

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**Alan Ricardo Dutra do Nascimento Filho**

**Aplicação de técnicas de fusão de dados e  
ferramentas de IoT em um sistema de medição  
de nível por ultrassom**

João Pessoa  
2020

Alan Ricardo Dutra do Nascimento Filho

# **Aplicação de técnicas de fusão de dados e ferramentas de IoT em um sistema de medição de nível por ultrassom**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Paraíba como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Energias Alternativas e Renováveis  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Juan M. Maurício Villanueva

João Pessoa

2020

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

F481a Filho, Alan Ricardo Dutra do Nascimento.

Aplicação de técnicas de fusão de dados e ferramentas de IoT em um sistema de medição de nível por ultrassom / Alan Ricardo Dutra do Nascimento Filho. - João Pessoa, 2020.

57 f. : il.

Orientação: Prof Dr Juan Moises Mauricio Villanueva.  
TCC (Especialização) - UFPB/CEAR.

1. Medição de Nível. 2. Sensor Ultrassônico. 3. Tempo de Voo. 4. ToF. 5. Fusão de Dados. 6. Estimação de Máxima Verossimilhança. 7. MLE. 8. Internet das Coisas. 9. IoT. 10. MQTT. I. Villanueva, Prof Dr Juan Moises Mauricio. II. Título.

UFPB/BC

Alan Ricardo Dutra do Nascimento Filho

## **Aplicação de técnicas de fusão de dados e ferramentas de IoT em um sistema de medição de nível por ultrassom**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Paraíba como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. João Pessoa, 11 de março de 2020:

---

**Prof. Juan M. Maurício Villanueva**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Alexsandro José Virgínio dos Santos**  
Examinador

---

**Prof. Dr. Carlos Alberto de Souza Filho**  
Examinador

João Pessoa  
2020

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente à todos os professores que me educaram e instruíram durante minha jornada.

Aos meus pais, pelo apoio indescritível e constante durante toda a minha vida.

Aos meus amigos Rômulo e Beco, pelo companheirismo dentro e fora da universidade, por cada dia de trabalho e noite de estudos juntos.

Ao professor Juan Maurício Villanueva, por ter sido um orientador extremamente solícito.

À equipe de alunos do LENHS, por todo o apoio e contribuições neste trabalho.

Por fim, a todos os demais que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

# Resumo

Em todo sistema hidráulico uma medição de extrema importância é o nível de seus reservatórios. Em muitos casos preza-se pela facilidade de implementação, assim como os custos envolvidos, o que leva à implementação de um único sensor. Entretanto, o monitoramento de dados de interesse baseado em um único sensor põe o sistema em dependência do bom funcionamento e durabilidade do sensor, gerando custos de manutenção e recalibração frequente deste sensor. Uma solução consiste em usar múltiplos sensores redundantes possibilitando de técnicas de detecção de falhas e fusão de dados para estimação de melhor aproximação. Para demonstrar esta solução, este trabalho propõe um sistema baseado em três sensores ultrassônicos redundantes, um sensor de temperatura e fusão de dados, fornecendo um sistema de medição de nível não-invasivo, capaz de realizar a estimação do nível com menor incerteza e identificar falhas em um ou mais sensores. Um microcontrolador ESP32 é utilizado para acionar o circuito dos sensores e medir o tempo de voo (ToF) dos ecos refletidos pela superfície da água recebidos pelo sensor ultrassônico que corresponde ao nível da água, no microcontrolador também é realizada a fusão de dados, onde realiza-se a correção do efeito da temperatura na velocidade do som, identifica-se se existe um sensor defeituoso e a realiza-se a recalibração automática. Através do protocolo MQTT os dados são lançados para uma plataforma online onde podem ser acessados e salvos conforme desejado. Os resultados experimentais ilustram a eficácia do sistema instalado para acessar a informação localmente ou via internet, assim como sua confiabilidade e boa estimação realizada através do uso da fusão de dados.

**Palavras-chave:** Medição de Nível, Sensor Ultrassônico, Tempo de Voo, ToF, Fusão de Dados, Estimação de Máxima Verossimilhança, MLE, Internet das Coisas, IoT, MQTT.

# Abstract

In every hydraulic system a data of extreme importance is the level of its tanks. In many cases it is appreciated the ease of implementation, as well as the costs involved, which leads to the implementation of a single sensor. However, the monitoring of data of interest based on a single sensor makes the system dependent on the proper functioning and durability of the sensor, generating maintenance costs and frequent recalibration of this sensor. One solution is to use multiple redundant sensors enabling the use of fault detection techniques. To demonstrate this solution, this work proposes a system based on three redundant ultrasonic sensors, a temperature sensor and data fusion, providing an accurate non-invasive level measurement system, capable of identifying faults in one or more sensors and alert the user about such faults. An ESP32 microcontroller is used to trigger the sensor circuit and measure the Time of Flight (ToF) of the echoes reflected by the water surface received by the ultrasonic sensor which corresponds to the water level, the microcontroller also performs data fusion, where the correction of the effect of temperature on the speed of sound is performed, automatic recalibration is done and any faulty sensor is identified. Through the MQTT protocol the data is launched to an online platform where it can be accessed and saved as desired. The experimental results illustrate the effectiveness of the system installed to access the information locally or via the internet, as well as its reliability and good estimation carried out through the use of data fusion.

**Keywords:** Level Measurement, Ultrasonic Sensor, Time of Flight, ToF, Data Fusion, Maximum Likelihood Estimation, MLE, Internet of Things, IoT, MQTT.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LE-NHS) . . . . .	14
Figura 2 – Princípio de Funcionamento do sensor para a estimação do ToF) . . . .	16
Figura 3 – Sensor Ultrassônico RadioLink SU04 PixHawk . . . . .	17
Figura 4 – Sensor Ultrassônico HC-SR04 . . . . .	17
Figura 5 – Diagrama de Temporização do Sensor para a estimação do ToF . . . .	18
Figura 6 – Detecção de Falha do tipo outlier . . . . .	20
Figura 7 – Princípio de Funcionamento do Protocolo MQTT . . . . .	26
Figura 8 – Exemplo de um Painel de Instrumentos da Ubidots . . . . .	27
Figura 9 – Configuração utilizada durante os testes de validação dos sensores . . .	29
Figura 10 – Exemplo de aplicação das bibliotecas utilizadas . . . . .	33
Figura 11 – Protótipo Final Pré-Instalação . . . . .	34
Figura 12 – Diagrama de Blocos do Sistema Proposto . . . . .	34
Figura 13 – Ciclo de funcionamento do sistema desenvolvido . . . . .	36
Figura 14 – Instalação do Projeto . . . . .	37
Figura 15 – Host em Detalhe . . . . .	38
Figura 16 – Barra de Sensores . . . . .	39
Figura 17 – Isolamento dos Sensores em Detalhe . . . . .	40
Figura 18 – Princípio de Funcionamento do Sistema de Medição de Nível . . . . .	40
Figura 19 – Histogramas Individuais dos Três Sensores Ultrassônicos . . . . .	42
Figura 20 – Medições de Tempo de Voo . . . . .	43
Figura 21 – Dados coletados durante teste de validação . . . . .	44
Figura 22 – Medições coletadas durante o sétimo teste . . . . .	45
Figura 23 – Sensores Instalados no Reservatório . . . . .	47
Figura 24 – Host em Funcionamento . . . . .	48
Figura 25 – Painel de Instrumentação Utilizado no Sistema . . . . .	49

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Efeito da variação de temperatura na medição de distância via ultrassom	19
Tabela 2 – Taxonomia de Falhas: Definições, Possíveis Causas e Impacto . . . . .	21
Tabela 3 – Medições Realizadas Para a Validação dos Sensores . . . . .	41
Tabela 4 – Resultados do Algoritmo de MLE . . . . .	46

# Lista de abreviaturas e siglas

LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
ToF	Time of Flight
IoT	Internet of Things
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Pertinência e motivação do trabalho	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Organização do trabalho	13
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>14</b>
2.1	Materiais Utilizados	15
2.2	Sensor Ultrassônico	16
2.2.1	Princípio de Funcionamento	16
2.2.2	Efeito da Temperatura	18
2.3	Fusão de Dados	19
2.3.1	Detecção de Falhas	19
2.3.2	Estimação de Máxima Verossimilhança (MLE)	22
2.4	Internet das Coisas	25
2.4.1	MQTT ( <i>Message Queuing Telemetry Transport</i> )	25
2.4.2	Ubidots	27
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL</b>	<b>28</b>
3.1	Validação dos Sensores	28
3.2	Fusão de Dados	30
3.2.1	Detecção de Falhas	30
3.2.2	Estimação por Máxima Verossimilhança	31
3.3	Aplicação de ferramentas de IoT	32
3.4	Circuito Final	34
3.5	Instalação no Reservatório	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>41</b>
4.1	Validação dos Sensores	41
4.2	Fusão de Dados	45
4.3	Medição de Nível	46
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>51</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Pertinência e motivação do trabalho

Muitas aplicações industriais requerem a instalação de múltiplos sistemas de aquisição de dados para medir o nível e volume de líquidos em tanques e recipientes. A coleta de dados de tanques de líquidos desempenha um papel essencial em muitas aplicações industriais, tais como tanques de óleo, recipientes de combustível, abastecimento público de água, sistemas de osmose reversa (RO) e aquários de peixes [1-6].

Uma gama de tecnologias foi proposta para coletar dados de tanques de líquidos usando diferentes tipos de sensores, como sensores baseados em fibra óptica [7], efeito Doppler [8-11], pressão [12], alterações de capacitância [13] e ressonância plasmônica de superfície [14]. Entretanto, cada tecnologia tem seus pontos fortes e fracos sob diferentes condições, levando a uma série de desafios a serem considerados pela comunidade acadêmica, incluindo custo de implementação, condições ambientais, instalação, distância de detecção e manutenção a longo prazo [5, 7]. O princípio de funcionamento, pontos fortes e fracos dessas tecnologias têm sido discutidos em muitos estudos [5, 15].

Os sensores ultrassônicos parecem promissores neste aspecto para a medição e monitoramento de parâmetros associados a líquidos, pois têm alta precisão, baixo custo e podem trabalhar com pressões de até 2 megapascal (MPa), temperaturas de até 100 °C, e alcances de até 30 m [9, 16].

Independentemente do tipo de sensor a ser utilizado, na instrumentação sempre tem-se o objetivo de fornecer medições confiáveis e precisas. Para atingir tais objetivos, grande parte da responsabilidade reside no tratamento de dados, na metodologia aplicada nos dados coletados para fornecer bons resultados. Nesta linha de raciocínio, uma técnica consolidada consiste na utilização de sensores em redundância permitindo a aplicação de técnicas de estimação de medições baseadas em fusão de dados [30].

A fusão de dados é a combinação de dados sensoriais ou dados derivados de fontes distintas, visando obter uma informação de maior confiabilidade através da fusão de diferentes informações conhecidas [31]. A informação resultante tem menor incerteza do que seria possível quando essas fontes são utilizadas individualmente, ponto que será abordado neste trabalho [32].

Um dos maiores interesses ao se implementar um sistema de medição é a disponibilidade da informação medida, isto é, possibilitar ou facilitar o acesso à uma informação ou grandeza anteriormente difícil ou inacessível. Atualmente uma forma de facilmente obter

informação se dá através da conexão à internet, impulsionado pelo campo da Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things (IoT)*) cujo desenvolvimento cresce rapidamente a cada dia que passa.

As tecnologias de IoT permitem uma fácil conexão e transferência de dados entre máquinas. Com o avanço dessas tecnologias, uma das áreas com maior proveito é sem dúvidas a instrumentação, que através da alta conectividade e rápida comunicação tornou possível avanços como a indústria 4.0 [43].

Para alcançar esta fácil e ampla conectividade à dispositivos muitas vezes de pequeno porte, com baixo poder computacional e baixo consumo energético, a IoT utiliza de protocolos de comunicação simples, como o MQTT, que apresentem vantagens em comparação a protocolos comumente utilizados, como o HTTP [41]. Dentre as vantagens apresentadas pelo protocolo MQTT sobre outras alternativas, pode-se citar o baixo consumo de energia e a boa confiabilidade quanto à perda de pacotes [42]. Neste trabalho será aplicada a tecnologia de IoT utilizando o protocolo MQTT para tornar acessível as medições realizadas via internet.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de medição de nível composto de múltiplos sensores ultrassônicos e de temperatura, utilizando de técnicas avançadas de estimação e de tecnologias de informação para tratamento dos dados com a finalidade de automatizar o processo de medição com maior confiabilidade.

Objetivos específicos:

- Estimar o nível de um reservatório utilizando fusão de dados com a finalidade de aumentar a confiabilidade;
- Aplicar algoritmos inteligentes para detecção de falhas de sensores;
- Aplicar ferramentas de IoT para comunicação, gerenciamento e armazenamento dos dados.

## 1.3 Organização do trabalho

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo, será feita uma introdução, abordando a importância e motivação do tema. Além disso, foram citados os objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo, serão feitas uma listagem e descrição dos materiais utilizados, assim como uma fundamentação teórica do que será implementado na realização do projeto. Conceitos relacionados à sensores ultrassônicos, fusão de dados e internet das coisas serão discutidos e exemplificados.

O terceiro capítulo abordará a metodologia utilizada, partindo da descrição do sistema com uma visão geral descrevendo o que foi implementado. Dando continuidade, será exposto de forma detalhada o sistema de medição de nível, descrevendo todas as metodologias utilizadas e funções que o sistema exercerá.

