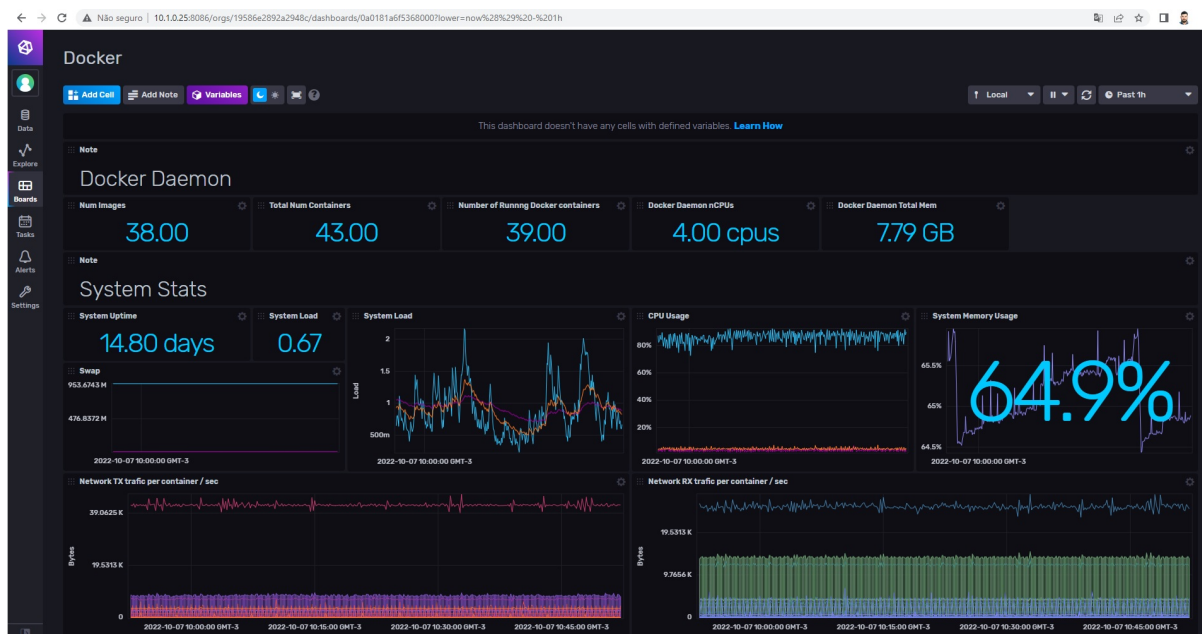


Figura 27 – *Dashboard de containers no InfluxDB.* Fonte: Autoria própria.

As informações exibidas na Figura 27 foram processadas por um período de aproximadamente 15 dias, no qual foi possível verificar a estabilidade do Dojot (não foram observados travamentos ou engasgos) antes de iniciar a carga de trabalho. Destaca-se ainda na Figura 27 que durante esse período a média de consumo de disco ficou em torno de 62% do total compartilhado (restando apenas $\approx 6,9$ GB de disco para registrar os dados do hidrômetro inteligente), o que representa uma aumento de 5% em relação a instalação do sistema (59%), com um consumo médio de memória RAM de 65% do total alocado (8 GB). Lembrando que o tempo de retenção dos dados para esse *bucket* foi definido para apenas 2 dias.

Após essa breve observação sobre as métricas do sistema, iniciou-se o ciclo de carga de trabalho do Dojot, em que realizou-se o registro de dados enviados pelo hidrômetro inteligente durante o período de 7 dias, em conjunto com o registro das métricas do sistema. A Figura 28 ilustra os dados obtidos após essa etapa.



Figura 28 – Dashboard de containers no InfluxDB. Fonte: Autoria própria.

Constata-se que houve um pequeno acréscimo no consumo de memória RAM (de 65% para 68%) e de disco (de 62% para 67%), em que o volume de dados gerado pelo hidrômetro inteligente nesse período (incluindo alguns testes anteriores), foi de aproximadamente 106 MB, como 1063332 objetos (documentos) gravados no MongoDB, como ilustrado na Figura 29.

Viewing Database: device_history

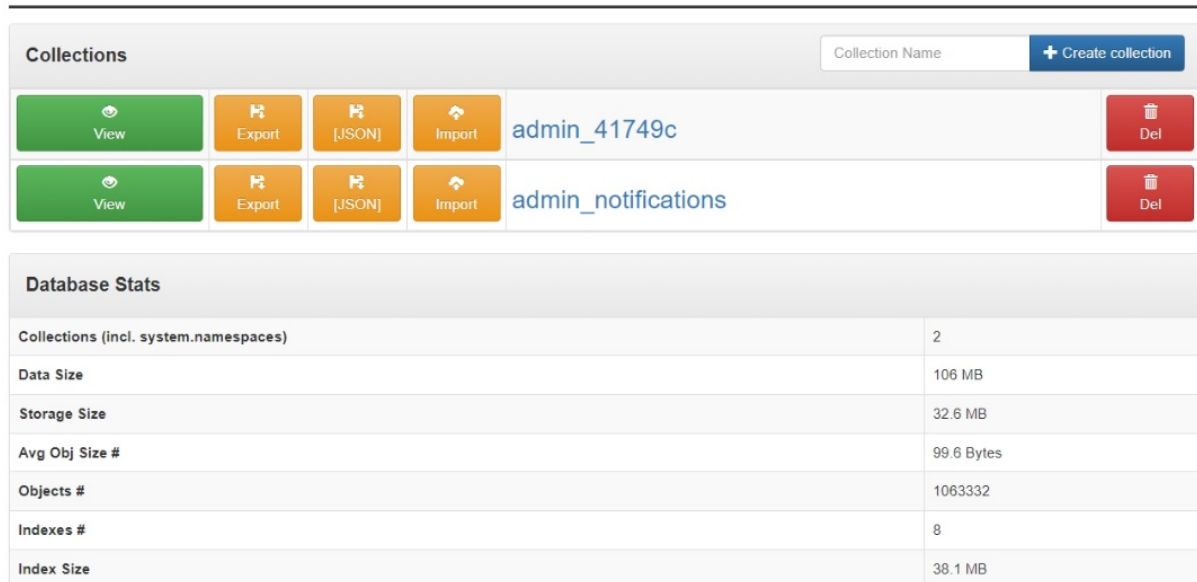


Figura 29 – Dashboard de visualização de dados no MongoDB Express . Fonte: Autoria própria.

Um retrato em tempo real das métricas do sistema também pode ser observado através do comando nativo da ferramenta Docker, o “docker stats”, que exibe todas as métricas (já apresentas graficamente no InfluxDB) de forma numérica, como os dados expressos na Ta-

bela 9. É importante destacar que os valores entre parênteses foram adicionados para facilitar a identificação dos serviços que mais consomem recursos, sendo “(01)” o maior consumidor de recursos.

Tabela 9 – Dados de métricas de serviços do Dojot extraídos da ferramenta “*docker stats*”.

NAME	CPU (%)	RAM (%)	NET (IN)	NET (OUT)	BLOCK (IN)	BLOCK (OUT)
kafka	6,05% (01)	11,73% (01)	56,4GB (01)	92,6GB (01)	126 MB (04)	1,89GB (4)
iotagent-mqtt	3,62% (02)	3,94% (06)	75,9 MB (21)	65,6 MB (20)	259 MB (03)	158 MB (7)
rabbitmq	2% (03)	1,1% (11)	377 MB (17)	397 MB (16)	45,6 MB (14)	592 MB (19)
auth	1,84% (04)	0,74% (14)	425 MB (16)	272 MB (18)	22,9 MB (23)	0B
persister	1,75% (05)	0,22% (31)	5,11GB (09)	3,09GB (12)	1,71 MB (36)	0B
mongodb	1,55% (06)	6,07% (04)	756 MB (14)	4,71GB (10)	66,6 MB (08)	83,1GB (2)
telegraf	1,37% (07)	0,74% (15)	1,34GB (12)	7,32GB (06)	108 MB (05)	0B
device-manager	1,2% (08)	0,69% (17)	3,61 MB (29)	3,81 MB (32)	15,3 MB (26)	0B
flowbroker	1,16% (09)	1,31% (09)	28,8GB (02)	18GB (02)	10,2 MB (29)	0B
apigw	0,99% (10)	4,88% (05)	7,99GB (07)	8,48GB (05)	26,4 MB (20)	53,2 kB (13)
history	0,96% (11)	0,49% (27)	4,33GB (10)	4,84GB (09)	9,41 MB (30)	0B
image-manager	0,92% (12)	0,53% (26)	136 kB (36)	72,4 kB (36)	15,1 MB (27)	0B
data-broker	0,68% (13)	0,63% (20)	18,2GB (04)	11,4GB (04)	30,1 MB (15)	4,1 kB (22)
influxdb-storer	0,67% (14)	0,55% (24)	24,7GB (03)	14,3GB (03)	13,5 MB (28)	8,19 kB (21)
cron	0,51% (15)	0,55% (25)	8,45GB (06)	5,66GB (08)	8,48 MB (31)	0B
postgres	0,48% (16)	0,77% (13)	667 MB (15)	3,39GB (11)	62,3 MB (10)	8,85GB (3)
k2v-bridge	0,47% (17)	0,65% (19)	8,67GB (05)	5,87GB (07)	26,9 MB (18)	24,6 kB (15)
x509-identity-mgmt	0,44% (18)	8,09% (02)	3,31GB (11)	374 MB (17)	305 MB (02)	9,76 MB (22)
v2k-bridge	0,26% (19)	0,71% (16)	175 MB (18)	57,5 MB (21)	28,8 MB (16)	24,6 kB (17)
backstage	0,22% (20)	0,59% (21)	4,92GB (09)	2,7GB (13)	28,3 MB (17)	8,19 kB (20)
influxdb	0,2% (21)	6,13% (03)	7,07GB (08)	871 MB (14)	427 MB (01)	92,1GB (1)
grafana	0,18% (23)	0,46% (28)	46,4 MB (24)	14,5 MB (29)	91 MB (06)	67,8 MB (21)
kafka-ws	0,18% (22)	0,94% (12)	155 MB (19)	45,7 MB (22)	24,1 MB (21)	24,6 kB (16)
zookeeper	0,16% (24)	2,99% (07)	47,6 MB (23)	28,6 MB (24)	54,4 MB (11)	143 kB (11)
device-manager-redis	0,14% (29)	0,04% (39)	68,7 kB (38)	0B (38)	172 kB (39)	0B
data-broker-redis	0,14% (28)	0,05% (37)	1,07 MB (33)	1,01 MB (34)	885 kB (37)	77,8 kB (7)
auth-redis	0,14% (27)	0,05% (36)	56,4 MB (22)	26,1 MB (25)	565 kB (38)	582 kB (10)
flowbroker-redis	0,14% (26)	0,08% (34)	13,8 MB (27)	9,76 MB (31)	3,13 MB (35)	20,5 kB (18)
kafka-ws-redis	0,14% (25)	0,09% (33)	30,3 MB (26)	16,6 MB (28)	5,28 MB (32)	0B
influxdb-retriever	0,11% (30)	0,69% (18)	42,6 MB (25)	35,6 MB (23)	4,76 MB (34)	12,3 kB (19)
iotagent-lwm2m	0,1% (31)	1,56% (08)	1,49 MB (32)	1,62 MB (33)	26,5 MB (19)	0B
minio	0,04% (32)	0,24% (30)	87,6 kB (37)	13,1 kB (37)	50 MB (12)	0B
portainer	0,03% (34)	0,28% (29)	1,9 MB (31)	20,8 MB (26)	67,3 MB (07)	730 MB (18)
postgres-admin	0,03% (33)	1,16% (10)	40,4 kB (39)	0B (39)	65,2 MB (09)	0B
mongo-express	0,01% (35)	0,59% (22)	152 MB (20)	159 MB (19)	46,4 MB (13)	0B
gui	0% (39)	0,05% (38)	333 kB (34)	18,5 MB (27)	24 MB (22)	0B
gui-v2	0% (38)	0,08% (35)	193 kB (35)	14 MB (30)	20,4 MB (24)	0B
fb-context-manager	0% (37)	0,22% (32)	978 MB (13)	715 MB (15)	5,08 MB (33)	0B
data-manager	0% (36)	0,59% (23)	4,32 MB (28)	74,4 kB (35)	18,5 MB (25)	36,9 kB (14)

Fonte: Autoria própria.

Ainda sobre os dados da Tabela 9, chama a atenção o grande volume de dados processados pelo serviço Kafka, com relação às métricas de rede (NET IN e NET OUT), além de ser responsável por consumir os maiores recursos de CPU e memória RAM em praticamente todo tempo operacional.

Apesar do curto período de análise do *middleware* Dojot, verificou-se algumas limitações na ferramenta, como por exemplo, a ausência de funcionalidade para configuração do tempo de retenção de dados no MongoDB após a instalação, ausência funcionalidade para alteração de senha de novos usuário, como também observou-se engasgos na interface de visualização de

dados v2 (serviço “gui-v2”) e na ferramenta InfluxDB ao tentar plotar gráficos em tempo real com mais de 1000 registros.

Ante o exposto, pode-se responder à questão de pesquisa “**QP03 - O middleware Dojot pode ser utilizado com uma ferramenta de produção no atual estágio de desenvolvimento da ferramenta?**” Sim, a ferramenta demonstra ser robusta, embora tenha apresentado algumas limitações que podem ser corrigidas em atualizações, dando indícios de que pode vir a ser utilizada como um *middleware* de produção em um futuro próximo.

4.3 Comunicação LoRa®

LoRa® é uma tecnologia de comunicação sem fio que vem ganhando bastante destaque no cenário de IoT. Utilizando técnicas de modulação de espalhamento espectral por pulsos curtos (*chirps*), a tecnologia apresenta um conjunto de vantagens (baixa potência, longo alcance, alta imunidade a ruído etc) e se torna ideal para aplicações de IoT em um *campus* inteligente. Nesse sentido, a presente seção discorre sobre os resultados da comunicação entre o protótipo e o LoRa® *gateway* Dragino LG02 instalado na Coordenação de Tecnologia da Informação (CTI) do *campus*.

O cenário da comunicação é ilustrado na Figura 30, em que apresenta-se uma imagem do Google Maps com a localização e a distância estimada entre os dispositivos, uma foto da casa de máquinas onde o hidrômetro inteligente está instalado e uma foto da vista frontal do hidrômetro inteligente para a sala da coordenação. A distância entre hidrômetro inteligente (H na figura) e o *gateway* (G na figura) é de aproximadamente 85 metros.

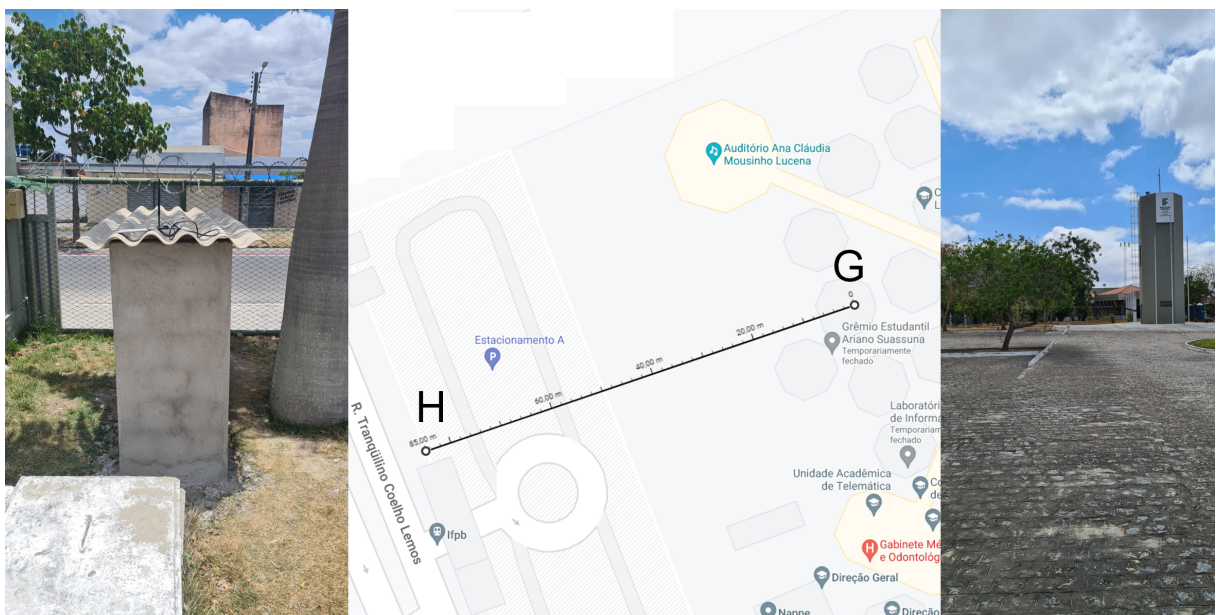


Figura 30 – Cenário da comunicação LoRa®. Fonte: Autoria Própria.

O *setup* de configuração da camada física LoRa®, bem como as configurações do cliente

MQTT do *gateway*, são apresentados na Figura 31. Utilizou-se a frequência de 917Mhz⁷ uma vez que foi constatado que a frequência padrão de 915 mHz já estava sendo utilizada por outros dispositivos, mitigando assim a possibilidade de colisão de pacotes. Vale ressaltar que a potência de transmissão (TX) tanto do WiFi LoRa® 32 (hidrômetro inteligente) quanto do *gateway* não foram alterados, utilizando assim a potência padrão de 14 dBm.