No quarto capítulo, os resultados serão apresentados. Para facilitar o entendimento, estes serão divididos em etapas, iniciando com a fusão de dados fora do contexto de medição de nível, seguido por sua implementação no reservatório. Por fim, será ilustrado como os dados coletados são exibidos localmente e à distância.

O quinto capítulo constará da conclusão do trabalho, comparando os resultados obtidos com os esperados ao traçar os objetivos. Também será discutido as futuras aplicações e utilidades deste projeto assim como sua continuação e expansão.

Por fim, o sexto capítulo aponta as referências bibliográficas.

## 2 Materiais e Métodos

No Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS/UFPB), são realizadas pesquisas e ensaios experimentais de sistemas de bombeamento de água. Para tanto, são utilizados conjuntos motor-bomba (CMB), ductos de 50 mm para a canalização da água e reservatórios para o armazenamento da água (Figura. 1). Estes ensaios tem como objetivo analisar as variações das diversas grandezas associados e estes experimentos, tais como: pressão, vazão e nível. Com a finalidade de automatizar o monitoramento e medição dessas grandezas, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de medição de nível baseados em sensores ultrassônicos utilizando técnicas de IoT para a transmissão das medições a um servidor de dados. Visando alcançar este propósito, nesta seção serão apresentados os materiais utilizados na realização do projeto assim como a fundamentação teórica.

Figura 1 – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS)



Fonte: Elaborado pelo autor

## 2.1 Materiais Utilizados

- 01 Reservatório Cilíndrico: 350 cm de altura, diâmetro interno de 157cm, equipado com encanamento de alimentação no fundo do tanque e uma calha para reter transbordamento no topo;
- 01 Microcontrolador ESP32: utilizado como unidade central do sistema para o acionamento e coleta dados dos sensores. Este microcontrolador possui módulos de conexão wifi e bluetooth, 33 pinos I/O, dos quais 25 digitais, 6 analógicos de entrada e 2 analógicos de saída, memória flash de 4 Mb e alimentado em 5 Vdc;
- 03 Sensores Ultrassônicos HC-SR04, operando por tempo de voo (ToF, do inglês, *Time-of-Flight*), frequência de operação 40 kHz, faixa de alcance entre 2 cm e 400 cm, incerteza de 3 mm, ângulo de abertura de 15°. Alimentados com 5 Vdc;
- 01 Sensor de Temperatura e Humidade DHT11, faixa de operação entre 0°C e 50°C, incerteza de 1°C, para a humidade faixa de operação entre 20% e 90%, incerteza de 5%. Alimentado com 5 Vdc;
- 01 Módulo Display LCD 16x2 alfanumérico, com duas linhas de 16 caracteres cada. Alimentado com 5 Vdc;
- 01 Conversor AC/DC: convertendo 220 Vac para 5 Vdc utilizado para alimentação do sistema;
- 01 Disjuntor monofásico 2 A: isolando o sistema da rede elétrica do laboratório para permitir o ligamento e desligamento do sistema em separado, assim como a proteção do mesmo em casos de curto-circuito;
- 01 Barra de alumínio utilizada no topo do reservatório para posicionar os sensores ultrassônicos e o sensor de temperatura no centro do reservatório;
- 01 Quadro de disjuntores utilizado para a montagem e isolamento dos componentes eletrônicos do host;
- 01 Trena digital à laser GLM 50 C, incerteza de  $\pm 1,5$  mm e faixa de alcance de 5 cm à 50 m;
- Dutos, cabos, fios e parafusos conforme necessário para realizar a instalação da barra de sensores ao reservatório, a fixação do host na parede do laboratório e a conexão das duas partes.

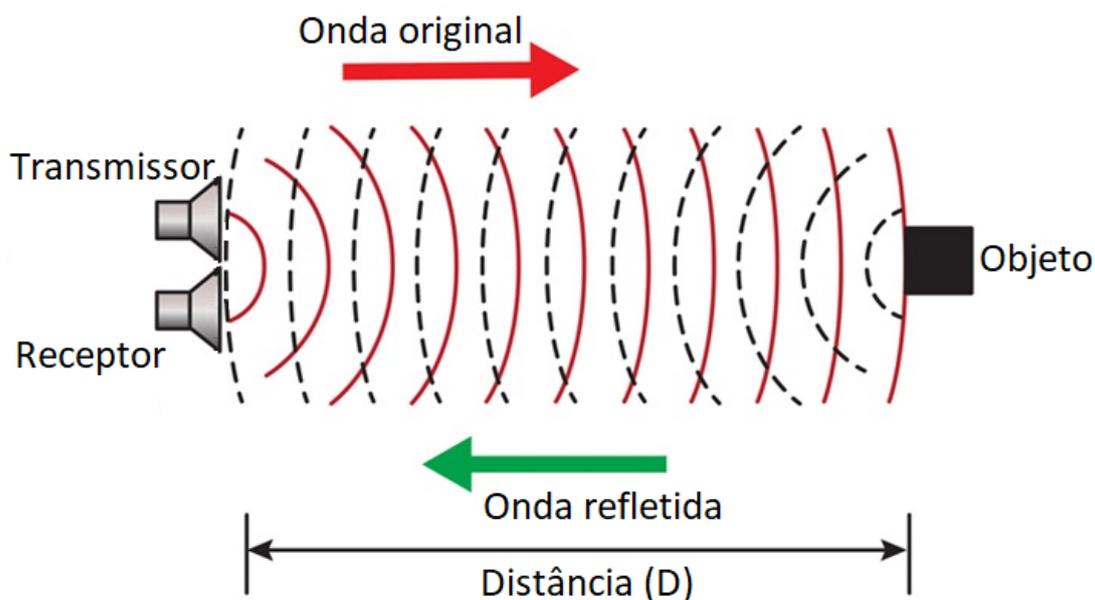
## 2.2 Sensor Ultrassônico

Os sensores ultrassônicos podem ser utilizados para a medição da distância através do uso de ondas ultrassônicas. Um dos modos de operação mais comumente utilizados é a medição de distância por tempo de voo (ou tempo de trânsito), em inglês *Time of Flight (ToF)*. Nesta subseção, serão apresentados os princípios básicos dos sensores ultrassônicos, assim como o efeito da temperatura sobre as medições realizadas com este sensor.

### 2.2.1 Princípio de Funcionamento

O sensor funciona em modo de eco de pulso, i.e. o sensor emite uma onda ultrassônica e recebe a onda refletida por um objeto/obstáculo. Os sensores ultrassônicos medem a distância até o alvo através da medição do tempo entre a emissão e a recepção (Fig. 2), sendo por isso chamado como um sensor de tempo de voo (ToF).

Figura 2 – Princípio de Funcionamento do sensor para a estimação do ToF)



Fonte: Elaborado pelo autor

Um dispositivo ultrassônico pode usar um único elemento ultrassônico tanto para emissão quanto para recepção, permitindo a diminuição do tamanho do dispositivo, porém limitando seu alcance em curtas distâncias (aumentando a área de "pontos cegos") visto que precisa alternar entre emitir ou escutar a onda sonora.[20]

Outra forma bastante utilizada é através de dois elementos distintos realizando a transmissão e recepção das ondas sonoras, isto permite detectar o eco refletido de um objeto mesmo enquanto o emissor ainda não terminou o seu ciclo de emissão, tornando possível

identificar objetos próximos ao dispositivo, em contrapartida aumentando o tamanho do mesmo.

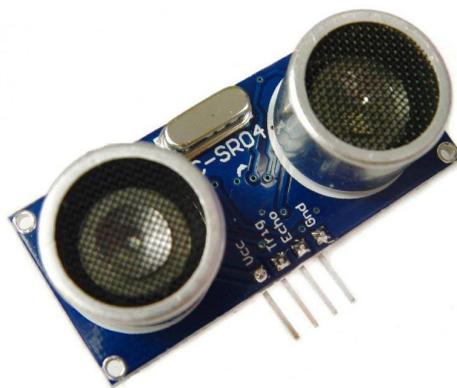
Um exemplo de dispositivo com um elemento único que alterna entre emissor e receptor está ilustrado na Figura 3, enquanto um exemplo de dispositivo com emissor e receptor separados pode ser visto na Figura 4.

Figura 3 – Sensor Ultrassônico RadioLink SU04 PixHawk



Fonte: <robothop.com>

Figura 4 – Sensor Ultrassônico HC-SR04

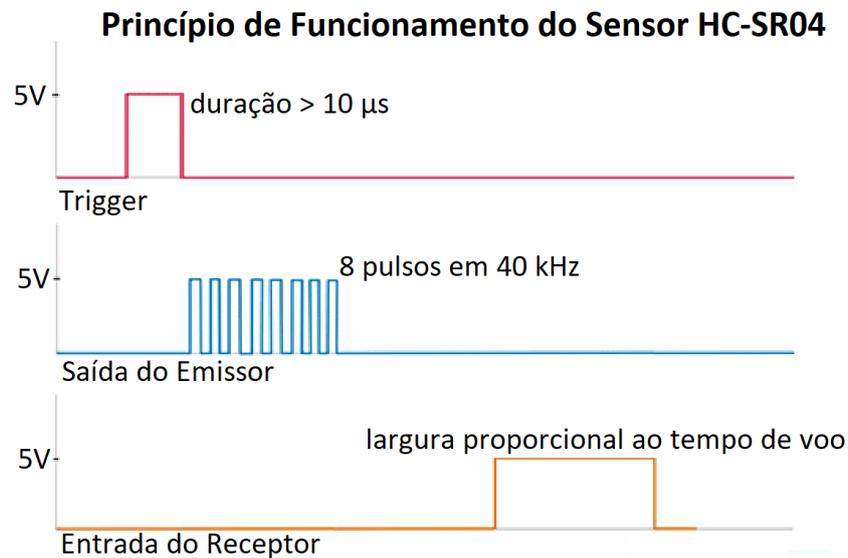


Fonte: <robocore.net>

Para realizar sua estimativa do ToF, o sensor HC-SR04 (Fig. 4), após receber um sinal positivo em seu trigger por 10 microsegundos, emite oito pulsos à 40 kHz através de seu emissor e aciona seu receptor aguardando um eco (reflexão das ondas ultrassônicas). Em caso havendo, o sensor então aciona seu output por uma duração igual ao tempo

levado entre emissão e reflexão recebida. Este princípio de funcionamento está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama de Temporização do Sensor para a estimação do ToF



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da medição do tempo de voo utilizando os sensores ultrassônicos, pode ser estimada indiretamente a distância entre o dispositivo ultrassônico e o objeto em estudo [21]. A distância pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$D = \frac{1}{2} * c * t \quad (2.1)$$

Em que:  $D$  é a distância entre dispositivo e objeto,  $c$  é a velocidade do som e  $t$  é o tempo entre a emissão e recepção da onda sonora. Visto que tal tempo é o total levado para a onda atingir o objeto e refletir de volta ao sensor, realiza-se a divisão por 2.

### 2.2.2 Efeito da Temperatura

Como foi observado, a medição de distância através do sensor ultrassônico por tempo de voo está diretamente ligada à velocidade do som. Boa parte dos dispositivos comerciais adotam uma velocidade do som constante, geralmente calculada para uma temperatura de 25°C, este é o caso do sensor adotado HC-SR04, que utiliza  $c = 340m/s$ . Porém a velocidade do som varia com a temperatura e tal variação pode propagar erros de medição notáveis ao medir distância via tempo de voo.

Desta maneira, a velocidade do som como função da temperatura pode ser encontrada através da seguinte equação:[22]

$$c = 20.05\sqrt{T + 273.15} \quad (2.2)$$

Onde  $c$  é a velocidade do som e  $T$  é a temperatura em graus Celsius.

Tabela 1 – Efeito da variação de temperatura na medição de distância via ultrassom

Temperatura (°C)	Velocidade do Som (m/s)	Tempo Necessário Para Atingir D=300cm (ms)	Distância Encontrada Assumindo Velocidade Constante $c = 340\text{m/s}$ (cm)
20	343,29	17,48	297,12
25	346,20	17,33	294,62
30	349,09	17,19	292,18
35	351,96	17,05	289,80
40	354,81	16,91	287,48
45	357,63	16,78	285,21

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 1 exemplifica como a variação de temperatura pode impactar consideravelmente as medições, mostrando a importância de medir e levar em consideração a temperatura do local de medição para uma melhor medição de distância via ultrassom. Para temperaturas quentes em torno de 40°C (frequentemente observadas dentro de reservatórios, como aquele utilizado neste projeto), percebe-se um erro de cerca de 12 cm na medição do nível quando não se leva em consideração a temperatura dentro do reservatório, para uma distância entre o sensor e a superfície da água de 300 cm.

## 2.3 Fusão de Dados

A fusão de dados é o processo de integração de múltiplas fontes de dados para produzir informações mais consistentes, precisas e úteis do que as fornecidas por qualquer fonte de dados individual.[23]

Dentre os múltiplos benefícios em realizar fusão de dados, dois de extrema importância ao utilizar tal técnica serão discutidos e aplicados neste trabalho. São eles: detectar falhas nos sensores e prover uma menor incerteza de medição.

### 2.3.1 Detecção de Falhas

À medida que o campo da automação avança, sistemas mais seguros e confiáveis são altamente desejáveis. Qualquer mal funcionamento numa fábrica resulta em uma redução da eficiência da planta, qualidade reduzida do produto e, às vezes, pode resultar

em fatalidades. Portanto, a detecção de falhas e o monitoramento do processo está se tornando parte integrante dos modernos sistemas de controle.[24]

As falhas têm significados diferentes quanto a sua interpretação final e a sua importância. Dependendo do contexto e da aplicação, algumas falhas podem ter valor informativo, enquanto outras são descartadas.[25] A Tabela 2 resume os tipos de falhas, suas definições, duração, indicação e possíveis causas, além do impacto que podem gerar nas medições. Na Tabela 2 segue a Taxonomia proposta por Ni, K. et al. (2009).

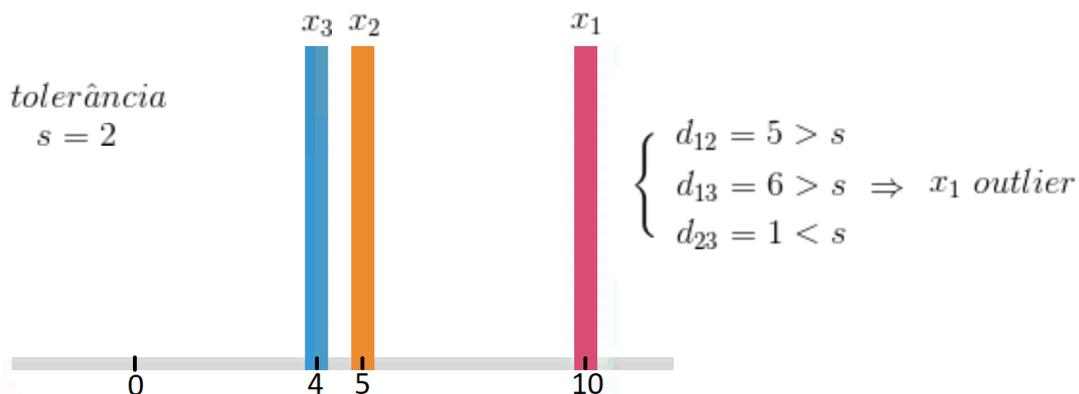
Ao utilizar múltiplos sensores redundantes pode-se utilizar suas medições, assim como de seus históricos, para detectar falhas através da fusão de dados. Uma forma de identificar falhas do tipo *outlier* se dá através da distância euclidiana entre as medições. Esta distância pode se encontrada através da equação 2.3. Ao se calcular as diferenças entre medições, pode-se atribuir uma tolerância máxima onde a medição que sua distância em relação as demais ultrapassar esta tolerância, será considerada como *outlier*.

$$d_{mn} = |x_m - x_n| \quad (2.3)$$

Onde  $d_{mn}$  é a distância euclidiana entre as medições  $x_m$  e  $x_n$ .

Por exemplo, em um cenário onde se tem 3 medições de distância  $x_1 = 10$  cm,  $x_2 = 5$  cm e  $x_3 = 4$  cm, e uma tolerância  $s = 2$  cm. Para detectar a existência de uma falha do tipo *outlier*, pode-se aplicar a seguinte metodologia: caso  $d_{12} > s$ ;  $d_{13} > s$ ; e  $d_{23} < s$ , percebe-se que a medição  $x_1$  difere das demais por uma distância maior que a tolerância assumida, portanto esta medição é considerada uma falha do tipo *outlier*. Este exemplo está ilustrado na figura 6

Figura 6 – Detecção de Falha do tipo outlier



Fonte: Elaborado pelo autor

Além de permitir a identificação de falhas nos sensores, outro ponto de interesse ao

Tabela 2 – Taxonomia de Falhas: Definições, Possíveis Causas e Impacto

Falha	Definição e Duração	Indicações e Possíveis Causas	Impacto da Falha
Outlier	Dados isolados inesperados. Ocorrem aleatoriamente.	A distância entre outras medições é maior do que a esperada. O gradiente muda rapidamente quando ocorre um outlier.	Ele pode distorcer significativamente a média, variância, gradiente e outros parâmetros de dados se não forem detectadas.
Picos	Múltiplos dados com uma taxa de variação maior do que esperado.	Mudança brusca no gradiente maior que o esperado. Pouca correlação temporal entre dados históricos e os picos. Falha de bateria e outros equipamentos ou falhas de conexão.	Os picos não geram valores informativos e podem ser descartados. Isso resulta em uma perda de dados de rendimento do sensor.
"Stuck-at"	Sensores apresentam uma variância próxima a zero em um inesperado período de tempo.	Variância é próxima de zero ou zero. A causa frequente dessa falha é uma avaria no hardware dos sensores.	Se a causa é pela mudança do ambiente, ainda tem valor informativo e os dados podem ser interpretados com baixa fidelidade. Caso contrário, os dados podem ser descartados.
Ruído ou Variância	Sensores apresentam uma alta variância ou ruído. Geralmente não temporárias.	A variação é maior do que o esperado. Devido a uma falha de hardware, ambiente fora da faixa, ou um enfraquecimento da bateria de abastecimento.	Se os dados ruidosos acompanham a tendência de outros sensores, então os dados ainda oferecem informação e não devem ser descartados.
Calibração	Os sensores reportam valores que estão fora da realidade. A falha se mantém até ser consertada.	Os erros de calibração e os desvios em sensores são as causas deste tipo de falha. Um sensor pode estar deslocado (offset) ou ter um ganho diferente do valor adequado. A maioria das falhas deste tipo pode piorar com o tempo.	Os dados não devem ser descartados. Os dados não calibrados podem fornecer informação relevante. Uma fórmula apropriada de calibração pode corrigir os dados.
Conexão ou Hardware	Um mal funcionamento no hardware do sensor pode causar uma leitura de dados inexatos. Falha permanente uma vez que ocorre.	Dados anormalmente inferiores ou superiores aos esperados. Perturbações ambientais e a idade do sensor indicam maiores probabilidades de falha. Curto-circuito ou mal conexão do cabo alimentador.	Os dados são sem sentido devido ao fato de que o sensor não está funcionando como projetado. Devem ser descartados.
Ambiente fora do intervalo	O ambiente excede o intervalo de sensibilidade do transdutor. As leituras voltam à normalidade quando o sensor volta a atuar dentro do intervalo.	Pode existir um ruído muito alto nos dados. Também pode ser um sinal de uma calibração mal realizada.	Ainda guarda informação nos dados. No valor mínimo indica que o sensor ultrapassou os limites de sensibilidade no ambiente.

Fonte: Ni et al., 2009

realizar a fusão de dados é prover uma melhor estimativa de medições redundantes, neste caso com a finalidade de prover uma melhor estimativa do nível de um reservatório.

Uma das formas de fundir dados redundantes visando obter uma melhor incerteza é através do algoritmo de estimativa de máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood Estimation (MLE)* em inglês) [27].

### 2.3.2 Estimativa de Máxima Verossimilhança (MLE)

Em estatística, a estimativa de máxima verossimilhança (MLE) é um método de estimar os parâmetros de uma distribuição de probabilidade através da maximização de uma função de verossimilhança, de modo que sob o modelo estatístico assumido os dados observados são os mais prováveis.[27-28]

O método de fusão baseado no algoritmo de estimativa de máxima probabilidade consiste em analisar a função de probabilidade (*likelihood function*) de um conjunto de amostras redundantes quantitativas e estimar os parâmetros que maximizem esta função. Este algoritmo está baseado na combinação da evidência contida no sinal com o conhecimento *a priori* da distribuição de densidade de probabilidade do processo. O estimador de máxima probabilidade toma como entrada o conjunto de observações das múltiplas fontes de informação e, usando um modelo probabilístico do processo (e.g. Gaussiano), estima os parâmetros desconhecidos. A exatidão da estimativa depende da informação disponível e da eficiência do estimador. [MAYBECK, 1997], [DHILLON, 1999] e [VASEGHI, 2000]

Para este propósito, considera-se um conjunto de amostras de tamanho  $n$ , definidas por  $x_1, \dots, x_n$ , com funções de densidade de probabilidade independentes. A função de probabilidade (*likelihood function*) do conjunto é dado por: [MAYBECK, 1997] [DHILLON, 1999]

$$K = f_1(\bar{x})f_2(\bar{x})\dots f_n(\bar{x}) \quad (2.4)$$

Onde  $f_1, \dots, f_n$  são as funções de densidade de probabilidade e  $\bar{x}$  é o melhor valor estimado que maximiza  $K$ .

Considera-se que as funções de densidade de probabilidade têm uma distribuição normal com parâmetros conhecidos, dada por:

$$f(x) = \frac{1}{u\sqrt{2\pi}} e^{-[(x-\bar{x})^2/2u^2]} \quad (2.5)$$

em que  $u$  é o desvio padrão de  $x$ .

Substituindo 2.5 em 2.4, tem-se:

$$K = \prod_{i=1}^n \frac{1}{u_i \sqrt{2\pi}} e^{-[(\bar{x}-x_i)^2/2u_i^2]} \quad (2.6)$$

Tomando o logaritmo da Eq. (2.6):

$$\ln K = \ln \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}^n \prod u_i} \right] - \sum_{i=1}^n \frac{(\bar{x} - x_i)^2}{2u_i^2} \quad (2.7)$$

O valor de  $\bar{x}$  que maximiza a Eq. (2.7) é conhecido como a estimação de máxima probabilidade (ou máxima verossimilhança), e pode ser calculado por:

$$\frac{\partial \ln K}{\partial \bar{x}} = 0 \quad (2.8)$$

Resolvendo a Eq. (2.8) para  $\bar{x}$ , tem-se que a estimação do valor de fusão é dado por:

$$\bar{x} = \frac{1}{\Gamma u_1^2} x_1 + \frac{1}{\Gamma u_2^2} x_2 + \dots + \frac{1}{\Gamma u_n^2} x_n \quad (2.9)$$

onde:

$$\Gamma = \left( \frac{1}{u_1^2} + \frac{1}{u_2^2} + \dots + \frac{1}{u_n^2} \right) \quad (2.10)$$

A Eq. (2.9) define um procedimento de fusão de dados para estimar o valor de fusão  $x_F = \bar{x}$ , a partir dos  $n$  valores medidos  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , levando em consideração os valores dos desvios padrão  $u_1, u_2, \dots, u_n$  de cada medida, respectivamente.

Para exemplificar este procedimento, considera-se que uma grandeza  $x$  é medida utilizando três dispositivos redundantes, em que o primeiro indica o valor da medida de  $0,9x$  com uma incerteza  $\sigma$ , o segundo, o valor de  $1,2x$  com uma incerteza  $2\sigma$  e o terceiro, o valor de  $1,15x$  com uma incerteza  $1,5\sigma$ . Utilizando o procedimento de fusão de máxima verossimilhança das equações Eq. (2.10) e Eq. (2.9), tem-se:

$$\Gamma = \frac{1}{\sigma^2} + \frac{1}{(2\sigma)^2} + \frac{1}{(1,5\sigma)^2} = \frac{1,6944}{\sigma^2} \quad (2.11)$$

$$x_F = \frac{0,9x}{\Gamma\sigma^2} + \frac{1,2x}{\Gamma(2\sigma)^2} + \frac{1,15x}{\Gamma(1,5\sigma)^2} = 1,01x \quad (2.12)$$

Seguindo este procedimento, o resultado final de fusão foi de  $x_F = 1,01x$ , cujo valor se encontra contido no intervalo da menor e maior medição. Com a finalidade

de avaliar a incerteza do resultado de fusão, foi realizada a análise da propagação de incertezas associadas às grandezas medidas  $x_1, x_2, \dots, x_n$  [TAYLOR, 1997], para determinar a incerteza final do processo de fusão  $u_{x_F}$ .

Das equações Eq. (2.9) e Eq. (2.10), tem-se:

$$u_{x_F}^2 = \left( \frac{\partial x_F}{\partial x_1} u_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial x_F}{\partial x_2} u_{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial x_F}{\partial x_n} u_{x_n} \right)^2 \quad (2.13)$$

$$u_{x_F}^2 = \left( \frac{1}{\Gamma u_{x_1}^2} u_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{1}{\Gamma u_{x_2}^2} u_{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{1}{\Gamma u_{x_n}^2} u_{x_n} \right)^2 \quad (2.14)$$

$$u_{x_F}^2 = \frac{1}{\Gamma^2} \left( \frac{1}{u_{x_1}^2} + \frac{1}{u_{x_2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{x_n}^2} \right) \quad (2.15)$$

$$u_{x_F}^2 = \frac{1}{\Gamma^2} \Gamma = \frac{1}{\Gamma} \quad (2.16)$$

Portanto, a incerteza final  $u_{x_F}$  associada a  $x_F$  é calculada como:

$$\frac{1}{u_{x_F}^2} = \frac{1}{u_{x_1}^2} + \frac{1}{u_{x_2}^2} + \dots + \frac{1}{u_{x_n}^2} \quad (2.17)$$

Pode-se então observar matematicamente que a incerteza final  $u_{x_F}$  é menor que as incertezas independentes  $u_{x_1}, u_{x_2}, \dots, u_{x_n}$ , isto é, o resultado da fusão apresenta menor incerteza que qualquer outra individual.