The screenshot displays the configuration page for a Dragino LoRa Gateway. It is divided into two main sections: 'LoRa Configuration' and 'MQTT Client Configuration'.

LoRa Configuration:

- Radio 1 RX Settings:** Frequency (Hz) is 917000000, Spreading Factor is SF7, Preamble Length is 8, RF Bandwidth (Hz) is 125kHz, Coding Rate is 4/5, and LoRa Sync Word is 52.
- Radio 2 TX Settings:** Frequency (Hz) is 915000000, Spreading Factor is SF7, Preamble Length is 8, RF Power (0-20) dBm is 20, RF Bandwidth (Hz) is 125kHz, Coding Rate is 4/5, and LoRa Sync Word is 52.
- Enable LoRaWAN/RAW Relay Mode:** A checkbox for 'Enable Relay Mode' is present, with a warning: 'Caution: Enabling Relay Mode will disable other LoRaWAN modes'.
- Static GPS coordinates ?** Includes fields for 'Enable Static GPS' (checked), Latitude (-7.213949), and Altitude (m) (450).

MQTT Client Configuration:

- MQTT Server Profile:** General
- Broker Address [-h]:** 10.1.0.25
- Broker Port [-p]:** 1883
- User ID [-u]:** admin.41749c
- Password [-P]:** [Redacted]
- Client ID [-i]:** admin.41749c
- Quality of Service [-q]:** QoS 0
- Topic Format [-t]:** CLIENTID/attrs
- Data Format [-m]:** JSON

Buttons for 'Save&Apply', 'Disable', and 'Cancel' are visible at the bottom of each section.

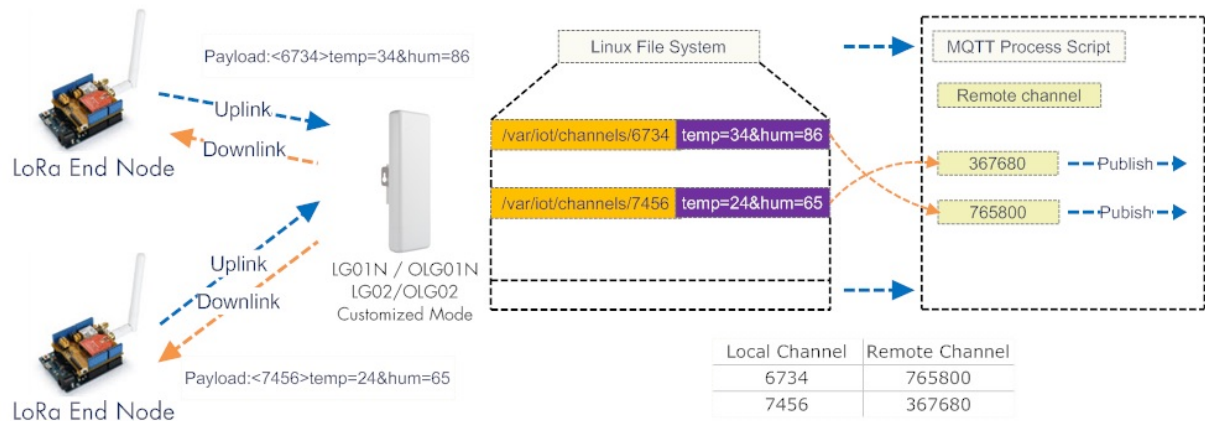
Figura 31 – Setup de configurações do LoRa® *gateway* Dragino LG02. Fonte: Autoria Própria.

Um ponto chave da comunicação entre o dispositivo final e o servidor (*broker* MQTT ou *middleware*) é o *script* MQTT do LG02. Suponha que existam dois nós sensores LoRa®, em que o ID do nó 01 (Node1) é 6734 e o ID do nó 02 (Node2) é 7456. No *broker* MQTT remoto há dois tópicos: Topic1:/channel/765800 e Topic2:/channel/367860. Podemos configurar o LG02 para mapear o Node1 para o Topic1 e o Node2 para o Topic2. Portanto, quando houver dados do sensor do Node1, o LG02 encaminhará os dados para o Topic1 e quando houver dados do sensor do Node2, o LG02 encaminhará para o Topic2. A dinâmica desse processo é exemplificada na Figura 32⁸, na qual ilustra dois nós enviando dados de temperatura e umidade para um servidor remoto.

⁷ o plano de frequência LoRa® do Brasil é de 915 mHz a 928 mHz, de acordo com o ato 14448 de 2017 da ANATEL.

⁸ Para mais informações consulte: Wiki Dragino. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

How MQTT script process sensor data



Operate Principle:

- > LoRa End Node sends the data to gateway in specify format: <node_ID>value
- > Gateway get the data and will put the data in corresponding files under /var/iot/channels.
- > MQTT Process Script will publish data to remote channel according to the pre-configure mapping

Figura 32 – Script MQTT do gateway Dragino LG02. Fonte: Dragino

Nesse sentido, configurou-se o canal local (*Local Channel*) do LG02 como “1” e o canal remoto (*Remote Channel*) como “2”, de acordo com o ilustrado na Figura 33 (A). A Figura 33 (B) exemplifica como se dá a estrutura de código para envio de pacotes LoRa® para o LG02.

```

LoRa.beginPacket();
LoRa.print("<");
LoRa.print("1"); // Canal MQTT utilizado no Dragino utiliza as tags "<
LoRa.print(">");
LoRa.print("{}"); // Formato do payload Dojot {
LoRa.print("\tx\\": "); // Número de Pacote LoRa
LoRa.print(String(Tx_LoRa));
LoRa.print("");
LoRa.endPacket(); // Finaliza Envio TX LoRa
    
```

Figura 33 – Configurações de canais no LG02 (A) e exemplo de código para envio de pacote LoRa® (B). Fonte: Autoria Própria.

As demais configurações permaneceram inalteradas, uma vez que a distância entre os

dispositivos é considerada baixa, e a comunicação se deu de forma satisfatória. Assim, não se detectou a necessidade de fazer testes alterando outras configurações da camada física, como a taxa de bits, o tamanho da palavra de sincronismo, entre outros.

Durante a coleta de dados, a comunicação entre o dispositivo final e o LG02 apresentou uma flutuação na potência do sinal (RSSI) de -80 dBm a -100 dBm, com uma potência média do sinal de aproximadamente -89,14 dBm. Insta salientar que a sensibilidade do transceptor do Dragino LG02 é < -148 dBm, de acordo com o manual do fabricante ⁹.

A Figura 34 traz um recorte de 1000 registros em que é possível visualizar um fenômeno fora do padrão detectado, bem como a média do parâmetro RSSI. Percebe-se que no período entre 09:16:44 e 21:00:03 da figura, que há uma perturbação atípica do sinal, período este marcado por chuvas no local, o que dá indícios de que a água da chuva interfere negativamente na comunicação, como já reportado na literatura.

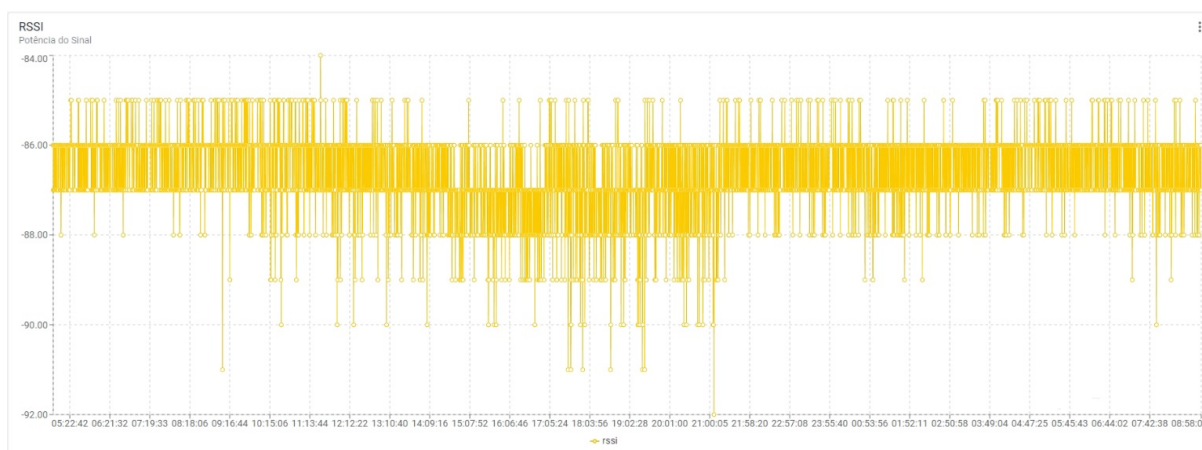


Figura 34 – Característica da potência do sinal recebida no *gateway* Dragino LG02. Fonte: Autoria Própria.

A relação sinal/ruído (SNR) não pôde ser observada com o equipamento Dragino LG02 utilizando apenas a camada física LoRa®, uma vez que esse parâmetro só é acessível quando se utiliza o protocolo LoRaWAN®. Quanto à taxa de perda de pacotes, durante o período de análise, do pacote 1 ao 30729 (último pacote durante a extração dos dados), foram perdidos 110 pacotes apenas, o que representa um taxa de perda de pacote de 0,35 %, ou seja, a comunicação obteve um índice de desempenho de 99,65 %.

Mediante os dados apresentados, pode-se responder a questão de pesquisa: “ **QP04 - A tecnologia LoRa® será capaz de apresentar um desempenho de comunicação com baixa taxa de perdas de pacotes para o cenário da aplicação?**” Sim, a questão foi elucidada, logo, entende-se que o uso da tecnologia LoRa® mostra-se madura o suficiente para ser utilizada em aplicações de um *campus* inteligente, podendo facilmente ser implementada e otimizada para diversos cenários.

⁹ Disponível em: LG02/OLG02 LoRa Gateway User Manual. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

4.4 Caracterização do Perfil de Consumo

Esta seção apresenta os resultados da caracterização do perfil de consumo de água do *campus* Campina Grande do IFPB, ou seja, apresenta as vazões de operação e os volumes contabilizados em cada faixa de vazão (Tabela 10), além da pressão obtida no cavalete de entrada de água do *campus*.

Tabela 10 – Faixas de vazão de ensaio.

Faixa de vazão (l/h)	Vazões para verificação de erros (l/h)	Faixa de vazão (l/min)	Vazões para verificação de erros (l/min)	Perfil de consumo %
0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	4,56
5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	6,99
15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	6,83
30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	7,34
50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	23,21
150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	23,92
350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	12,27
550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	7,29
850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	5,86
1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	1,73

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15538:2014

Não menos importante, a Tabela 11 carrega os dados com a série histórica de consumo de água do *campus* extraídos da plataforma da concessionária de água CAGEPA do ano de 2022. Esse parâmetro serve como um parâmetro auxiliar para verificar se o medidor de vazão está operando dentro dos padrões de consumo previstos historicamente. De acordo com os dados da CAGEPA informados na Tabela 11, o consumo médio faturado em Janeiro de 2022 (mês de férias, com pouca demanda) foi de 233 m³, com um consumo diário de aproximadamente 7,76 m³, sendo a média histórica para o mês de 154 m³.

Tabela 11 – Consumo médio de água do *campus* no ano de 2022 em metros cúbicos.

Código Mês/Ano	Data da leitura	Leitura	Cons. Medido	Cons. Faturado	Cons. Médio	Dias de Consumo
dez/22	09/12/2022	1624		530	530	30
nov/22	09/11/2022	1094	628	611	470	32
out/22	08/10/2022	466	465	664	393	29
set/22	09/09/2022	26525	641	641	316	31
ago/22	09/08/2022	25884	416	416	279	32
jul/22	08/07/2022	25468	279	279	271	30
jun/22	08/06/2022	5392		200	200	30
mai/22	09/05/2022	24615	434	246	189	31
abr/22	08/04/2022	24181	205	205	182	29
mar/22	10/03/2022	23976	177	177	181	30
fev/22	08/02/2022	23799	193	193	178	29
jan/22	10/01/2022	23606	233	233	154	32

Fonte: CAGEPA

Ainda sobre os dados da CAGEPA, observa-se na Tabela 11 que após a troca do hidrômetro realizada no mês de Agosto pelo modelo ultrassônico da Viewshine/SAGA, houve um aumento do consumo médio registrado, ou seja, o hidrômetro anterior (SENSUS IM-T20) estava

apresentando um elevado erro de leitura em virtude do desgaste temporal (instalado há mais de 8 anos), o que já é esperado para esse tipo de hidrômetro mecânico.

A metodologia para realização desse ensaio baseou-se no Anexo C da ABNT NBR 15538:2014, que visa padronizar o método de coleta de dados de vazões de operação e expressão dos resultados, facilitando a identificação dos volumes escoados no período em função da vazão que operou, através de gráficos do tipo barra (histograma). Dessa forma, pode-se identificar as vazões e as pressões mais significativas operacionalmente e verificar se o hidrômetro ou dispositivo medidor está corretamente dimensionado para operar no local a ser monitorado, como também o manômetro analógico.

Para uma melhor compreensão metodológica, elencamos a seguir os principais pontos do Anexo C da ABNT NBR 15538:2014:

- **Quanto a aparelhagem (medidor):**

1. medidores de tipo volumétrico, classe C ou melhor, de vazão máxima de 3 m³/h, dotados de saída de pulsos com resolução de 0,1 l/pulso ou melhor;
2. *data logger* adequado ao registro de pulsos de consumo e registro de sinal de pressão (no caso do levantamento de dados de pressão) e com capacidade de memória suficiente para registro ininterrupto de uma semana completa;
3. alternativamente, a entrada para registro dos consumos no *data logger* pode ser por intervalo de tempo, desde que se possa fixar intervalos de 15 s.

- **Quanto a metodologia de registro:** O medidor pode ser instalado no lugar do hidrômetro utilizado para medição do consumo, ou em série, fazendo uso de um cavalete especial, visando à coleta dos dados com o *data logger* sem interferir no consumo e no faturamento do usuário, por um período mínimo de uma semana inteira sem interrupções.

Antes de realizar o procedimento descrito na norma, realizou-se um levantamento preliminar do perfil de consumo, utilizando-se apenas o sensor de vazão FG400A (capacidade máxima de 3,6 m³/h e 4,8 l/pulso), enviando dados a cada 1 segundo para a plataforma Dojot, com um protótipo inicial, para efeito comparativo com o versão final do SMMIA. Neste teste, o protótipo foi alimentado por uma bateria estacionária de no-break de 12 V e 9 a/h, a qual suportou alimentar o circuito (carga) por pouco mais de 108 h (quatro dias). O protótipo é exibido na Figura 35.



Figura 35 – Protótipo inicial. Fonte: Autoria própria.

Após esse período de coleta de dados da vazão (l/min), obteve-se o histograma ilustrado no gráfico da Figura 36.

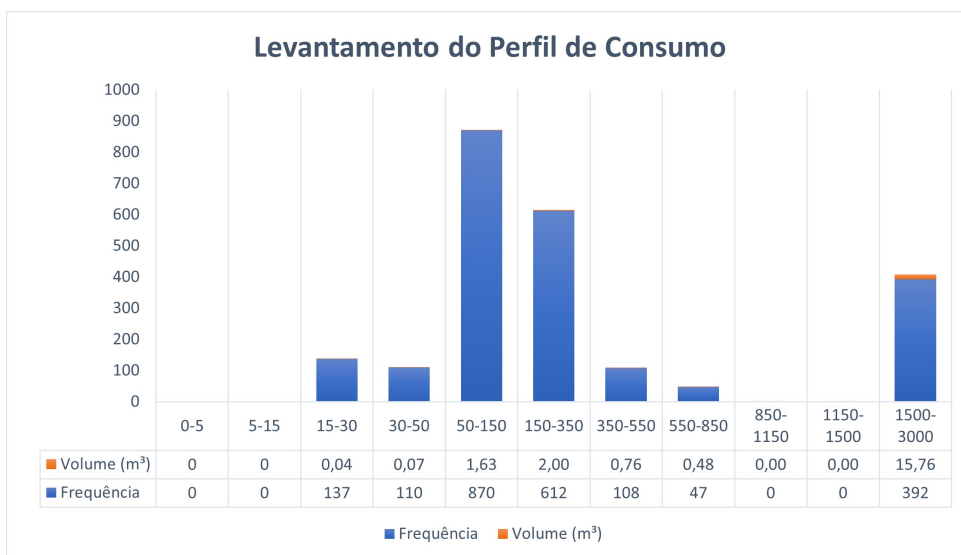


Figura 36 – Caracterização do perfil de consumo do campus com protótipo inicial. Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 36 que os perfis de 50-150 l/h (0,83-2,5 l/min) e 150-350 l/h (2,5-5,83 l/min) representaram a maior frequência de vazão de operação do sistema. É importante ressaltar que a terceira maior frequência de operação registrada (1500-3000 l/h) está fora do

escopo da norma (1150-1500 l/h), embora a faixa de vazão represente o maior consumo de água do *campus*, com um volume totalizado de aproximadamente 15,76 m³.

Ainda neste ensaio, foi possível verificar que a menor vazão instantânea registrada pelo sensor foi de 0,26 l/min e a maior vazão registrada foi de 45 l/min, o que demonstra que o sensor FS400A está em conformidade com as faixas de vazão apresentadas pelo sistema, uma vez que a vazão máxima suportada pelo sensor é de 60 l/min.

No segundo ensaio – seguindo os 15 segundos de intervalo para envio de dados de vazão e pressão com a versão final do protótipo – os resultados obtidos geraram o histograma exibido na Figura 37.

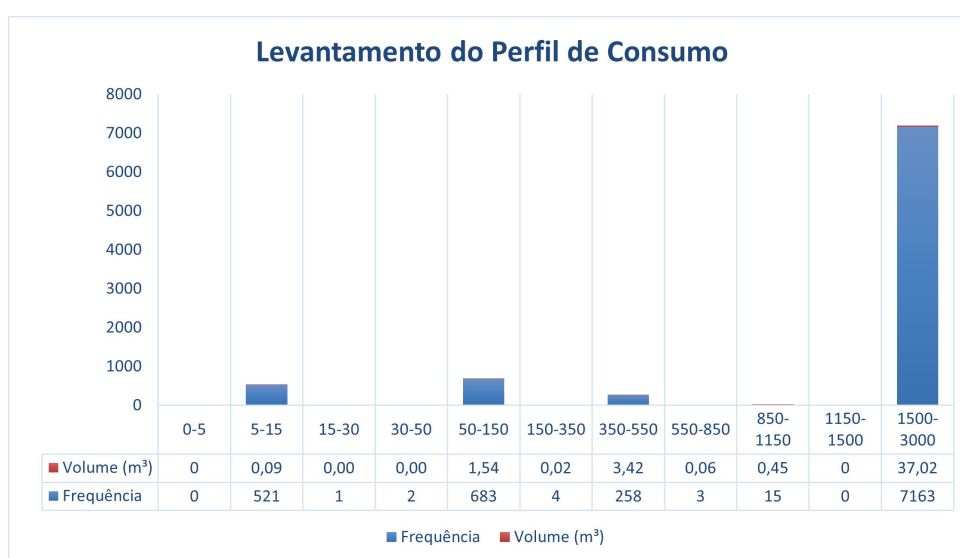


Figura 37 – Caracterização do perfil de consumo do campus com protótipo final. Fonte: Autoria própria.

Percebe-se no histograma do protótipo final que houve uma tendência de uniformização da faixa de vazão para faixa de 25-50 l/min (1500-3000 l/h), com um volume total estimado de aproximadamente 37 m³. Ainda neste período, observou-se uma interferência na faixa de vazão operacional quando a válvula solenoide encontra-se energizada em comparação com a mesma desenergizada. Quando não alimentada (fora da rede elétrica), a faixa de vazão observada ficou entre 22 e 25 l/min (1320 a 1500 l/h), com um volume total contabilizado no período de um dia (período de observação para ajustes no algoritmo e calibração do sensor de pressão) de 26,68 m³, apresentando uma diferença de 0,61 m³ ou 2,5 % a mais na solução SMMIA, como pode ser observado na Figura 38.



Figura 38 – Comparação do volume total contabilizado entre o SMMIA e o hidrometro SAGA da CAGEPA com o solenoide desenergizado. Fonte: Autoria própria.

Com o solenoide energizado, a faixa de vazão operacional mudou para faixa de 30 a 35 l/min (1800 a 2100 l/h), com uma vazão média de aproximadamente 31 l/min (1860 l/h), sendo a maior vazão contabilizada no período observado de 34,58 l/min (2074,8 l/h) e a menor de 0,1 l/min (6 l/h), o que pode ser considerado ruído, pois mesmo com o solenoide fechado (energizado) durante o período das 23:00 h as 06:00 h, constatou-se diversos registros de 0,1 l/min.

A Tabela 12 sistematiza os dados do monitoramento do consumo total durante o período de observação, comparando a solução SMMIA com o hidrômetro SAGA da CAGEPA.

Tabela 12 – Acompanhamento das soluções (SAGA e SMMIA) na totalização do volume total contabilizado (m³).

Dia	SAGA (m ³)	SMMIA (m ³)	SAGA - SMMIA (m ³)	Erro (%)
02/01/2023	0	0	0	0
04/01/2023	24,85	23,05	1,80	7,24
05/01/2023	34,50	32,16	2,34	6,77
06/01/2023	45,20	42,99	2,21	4,90
07/01/2023	53,28	49,67	3,61	6,77
09/01/2023	57,50	52,44	5,06	8,79
10/01/2023	73,82	68,16	5,66	7,67
Média			3,45	7,02

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que durante esse período constatou-se uma diferença média na contabilização do volume total escoado de aproximadamente 7,00 % a menos na solução SMMIA, o que pode ser explicado por algum dos fatores reportados a seguir:

1. o sensor não foi calibrado para essa faixa de vazão (abordado na seção seguinte);
2. o hidrômetro SAGA apresenta uma maior sensibilidade e precisão, já que utiliza a tecnologia de sensor ultrassônico com início de funcionamento em 0,03 l/min (2 l/h) contra 1 l/min (60 l/h) do sensor FS400A;
3. o fluxo de água entrante no sensor de vazão não possui um fluxo laminar, gerando uma leitura equivocada do sensor, e/ou;

4. outros fatores ainda não conhecidos.

Com isso, a seguinte questão de pesquisa: “**QP01 - O medidor inteligente de água desenvolvido será capaz de medir com a precisão e requisitos estabelecidos em normas vigente?**” pode ser parcialmente respondida, já que a solução SMMIA apresentou um erro de indicação médio (-7,00%) acima do valor esperado (entre $\pm 3\%$ e $\pm 5\%$, taxa de erro máximo, segundo o fabricante), logo, para elucidar essa questão em sua plenitude é necessário um período maior de testes e ajustes da solução.

Embora tenha-se observado uma mudança de padrão no perfil de consumo, com uma redução de aproximadamente 22 % da vazão máxima (de 45 l/min para 35 l/min) entre o protótipo inicial e o final, provocado aparentemente pelo solenoide, esse comportamento em nada afeta o abastecimento de água do *campus*, porém, pode ser um fator de impacto na redução do consumo, além de proporcionar uma maior regularidade na leitura dos sensores, aumentando sua vida útil, como também pode facilitar futuramente uma calibração mais precisa *in loco*, uma vez que a faixa de vazão é praticamente restrita a um único intervalo.

Observou-se também que o volume contabilizado está em conformidade com a série histórica apresentada pela CAGEPA, com um leve aumento se comparado ao mesmo período do ano anterior (7,2 m³), apresentando um consumo médio diário de aproximadamente 8,15 m³ até a data final do período de monitoramento.

Quanto à caracterização da pressão no cavalete de entrada de água do campus, a Figura 39 exhibe o histograma com o comportamento apresentado durante o período de observação. Vale salientar que a maior pressão registrada foi de 4,73 bar (48,23 mca), com uma média aproximada de 3,90 bar (39,77 mca), o que demonstra que o manômetro analógico utilizado deve ser substituído por um manômetro com fundo de escala ≥ 5 bar.

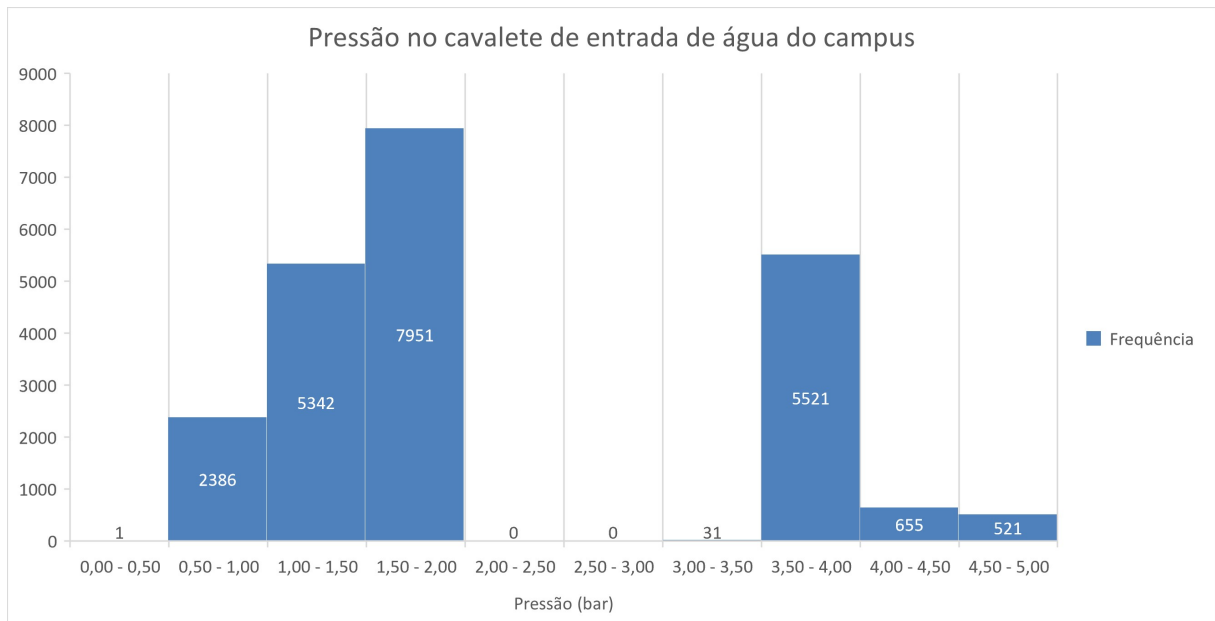


Figura 39 – Caracterização da pressão no cavalete de entrada de água do *campus*. Fonte: Autoria própria.

Embora o histograma apresente uma frequência muito alta de pressões entre 0,5 bar e 2 bar, na prática observou-se que trata-se de pressões “residuais” na tubulação após o fechamento da válvula de passagem de água manual do cavalete de entrada de água, como pode-se perceber no gráfico exibido na Figura 40, em que a vazão instantânea encontra-se em zero, e a pressão na tubulação variando entre 1,4 bar e 1,5 bar aproximadamente, logo foram descartadas do cálculo da pressão média.

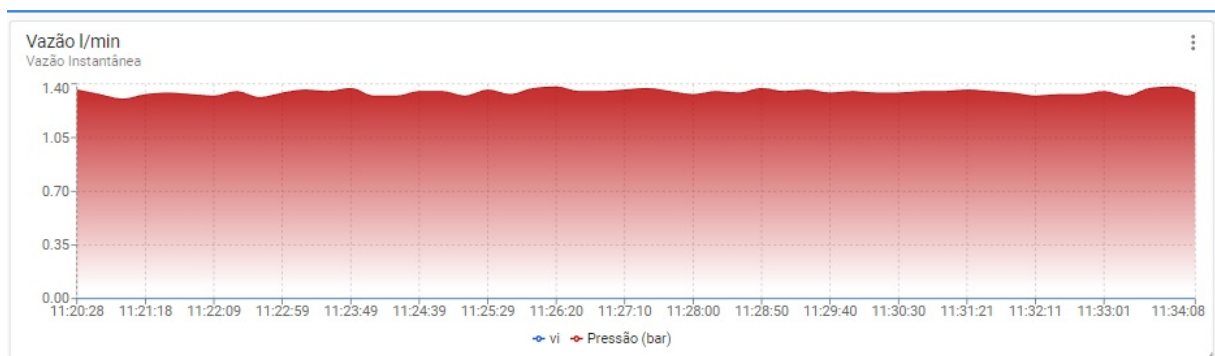


Figura 40 – Caracterização da pressão no cavalete de entrada de água do *campus*. Fonte: Autoria própria.

Cabe destacar que a pressão observada durante o ensaio está dentro dos limites estabelecidos pela NBR 12218, que estabelece que as redes de abastecimento de água tenham pressão mínima de 10 mca (0,98 bar) e máxima de 50 mca (4,90 bar). Com isso, responde-se à questão de pesquisa “**QP02 - A pressão da água na entrada do sistema de distribuição de água do campus está em conformidade com as normas vigentes?**” Sim.

4.5 Calibração do Sensor de Vazão

A calibração de sensores de vazão pode ser realizada por meio de comparações volumétricas ou mássicas, através do método estático ou dinâmico. Neste sentido, o presente tópico aborda em detalhes a metodologia adotada para calibração do sensor de vazão FS400A G1 utilizado neste projeto. O procedimento utilizado baseou-se em um dos três modelos (1C) de bancada de ensaio de calibração por pesagem com método estático, descrito na ABNT NBR ISO 4185:2009.

O princípio gravimétrico por pesagem estática consiste em pesar o volume do líquido represado em um recipiente (de peso conhecido) em um tanque de pesagem, uma vez que se conhece o tempo, a densidade específica do líquido e a temperatura de operação. Nesse contexto, a Figura 41 ilustra o diagrama da bancada de calibração de sensores de vazão para o método estático descrito na norma, no qual utiliza o método por bombeamento direto.

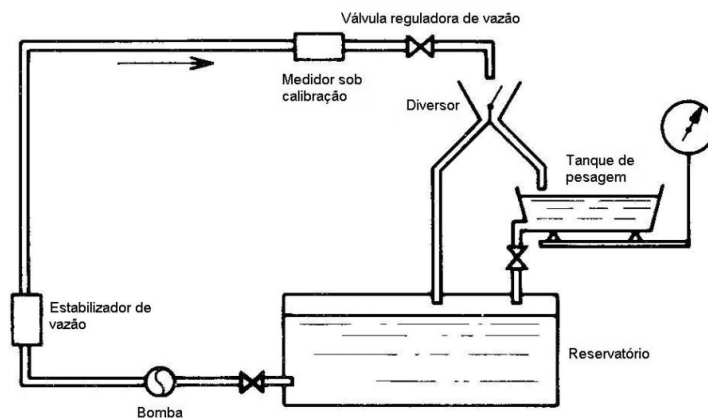


Figura 41 – Diagrama de uma instalação para calibração por pesagem (método estático (1C), alimentação por bombeamento direto). Fonte: ABNT NBR ISO 4185:2009.

Nesse ensaio (1C), a bomba direciona o líquido do reservatório sob pressão constante para o estabilizador de vazão, que mantém o fluxo do líquido constante para o sensor sob calibração, ajustando a vazão de saída através da válvula reguladora de vazão, que direciona o fluxo para o divisor, período no qual é registrada a massa inicial (m_0). Com o fluxo do líquido estabilizado, o divisor é acionado e direciona a vazão do líquido para o tanque de pesagem, acionando o cronômetro e contabilizando o volume escoado por um tempo t . A pesagem (a massa final aparente m_1) se dá quando o líquido se estabiliza no tanque, momento no qual o valor deve ser registrado e o líquido drenado novamente para o reservatório.

A vazão mássica média (q_m) desse ensaio é dada pela equação 16.

$$q_m = \frac{m}{t} = 1,00106 \frac{m_1 - m_0}{t}, \quad (16)$$

e a vazão volumétrica dada pela equação 17:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} = 1,00106 \frac{m_1 - m_0}{\rho \times t}. \quad (17)$$

O valor de 1,00106 nas equações acima se deve à aplicação de um fator de correção (ϵ), em virtude da diferença entre o empuxo exercido pela atmosfera em uma determinada massa de líquido e em uma mesma massa padrão construída em metal, utilizada na calibração da balança, quando o líquido sob ensaio é a água, levando-se em consideração a massa específica da água (ρ) de 1000 kg/m^3 , a massa específica do ar (ρ_a) de $1,21 \text{ kg/m}^3$ e a massa específica do material dos pesos-padrão (ρ_p) de 8000 kg/m^3 (ABNT NBR ISO 4185:2009). Vale ressaltar que uma exatidão de $0,5^\circ\text{C}$ é suficiente para assegurar um erro menor que 10^{-4} na avaliação da massa específica, uma vez que as propriedades físicas da água são bem estáveis nas condições atmosféricas (ABNT NBR ISO 4185:2009).

Para calibração do sensor de vazão FS400A utilizou-se a biblioteca FlowMeter¹⁰ versão 1.2.0. É importante ressaltar que o algoritmo dessa biblioteca não leva em consideração a viscosidade, a massa específica (considerado a massa específica da água como $1 \sim \text{g/cm}^3$) e a temperatura do líquido sob medição, ou seja, para todos os efeitos é considerado $1 \text{ kg/min} = 1 \text{ l/min}$.

As propriedades ou características dos sensores de vazão utilizadas pelo FlowMeter são compostos por uma estrutura de dados contendo os seguintes atributos:

1. Fator K (KF): Fatores K são valores de calibração (pulsos por unidade de volume) usados para converter frequências de saída do sensor de vazão em taxas de vazão, ou seja, converte a frequência de rotação da aleta em litros por minuto (l/min), obedecendo a seguinte relação:

$$Q = \frac{f}{KF}, \quad (18)$$

em que Q é a vazão contabilizada, f é a frequência de rotação da aleta e KF é o fator K .

2. Fator M (MF): é o conjunto de fatores de correção do fator K , uma vez que na prática os sensores não são lineares. Por padrão, a FlowMeter trabalha com 10 índices, dividindo a capacidade do sensor (cap) em percentis, com a seguinte relação matemática para cada ponto de calibração:

$$Q_{\text{corrigido}} = \left(\frac{f}{KF}\right) \times MF. \quad (19)$$

3. Capacidade do sensor (cap): define o valor máximo de vazão que o sensor suporta. A estrutura de dados antes da calibração para a taxa de erro padrão (de $\pm 3\%$ a $\pm 5\%$ ¹¹) do sensor FS400A é apresentada a seguir:

- FlowSensorProperties FS400A = {60.0f, 4.8f, {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}};

Em virtude da impossibilidade de utilizar uma bancada certificada como a apresentada em norma, realizou-se uma adaptação do modelo 1C, utilizando-se materiais de fácil acesso

¹⁰ Para mais detalhes consulte: FlowMeter Library. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

¹¹ Disponível em: AliExpress. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

no mercado local e de custo relativamente viável, viabilizando a execução dos ensaios para calibração do sensor de vazão, índice da incerteza da medição e do índice de desempenho do medidor, apresentados em tópicos subsequentes.