Dando continuidade ao exemplo ilustrado nas equações 2.11 e 2.12, tem-se:

$$\frac{1}{u_{x_F}^2} = \frac{1}{\sigma^2} + \frac{1}{(2\sigma)^2} + \frac{1}{(1,5\sigma)^2} \quad (2.18)$$

$$u_{x_F} = 0,768\sigma \quad (2.19)$$

Portanto ao utilizar o procedimento de fusão de máxima probabilidade (máxima verossimilhança) numa medição de três dispositivos com incertezas individuais  $\sigma, 2\sigma$  e  $1,5\sigma$ , tem-se uma incerteza final de fusão de  $0,768\sigma$ .

## 2.4 Internet das Coisas

Com o desenvolvimento da ciência e das tecnologias de comunicação, a Internet das Coisas nasceu e rapidamente se viu presente em diversas aplicações [33]. A Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things (IoT)*) é um sistema de dispositivos de computação inter-relacionados, máquinas mecânicas e digitais, objetos, animais ou pessoas que recebem identificadores únicos (UIDs) e a capacidade de transferir dados através de uma rede sem exigir interação entre homem-homem ou homem-máquina [35].

Na instrumentação, a Internet das Coisas pode ser aplicada ao conectar sensores e microcontroladores à internet, fazendo uso de um protocolo de comunicação máquina-máquina (em inglês *Machine to Machine (M2M)*). Dois protocolos de comunicação para aquisição de dados que podem ser utilizados são HTTP e MQTT.

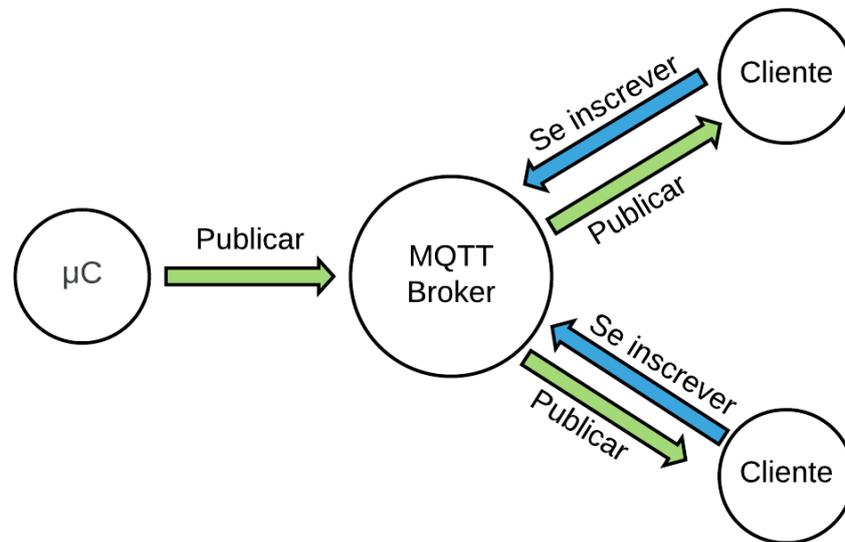
O protocolo HTTP é usado para troca de dados onde normalmente pode ser usado para lidar com a aquisição de dados, mas a capacidade do HTTP é menos adequada quando usado em aplicações baseadas em IoT. O protocolo HTTP usa um modelo de solicitação/resposta, que é atualmente o protocolo de troca de mensagens mais comum. O MQTT usa um padrão de publicação/assinatura [39]. O protocolo HTTP não é projetado para redes abrangentes e pode causar uma diminuição no desempenho, especialmente no uso de largura de banda e durabilidade da bateria [40]. Um protocolo pensado para aplicações IoT requer menor largura de banda, menor latência e baixo consumo de energia porque é comumente usado para pequenos aparelhos.

Um estudo conduzido por Vergara et.al mostrou a superioridade do MQTT implementado em dispositivos Android, o que pode diminuir o consumo de energia em comparação com o protocolo HTTP [41]. MQTT e HTTP ambos funcionam à base do TCP. No entanto, o MQTT oferece algumas vantagens, como baixo consumo de energia e pouca latência [42]. Pelos motivos apresentados, escolheu-se o protocolo MQTT para ser utilizado neste projeto.

### 2.4.1 MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*)

O MQTT é um protocolo de conectividade máquina a máquina (M2M)/"Internet das Coisas". Foi projetado como um sistema de transmissão de mensagens de publicação/assinatura extremamente leve. É útil para conexões com locais remotos onde uma pequena área de código é necessária e/ou a largura de banda da rede está em um nível superior [34]. Os protocolos MQTT têm vantagens sobre outros protocolos como o HTTP (Hypertext Transfer Protocol). O MQTT é mais leve, capaz de rodar em baixa largura de banda, mais simples, e mais moderno que o HTTP que roda em alta latência [36].

Figura 7 – Princípio de Funcionamento do Protocolo MQTT



Fonte: Elaborado pelo autor

O princípio de funcionamento deste protocolo é simples, todas as fontes de informação (como sensores, microcontroladores) que desejarem compartilhar seus dados publicam estas informações juntamente a um tópico determinado para um *MQTT Broker*, responsável por receber todas as informações dos tópicos conhecidos e por publicar estas informações para os clientes interessados [37]. Para um cliente ter acesso a estas informações, basta enviar ao *Broker* a informação que deseja se inscrever no tópico e passará a receber atualizações sempre que uma nova informação for publicada. Este princípio está ilustrado na Figura 7.

Apesar da simplicidade, este protocolo permite o funcionamento em paralelo de múltiplos tópicos e múltiplos clientes inscritos a um mesmo tópico, o que torna o protocolo muito utilizado na área de IoT.

Após a escolha do protocolo a ser utilizado para realizar a conexão dos dados medidos à internet, precisa-se de um *Broker* para receber as informações e publicá-las quando requisitado. Geralmente utiliza-se de servidores dedicados à serviços de IoT exercendo o papel de *Broker* para ter disponível 24 horas por dia onde publicar suas informações e para receber atualização dos tópicos inscritos sempre que requisitado.

Uma das empresas que fornece este serviço chama-se Ubidots. Esta empresa americana fornece soluções em diversas aplicações de IoT, entre elas um *Broker* para protocolo MQTT [38].

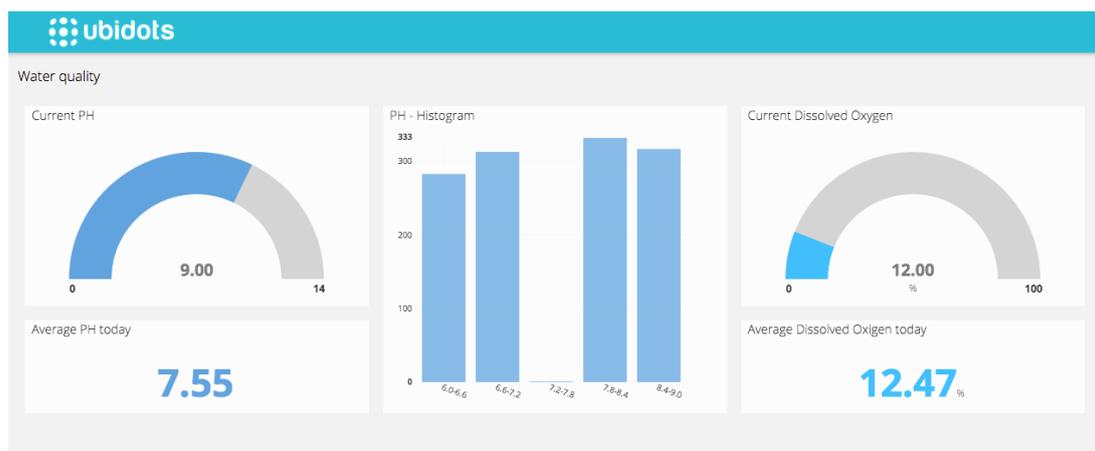
## 2.4.2 Ubidots

A Ubidots fornece soluções completas de IoT para monitorizar, controlar e automatizar remotamente processos, em sua maior parte industriais. Esta empresa permite o uso gratuito de alguns de seus serviços, quando este uso possui fins acadêmicos.

Além de fornecer o servidor e banco de dados responsáveis para receber todas as publicações e para postar estas informações quando requisitadas por clientes inscritos, a Ubidots permite a seus usuários de criar seus painéis de instrumentos, tornando visível as informações desejadas pelo usuário.

Dentro da comunicação MQTT este painel funciona como um cliente, inscrito em todos os tópicos existentes dentro de sua aplicação. De acordo com o interesse e *design* individual de cada aplicação, o usuário pode programar o painel para expor estes dados em forma de gráficos, figuras, tabelas, incluindo os valores mais atuais ou também históricos de uma ou mais variáveis, permitindo comparação entre suas variáveis de interesse, entre outras funções. Um exemplo de painel de instrumentos está ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Exemplo de um Painel de Instrumentos da Ubidots



Fonte: Elaborado pelo autor

## 3 Sistema de Medição de Nível

Neste capítulo serão demonstrados os cálculos e processos realizados no desenvolvimento do trabalho. Inicialmente será descrito a validação realizada nos sensores escolhidos, em seguida será detalhado como foram implementadas as técnicas de fusão de dados e as ferramentas de IoT, então será feita uma visão geral do sistema proposto. Por fim será descrita a instalação do sistema no reservatório.

Todos os resultados obtidos durante os procedimentos descritos neste capítulo serão discutidos no capítulo seguinte.

Durante a realização do projeto, foram utilizados os softwares Arduino® , Microsoft® Excel, MatLAB®, assim como os datasheets dos componentes utilizados.

### 3.1 Validação dos Sensores

Visto que o sistema depende diretamente da confiabilidade nos dados fornecidos pelos sensores ultrassônicos, o primeiro passo consistiu em validar o funcionamento destes sensores, testando seu alcance e incerteza. Para isto foi realizada uma comparação entre os três sensores do tipo HC-SR04 e uma trena digital à laser GLM 50 C. De acordo com a descrição dos equipamentos, os sensores ultrassônicos possuem incerteza de  $\pm 0,3$  cm, enquanto a trena digital possui incerteza de  $\pm 0,15$  cm, as amplitudes de medição são de 2 cm à 400 cm para o sensor ultrassônico e de 5 cm à 5000 cm para a trena digital.

Visto que a posterior aplicação em um reservatório de água pode esperar um funcionamento de longa duração do sistema, podendo até mesmo servir para um supervisor ininterrupto, os testes foram conduzidos durante oito a doze horas totais cada. Isto ajudou a validar além da medição de tempo de vôo, também a durabilidade e constância dos sensores escolhidos.

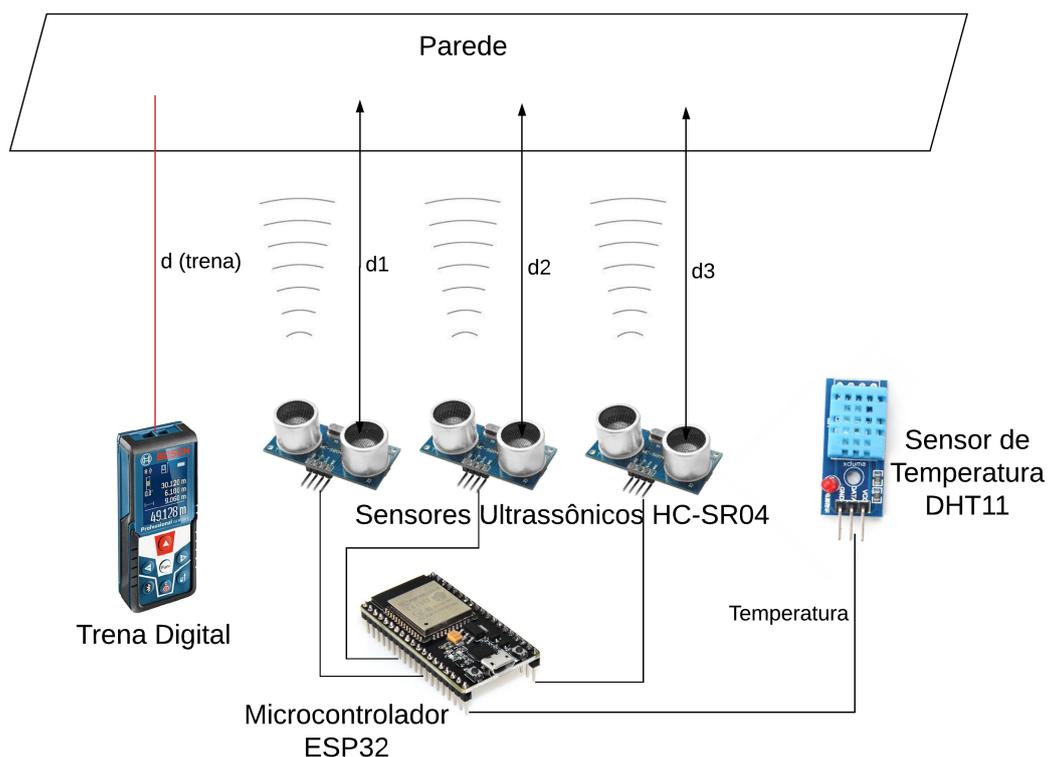
Ao todo foram realizados nove testes. Em todos eles os sensores ultrassônicos foram acionados pelo microcontrolador ESP32, que também foi responsável por armazenar os dados coletados, realizando novas medições a cada cinco segundos durante um período total de doze horas. O sensor de temperatura foi incluído do segundo ao último teste, também realizando medições a cada 5 segundos. A trena digital foi acionada manualmente a cada 30 minutos para comparação e validação das distâncias individuais de cada sensor ultrassônico.

Durante o teste inicial os três sensores ultrassônicos juntamente à trena digital foram posicionados face à uma parede, numa distância de 50 cm, e a temperatura não foi

medida ou controlada. No segundo teste, os sensores mantiveram sua formação, porém a temperatura foi medida juntamente às distâncias individuais. Durante o terceiro teste a temperatura foi propositalmente variada através do uso de um aparelho de ar-condicionado, e as medições de temperatura e distância assim como o posicionamento dos sensores se mantiveram. Do quarto ao nono teste a distância entre a parede e os sensores foi ajustada para 20 cm, 100 cm, 200 cm, 250 cm, 300 cm e 350 cm, respectivamente. As medições de temperatura permaneceram e a trena digital continuou sendo acionada a cada 30 minutos.

Devido à longa duração dos testes, naturalmente a temperatura variou durante a execução, porém este era um fenômeno esperado e desejado, para então comprovar o efeito da variação da velocidade do som com a temperatura e observar o quanto afetaria as medições individuais, visto que os dispositivos ultrassônicos originalmente não realizam nenhum tipo de ajuste por temperatura. A configuração utilizada está ilustrada na Figura 9. Os resultados serão expostos e discutidos no capítulo seguinte.

Figura 9 – Configuração utilizada durante os testes de validação dos sensores



Fonte: Elaborado pelo autor

Estes testes permitiram a validação de medição do tempo de vôo, porém para uma correta medição de distância a temperatura deve ser levada em consideração. Sabe-se que o sensor HC-SR04 não realiza a correção por temperatura automaticamente. Em seu datasheet consta que a velocidade do som adotada é constante ( $c = 340$  m/s), portanto ao

utilizar das medições de temperatura fornecidas através do sensor DHT11, a correção da velocidade do som se torna possível, de acordo com a equação 2.2.

Tem-se então um sistema capaz de medir distância através de três dispositivos redundantes, utilizando princípio de tempo de voo e correção da velocidade do som por temperatura. Isto permitiu o desenvolvimento do circuito de base do futuro sistema de medição de nível, onde a próxima etapa consiste em interligar as informações coletadas através da fusão de dados.

## 3.2 Fusão de Dados

A fusão de dados será aplicada com dois objetivos: detectar falhas e prover uma estimativa de menor incerteza que qualquer medição individual. Para fornecer uma melhor estimativa escolheu-se aplicar o algoritmo de máxima verossimilhança (MLE), porém como não deseja-se utilizar de medições incorretas, inicialmente realizou-se a detecção de falhas.

### 3.2.1 Detecção de Falhas

Dentre as falhas descritas na tabela 2, espera-se encontrar mais frequentemente nesta aplicação dois tipos: *outliers* e falhas de ambiente fora do intervalo. *Outliers* devem acontecer frequentemente pois a superfície interna do reservatório utilizado não é perfeitamente lisa, o que por vez pode refletir as ondas ultrassônicas gerando dados isolados inesperados. Quanto à falhas de ambiente fora do intervalo, apesar do reservatório possuir uma altura de 350cm por vezes um sensor pode apresentar uma medição além desta distância. Isto se dá pois as ondas sonoras podem refletir entre as paredes do reservatório e ao retornar para o sensor o tempo de voo medido fornece uma leitura não esperada.

Apesar de serem dois tipos de falhas aparentemente inevitáveis, são falhas facilmente detectadas ao utilizar a fusão de dados. Inicialmente sabe-se que o reservatório a ser utilizado possui uma altura de 350cm, portanto qualquer medição acima de 350cm é automaticamente classificada como fora do intervalo, sendo então uma falha facilmente identificada. Já para os *outliers*, aplica-se o procedimento de identificação apresentado no capítulo anterior, onde se compara as medições de três sensores redundantes, juntamente com os históricos individuais de cada sensor, adota-se uma tolerância máxima aceita entre as medições, em seguida calcula-se a distância euclidiana e caso alguma delas apresente divergência maior que a tolerância, considera-se um *outlier*, identificando então a presença de uma falha deste tipo. Ao detectar uma falha, o sistema não utiliza aquela medição no processo de estimativa da distância final.

### 3.2.2 Estimação por Máxima Verossimilhança

Após realizada a detecção de falhas, a próxima etapa consiste prover uma estimação com menor incerteza comparada a qualquer medição individual, para isto será aplicado o algoritmo de máxima verossimilhança (MLE), discutido no capítulo anterior.

Através das equações (2.9) e (2.10), tem-se definido matematicamente o processo de estimação para uma quantidade qualquer  $n$  de medições. Neste sistema apresentam-se três sensores redundantes, portanto nos ciclos onde não houverem falhas, aplica-se a estimação adotando  $n = 3$ , de acordo com as equações a seguir.

$$\bar{x} = \frac{1}{\Gamma u_1^2} x_1 + \frac{1}{\Gamma u_2^2} x_2 + \frac{1}{\Gamma u_3^2} x_3 \quad (3.1)$$

onde:

$$\Gamma = \left( \frac{1}{u_1^2} + \frac{1}{u_2^2} + \frac{1}{u_3^2} \right) \quad (3.2)$$

Nota-se que para aplicar esta estimação, necessita-se além das medições também o desvio padrão do conjunto de medições. Para obter tais valores, realiza-se a cada  $g$  ciclos uma série de medições em sequência por cada sensor isoladamente, para então obter os valores de desvio padrão que serão utilizados nesta estimação. Inicialmente o valor adotado para  $g$  foi escolhido para que durante os testes este cálculo do desvio padrão coincida com a validação comparado à trena digital, isto é, a cada 30 minutos, e os valores de desvio padrão encontrados serão adotados como constante durante os próximos  $g$  ciclos.

Nos casos onde for detectada alguma falha, aquela medição não fará parte da estimação final. Portanto nos cenários onde uma falha for detectada, será aplicado a estimação adotando  $n = 2$ , de acordo com as equações (3.3) e (3.4).

$$\bar{x} = \frac{1}{\Gamma u_1^2} x_1 + \frac{1}{\Gamma u_2^2} x_2 \quad (3.3)$$

onde:

$$\Gamma = \left( \frac{1}{u_1^2} + \frac{1}{u_2^2} \right) \quad (3.4)$$

Por fim, nos casos onde são detectadas falhas simultaneamente em dois dos sensores, apenas a medição válida será levada em consideração, não realizando então nenhuma estimação. Já nos casos onde todas as medições forem consideradas como *outliers* em comparação ao histórico apresentado nos últimos ciclos, nenhuma das três medições será considerada válida. Estes cenários onde mais de uma falha são apresentadas não se mostrou presente durante as validações, porém visando tornar o sistema mais robusto e consistente,

estas medidas foram implementadas no código do microcontrolador para evitar oscilações ou medições inesperadas e incoerentes.

A última etapa realizada ainda em protoboard, antes da instalação do projeto no reservatório do LENHS, consistiu em disponibilizar as medições e estimação final de distância e de temperatura. Inicialmente através apenas de um display LCD 16x2 também controlado pelo microcontrolador ESP32, e posteriormente foi adicionado a publicação destas medições online, utilizando de ferramentas de IoT.

### 3.3 Aplicação de ferramentas de IoT

Com os avanços tecnológicos dos últimos anos, os sistemas de supervisão e monitoramento estão cada vez mais conectados. Uma função muito procurada é o monitoramento à distância, e para isto o campo da internet das coisas (IoT) fornece soluções de baixo custo, baixo consumo de energia e simples instalação e configuração.

Tendo em mãos o sistema de medição local funcionando, resta apenas fornecer estes dados à uma plataforma online para então poder acessar via internet. Escolheu-se trabalhar com o protocolo MQTT devido à sua simplicidade, bom desempenho e baixo consumo de energia, como foi discutido no capítulo anterior. Ao utilizar este protocolo, necessita-se de um *MQTT Broker*, responsável por receber as publicações de cada medição e por retornar estas informações aos clientes que se inscreverem em seus respectivos tópicos. Para fornecer o *Broker*, assim como a interface de visualização das medições, escolheu-se utilizar os serviços fornecidos pela empresa Ubidots, que permite que o usuário possua um painel de instrumentação próprio, editável e programável facilmente, que ligado ao protocolo MQTT é automaticamente inscrito aos tópicos de interesse e fornece uma visualização dos dados recebidos online.

O microcontrolador utilizado ESP32 possui módulos de conexão embarcados, para conexão via WiFi ou Bluetooth. A conexão à internet foi realizada através da biblioteca **WiFi.h**, que permite realizar esta conexão e possui funções importantes como a *WiFi.status()* responsável por retornar o status atual de conexão à internet. A aplicação do protocolo MQTT se deu através da biblioteca **PubSubClient.h** do Arduino, esta biblioteca permite criar uma instância chamada de cliente que é capaz de publicar mensagens dentro de tópicos e também é capaz de se inscrever em tópicos para receber atualizações.

A cada nova medição, uma variável do tipo *char* denominada 'topic' tem seu valor atualizado indicando que a informação a ser enviada parte do microcontrolador ESP32. Uma outra variável denominada 'payload' é atualizada para incluir o tipo de dado a ser transmitido, assim como o valor medido.

Para fins ilustrativos, supõe-se um exemplo onde se deseja medir apenas a tempe-

ratura e publicar esta medição utilizando o protocolo MQTT. O código apresentado na Figura 10 ilustra como as bibliotecas mencionadas são incluídas e aplicadas. Neste exemplo, o tópico indica que a informação parte do microcontrolador ESP32, sendo uma grandeza associada a uma medição de temperatura, através da variável *topic*, já a mensagem conduz a medição realizada, através da variável *payload*. A publicação é feita chamando a função **client.publish()** para o servidor definido no setup através da função **client.setServer()**.