A Figura 42 apresenta um esboço do diagrama esquemático (eletroeletrônico e hidráulico) da bancada adaptada utilizada para realização dos ensaios. Para uma melhor visualização do cenário, a Figura 43 ilustra a bancada em cenário real.

A bancada é composta por um reservatório de 100 l, uma válvula tipo borboleta de abertura manual (1) de corpo em policloreto de vinila (PVC), um pressurizador de água (2), uma válvula reguladora de pressão (3) – que acomoda o sensor de pressão eletrônico e o manômetro analógico –, um sensor de vazão (4), uma válvula tipo borboleta de abertura manual (5) de corpo em metal, uma válvula do tipo solenoide (6) normalmente aberta (NA) operando em 220V, e uma válvula de retenção de água. Toda a tubulação utilizada é de PVC 32 mm/25 DN, análoga à tubulação utilizada no cavalete de entrada de água do *campus*.

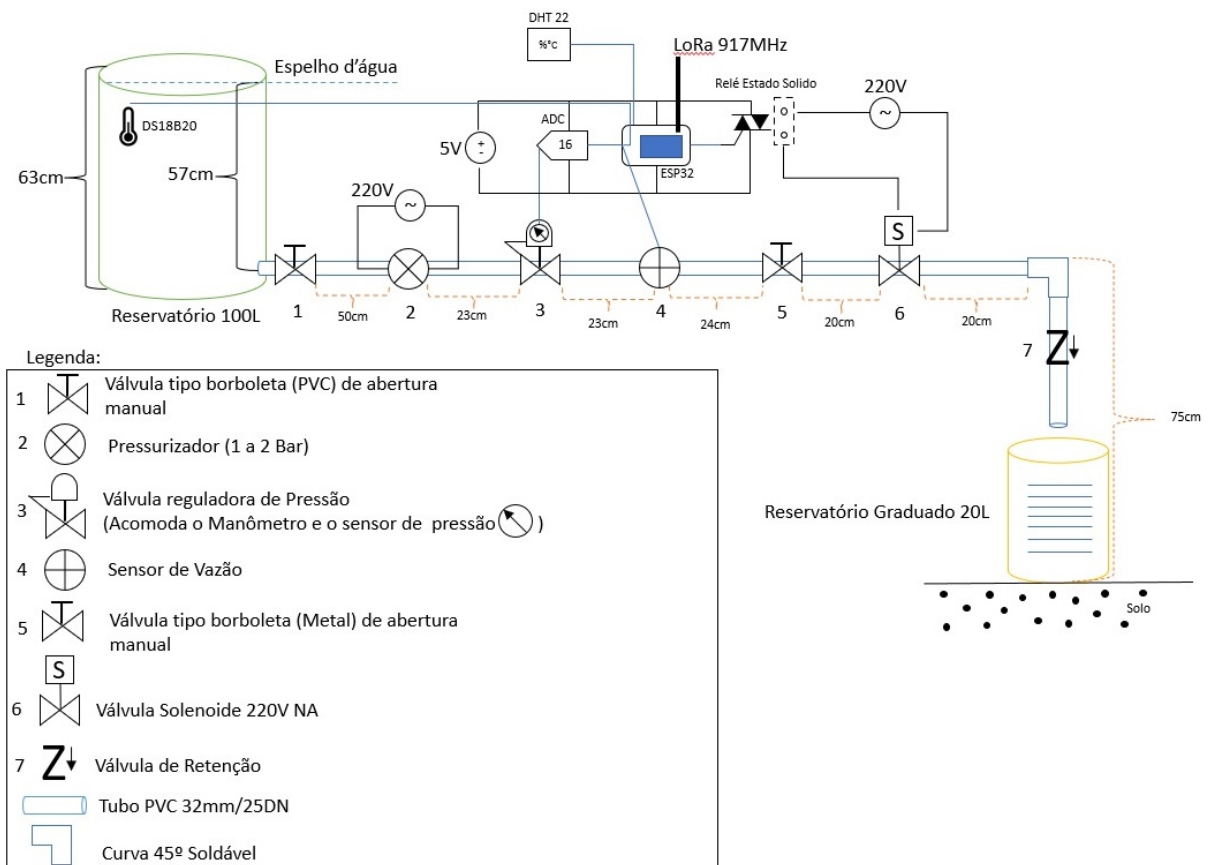


Figura 42 – Diagrama da bancada adaptada para calibração do sensor de vazão FS400A G1" (método estático, alimentado por pressurização direta). Fonte: Autoria Própria.



Figura 43 – Bancada adaptada ao método estático 1C da ABNT NBR ISO 4185:2009. Fonte: Autoria Própria.

O fluxograma com o processo de medição para calibração do sensor de vazão e outros indicadores é ilustrado na Figura 44.

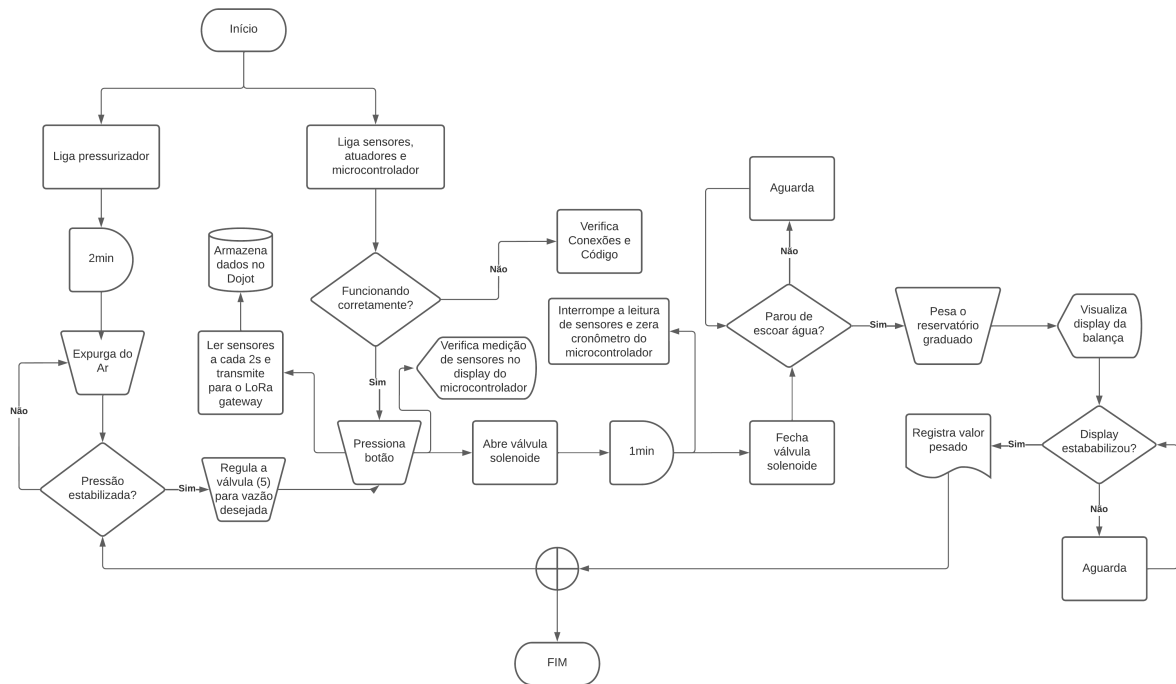


Figura 44 – Fluxograma do processo de medição. Fonte: Autoria Própria.

Inicialmente, liga-se os equipamentos (pressurizador, sensores, atuador e microcontrolador) e aguarda-se um período de dois minutos para estabilização do sistema. Após esse período, realiza-se a expurga do ar da tubulação, com todas as válvulas abertas e o parafuso central do pressurizador removido, para que o ar seja completamente drenado do sistema. Em seguida, verifica-se a estabilidade da pressão do sistema através do manômetro analógico acoplado à válvula reguladora de pressão e pelo gráfico da pressão visualizado no Dojot, bem como é verificado se o conjunto eletrônico (sensores, atuadores e microcontrolador) está funcionando a contento, assim como a comunicação com o Dojot.

As Figuras a seguir (de 45 a 47) demonstram o comportamento da curva característica da pressão estática do sistema para cada um dos níveis de ajuste do pressurizador. A curva na cor azul ilustra a pressão (em bar), a curva na cor laranja apresenta a média aritmética da amostra e as barras na vertical representam o desvio padrão da amostra. Os dados foram coletados a cada dois segundos, em um total de 50 amostras.

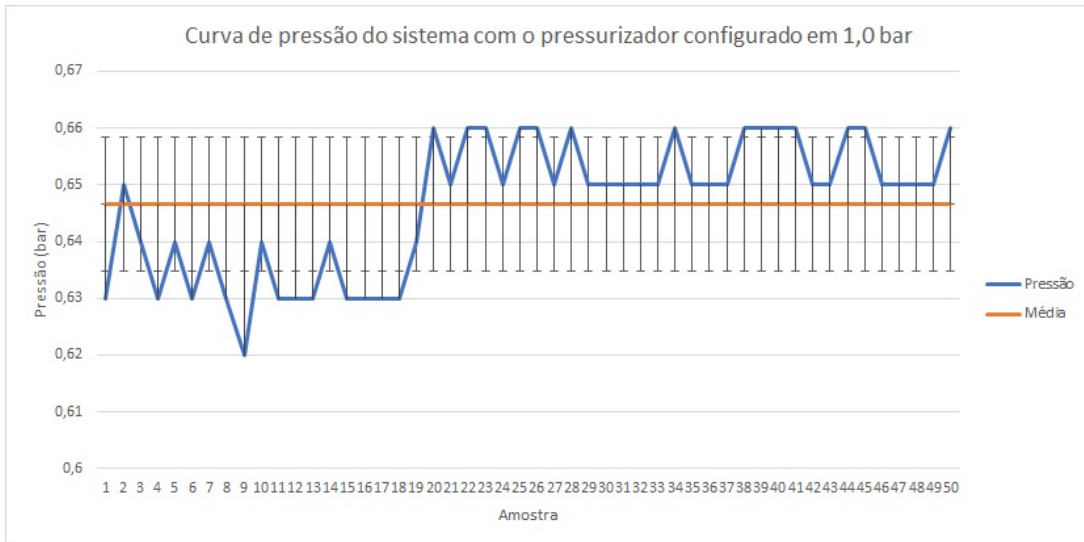


Figura 45 – Comportamento da pressão estática na bancada adaptada com pressurizador configurado em 1,0 bar. Fonte: Autoria Própria.



Figura 46 – Comportamento da pressão estática na bancada adaptada com pressurizador configurado em 1,5 bar. Fonte: Autoria Própria.

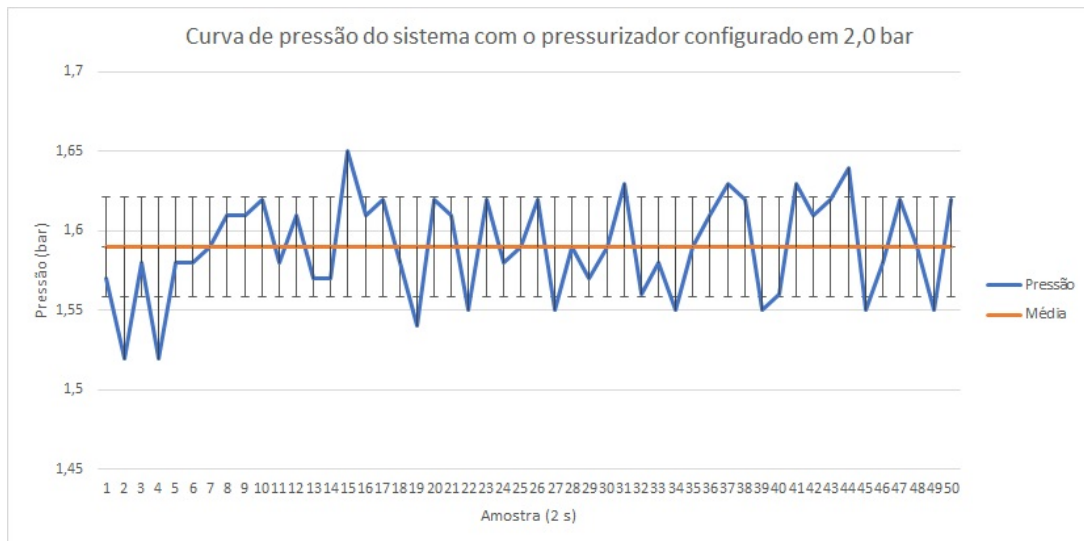


Figura 47 – Comportamento da pressão estática na bancada adaptada com pressurizador configurado em 2 bar. Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se que o nível 1 (1 bar) de ajuste do pressurizador apresenta maior regularidade na variação de pressão, com apenas 0,04 bar de diferença entre a menor (0,62 bar) e a maior pressão registrada (0,66 bar) pelo sensor de pressão eletrônico, com uma variação percentual de $\approx 6,00\%$, desvio padrão amostral de $\approx 0,012$ bar e a média de $\approx 0,64$ bar. Já o nível máximo (2 bar) de ajuste do pressurizador apresenta maior irregularidade na variação de pressão, com 0,13 bar de diferença entre a menor (1,52 bar) e a maior pressão registrada (1,65 bar) pelo sensor de pressão eletrônico, com uma variação percentual de $\approx 7,88\%$, desvio padrão amostral de $\approx 0,031$ bar e a média de $\approx 1,59$ bar.

Outro ponto a ser observado entre os gráficos das curvas de pressão é o tempo que o sistema leva para obter uma certa tendência de estabilização (amostra 20 ou 40 segundos) da pressão, embora não seja possível manter a pressão estável em um valor fixo 100 % do tempo com os equipamentos e acessórios utilizados na bancada. A Figura 48 ilustra o comparativo do comportamento das curvas de pressão estática do sistema, para os três níveis de ajuste do pressurizador, facilitando a percepção de variação de pressão entre elas.

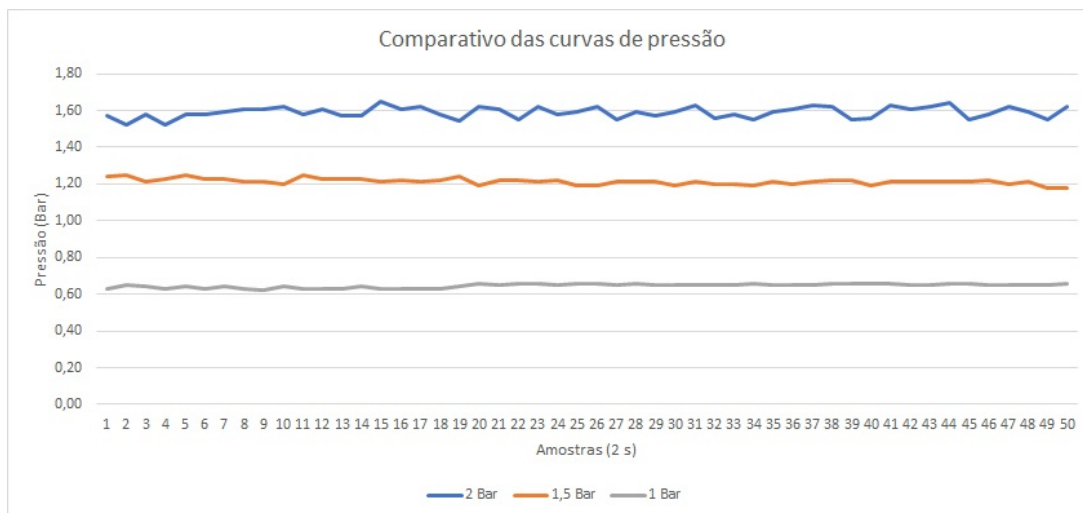


Figura 48 – Comportamento da pressão estática na bancada adaptada. Fonte: Autoria Própria.

Ademais, constatou-se que em nenhum momento o pressurizador atingiu seus valores nominais de pressão, o que pode ser compreendido pela ausência mínima de pressão de entrada (0,19 bar, conforme manual do fabricante) no pressurizador, um vez que, o reservatório principal (100 l) exerce apenas uma pressão de 0,055 bar na entrada do equipamento. A Figura 49 ilustra a pressão no manômetro analógico, para cada um dos níveis, o que demonstra que o sensor de pressão eletrônico está em conformidade com os dados apresentados.



Figura 49 – Imagens de medição da pressão estática no manômetro analógico. Fonte: Autoria Própria.

Com todo o sistema estabilizado e operante, regula-se a válvula tipo borboleta de abertura manual (Item 5 na Figura 43) e aciona-se o botão capacitivo do microcontrolador, para abertura da válvula solenoide e ajuste da vazão para o valor típico desejado, de acordo com a norma. Uma vez ajustada, aciona-se novamente o botão e inicia-se o processo de medição por um minuto, no qual a água é escoada para um reservatório graduado e os dados dos sensores enviados para o Dojot a cada dois segundos. Após esse período, a válvula solenoide é fechada, o cronômetro zerado e a leitura dos sensores suspensa. *A posteriori*, aguarda-se o escoamento cessar, para então levar o reservatório graduado para ser pesado, colocando-o no centro da balança e aguardando o

sistema estabilizar. Uma vez que o *display* da balança esteja estabilizado, o valor é registrado manualmente em uma tabela e a água do reservatório graduado é devolvida para o reservatório principal.

É importante ressaltar as limitações da bancada de ensaio, uma vez que não foi possível realizar a contento os ensaios para as faixas de vazão de 2,5 l/h a 100 l/h, em virtude do mau funcionamento da válvula solenoide em baixas vazões, pois ela não consegue cessar o fluxo de água de forma instantânea, como também não foi possível ajustar exatamente o fluxo de água (vazão) para as vazões sob ensaio devido ao tipo de válvula utilizada para este fim. No entanto, os resultados obtidos foram bem próximos dos valores estabelecidos em norma, o que não invalida os resultados da avaliação.

Outra limitação do ensaio foi a impossibilidade de avaliar o erro de indicação, como também efetuar a calibração do sensor para as faixas de vazões típicas (Q3) constatadas no ensaio de caracterização do perfil de consumo do *campus* – reportado na Seção 4.4 – em virtude da incapacidade do pressurizador utilizado gerar vazões superiores a 31 l/min, como também não foi possível verificar o Q1¹² e o Q4¹³ pelos motivos já mencionados.

Vale salientar ainda que para o processo de verificação do erro de indicação da balança, foram utilizados dois pesos padrão classe F2 de 100 g e 200 g (ver Figura 50), em que foi constatado um erro sistemático de -5 g para essas faixas de medições. Embora não seja possível afirmar que o erro se estenda por toda a faixa de medição da balança (40 kg), adotou-se um fator de correção de +5 g para todas as medições, visando compensar o erro sistemático observado.

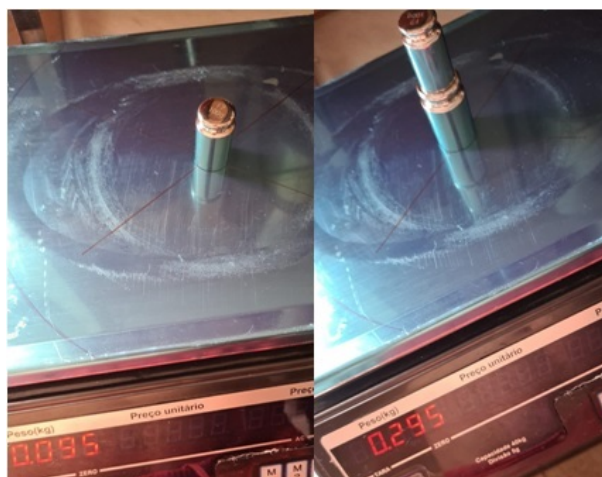


Figura 50 – Erro de indicação da balança. Fonte: Autoria Própria.

Assim, no processo de pesagem o registro final da massa da água foi descontado o peso do reservatório graduado (≈ 695 g + 5 g do erro sistemático da balança) e o peso do volume de água (massa) represado entre o sensor de vazão e a válvula de retenção de água (≈ 700 g), ou seja, o peso de tara (≈ 1400 g). Para facilitar o procedimento visual da pesagem, o volume

¹² menor faixa de vazão que o sensor opera dentro dos limites de erro de indicação estabelecido em norma.

¹³ maior faixa de vazão que o sensor opera dentro dos limites de erro de indicação estabelecido em norma.

represado foi adicionado ao reservatório graduado e pesado, configurado diretamente o valor de tara na balança, no qual subtrai o valor automaticamente.

Desse modo, foram realizadas 15 medições para cada ponto de calibração (de 250 l/h ou 4,167 l/min a 1350 l/h ou 22,083 l/min) seguindo o procedimento descrito anteriormente. A Figura 51 apresenta os resultados da curva de erro de indicação obtidos no processo de calibração do sensor FS400A.

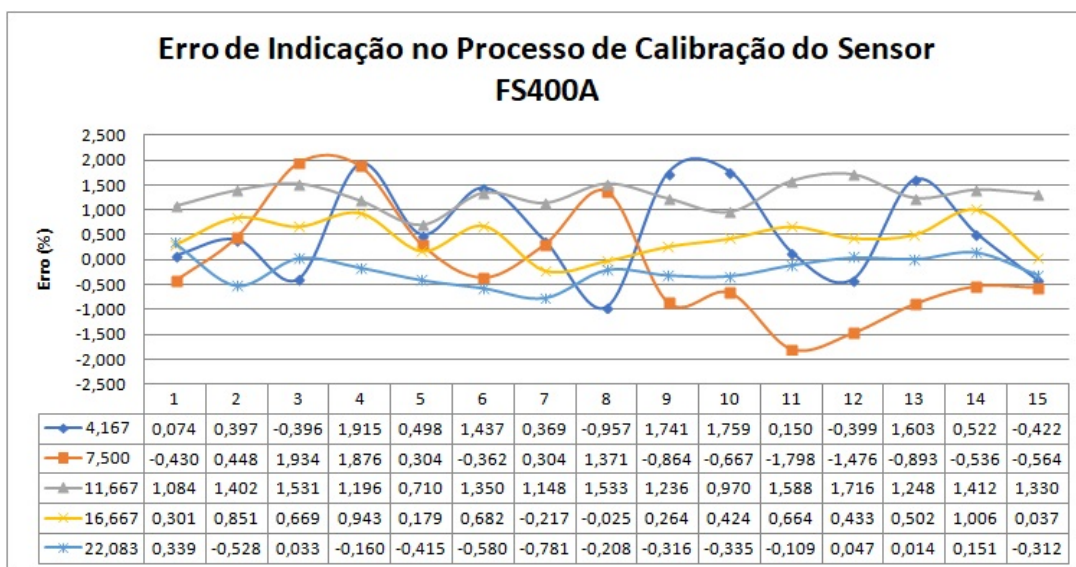


Figura 51 – Gráfico do erro de indicação obtido no processo de calibração. Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na Figura 51 que nas faixas de vazão abaixo de 11,667 l/min, o sensor FS400A apresenta um comportamento altamente não linear, passando a obter uma maior regularidade em vazões superiores, característica já reportada na documentação da biblioteca de calibração FlowMeter¹⁴.

Embora o sensor apresente essa característica de não linearidade em baixas vazões, todas as medições se mantiveram dentro da margem de erro permitida em norma, ou seja, em nenhuma das medições o erro de indicação foi superior a 2 %, sendo um ótimo resultado para um sensor de baixo custo. Outras variáveis estáticas como média da amostra e o desvio padrão são aparentadas na seção seguinte deste documento.

Vale destacar que durante o processo de calibração do sensor de fluxo FS400A diversos parâmetros complementares foram coletados de acordo como a norma, como a temperatura ambiente (th), temperatura da água (ta), umidade do ambiente (um) volume total escoado (vt), o volume instantâneo em litros por minuto (vi), o cálculo da média e do desvio-padrão de cada parâmetro, como o exemplo da Tabela 13 com os dados obtidos durante a calibração para faixa de vazão de 4,167 l/min. O Apêndice B traz as informações da média e do desvio-padrão das 15 medições para cada faixa de vazão ensaiada .

¹⁴ Para mais detalhes consulte: FlowMeter Library. Acesso em: 25 de jan. de 2023.

Tabela 13 – Exemplo dos demais parâmetros coletados durante a calibração do sensor de vazão.

Timestamp	bar	ta	th	tx	um	vi	vt
28/10/2022 13:13	1,06	28,31	31,38	1	51,39	0,041	0,077
28/10/2022 13:13	1,04	28,31	31,35	2	51,52	4,132	0,138
28/10/2022 13:13	1,05	28,31	31,37	3	51,59	4,134	0,276
28/10/2022 13:13	1,04	28,31	31,38	4	51,59	4,237	0,417
28/10/2022 13:13	1,05	28,31	31,38	5	51,59	4,237	0,559
28/10/2022 13:13	1,04	28,31	31,4	6	51,69	4,132	0,697
28/10/2022 13:13	1,04	28,25	31,42	7	51,69	4,233	0,838
28/10/2022 13:13	1,05	28,25	31,46	8	51,69	4,229	0,98
28/10/2022 13:13	1,05	28,31	31,49	9	51,69	4,235	1,121
28/10/2022 13:13	1,03	28,31	31,5	10	51,69	4,229	1,262
28/10/2022 13:13	1,05	28,31	31,49	12	51,59	4,229	1,545
28/10/2022 13:13	1,06	28,25	31,5	13	51,59	4,139	1,683
28/10/2022 13:13	1,05	28,31	31,5	14	51,59	4,242	1,825
28/10/2022 13:13	1,05	28,25	31,52	15	51,59	4,242	1,966
28/10/2022 13:13	1,05	28,25	31,54	16	51,59	4,233	2,107
28/10/2022 13:13	1,06	28,25	31,53	17	51,49	4,233	2,249
28/10/2022 13:14	1,05	28,31	31,54	18	51,49	4,132	2,387
28/10/2022 13:14	1,05	28,31	31,54	19	51,49	4,231	2,528
28/10/2022 13:14	1,07	28,31	31,56	20	51,49	4,242	2,669
28/10/2022 13:14	1,05	28,25	31,49	21	51,49	4,229	2,811
28/10/2022 13:14	1,06	28,25	31,49	22	51,49	4,139	2,949
28/10/2022 13:14	1,06	28,31	31,49	23	51,59	4,235	3,09
28/10/2022 13:14	1,06	28,31	31,47	24	51,59	4,242	3,232
28/10/2022 13:14	1,05	28,38	31,47	25	51,69	4,134	3,37
28/10/2022 13:14	1,06	28,31	31,47	26	51,69	4,237	3,511
28/10/2022 13:14	1,06	28,31	31,49	27	51,69	4,229	3,652
28/10/2022 13:14	1,06	28,25	31,5	28	51,69	4,136	3,79
28/10/2022 13:14	1,04	28,31	31,54	29	51,69	4,235	3,932
28/10/2022 13:14	1,05	28,31	31,59	30	51,59	4,235	4,073
Média	1,051	28,294	31,478	-	51,594	4,063	-
Desvio Padrão	0,009	0,033	0,062	-	0,085	0,775	-

Fonte: Autoria própria.

Quanto aos fatores de correção de calibração (Fator M) da biblioteca FlowMeter, os resultados são expostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Fatores de correção (M) da calibração utilizados.

Índice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vazão (l/min)	0-6	6-12	12-18	18-24	24-30	30-36	36-42	42-48	48-54	54-60
Fator M	0.9695	1.0255	1.0350	1.0250	1	1	1	1	1	1

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o Índice 2 atua sobre duas faixas de vazão sob ensaio (7,500 l/min e 11,667 l/min), logo, optou-se por tentar calibrar com menor erro de indicação a faixa de vazão de 7,5 l/min, uma vez que o sensor tem maior dificuldade em aferir faixas menores de vazão.

Com os resultados apresentados até aqui, pode-se responder a questão de pesquisa “**QP05 - É possível calibrar um sensor de vazão com resultados satisfatórios, dentro da margem de erro de indicação estabelecido em norma, com uma bancada de calibração não certificada?**” Embora não tenha sido possível realizar o ensaio de calibração para todas as faixas de vazão com a bancada de calibração desenvolvida, infere-se que é possível a calibração de um sensor de vazão com uma bancada de calibração não certificada, desde que a bancada de

calibração não certificada consiga prover mecanismos de ajuste de pressão e vazão com um fluxo de água relativamente estável.

4.6 Índice de Desempenho da Medição - IDM, e Incerteza da Mediação

O IDM é o método de estimação da submedição em hidrômetros apresentado na ABNT NBR 15.538 – Medidores de água potável – ensaios para avaliação de eficiência, no qual realiza-se o levantamento da curva de erros para vazões médias correspondentes às faixas do perfil de consumo apresentado na Tabela 10. Já a incerteza da Mediação é um parâmetro que indica a qualidade de uma medida de uma forma quantitativa, ou seja, “a incerteza caracteriza a faixa de valores dentro da qual se espera que a vazão ou a grandeza medida se situe, com um nível de confiança especificada” (ABNT ISO 5168:2015).

Neste sentido, apresenta-se a seguir os resultados obtidos do IDM e da incerteza da medição para os respectivos ensaios de curva de erro das vazões estabelecidas em norma. O modelo matemático utilizado para o cálculo da vazão no sensor FS400A é baseado no princípio de funcionamento de sensores de efeito *hall*, em que a cada revolução da aleta é gerada um onda quadrada (pulso), e a vazão é computada como a Equação 20:

$$Q = \sum \left(\frac{f}{KF} \right) \times MF, \quad (20)$$

em que Q é a vazão, expressa em litros por minuto (l/min); f é a frequência de rotação da aleta (pulsos por unidade de volume), dado em Hz; KF é o fator de conversão, ou seja, se em 1 segundo a aleta do sensor gerar 4,8 pulsos, significa que será contabilizado 1 l/min, com um volume total contabilizado de 1 l; MF é o fator de correção do fator KF .

O erro de indicação do sensor em litros (l) é dado pela relação:

$$E_v = V_s - V_r, \quad (21)$$

em que E_v é o erro de indicação do sensor em litros (l); V_s é o volume contabilizado pelo sensor em litros (l); V_r é o peso da massa volumétrica real, ou seja, o peso da massa volumétrica menos o peso de tara P_T do sistema, que inclui o peso do reservatório graduado P_r somado ao peso da massa volumétrica represado na tubulação P_a .

O erro de indicação percentual é calculado como:

$$Erro(\%) = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100. \quad (22)$$

As Tabelas 15 a 19 exibem os dados dos resultados obtidos nos ensaios para vazões de 250 l/h a 1350 l/h, nos quais são apresentados o erro de indicação (%) da medição, a média aritmética (\bar{X}) da amostra, o desvio padrão da amostra (S), a variância (S²), a incerteza padrão

(u_x) e a incerteza expandida da medição (U_x) para 15 observações e 14 graus de liberdade (ν), fator de abrangência $k = 2,2$, e nível de confiança de 95,45 %, de acordo com a Tabela C.1 da ABNT NBR ISO 5168:2015. A avaliação da incerteza da mediação Tipo B foge do escopo deste trabalho, sendo recomendada em trabalhos futuros para uma análise ainda mais precisa.

Para o ensaio de erro de indicação de 250 l/h (Tabela 15) os dados obtidos durante o processo de calibração do sensor apontam para um erro de indicação médio entre o valor computado pelo sensor (V_s) e o valor obtido pelo método gravimétrico de $\pm 0,553\%$, com um desvio-padrão da média do erro de indicação de 0,930 %, o que demonstra uma certa imprecisão do sensor para essa faixa de vazão, embora o erro de indicação médio possa ser considerado baixo.

Quanto à medição, a vazão média obtida pelo sensor foi de $V_s = (4,055 \pm 0,021)$ l. Já para volume total "real" obtido pelo método gravimétrico $V_r = (4,032 \pm 0,015)$ l, ou seja, a probabilidade do valor real do mensurando encontra-se entre [4,017 l a 4,047 l] para um grau de confiança de 95,45 % para essa faixa de vazão.

Tabela 15 – Resultado ensaio curva de erro para vazão de 250 l/h ou 4,167 l/min.

Medição	V_s (l)	Balança (kg)	V_r (l)	E_v (l)	Erro (%)
1	4,073	5,470	4,070	0,003	0,074
2	4,046	5,430	4,030	0,016	0,397
3	4,029	5,445	4,045	-0,016	-0,396
4	4,097	5,42	4,02	0,077	1,915
5	4,040	5,420	4,020	0,020	0,498
6	4,093	5,435	4,035	0,058	1,437
7	4,080	5,465	4,065	0,015	0,369
8	4,036	5,475	4,075	-0,039	-0,957
9	4,090	5,420	4,020	0,070	1,741
10	4,050	5,380	3,980	0,070	1,759
11	4,006	5,400	4,000	0,006	0,150
12	3,999	5,415	4,015	-0,016	-0,399
13	4,120	5,455	4,055	0,065	1,603
14	4,046	5,425	4,025	0,021	0,522
15	4,013	5,430	4,030	-0,017	-0,422
\bar{X}	4,055	5,432	4,032	0,022	0,553
S^2	0,001	0,001	0,001	0,001	0,864
$S(\bar{X})$	0,036	0,026	0,026	0,037	0,930
$u_{\bar{X}}$	0,009	0,007	0,007	0,010	0,240
$U_{\bar{X}}$	0,021	0,015	0,015	0,021	0,528

Fonte: Autoria própria.

De forma análoga, a mesma análise pode ser aplicada às demais tabelas de ensaios de curva de erro de indicação. Observa-se portanto que a faixa de vazão na qual o sensor apresentou uma maior precisão durante o processo de calibração foi a faixa de 700 l/h ou 11,667 l/min, com uma dispersão (desvio-padrão) do erro de indicação de 0,258 %, embora tenha apresentado um erro de indicação médio de $\pm 1,297$ %. Já a faixa de vazão com maior imprecisão foi a de 450 l/h ou 7,5 l/min, com um desvio-padrão do erro de indicação de 1,125 %, embora tenha apresentado um baixo erro de indicação médio de $\pm 0,090$ %.

Tabela 16 – Resultado ensaio curva de erro de indicação para vazão de 450 l/h ou 7,5 l/min.