Figura 10 – Exemplo de aplicação das bibliotecas utilizadas

```
#include <WiFi.h> // biblioteca para conexão WiFi
#include <PubSubClient.h> // biblioteca para comunicação MQTT
#define WIFISSID "Rede_WiFi" // credenciais da rede WiFi
#define PASSWORD "Senha"
WiFiClient ubidots; //
PubSubClient client(ubidots); // biblioteca utilizada no MQTT
char mqttBroker[] = "industrial.api.ubidots.com"; // MQTT Broker utilizado como servidor
char payload[100]; // variável utilizada para enviar mensagens ao servidor
char topic[150]; // tópico da mensagem a ser enviada

void setup() {
  WiFi.begin(WIFISSID, PASSWORD); // realiza a conexão à internet
  client.setServer(mqttBroker, 1883); // determina a porta à ser utilizada na comunicação
} // a porta 1883 é reservada para o protocolo MQTT

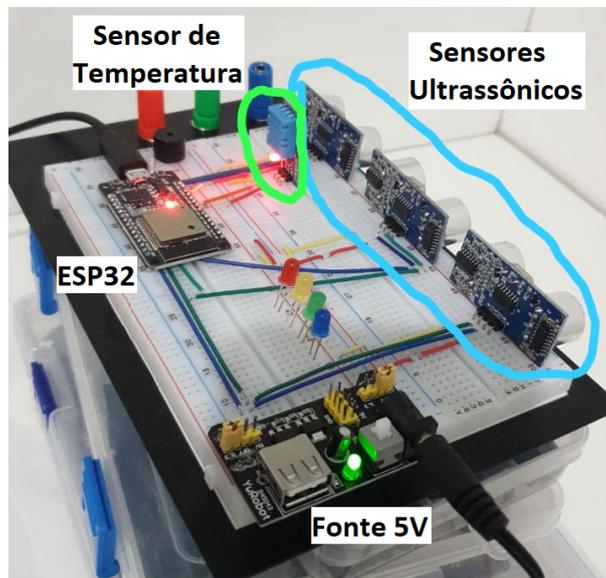
void loop() {
  t = medir_temperatura();
  sprintf(topic, "%s", "esp32\ntemperatura:"); // define o tópico da mensagem a ser enviada
  sprintf(payload, "{\"value\": %s}", t); // adiciona a medição no payload
  client.publish(topic, payload); // publica a informação do payload no tópico
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a implementação das ferramentas de IoT, o protótipo estava finalizado, a seção seguinte apresentará uma visão geral deste sistema.

### 3.4 Circuito Final

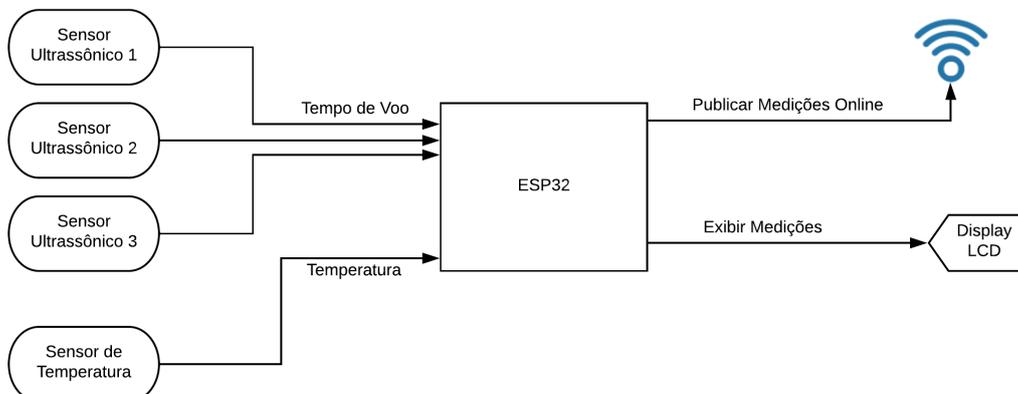
Figura 11 – Protótipo Final Pré-Instalação



Fonte: Elaborado pelo autor

A parte eletrônica do sistema é composta por três sensores ultrassônicos HC-SR04, um sensor de temperatura e umidade DHT11, um display LCD 16x2 e um microcontrolador ESP32. A ESP32 é conectada à internet para utilizar das ferramentas de IoT e este microcontrolador está programado através da IDE Arduino, o que significa dizer que após sua inicialização e configuração inicial, o sistema entra num ciclo de medição, exibição e postagem. O circuito final utilizado neste protótipo pode ser visto na Figura 11. Seu diagrama de funcionamento está ilustrado na Figura 12.

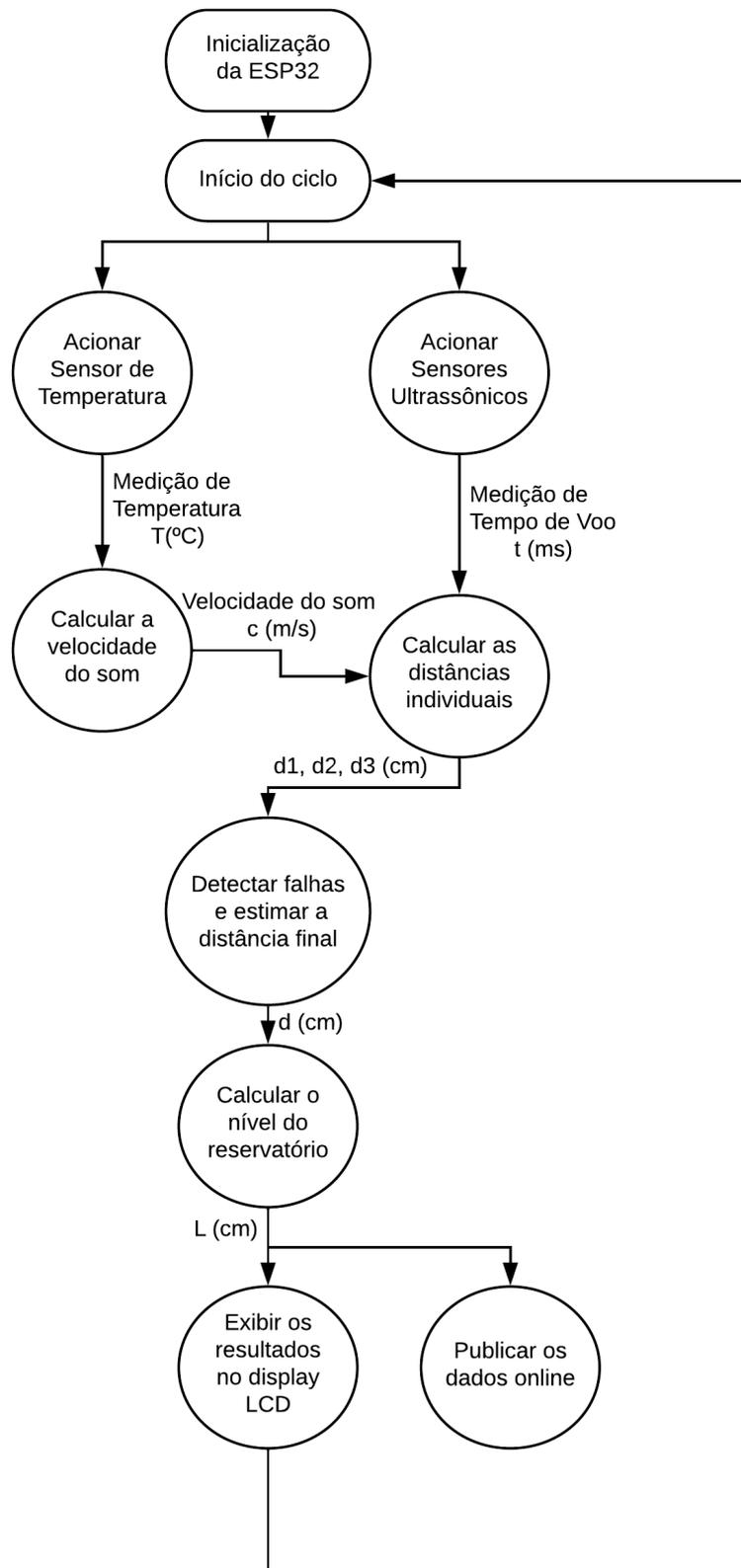
Figura 12 – Diagrama de Blocos do Sistema Proposto



Fonte: Elaborado pelo autor

O ciclo de funcionamento proposto consiste em acionar os dispositivos para realizar medições de tempo de vôo e temperatura, em seguida a velocidade do som é calculada através da equação (2.2) e aplicada juntamente ao tempo de vôo medido na equação (2.1) para encontrar as distâncias individuais entre cada sensor a superfície que refletiu as ondas ultrassônicas. Em seguida são aplicadas as técnicas de fusão de dados para detecção de falhas e estimação de máxima verossimilhança, que fornecem o valor final adotado para distância. Por fim, este valor final é exibido no display LCD e é também publicado utilizando o protocolo MQTT para acesso via internet. Este ciclo de funcionamento está ilustrado na Figura 13

Figura 13 – Ciclo de funcionamento do sistema desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5 Instalação no Reservatório

Na Figura 14 ilustra-se a etapa final do projeto consistiu em instalar os componentes eletrônicos no reservatório do LENHS, uma vez que o sistema montado em protoboard já possuía todas as funções inicialmente projetadas. O sistema proposto consiste de duas partes:

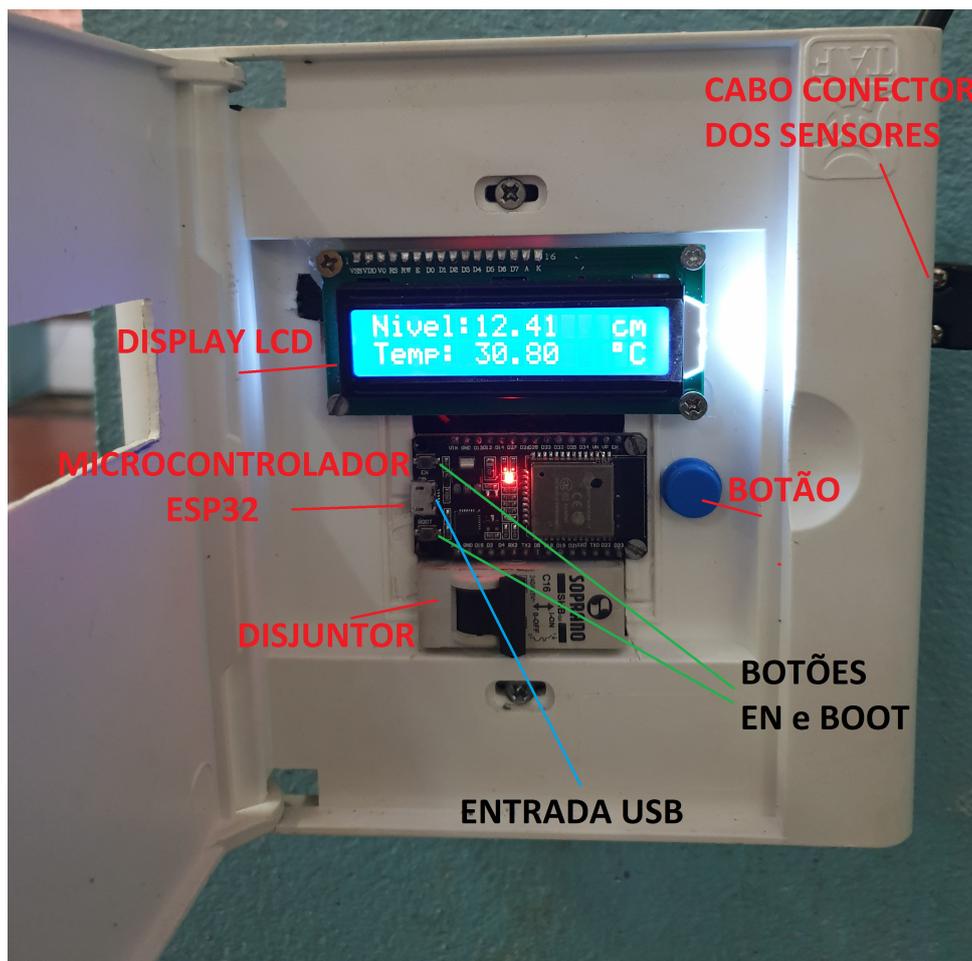
- **Host:** Um quadro de disjuntores foi adaptado para receber o microcontrolador ESP32, o display LCD 16x2, um botão e um disjuntor utilizado para energizar o sistema, como se ilustra na Figura 15;
- **Barra de Sensores:** Uma barra de alumínio de comprimento igual ao diâmetro do reservatório, onde foram fixados os sensores ultrassônicos e de temperatura, que foi fixada no topo do reservatório, como se ilustra na Figura 16.

Figura 14 – Instalação do Projeto



Fonte: Elaborado pelo autor

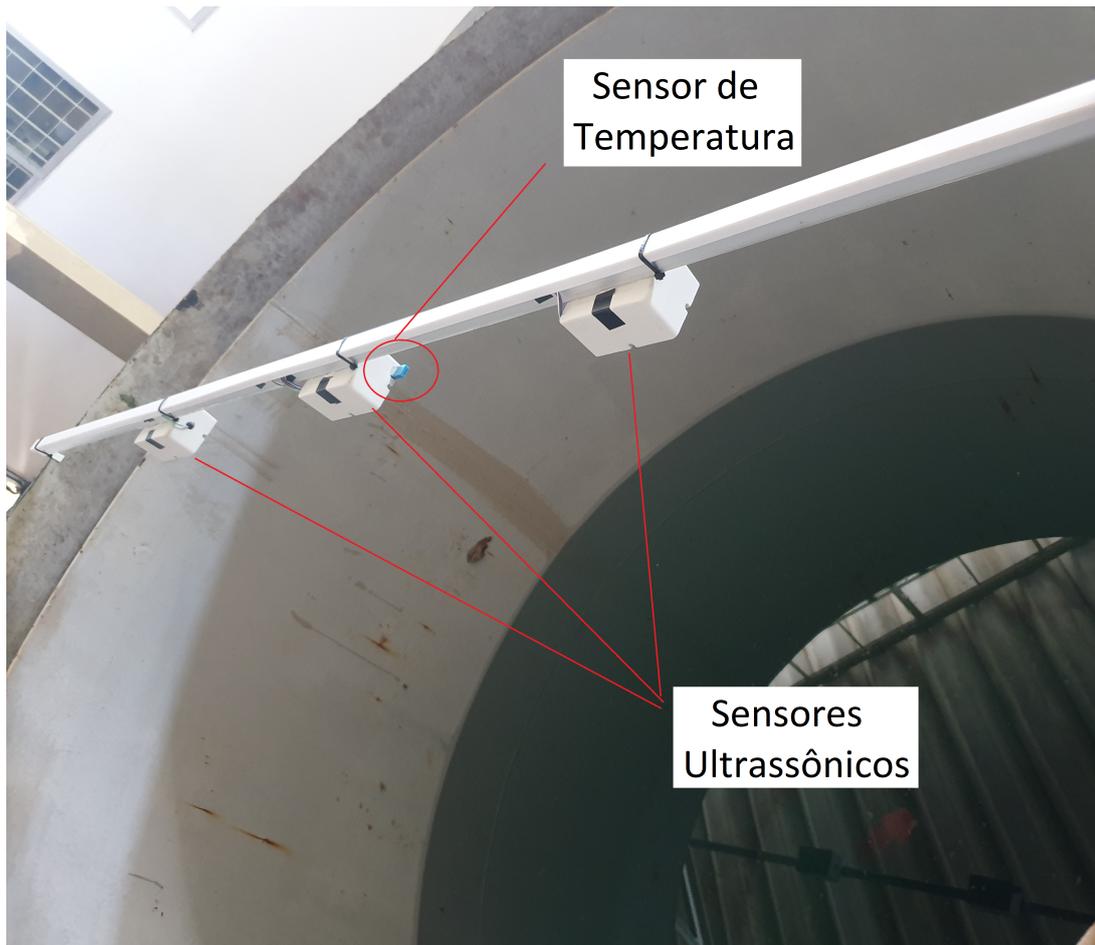
Figura 15 – Host em Detalhe



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dispositivos ultrassônicos foram inseridos dentro de pequenas caixas visando proteção e durabilidade, como visto na Figura 17. Estas caixas por sua vez foram parafusadas na barra de alumínio para posterior fixação no topo do reservatório, a barra pode ser vista na figura 16. Para realizar a conexão entre a barra de sensores e o host, um cabo de pares trançados (cabo manga) foi utilizado.

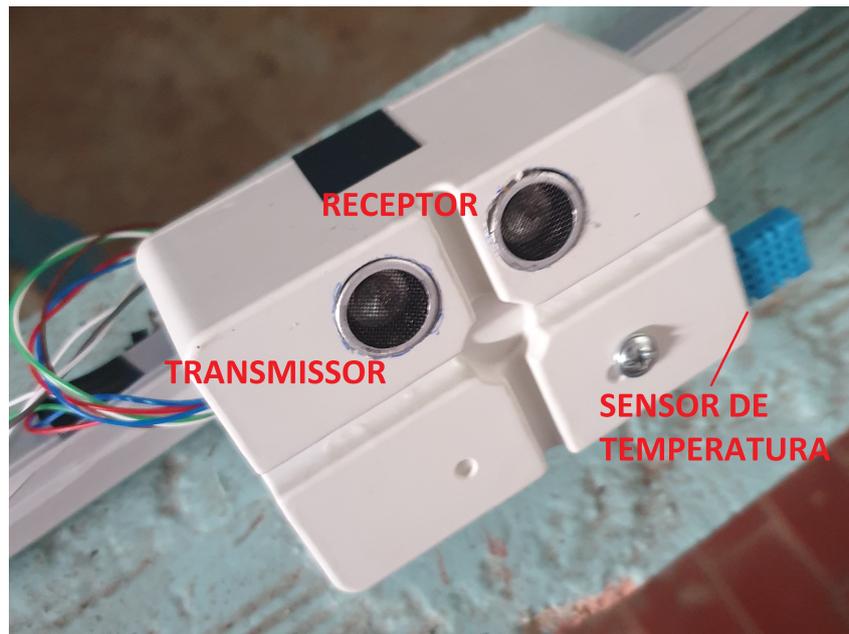
Figura 16 – Barra de Sensores



Fonte: Elaborado pelo autor

O host fixo à parede próxima ao reservatório está detalhado na Figura 15. A instalação completa pode ser observada na Figura 14. Uma visão mais ampla do laboratório foi apresentada na Figura 1.

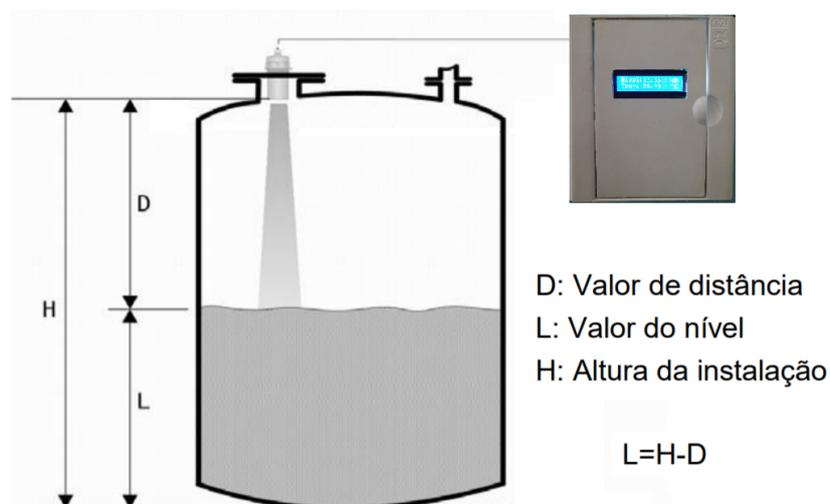
Figura 17 – Isolamento dos Sensores em Detalhe



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a confecção e instalação dos componentes utilizados, se iniciou a etapa final do projeto: medição de nível. Para realizar a medição de nível, inicialmente mediu-se a altura do reservatório, através da trena digital, em seguida encontra-se o nível de água dentro do reservatório através da diferença entre esta altura e a distância medida entre os sensores e a superfície da água, como descrito na Figura 18.

Figura 18 – Princípio de Funcionamento do Sistema de Medição de Nível



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4 Resultados

Neste capítulo serão expostos os resultados do trabalho, em detalhes. Iniciando pelos testes de validação dos sensores ultrassônicos e dando continuidade nos procedimentos descritos no capítulo anterior para fusão de dados e finalização do protótipo, por fim serão descritos os resultados obtidos para exibição local e online das medições.