Medição	V_s (l/min)	Balança (kg)	V_r (l)	E_v (l)	Erro (%)
1	6,950	8,380	6,980	-0,030	-0,430
2	6,956	8,325	6,925	0,031	0,448
3	7,064	8,330	6,930	0,134	1,934
4	7,060	8,330	6,930	0,130	1,876
5	6,921	8,300	6,900	0,021	0,304
6	6,880	8,305	6,905	-0,025	-0,362
7	7,247	8,625	7,225	0,022	0,304
8	7,025	8,330	6,930	0,095	1,371
9	6,885	8,345	6,945	-0,060	-0,864
10	6,849	8,295	6,895	-0,046	-0,667
11	6,771	8,295	6,895	-0,124	-1,798
12	6,808	8,310	6,910	-0,102	-1,476
13	6,769	8,230	6,830	-0,061	-0,893
14	6,863	8,300	6,900	-0,037	-0,536
15	6,871	8,310	6,910	-0,039	-0,564
\bar{X}	6,928	8,334	6,934	-0,006	-0,090
S^2	0,016	0,008	0,008	0,006	1,266
$S(\bar{X})$	0,128	0,087	0,087	0,078	1,125
$u_{\bar{X}}$	0,033	0,022	0,022	0,020	0,291
$U_{\bar{X}}$	0,073	0,049	0,049	0,044	0,639

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 – Resultado ensaio curva de erro de indicação para vazão de 700 l/h ou 11,667 l/min.

Medição	V_s (l/min)	Balança (kg)	V_r (l)	E_v (l)	Erro (%)
1	11,281	12,560	11,160	0,121	1,084
2	11,210	12,455	11,055	0,155	1,402
3	11,209	12,440	11,040	0,169	1,531
4	11,253	12,520	11,120	0,133	1,196
5	11,199	12,520	11,120	0,079	0,710
6	11,260	12,510	11,110	0,150	1,350
7	11,278	12,550	11,150	0,128	1,148
8	11,260	12,490	11,090	0,170	1,533
9	11,217	12,480	11,080	0,137	1,236
10	11,142	12,435	11,035	0,107	0,970
11	11,256	12,480	11,080	0,176	1,588
12	11,260	12,470	11,070	0,190	1,716
13	11,274	12,535	11,135	0,139	1,248
14	11,206	12,450	11,050	0,156	1,412
15	11,202	12,455	11,055	0,147	1,330
\bar{X}	11,234	12,490	11,090	0,144	1,297
S^2	0,002	0,002	0,002	0,001	0,067
$S(\bar{X})$	0,039	0,040	0,040	0,028	0,258
$u_{\bar{X}}$	0,010	0,010	0,010	0,007	0,067
$U_{\bar{X}}$	0,022	0,023	0,023	0,016	0,147

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Resultado ensaio curva de erro de indicação para vazão de 1000 l/h ou 16,667 l/min.

Medição	V_s (l/min)	Balança (kg)	V_r (l)	E_v (l)	Erro (%)
1	16,334	17,685	16,285	0,049	0,301
2	16,348	17,610	16,210	0,138	0,851
3	16,258	17,550	16,150	0,108	0,669
4	16,373	17,620	16,220	0,153	0,943
5	16,269	17,640	16,240	0,029	0,179
6	16,230	17,520	16,120	0,110	0,682
7	16,090	17,525	16,125	-0,035	-0,217
8	16,291	17,695	16,295	-0,004	-0,025
9	16,313	17,670	16,270	0,043	0,264
10	16,324	17,655	16,255	0,069	0,424
11	16,212	17,505	16,105	0,107	0,664
12	16,245	17,575	16,175	0,070	0,433
13	16,201	17,520	16,120	0,081	0,502
14	16,262	17,500	16,100	0,162	1,006
15	16,136	17,530	16,130	0,006	0,037
\bar{X}	16,259	17,587	16,187	0,072	0,448
S^2	0,006	0,005	0,005	0,003	0,131
$S(\bar{X})$	0,078	0,070	0,070	0,058	0,362
$u_{\bar{X}}$	0,020	0,018	0,018	0,015	0,094
$U_{\bar{X}}$	0,044	0,040	0,040	0,033	0,206

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 – Resultado ensaio curva de erro de indicação para vazão de 1325 l/h ou 22,083 l/min.

Medição	V_s (l/min)	Balança (kg)	V_r (L)	E_v (L)	Erro (%)
1	21,148	23,130	21,220	0,072	0,339
2	21,322	23,120	21,210	-0,112	-0,528
3	21,208	23,125	21,215	0,007	0,033
4	21,219	23,095	21,185	-0,034	-0,160
5	21,268	23,090	21,180	-0,088	-0,415
6	21,343	23,130	21,220	-0,123	-0,580
7	21,411	23,155	21,245	-0,166	-0,781
8	21,194	23,060	21,150	-0,044	-0,208
9	21,237	23,080	21,170	-0,067	-0,316
10	21,276	23,115	21,205	-0,071	-0,335
11	21,133	23,020	21,110	-0,023	-0,109
12	21,105	23,025	21,115	0,010	0,047
13	21,272	23,185	21,275	0,003	0,014
14	21,108	23,050	21,140	0,032	0,151
15	21,186	23,030	21,120	-0,066	-0,312
\bar{X}	21,229	23,094	21,184	-0,045	-0,211
S^2	0,008	0,002	0,002	0,004	0,090
$S(\bar{X})$	0,089	0,050	0,050	0,064	0,301
$u_{\bar{X}}$	0,023	0,013	0,013	0,016	0,078
$U_{\bar{X}}$	0,050	0,028	0,028	0,036	0,171

Fonte: Autoria própria.

A Figura 52 traz um quadro resumo com os principais indicadores das medições (média, desvio padrão, incerteza expandida da medição e erro de indicação), para uma melhor visualização dos resultados, com destaque em negrito para os "piores" valores obtidos nos ensaios de calibração do sensor FS400A.

Medição do Sensor (Vs).					Medição Gravimétrica (Vr).					Erro de Indicação (Erro (%))		
Vazão (l/min)	\bar{X}	S(\bar{X})	$U_{\bar{x}}$	Intervalo Real (I)	Vazão (l/min)	\bar{X}	S(\bar{X})	$U_{\bar{x}}$	Intervalo Real (I)	Vazão (l/min)	Erro (%)	S(\bar{X})
4,167	4,055	0,036	0,021	[4,034 a 4,076]	4,167	4,032	0,026	0,015	[4,017 a 4,047]	4,167	± 0,553	0,930
7,500	6,928	0,128	0,073	[6,855 a 7,001]	7,500	6,934	0,087	0,049	[6,885 a 6,983]	7,500	± 0,090	1,125
11,667	11,234	0,039	0,022	[11,212 a 11,256]	11,667	11,090	0,040	0,023	[11,067 a 11,113]	11,667	± 1,297	0,258
16,667	16,259	0,078	0,044	[16,215 a 16,303]	16,667	16,187	0,070	0,040	[16,147 a 16,227]	16,667	± 0,448	0,362
22,083	21,229	0,089	0,050	[21,179 a 21,279]	22,083	21,184	0,050	0,028	[21,156 a 21,212]	22,083	± 0,211	0,301

Figura 52 – Resumo das medições. Fonte: Autoria Própria.

Destaca-se que aplicou-se o teste de Grubbs¹⁵ para o nível de confiança de 95 % e 15 observações sobre o erro de indicação, no qual não foi identificado nenhum valor aberrante (>2,51).

É possível verificar na Tabela 20 os dados referente ao IDM para as três primeiras medições (para tabela completa dos cálculos consulte o Apêndice A). O IDM calculado após a média aritmética do ensaio das 15 medições atingiu um índice de 97,83 % de eficiência, ou seja, apenas -2,17 % (EP) do volume escoado pelo sensor FS400A não será contabilizado (submedição), demonstrando que a princípio esse tipo de sensor pode ser utilizado se devidamente calibrado e bem acomodado, embora seja necessária uma avaliação minuciosa do IDM ao longo de 10 anos, com uma amostra maior de sensores, conforme preconiza a norma, para averiguar por quanto tempo o sensor funciona dentro dos limites.

¹⁵ O teste de Grubbs compara a distância entre o valor aberrante e a média com o desvio-padrão do conjunto total de dados, de acordo com a equação: $Z_n = \frac{|X_m - \bar{X}|}{S}$. Fonte: ABNT NBR ISO 5168:2015.

Tabela 20 – Exemplo do cálculo do IDM para as três primeiras medições.

Ordem	Vazão (l/min)	Verificação de erros (l/min)	Erro Médio (%)	Peso (%)	EP (%)	IDM (%)
1	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,38	97,62
	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	2,5 a 5,83	4,167	0,07	23,92		
	5,83 a 9,16	7,500	-0,43	12,27		
	9,16 a 14,16	11,667	1,08	7,29		
	14,16 a 19,16	16,667	0,30	5,86		
19,16 a 25	22,083	0,34	1,73			
2	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,19	97,81
	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	2,5 a 5,83	4,167	0,40	23,92		
	5,83 a 9,16	7,500	0,45	12,27		
	9,16 a 14,16	11,667	1,40	7,29		
	14,16 a 19,16	16,667	0,30	5,86		
19,16 a 25	22,083	-0,53	1,73			
3	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,14	97,86
	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	2,5 a 5,83	4,167	-0,40	23,92		
	5,83 a 9,16	7,500	2,01	12,27		
	9,16 a 14,16	11,667	1,53	7,29		
	14,16 a 19,16	16,667	0,67	5,86		
19,16 a 25	22,083	0,03	1,73			

Destaca-se que em virtude da impossibilidade de se verificar as vazões de 0,042 l/min a 1,667 l/min, aplicou-se o maior percentual de erro estabelecido em norma (-5,0 %) para essas faixas de vazões (pior caso), embora o sensor não tenha extrapolado os 2 % em nenhuma medição, podendo apresentar níveis reais ainda melhores ou, a depender da faixa de vazão, exceder os limites estabelecidos em norma, o que só pode ser confirmado executando-se o ensaio de calibração para todas as faixas de vazão.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a construção e obtenção de resultados a partir de um protótipo de sistema de monitoramento e "medição inteligentes de água" implantado no ponto de entrada de água do *campus* Campina Grande do IFPB, como um projeto piloto e uma iniciativa para tornar o *campus* um *campus* inteligente (*Smart Campus*), como também, abordou alguns trabalhos correlatos ao tema apresentado e tópicos da fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do artefato desenvolvido.

O protótipo se destaca pelo uso da tecnologia LoRa® e do *middleware* Dojot, em vez de soluções na nuvem, no qual a comunicação é bidirecional através do LoRa® *gateway* Dragino LG02, além de utilizar adaptações a metodologias metrológicas estabelecidas em normas brasileiras vigentes, para calibração do sensor de vazão do "medidor inteligente de água", o cálculo do índice de desempenho do medidor e o cálculo da incerteza da medição (Tipo A).

O *middleware* Dojot demonstra ser uma ferramenta promissora para o gerenciamento de ecossistemas IoT, reduzindo a complexidade de desenvolvimento de "aplicações inteligentes", como também, facilita a prototipação do produtos mínimo viável (*Minimum Viable Product* - MVP). Além disso, demonstra ser uma plataforma robusta para produção em um "*campus* inteligente", embora apresente algumas limitações já reportadas neste documento, o que já é esperado para um plataforma considerada em fase beta.

A comunicação LoRa® entre hidrômetro inteligente e o Dragino LG02, apresentou um ótimo índice de desempenho (99,65%) em relação a taxa de perda de pacotes, mesmo com as configurações padrões (exceto pela frequência de operação, que foi alterada para 917 mHz) e com o *gateway* posicionado sobre uma estação de trabalho dentro da Coordenação de Tecnologia da Informação (CTI), com uma potência de sinal (RSSI) média de -89,00 dBm, demonstrando que a tecnologia LoRa® é viável e bem robusta para o desenvolvimento de aplicações IoT em um *campus* inteligente.

O resultado de uma medição é uma estimativa do valor do mensurando e, desta forma, a apresentação do resultado só é completa quando acompanhada por uma quantidade que declara sua incerteza. Assim, foi apresentado para as faixas de vazão no qual realizou-se a calibração do sensor de vazão FS400A, a avaliação do Tipo A da incerteza da medição.

Embora o sensor de vazão de baixo custo FS400A utilizado no hidrômetro inteligente tenha apresentado resultados satisfatórios na fase de calibração, com uma taxa de erro médio menor que $\pm 2 \%$ em todas as faixas de vazão ensaiadas, na fase de caracterização do perfil de consumo, com o sensor já instalado no cavalete de entrada de água do *campus*, o mesmo apresentou um taxa de erro de aproximadamente -7% na contabilização do volume total (m^3) em relação ao hidrômetro SAGA da concessionária de água CAGEPA, no qual era esperado

uma margem de erro entre $\pm 3\%$ e $\pm 5\%$ (taxa de erro máximo, segundo o fabricante), já que não foi possível calibrar o sensor para faixa de vazão operacional, demonstrando assim, que a solução necessita de ajustes.

Ainda sobre o sensor FS400A, para as faixas de vazão ensaiadas, o mesmo apresentou um índice de desempenho da medição (IDM) de 97,83 % de eficiência, ou seja, apenas -2,17 % (EP) do volume escoado pelo sensor FS400A não será contabilizado (submedição), demonstrando que a princípio esse tipo de sensor pode ser utilizado se devidamente calibrado e bem acomodado, embora seja necessário uma avaliação minuciosa do IDM ao longo de 10 anos conforme preconiza a norma ABNT NBR 15538:2014.

Quanto a pressão no cavalete de entrada de água do campus, constatou-se que as pressões registradas operam dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira ABNT NBR 12218 (entre 10 mca e 50 mca), atuando a maior parte do tempo na casa dos 4,00 bar (40,78 mca), com alguns picos de pressão (máximo registrado de 4,73 bar ou 48,23 mca) próximo dos 5,00 bar, o que demonstra que o manômetro analógico utilizado deve ser substituído por um manômetro com um fundo de escalar de pelo menos 5,00 bar.

Embora o rigor metodológico das normas não tenham sido seguidos a risca, em virtude da falta de infraestrutura e recursos, tornando o controle de variáveis dos procedimentos de ensaio (como temperatura, umidade, vazão e pressão do sistema) impossíveis de serem obtidos com a precisão estabelecida em norma, além da ausência de equipamentos já calibrados e certificados para efeito comparativo — apesar de o objetivo não ser a certificação de sensores — demonstrou-se mediante o exposto, que a adaptação ao modelo de bancada apresentado pode ser viável para calibração de sensores de vazão.

Considerando-se que o artefato atingiu os resultados esperados após a etapa de avaliação, podemos destacar como aprendizagem durante o desenvolvimento do protótipo, que a implementação de uma solução IoT é complexa e envolve diversas áreas de conhecimento, como eletrônica, programação, redes de computadores, sistemas, etc, e que em cada uma dessas áreas enfreou-se dificuldades e limitações, como por exemplo, na bancada de calibração do sensor de vazão, que não foi possível realizar os ensaios em alguns faixas de vazão estabelecidas em norma.

Ante o exposto, constata-se que a telemetria em tempo real (monitoramento) e o controle remoto do abastecimento de água de um *campus* são possíveis utilizando tecnologias IoT de baixo custo, através da tecnologia de comunicação sem fio LoRa®, ou seja, o ecossistema utilizado neste projeto piloto pode ser replicado com uma solução para aplicações IoT em um *Smart Campus*, uma vez que, ainda não existe um padrão de fato na literatura ou solução comercial.

5.1 Trabalhos Futuros

Embora os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho tenham apresentado resultados satisfatórios, sempre há o que melhorar e ajustar para se obter resultados ainda mais precisos.

Nesse sentido, como recomendações de trabalhos futuros, podemos elencar uma série de melhorias que podem ser realizadas, tanto em termos de *hardware* como de *software*, como também, em procedimentos metodológicos de ensaios e equipamentos a serem utilizados.

Inicialmente, recomenda-se a adoção de um sistema de placas solares e/ou de geradores do tipo turbina para uma autonomia energética do sistema, garantindo assim, que os dados serão preservados com a ausência de energia da rede elétrica, além de adaptar-se a uma tendência futura de ecossistema *Smart* imprescindível para um *campus* inteligente autossustentado.

Em termos de *hardware*, sugere-se a utilização de sensores de vazão do tipo ultrassônico, que são mais precisos, não invasivos (não há necessidade de romper tubulações), apresentam maior vida útil com uma maior precisão e baixa perda de carga, como também, recomenda-se a substituição do manômetro analógico por um manômetro com fundo de escala $\geq 5,0$ bar.

Já no quesito *software*, recomenda-se a utilização de um sistema operacional de tempo real (do inglês: *Real Time Operating Systems* - RTOS) como o FreeRTOS para o dispositivo embarcado, garantindo assim, uma maior precisão nos contadores de tempo e isolamento de tarefas.

Quanto a bancada proposta para calibração do sensor de vazão, sugere-se adaptações para um melhor desempenho na calibração do sensor, com a introdução de uma válvula estabilizadora de vazão e uma válvula reguladora de vazão, conforme preconiza a norma ABNT NBR 4185:2009, como também, recomenda-se a substituição do pressurizador de pressão por um dispositivo de maior capacidade de pressão, para que seja possível atingir vazões maiores, assim como, recomenda-se a substituição da válvula solenoide, uma vez que, a válvula utilizada apresentou falhas de funcionamento em baixas vazões, inviabilizando o ensaio em faixas de vazões menores.

Por fim, recomenda-se uma avaliação estatística da incerteza da medição Tipo B, para que seja possível realizar o cálculo da incerteza-padrão combinada ($u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$), em que u_A é incerteza do Tipo A e u_B são as incerteza do Tipo B, tornando assim, uma avaliação ainda mais precisa da incerteza da medição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CPQD. Citado na página 39.

ADAMS, M. N.; JOKONYA, O. An investigation of smart water meter adoption factors at universities. *Procedia Computer Science*, v. 196, p. 324–331, 2022. ISSN 1877-0509. International Conference on ENTERprise Information Systems / ProjMAN - International Conference on Project MANAgement / HCist - International Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921022432>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.

AESB. *Guia Prático de Procedimentos para Estimativa de Submedição no Parque de Hidrômetros*. 1ª. ed. Brasília: Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento - AESB, 2015. Disponível em: <http://www.aesbe.org.br/wp-content/uploads/2018/04/GUIA-3_V5-.pdf>. Acesso em: 22 de abr. de 2021. Citado na página 22.

AGRICULTURE, C. A. of Water Management in. *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. London: Earthscan, and Colombo: International Water Management Institute, 2007. Disponível em: <https://www.iwmi.cgiar.org/assessment/files_new/synthesis/Summary_SynthesisBook.pdf>. Acesso em: 15 de abr. de 2021. Citado na página 20.

ALLIANCE. *RP002-1.0.0 LoRaWAN Regional Parameters*. LoRa Alliance, 2019. Disponível em: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2019/11/rp_2-1.0.0_final_release.pdf>. Acesso em: 26 de maio de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 32.

ALLIANCE, L. *LoRaWAN, What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™*. Fremont, CA: LoRa Alliance®, 2020. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>>. Acesso em: 22 de maio. de 2021. Citado na página 65.

ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual*. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, 2020. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.23309814.pdf>>. Acesso em: 11 de mar. de 2021. Citado na página 18.

ANATEL. *ATO N° 14448, DE 04 DE DEZEMBRO DE 2017*. AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, 2017. Disponível em: <https://sei.anatel.gov.br/sei/publicacoes/controlador_publicacoes.php?acao=publicacao_visualizar&id_documento=2549681&id_orgao_publicacao=0>. Acesso em: 26 de mar. de 2021. Citado na página 32.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15538: Medidores de água potável — ensaios para avaliação de eficiência*. Rio de Janeiro, 2014. 24 p. Citado 5 vezes nas páginas 55, 56, 57, 58 e 59.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 1568: Medição de vazão de fluidos - procedimento para avaliação de incertezas*. Rio de Janeiro, 2015. 83 p. Citado 3 vezes nas páginas 60, 61 e 62.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16043-2*: Medidores para água potável fria e água quente parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021. 125 p. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16043-4*: Medidores para água potável fria e água quente parte 4: Requisitos de instalação. Rio de Janeiro, 2021. 12 p. Citado na página 62.

AWS. *O que é o Redis?* Amazon Web Services, Inc., 2021. Disponível em: <<https://aws.amazon.com/pt/elasticache/what-is-redis/>>. Acesso em: 28 de maio de 2021. Citado na página 40.

BANKS, A. et al. *MQTT Version 5.0*. OASIS Standard, 2019. Disponível em: <<https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>>. Acesso em: 27 de maio de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

BENAYACHE, A. et al. Msm: A microservice middleware for smart wsn-based iot application. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 144, p. 138–154, 2019. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804519302206>>. Citado na página 37.

BERTOLETI, P. *Projetos com ESP32 e LoRa*. 1. edição do kindle. ed. São Paulo: Editora NCB, 2019. Citado na página 41.

BIOCAM. *Empresas de Campinas São Referências na Criação De Soluções de Internet das Coisas para a Área de Saúde*. BIOCAM Soluções Hospitalares, 2018. Disponível em: <<https://www.biocam.com.br/empresas-de-campinas-sao-referencias-na-criacao-de-solucoes-de-internet-das-coisas-para-a-area-de-saude>>. Acesso em: 29 de maio de 2021. Citado na página 72.

BRANDÃO, I. A. D. P. e. a. *Sistema inteligente para automação do consumo de água dos pontos de utilização no campus da UFCG de campina grande-pb*. [S.l.], 2019. Acesso em: 21-06-2021. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 45.

BRASIL. *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos*. Brasília: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/DiagnC3B3stico_SNIS_AE_2019_Republicacao_31032021.pdf>. Acesso em: 22 de abr. de 2021. Citado na página 21.

BRASIL. *Portaria nº 490, de 22 de março de 2021*. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional. Gabinete do Ministro, 2021. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-490-de-22-de-marco-de-2021-309988760>>. Acesso em: 22 de abr. de 2021. Citado na página 22.

BRASIL. *Portaria nº 155, de 31 de MARÇO de 2022*. Brasília: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços – MDIC. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO, 2022. Disponível em: <<http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC002971.pdf>>. Acesso em: 18 de jan. de 2021. Citado na página 22.

CPQD. *CPQD lança dojot, plataforma aberta para o desenvolvimento de aplicações de IoT*. CPQD, 2017. Disponível em: <<https://www.cpqd.com.br/releases/cpqd-lanca-dojot-plataforma-aberta-para-o-desenvolvimento-de-aplicacoes-de-iot/>>. Acesso em: 29 de maio de 2021. Citado na página 72.

DERIVA. *deriva no Dicionário infopédia da Língua Portuguesa*. In: Infopédia, Dicionários Porto Editora, 2021. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/ecologia/estresse-hidrico/>>. Acesso em: 23 de mar. de 2021. Citado na página 30.

DOJOT. *Você conhece a dojot?* DOJOT, 2017. Disponível em: <<https://dojot.com.br/sobre-a-dojot-iot/>>. Acesso em: 28 de maio de 2021. Citado na página 37.

DOJOT. *Documentação da dojot*. DOJOT, CPqD, 2020. Disponível em: <https://dojotdocs.readthedocs.io/pt_BR/latest/>. Acesso em: 28 de maio de 2021. Citado 5 vezes nas páginas 7, 38, 39, 40 e 54.

DRAGINO. *LG02 Dual Channels LoRa IoT Gateway*. Dragino Technology Co., LTD., 2020. Disponível em: <<https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/135-lg02.html>>. Acesso em: 22 de maio. de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 71.

DRESCH, A. *Design Science e Design Science Research como Artefatos Metodológicos para Engenharia de Produção*. 184 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES, J. A. V. J. *Design Science Research: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia*. Edição do kindle. Porto Alegre: Bookman, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 48, 49, 50, 51 e 52.

EC. *Smart cities*. European Commission, 2021. Disponível em: <https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en>. Acesso em: 11 de mar. de 2021. Citado na página 18.

EOS. *Impactos das Perdas de Água Comerciais no Faturamento das Empresas de Saneamento*. EOS Organização e Sistemas Ltda, 2019. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/impacto-das-perdas-de-agua-comerciais/>>. Acesso em: 19 de abr. de 2021. Citado na página 21.

FACENS. *Guia FACENS para Cidades Inteligentes, Sustentáveis e Seguras*. Sorocaba, São Paulo: FACENS, 2020. Disponível em: <<https://blog.facens.br/wp-content/uploads/2020/09/Cartilha-Cidades-Inteligentes-Smart-Campus.pdf>>. Acesso em: 13 de mar. de 2021. Citado na página 18.

HAOYU. *G1"Water Flow Sensor*. HAOYU STAR Electronics, 2021. Disponível em: <<https://www.hotmcu.com/g1-water-flow-sensor-p-312.html>>. Acesso em: 08 de jun. de 2021. Citado 3 vezes nas páginas 7, 56 e 57.

HAT, R. *O que é Apache Kafka?* Red Hat, Inc., 2021. Disponível em: <<https://www.redhat.com/pt-br/topics/integration/what-is-apache-kafka>>. Acesso em: 28 de maio de 2021. Citado na página 39.

HELTEC. *WiFi LoRa 32(V2)*. Chengdu Heltec Automation Technology Co., Ltd, 2018. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>>. Acesso em: 28 de maio de 2021. Citado na página 41.

HELTEC. *WiFi LoRa 32(V2) Pinout Diagram*. Chengdu Heltec Automation Technology Co., Ltd, 2021. Disponível em: <https://resource.heltec.cn/download/WiFi_LoRa_32/WIFI_LoRa_32_V2.pdf>. Acesso em: 28 de maio de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 41.

- HERRERO, R. Towards protocol stack virtualization in massive iot deployments. *Internet of Things*, v. 14, p. 100396, 2021. ISSN 2542-6605. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660521000408>>. Citado na página 35.
- HIVEMQ. *MQTT & MQTT 5 Essentials: A comprehensive overview of MQTT facts and features for beginners and experts alike*. Bavaria, Germany: HiveMQ GmbH, 2015. v. 1. Disponível em: <<https://www.hivemq.com/mqtt-5/>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 35 e 36.
- INMETRO. *Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008*. 1ª. ed. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum_final.pdf>. Acesso em: 25 de maio de 2021. Citado 6 vezes nas páginas 27, 28, 29, 30, 31 e 45.
- INMETRO. *Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)*. 1ª. ed. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 25 de maio de 2021. Citado 5 vezes nas páginas 27, 28, 29, 30 e 31.
- ITB. *Perdas de Água 2020 (SNIS 2018): Desafios para Disponibilidade Hídrica e Avanço da Eficiência do Saneamento Básico*. Instituto Trata Brasil, 2020. Disponível em: <http://tratabrasil.org.br/images/estudos/Relat%C3%B3rio_Final_-_Estudo_de_Perdas_2020_-_JUNHO_2020.pdf>. Acesso em: 17 de abr. de 2021. Citado na página 21.
- ITB. *Redução das perdas de água potável tem potencial de ganhos líquidos de R\$ 30 bilhões até 2033*. Instituto Trata Brasil, 2020. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/Release_-_Estudo_Perdas_de_%C3%81gua_JUNHO_2020.pdf>. Acesso em: 17 de abr. de 2021. Citado na página 21.
- KAFKA. *DOCUMENTATION: Kafka 2.8 Documentation*. Apache Software Foundation, 2017. Disponível em: <<https://kafka.apache.org/documentation/>>. Acesso em: 28 de maio de 2021. Citado na página 38.
- KONCAGÜL, E.; TRAN, M.; CONNOR, R. *Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2021: o valor da água; fatos e dados*. Paris, France: UNESCO World Water Assessment Programme, 2021. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por>. Acesso em: 15 de abr. de 2021. Citado na página 20.
- KONDORO, A. et al. Real time performance analysis of secure iot protocols for microgrid communication. *Future Generation Computer Systems*, v. 116, p. 1–12, 2021. ISSN 0167-739X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X20305707>>. Citado na página 34.
- LACERDA DANIEL PACHECO, D. A. P. A. J. J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. *Gestão & Produção*, scielo, v. 20, p. 741–761, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2013000400001&lang=pt>. Citado na página 48.
- LALLE, Y. et al. A comparative study of lorawan, sigfox, and nb-iot for smart water grid. In: *2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 31.

- LALLE, Y. et al. Lorawan network capacity analysis for smart water grid. In: *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 33.
- LIRA, F. A. d. *Metrologia na Indústria*. 10. ed. Pinheiros, São Paulo: Érica, 2018. Citado na página 31.
- LORA. *LoRa*. LoRa, 2018. Disponível em: <<https://lora.readthedocs.io/en/latest/>>. Acesso em: 25 de mar. de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.
- MANKAD, U.; AROLKAR, H. A. A study of the open source framework osgp / gxf for implementing smart water metering. In: *2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 357–361. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.
- MARTYUSHEVA, O. *Smart Water Grid: Plan B Technical Report*. Fort Collins, Colorado: Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado State University, 2014. Disponível em: <"https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/Rising%20Stars%20Website/Martyusheva,Olga_PlanB_TechnicalReport.pdf">. Acesso em: 18 de mar. de 2021. Citado na página 19.
- MATTOS, C. H. d. *Cidades Inteligentes: Motivações e Desafios da Adoção de Medidores Inteligentes de Água*. Rio de Janeiro: O Instituto de Tecnologia e Sociedade do Rio - ITS, 2018. Disponível em: <https://beta.itsrio.org/wp-content/uploads/2018/03/agatha_mattos-agua.pdf>. Acesso em: 14 de mar. de 2021. Citado na página 19.
- MENDES, A.; ROSÁRIO, P. P. N. d. *Metrologia e Incerteza de Medição: conceitos e aplicações*. 1ª. edição do kindle. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 31.
- MICROSOFT. *Tecnologias e protocolos de IoT*. Microsoft, 2021. Disponível em: <<https://azure.microsoft.com/pt-br/overview/internet-of-things-iot/iot-technology-protocols/>>. Acesso em: 27 de maio de 2021. Citado na página 34.
- MILEVA, A. et al. Comprehensive analysis of mqtt 5.0 susceptibility to network covert channels. *Computers Security*, v. 104, p. 102207, 2021. ISSN 0167-4048. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404821000316>>. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 37.
- MONGODB. *The database for modern applications*. MongoDB, Inc., 2021. Disponível em: <<https://www.mongodb.com/>>. Acesso em: 28 de maio de 2021. Citado na página 40.
- MORAES, C. H. V. d.; ALMEIDA, R. M. A. d.; SERAPHIM, T. d. F. P. *Programação de Sistemas Embarcados: Desenvolvendo Software para Microcontroladores em Linguagem C*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. Citado na página 41.
- MOTTA, A. C. S.; LIMA, C. d. A.; CUNHA, T. C. d. C. Campus universitário e espaço urbano: integração socioespacial em metrópole e cidades médias no sul do brasil. In: *X Seminário Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Córdoba, Junio 2018*. Córdoba, Barcelona: [s.n.], 2018. ISSN 2604-7756. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2117/134353>>. Citado na página 18.
- NADIPALLI, L. S. P. S. et al. Water conservation control by using iot smart meter. In: *2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 448–452. Citado 3 vezes nas páginas 42, 44 e 45.

NAKAGAWA, E. Y. et al. *Revisão Sistemática da Literatura em Engenharia de Software*. Edição do kindle. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2017. Citado na página 51.

NEVES, A. R. de M. et al. Iniciativa smart campus: um estudo de caso em progresso na universidade federal do pará. In: *Anais do I Workshop de Computação Urbana*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2017. ISSN 2595-2706. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/courb/article/view/2576>>. Citado na página 18.

OBERASCHER, M. et al. Smart water campus – a testbed for smart water applications. *Water Science and Technology*, v. 86, n. 11, p. 2834–2847, 11 2022. ISSN 0273-1223. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/wst.2022.369>>. Citado na página 18.

ORTIZ, F. M. et al. Caracterização de desempenho de uma rede lora em ambientes urbanos: Simulação vs. prática. In: *Anais do III Workshop de Computação Urbana*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 167–180. ISSN 2595-2706. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/courb/article/view/7476>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

PAIVA, F. *Sabesp adota medidores inteligentes de consumo de água*. Mobile Time, 2019. Disponível em: <<https://www.mobiletime.com.br/noticias/22/11/2019/sabesp-adota-medidores-inteligentes-de-consumo-de-agua/>>. Acesso em: 18 de mar. de 2021. Citado na página 19.

PIMENTEL, M.; FILIPPO, D.; SANTORO, F. M. *Design Science Research: fazendo pesquisas científicas rigorosas atreladas ao desenvolvimento de artefatos computacionais projetados para a educação*. Porto Alegre: SBC, 2020. v. 1. Disponível em: <<https://metodologia.ceie-br.org/livro-1/>>. Acesso em: 15 de maio de 2021. Citado na página 49.

RAY, A.; GOSWAMI, S. Iot and cloud computing based smart water metering system. In: *2020 International Conference on Power Electronics IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 308–313. Citado 3 vezes nas páginas 42, 44 e 45.

RODRIGUES, D. Design science research como caminho metodológico para disciplinas e projetos de design da informação | design science research as methodological path for information design subjects and projects. *InfoDesign - Revista Brasileira de Design da Informação*, v. 15, p. 111–124, 08 2018. Citado na página 48.

RUSSO, F.; RINDONE, C.; PANUCCIO, P. The process of smart city definition at an eu level. In: . [S.l.: s.n.], 2014. v. 191, p. 979–989. ISBN 9781845648206. Citado na página 18.

SARAVANAN, M.; DAS, A.; IYER, V. Smart water grid management using lpwan iot technology. In: *2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 45.

SEMTECH. *AN1200.22: LoRa™ Modulation Basics*. Semtech Corporation, 2015. Disponível em: <<https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>>. Acesso em: 26 de maio de 2021. Citado na página 33.

SEMTECH. *LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview*. Semtech Corporation, 2019. Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf>. Acesso em: 26 de maio de 2021. Citado 3 vezes nas páginas 7, 32 e 33.

SENAI. *Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial Fundamentos de instrumentação : pressão / nível / vazão / temperatura*. Edição do kindle. São Paulo: SENAI-SP, 2015. Citado na página 56.

SINGH, M.; AHMED, S. Iot based smart water management systems: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 2020. ISSN 2214-7853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320364701>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 23 e 24.

SNIS. *Perdas Aparentes: Ações de Assistência Técnica em Redução e Controle de Perdas de Água e Uso Eficiente de Energia Elétrica*. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2018. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/downloads/publicacoes-acertar/perdas/Vol.4-Perdas-Aparentes.pdf>>. Acesso em: 17 de abr. de 2021. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 58.

SNIS. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento*. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2021. Disponível em: <http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua_esgoto/mapa-agua>. Acesso em: 23 de abr. de 2021. Citado na página 21.

SNIS. *Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. Visão Geral*. Ministério do Desenvolvimento Regional Secretaria Nacional de Saneamento, 2022. Disponível em: <https://arquivos-snis.mdr.gov.br/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2022.pdf>. Acesso em: 18 de jan. de 2023. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

SUÇUARANA, M. d. S. *Estresse hídrico*. InfoEscola: Navegando e Aprendendo, 2021. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/ecologia/estresse-hidrico/>>. Acesso em: 22 de mar. de 2021. Citado na página 20.