### 4.1 Validação dos Sensores

O primeiro passo na validação dos sensores consistiu em identificar suas respectivas incertezas. Para tal, os dispositivos foram posicionados de acordo com a configuração descrita na Figura 9, explicada no capítulo anterior, e permaneceram imóveis coletando medições de tempo de vôo durante nove testes. As medições foram salvas em arquivos de registro, posteriormente analisados através do software MatLAB. Os resultados obtidos durante os testes 1 e 8 dentre os nove descritos na seção anterior estão expostos na Tabela 3.

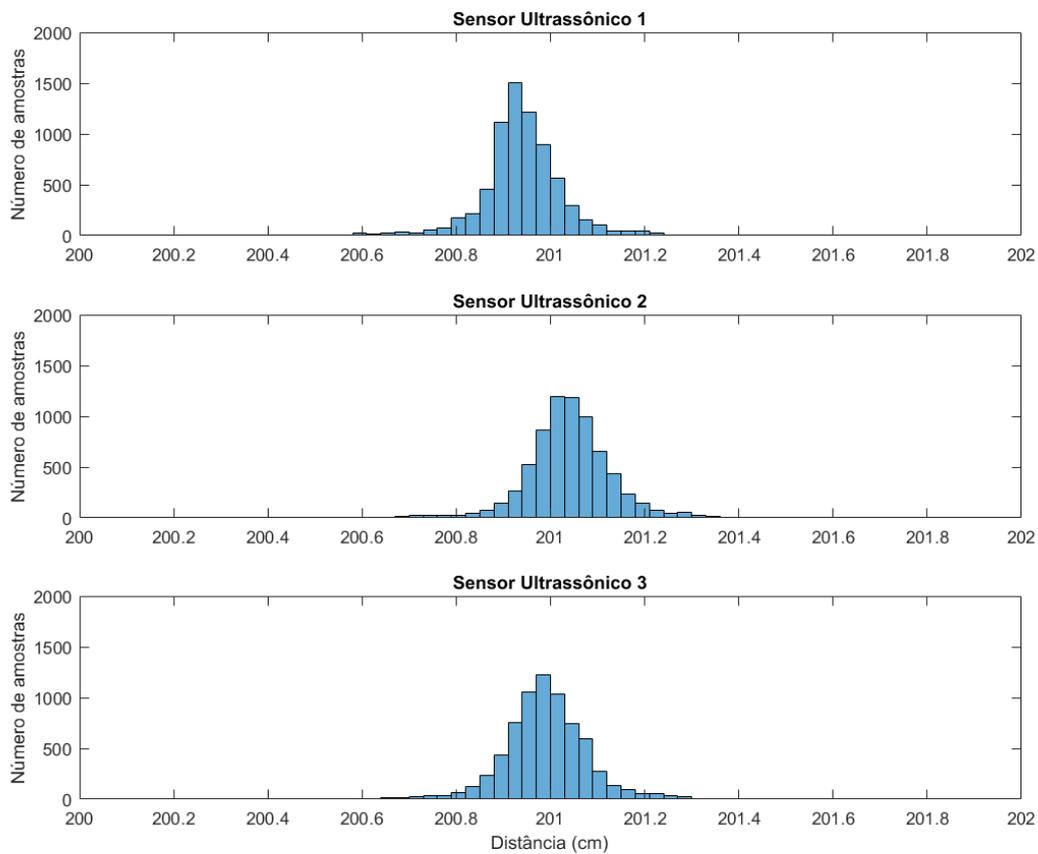
Tabela 3 – Medições Realizadas Para a Validação dos Sensores

Teste	Sensor	Incerteza Indicada no Datasheet	Número de Medições	Média (cm)	Desvio Padrão (cm)
1	Ultrassônico 1	$\pm 3mm$	5618	51,934	0,1012
	Ultrassônico 2	$\pm 3mm$	5618	51,953	0,1046
	Ultrassônico 3	$\pm 3mm$	5618	51,947	0,1039
	Trena digital (laser)	$\pm 1,5mm$	15	51,969	0,1159
8	Ultrassônico 1	$\pm 3mm$	8424	302,981	0,2194
	Ultrassônico 2	$\pm 3mm$	8424	302,620	0,2301
	Ultrassônico 3	$\pm 3mm$	8424	302,168	0,2253
	Trena digital (laser)	$\pm 1,5mm$	23	302,812	0,1172

Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se que os sensores ultrassônicos apresentam melhor desempenho em curtas distâncias, porém mesmo trabalhando próximo ao seu limite de alcance (4 metros) o desvio padrão apresentado foi abaixo do esperado, indicado no datasheet do sensor. Os histogramas individuais obtidos durante o teste 1 estão ilustrados na Figura 19.

Figura 19 – Histogramas Individuais dos Três Sensores Ultrassônicos

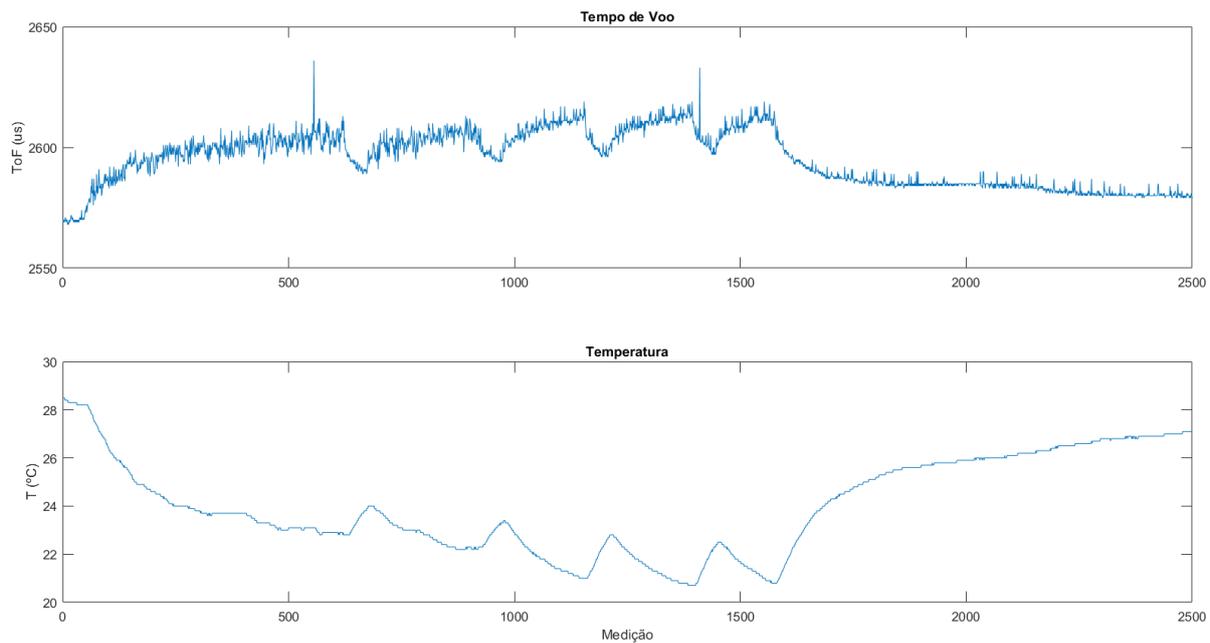


Fonte: Elaborado pelo autor

Após validar seus limites de alcance e a incerteza de cada sensor, os dados coletados foram utilizados para observar o impacto causado pela falta de correção da velocidade do som por temperatura. Os sensores HC-SR04 não realizam esta correção automaticamente, é então necessário a inserção de um sensor de temperatura para tornar possível o cálculo da velocidade do som corrigida. A Figura 20 ilustra as medições realizadas durante um trecho do teste de validação, onde o sistema estava localizado num cômodo fechado e um aparelho de ar-condicionado fez a temperatura variar.

A primeira curva apresenta o tempo de vôo medido por um dos sensores ultrassônicos, e a segunda curva apresenta a temperatura medida pelo sensor DHT11. Percebe-se que no início o ambiente estava na temperatura máxima medida,  $28,5^{\circ}\text{C}$ , e a temperatura mínima observada foi de  $20,7^{\circ}\text{C}$ . O sistema estava posicionado numa distância fixa durante todo o processo.

Figura 20 – Medições de Tempo de Voo

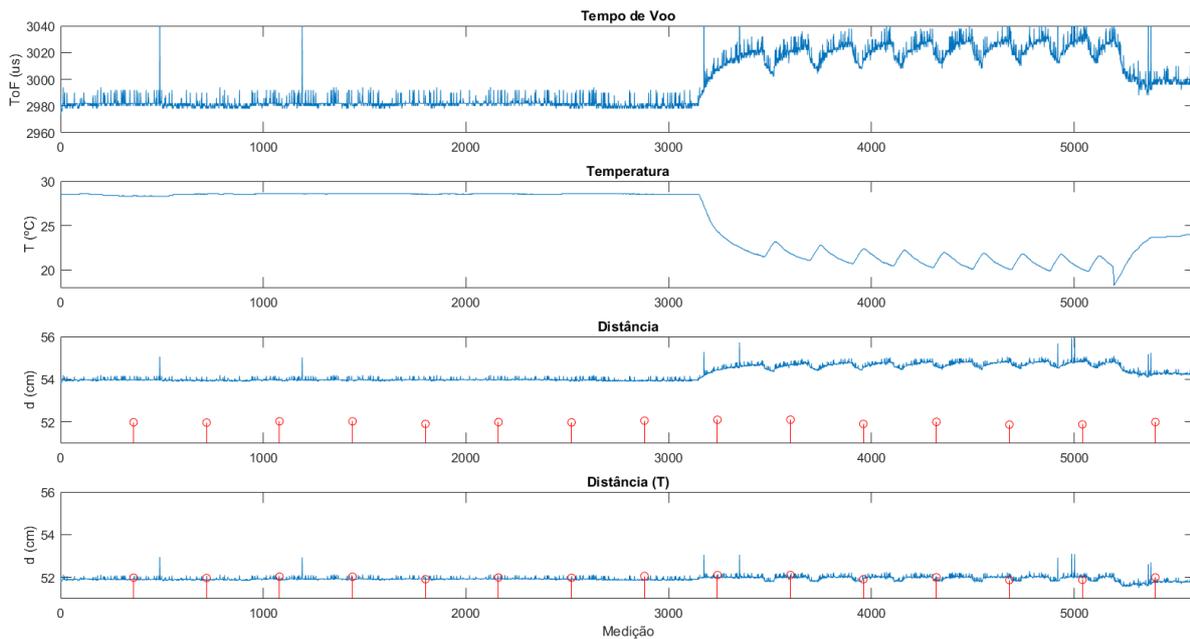


Fonte: Elaborado pelo autor

Vale ressaltar que as medições ilustradas nas duas curvas são independentes e de fontes distintas. O sensor HC-SR04 não realiza correção da velocidade do som por temperatura automaticamente, portanto a distância informada pelo sensor depende apenas do tempo de voo medido. Porém percebe-se nesta figura que as medições variaram consideravelmente, de uma mínima registrada em  $2569 \mu s$  até uma máxima considerada de  $2619 \mu s$ , desconsiderando os *outliers*, o que representa uma variação de 2% não corrigida pelo sensor. Quando se leva a temperatura em consideração, percebe-se que a diferença entre a distância estimada pelo sensor e a distância calculada através da correção por temperatura chega a atingir 5,8%, num cenário onde a distância não foi alterada e as medições deveriam ser constantes.

Visando demonstrar melhor o impacto causado pela falta de correção por temperatura, a Figura 21 apresenta um trecho dos testes onde a temperatura permaneceu constante durante boa parte do experimento, em seguida o aparelho de ar-condicionado foi ligado para resfriar o ambiente.

Figura 21 – Dados coletados durante teste de validação



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta figura, a primeira curva apresenta o tempo de vôo medido pelo sensor ultrassônico HC-SR04, a segunda apresenta a temperatura medida pelo sensor de temperatura e humidade DHT11, a terceira curva apresenta a distância estimada pelo sensor HC-SR04 e a quarta curva apresenta a distância encontrada ao corrigir a velocidade do som de acordo com a temperatura. Nos dois últimos gráficos estão inclusas também as medições da trena digital, em vermelho, que servem de referência para a distância real entre os sensores e a parede.

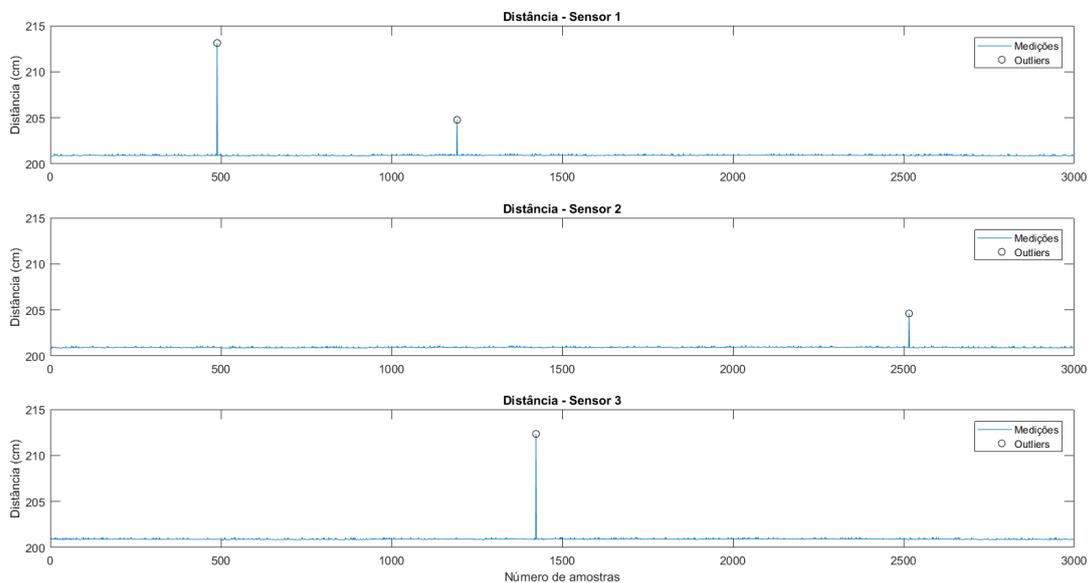
Observa-se que ao se adotar a velocidade do som constante as estimações de distância varia consideravelmente com a variação de temperatura, porém ao se realizar a correção por temperatura as estimações de distância permanecem quase constantes, muito próxima às fornecidas através da trena digital. Como era esperado, quando a temperatura permanece constante as medições possuem melhor resultado, isto pode ser explicado pois o sensor de temperatura utilizado possui incerteza de 1°C e não possui resposta rápida à variação de temperatura. Isto porém não afetará a aplicação no reservatório do laboratório visto que a temperatura interna do reservatório deverá variar lentamente ao longo do dia.

Após realizada a correção por temperatura, o próximo passo consiste em aplicar as técnicas de fusão de dados para detecção de falhas e algoritmos de estimação para prover melhor estimação da distância.

## 4.2 Fusão de Dados

Como pode ser visto na Figura 21, constata-se que durante os testes houve a presença de alguns *outliers*, que caso não sejam detectados podem distorcer a estimação de distância final e prover uma medição errônea. Logo, visando identificar este tipo de falha, aplicou-se através da fusão de dados um algoritmo que compara as medições mais recentes de cada sensor entre eles e também compara com as últimas medições registradas, se houverem. Este algoritmo compara os valores através de sua distância euclidiana, e nos casos onde esta distância supere um limite pré-definido, a medição distante das demais é considerada um *outlier*. Um exemplo de aplicação está ilustrado na Figura 22, onde este algoritmo foi aplicado em um dos testes coletados para validação.