VERNEMQ. *What is VerneMQ?* Octavo Labs AG, 2021. Disponível em: <<https://vernemq.com/intro/index.html>>. Acesso em: 28 de maio de 2021. Citado na página 39.

VERSTAEVEL, N.; BOES, J.; GLEIZES, M.-P. From smart campus to smart cities issues of the smart revolution. In: *2017 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence Computing, Advanced Trusted Computed, Scalable Computing Communications, Cloud Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCom/IOP/SCI)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado na página 18.

VIKASH; MISHRA, L.; VARMA, S. Middleware technologies for smart wireless sensor networks towards internet of things: A comparative review. *Wireless Personal Communications*, v. 116, 02 2021. Citado na página 37.

WISINTAINER, E. H. P. e Aurélio Faustino Hoppe e M. A. Smart water:a prototype for monitoring water consumption. *Anais do Computer on the Beach*, v. 11, n. 1, p. 321–325, 2020. ISSN 2358-0852. Disponível em: <<https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/acotb/article/view/16786>>. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 45.

WRI. *Ensuring Prosperity in a Water-stressed World*. [S.l.]: World Resources Institute - WRI, 2021. "<https://www.wri.org/water>". Acesso em: 01 de mar. de 2021. Citado na página 18.

YE, Y. et al. A lora-based low-power smart water metering system. In: *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 301–305. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 45.

YI, S. et al. *Smart Water Management: Case Study Report*. K-water, IWRA, 2018. Disponível em: <<https://www.iwra.org/wp-content/uploads/2018/11/SWM-report-final.pdf>>. Acesso em: 18 de mar. de 2021. Citado na página 19.

YUGHA, R.; CHITHRA, S. A survey on technologies and security protocols: Reference for future generation iot. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 169, p. 102763, 2020. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S108480452030237X>>. Citado na página 35.

Apêndices

APÊNDICE A – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DO IDM

Ordem	Faixa de vazão (L/h)	Vazões para verificação de erros (L/h)	Faixa de vazão (L/min)	Vazões para verificação de erros (L/min)	Erro Bancada (%)	Peso (%)	EP (%)	IDM (%)
1	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,38	97,62
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	0,07	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	-0,43	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,08	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,30	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	0,34	1,73		
2	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,19	97,81
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	0,40	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	0,45	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,40	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,30	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,53	1,73		
3	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,14	97,86
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	-0,40	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	2,01	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,53	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,67	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	0,03	1,73		
4	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-1,47	98,53
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	2,55	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	1,88	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,20	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,94	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,16	1,73		
5	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,24	97,76
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	0,50	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	0,30	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	0,71	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,18	5,86		

	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,42	1,73		
6	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,27	97,73
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	0,37	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	-0,36	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,35	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,68	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,58	1,73		
7	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-1,70	98,30
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	0,37	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	4,88	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,15	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	-0,22	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,78	1,73		
8	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,40	97,60
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	-0,96	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	1,37	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,53	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	-0,02	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,21	1,73		
9	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,04	97,96
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	1,74	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	-0,86	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,24	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,26	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,32	1,73		
10	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,02	97,98
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	1,76	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	-0,67	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	0,97	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,42	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,33	1,73		
	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56		
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		

11	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21	-2,48	97,52
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	0,15	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	-1,80	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,59	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,66	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,11	1,73		
12	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,57	97,43
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	-0,40	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	-1,48	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,72	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,43	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	0,05	1,73		
13	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-1,99	98,01
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	1,60	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	-0,89	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	2,17	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,50	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	0,01	1,73		
14	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,22	97,78
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	0,52	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	-0,54	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,41	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	1,01	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	0,15	1,73		
15	0 a 5	2,5	0 a 0,083	0,042	-5,00	4,56	-2,52	97,48
	5 a 15	10	0,083 a 0,25	0,167	-5,00	6,99		
	15 a 30	22,5	0,25 a 0,5	0,375	-5,00	6,83		
	30 a 50	40	0,5 a 0,83	0,667	-5,00	7,34		
	50 a 150	100	0,83 a 2,5	1,667	-5,00	23,21		
	150 a 350	250	2,5 a 5,83	4,167	-0,42	23,92		
	350 a 550	450	5,83 a 9,16	7,500	-0,56	12,27		
	550 a 850	700	9,16 a 14,16	11,667	1,33	7,29		
	850 a 1150	1000	14,16 a 19,16	16,667	0,04	5,86		
	1150 a 1500	1325	19,16 a 25	22,083	-0,31	1,73		
MÉDIA							-2,17	97,83

EP (%)	IDM (%)
-2,17	97,83

**APÊNDICE B – MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DOS
PARÂMETROS AUXILIARES NO PROCESSO DE
CALIBRAÇÃO DO SENSOR FS400A**

Medição	BAR (X)	BAR (S)	TA (X)	TA (S)	TH (X)	TH (S)	UM (X)	UM (S)	VI (X)	VI (S)
1	1,051	0,009	28,294	0,033	31,478	0,062	51,594	0,085	4,063	0,775
2	1,031	0,011	28,365	0,044	31,456	0,055	51,444	0,112	3,964	0,743
3	1,047	0,011	28,428	0,029	31,276	0,198	51,405	0,240	3,947	0,738
4	1,022	0,008	28,470	0,034	31,301	0,067	52,090	0,149	4,019	0,758
5	1,035	0,009	28,538	0,033	31,083	0,113	52,802	0,178	3,958	0,743
6	1,041	0,010	28,574	0,030	31,388	0,041	52,319	0,159	4,021	0,756
7	1,056	0,010	28,613	0,032	31,366	0,075	52,311	0,112	4,000	0,750
8	1,066	0,014	28,734	0,031	31,253	0,123	52,174	0,138	3,964	0,743
9	1,040	0,012	28,800	0,032	30,977	0,077	51,689	0,077	4,015	0,758
10	1,028	0,010	29,042	0,032	-	-	52,247	0,088	3,969	0,746
11	1,040	0,009	29,100	0,042	-	-	52,742	0,108	3,924	0,747
12	1,039	0,008	29,102	0,040	-	-	52,442	0,435	3,921	0,737
13	1,057	0,007	29,167	0,034	-	-	52,365	0,131	4,045	0,759
14	1,045	0,009	29,220	0,035	-	-	53,528	0,234	3,972	0,744
15	1,049	0,010	29,232	0,028	-	-	54,491	0,135	3,938	0,738
X̄	1,043	0,010	28,779	0,034	31,287	0,090	52,376	0,159	3,981	0,749
S²	0,000	0,000	0,113	0,000	0,028	0,002	0,654	0,008	0,002	0,000
S(X̄)	0,012	0,002	0,336	0,005	0,166	0,048	0,809	0,090	0,043	0,010
uX̄	0,003	0,000	0,087	0,001	0,059	0,017	0,209	0,023	0,011	0,003
UX̄	0,007	0,001	0,191	0,003	0,139	0,040	0,460	0,051	0,025	0,006

Legenda:

Média	\bar{X}
Variância	S^2
Desvio-Padrão da Média	$S(\bar{X})$
Incerteza- Padrão da Média	$u\bar{X}$
Incerteza Expandida da Média	$U\bar{X}$
Falha na obtenção dos dados	-
Vazão ensaiada (l/min)	4,167

Medição	BAR (X)	BAR (S)	TA (X)	TA (S)	TH (X)	TH (S)	UM (X)	UM (S)	VI (X)	VI (S)
1	1,009	0,013	24,967	0,030	28,040	0,100	67,288	0,348	7,177	1,305
2	1,003	0,009	25,006	0,033	27,730	0,081	67,563	0,139	6,873	1,292
3	1,002	0,012	25,058	0,025	27,801	0,041	67,467	0,207	6,988	1,323
4	1,008	0,013	25,133	0,043	27,159	0,062	68,746	0,272	6,975	1,316
5	1,000	0,009	25,202	0,030	27,255	0,141	68,632	0,277	6,845	1,287
6	0,999	0,011	25,266	0,035	27,479	0,027	68,098	0,057	6,786	1,274
7	1,007	0,011	25,344	0,034	28,307	0,148	66,480	0,581	7,158	1,347
8	1,014	0,008	25,407	0,039	28,226	0,103	65,906	0,206	6,952	1,312
9	1,017	0,010	25,520	0,029	27,762	0,126	67,184	0,298	6,809	1,281
10	1,006	0,009	25,582	0,033	27,650	0,069	67,656	0,185	6,769	1,275
11	1,005	0,009	25,660	0,049	28,067	0,064	66,953	0,154	6,711	1,287
12	1,003	0,012	25,746	0,035	28,025	0,220	66,645	0,301	6,719	1,261
13	0,990	0,010	25,789	0,038	27,842	0,147	66,892	0,272	6,684	1,249
14	1,006	0,012	25,818	0,037	28,307	0,101	65,920	0,180	6,767	1,298
15	1,014	0,010	25,927	0,052	28,599	0,153	65,379	0,328	6,802	1,266
\bar{X}	1,005	0,011	25,428	0,036	27,883	0,105	67,121	0,254	6,868	1,291
S^2	0,000	0,000	0,101	0,000	0,161	0,003	0,942	0,015	0,023	0,001
$S(\bar{X})$	0,007	0,002	0,318	0,007	0,401	0,051	0,970	0,121	0,153	0,026
$u\bar{X}$	0,002	0,000	0,082	0,002	0,103	0,013	0,251	0,031	0,040	0,007
$U\bar{X}$	0,004	0,001	0,181	0,004	0,228	0,029	0,551	0,069	0,087	0,015

Legenda:

Média	\bar{X}
Variância	S^2
Desvio-Padrão da Média	$S(\bar{X})$
Incerteza-Padrão da Média	$u\bar{X}$
Incerteza Expandida da Média	$U\bar{X}$
Falha na obtenção dos dados	-
Vazão ensaiada (l/min)	7,500

Medição	BAR (X)	BAR (S)	TA (X)	TA (S)	TH (X)	TH (S)	UM (X)	UM (S)	VI (X)	VI (S)
1	0,811	0,008	26,056	0,027	28,762	0,087	63,980	0,114	11,174	2,091
2	0,799	0,014	26,092	0,030	28,589	0,075	64,161	0,179	11,107	2,092
3	0,797	0,011	26,162	0,035	28,721	0,103	63,900	0,242	11,096	2,087
4	0,808	0,009	26,232	0,036	28,626	0,133	64,379	0,144	11,148	2,098
5	0,808	0,010	26,298	0,037	28,738	0,055	63,095	0,107	11,100	2,088
6	0,805	0,012	26,387	0,038	29,151	0,128	62,854	0,292	11,151	2,097
7	0,810	0,010	26,447	0,032	28,945	0,147	63,482	0,348	11,178	2,103
8	0,806	0,011	26,510	0,032	29,547	0,262	61,589	0,417	11,154	2,099
9	0,805	0,010	26,554	0,029	29,395	0,102	61,903	0,161	11,109	2,089
10	0,795	0,012	26,643	0,034	29,120	0,076	61,811	0,127	11,035	2,079
11	0,804	0,011	26,730	0,029	28,542	0,126	63,619	0,394	11,149	2,097
12	0,802	0,010	26,776	0,038	29,054	0,075	62,917	0,177	11,150	2,098
13	0,798	0,013	26,836	0,034	29,337	0,166	62,257	0,245	11,165	2,101
14	0,794	0,012	26,898	0,038	29,269	0,194	61,211	0,162	11,095	2,091
15	0,795	0,013	26,990	0,032	29,380	0,083	61,766	0,214	11,092	2,087
\bar{X}	0,802	0,011	26,507	0,033	29,012	0,121	62,862	0,222	11,127	2,093
S^2	0,000	0,000	0,091	0,000	0,111	0,003	1,090	0,010	0,002	0,000
$S(\bar{X})$	0,006	0,001	0,301	0,004	0,333	0,055	1,044	0,100	0,040	0,007
$u\bar{X}$	0,001	0,000	0,078	0,001	0,086	0,014	0,270	0,026	0,010	0,002
$U\bar{X}$	0,003	0,001	0,171	0,002	0,189	0,031	0,593	0,057	0,023	0,004

Legenda:

Média	\bar{X}
Variância	S^2
Desvio-Padrão da Média	$S(\bar{X})$
Incerteza-Padrão da Média	$u\bar{X}$
Incerteza Expandida da Média	$U\bar{X}$
Falha na obtenção dos dados	-
Vazão ensaiada (l/min)	11,667

Medição	BAR (X)	BAR (S)	TA (X)	TA (S)	TH (X)	TH (S)	UM (X)	UM (S)	VI (X)	VI (S)
1	0,585	0,009	27,324	0,038	29,946	0,215	60,369	0,557	16,311	3,076
2	0,580	0,012	27,401	0,039	30,483	0,059	60,174	0,369	16,222	3,061
3	0,579	0,011	27,488	0,033	30,515	0,042	58,917	0,249	16,132	3,037
4	0,583	0,012	27,566	0,029	30,529	0,114	58,828	0,114	16,250	3,061
5	0,583	0,010	27,615	0,030	29,932	0,120	60,144	0,137	16,150	3,044
6	0,575	0,010	27,678	0,036	30,182	0,154	59,636	0,155	16,107	3,034
7	0,578	0,011	27,752	0,025	29,833	0,104	60,533	0,329	15,966	3,009
8	0,571	0,106	26,884	0,036	29,060	0,037	60,596	0,085	16,143	3,096
9	0,584	0,010	27,863	0,040	29,996	0,150	60,500	0,174	16,195	3,053
10	0,584	0,011	27,929	0,039	30,200	0,092	59,318	0,368	16,185	3,105
11	0,577	0,012	28,010	0,028	30,499	0,086	58,870	0,293	16,100	3,033
12	0,581	0,011	28,068	0,031	29,963	0,246	58,867	0,639	16,105	3,089
13	0,575	0,011	28,139	0,036	30,071	0,041	59,549	0,121	16,077	3,025
14	0,577	0,012	28,197	0,036	30,858	0,081	59,283	0,157	16,139	3,039
15	0,572	0,013	28,212	0,029	30,220	0,077	62,735	0,702	16,011	3,018
\bar{X}	0,579	0,017	27,742	0,034	30,152	0,108	59,888	0,297	16,139	3,052
S^2	0,000	0,001	0,140	0,000	0,176	0,004	1,056	0,039	0,008	0,001
$S(\bar{X})$	0,004	0,025	0,374	0,005	0,419	0,062	1,028	0,199	0,088	0,029
$u\bar{X}$	0,001	0,006	0,097	0,001	0,108	0,016	0,265	0,051	0,023	0,007
$U\bar{X}$	0,003	0,014	0,212	0,003	0,238	0,035	0,584	0,113	0,050	0,016

Legenda:

Média	\bar{X}
Variância	S^2
Desvio-Padrão da Média	$S(\bar{X})$
Incerteza- Padrão da Média	$u\bar{X}$
Incerteza Expandida da Média	$U\bar{X}$
Falha na obtenção dos dados	-
Vazão ensaiada (l/min)	16,667

Medição	BAR (X)	BAR (S)	TA (X)	TA (S)	TH (X)	TH (S)	UM (X)	UM (S)	VI (X)	VI (S)
1	1,101	0,111	-	-	32,104	0,138	54,639	0,097	21,117	3,982
2	1,112	0,074	-	-	32,213	0,099	53,997	0,180	21,170	3,991
3	1,108	0,089	-	-	32,322	0,074	54,403	0,269	21,042	3,969
4	1,103	0,107	-	-	31,959	0,223	54,424	0,272	21,039	4,046
5	1,102	0,102	-	-	32,362	0,113	54,056	0,226	21,104	3,983
6	1,117	0,091	-	-	32,404	0,064	54,380	0,268	21,190	4,000
7	1,133	0,077	-	-	32,413	0,099	54,278	0,154	21,264	4,002
8	1,092	0,101	-	-	31,807	0,120	55,266	0,144	21,043	3,974
9	1,078	0,027	-	-	31,383	0,090	56,624	0,250	21,081	3,977
10	1,092	0,104	-	-	31,695	0,138	55,383	0,273	21,121	3,980
11	1,056	0,015	29,389	0,036	32,245	0,070	55,049	0,386	20,976	3,959
12	1,056	0,020	29,565	0,025	32,230	0,066	55,331	0,099	20,945	3,946
13	1,073	0,022	29,698	0,034	32,499	0,139	54,384	0,391	21,124	3,983
14	1,051	0,020	29,796	0,034	32,464	0,064	53,599	0,133	20,947	3,961
15	1,061	0,016	29,988	0,024	32,640	0,065	53,483	0,136	21,016	3,963
\bar{X}	1,089	0,065	29,687	0,031	32,183	0,104	54,620	0,219	21,079	3,981
S^2	0,001	0,002	0,052	0,000	0,116	0,002	0,647	0,009	0,008	0,001
$S(\bar{X})$	0,025	0,039	0,227	0,006	0,340	0,044	0,804	0,094	0,091	0,024
$u\bar{X}$	0,007	0,010	0,114	0,003	0,088	0,011	0,208	0,024	0,023	0,006
$U\bar{X}$	0,014	0,022	0,326	0,008	0,193	0,025	0,457	0,054	0,051	0,013

Legenda:

Média	\bar{X}
Variância	S^2
Desvio-Padrão da Média	$S(\bar{X})$
Incerteza- Padrão da Média	$u\bar{X}$
Incerteza Expandida da Média	$U\bar{X}$
Falha na obtenção dos dados	-
Vazão ensaiada (l/min)	22,083