Figura 22 – Medições coletadas durante o sétimo teste



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos foram satisfatórios na identificação de *outliers*, que juntamente à detecção de falhas por medição fora do intervalo tornam o sistema mais robusto e confiável. Quando uma falha é detectada, esta medição é em seguida ignorada no procedimento de estimação da distância final, que é o próximo passo no sistema de medição.

O objetivo ao utilizar a técnica de fusão de dados para aplicar o algoritmo de estimação por máxima verossimilhança (MLE) é obter uma melhor aproximação da distância real entre os sensores e a superfície da água dentro do reservatório, isto é, uma medição com menor incerteza.

Tabela 4 – Resultados do Algoritmo de MLE

<b>Teste</b>	<b>Fonte</b>	<b>Número de Amostras</b>	<b>Média (cm)</b>	<b>Desvio Padrão (cm)</b>
4	Sensor 1	6433	20,4847	0,1032
	Sensor 2		20,6512	0,1038
	Sensor 3		20,9831	0,1041
	Estimação (MLE)		20,6856	0,0619
6	Sensor 1	7091	200,9421	0,1759
	Sensor 2		201,0421	0,1787
	Sensor 3		200,9922	0,1787
	Estimação (MLE)		200,9916	0,1026
9	Sensor 1	5983	350,9364	0,1973
	Sensor 2		350,9533	0,1949
	Sensor 3		350,9486	0,1837
	Estimação (MLE)		350,9463	0,1107

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 4 ilustra os resultados obtidos após aplicar o algoritmo nas medições coletadas durante os testes de validação. Pode-se perceber que a incerteza provida pelo algoritmo de estimação é consideravelmente menor que qualquer incerteza individual daquele teste. Como foi observado anteriormente, os sensores ultrassônicos HC-SR04 apresentam melhores resultados para menores distâncias, porém percebeu-se após a aplicação do algoritmo de MLE que independentemente da distância entre sensores e superfície refletora, o algoritmo diminuiu o desvio padrão em cerca de 40% quando comparado às medições individuais de cada sensor. No último teste pode-se observar da tabela que o sensor com melhor desempenho apresentou desvio padrão de 0,1837 cm, onde a estimação final do algoritmo MLE apresentou um desvio padrão de 0,1107 cm, uma melhora de 39,74%.

### 4.3 Medição de Nível

Após validação do funcionamento do sistema em protoboard, a instalação no reservatório do laboratório pôs o sistema em sua fase final de funcionamento. Sabe-se que as paredes internas do reservatório podem ecoar as ondas ultrassônicas e interferir nas medições, por isto os sensores foram posicionados no centro da barra de alumínio, consequentemente ao centro do reservatório, como pode ser visto na figura 23.

Figura 23 – Sensores Instalados no Reservatório



Fonte: Elaborado pelo autor

De imediato o primeiro teste consistiu em validar o alcance dos sensores no cenário onde o reservatório encontra-se vazio. Todos os três indicaram medições coerentes em torno de 357 cm. Após validar com auxílio da trena digital, concluiu-se que a barra de sensores instalada estava de fato 7 centímetros acima do nível máximo do reservatório, o que impede os sensores de afogarem em um cenário onde o reservatório transborda.

Visto que o sistema utiliza sensores que funcionam através do princípio de tempo de voo, a frequência de amostragem se limita ao tempo necessário para cada sensor ultrassônico medir sua distância máxima, o sensor de temperatura e umidade medir a temperatura interna do reservatório e por fim o microcontrolador efetuar o processamento destas informações e aplicação dos algoritmos descritos anteriormente. Constatou-se que no pior caso o período de cada ciclo pode chegar à 1 segundo, isto é, a frequência de amostragem poderia chegar a até 1 Hz.

Após discutir com os professores do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), que utilizarão deste sistema para suas futuras aplicações, concluiu-se que não seria necessário aplicar a frequência de amostragem no limite, visto que este é um reservatório de grande porte para o escopo do laboratório, variando então lentamente seu nível, e que as medições não seriam utilizadas para estimação de fluxo de

entrada ou saída de água do reservatório, portanto fixou-se uma frequência de amostragem de 0,2 Hz, isto é, o ciclo de medição  $g$  se repete a cada 5 segundos.

Tendo isso em mente, as últimas alterações no código implementado foram realizadas e o projeto do ponto de vista de medição encontra-se concluído. Para consolidar o sistema resta apenas tratar a exibição destas medições, para isto foram fornecidas duas opções para o usuário: observar o nível e temperatura atual do reservatório a cada nova medição, disponível no display LCD do host (fig. 24, ou observar e possivelmente armazenar os dados publicados na rede através da interface Ubidots.

Figura 24 – Host em Funcionamento

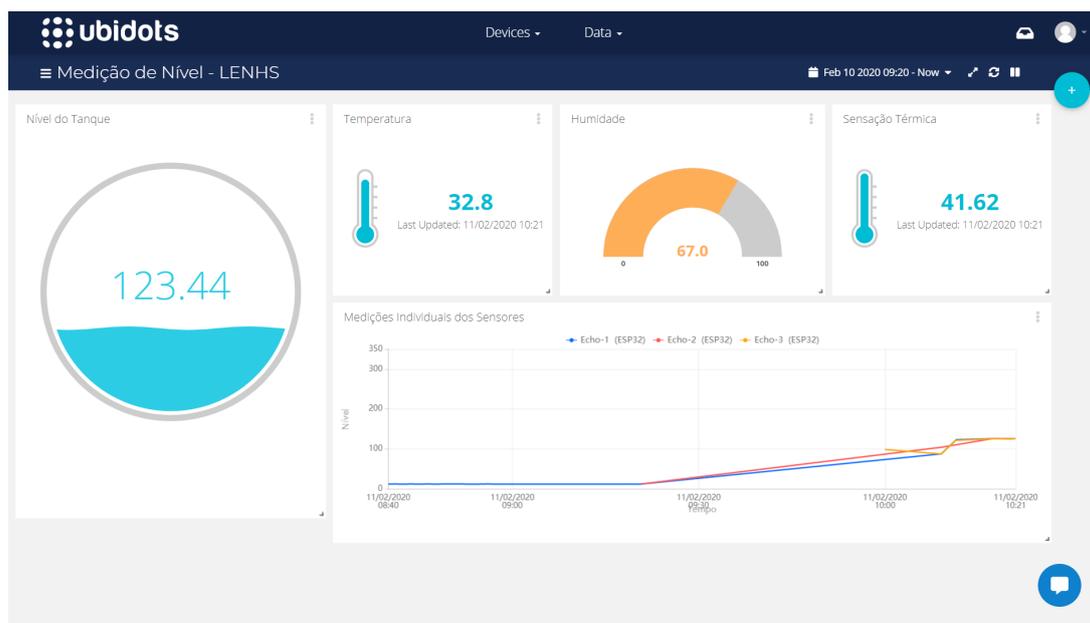


Fonte: Elaborado pelo autor

Para ter acesso ao painel de instrumentação programado durante o desenvolvimento deste trabalho, o usuário necessita acessar o site <[www.ubidots.com](http://www.ubidots.com)>, cadastrar-se gratuitamente e então utilizar seu login para acessar o link específico desta aplicação. Este link de acesso estará disponível no site do laboratório e se manterá atualizado pelos professores e técnicos do LENHS.

Também é possível acessar via smartphone o mesmo painel de instrumentação, através do aplicativo 'Ubidots', atualmente disponível para iOS e Android, onde o usuário necessitará da mesma forma de um cadastro que pode ser feito gratuitamente, e do link de acesso deste painel.

Figura 25 – Painel de Instrumentação Utilizado no Sistema



Fonte: Elaborado pelo autor

O painel visto através de um navegador de internet está ilustrado na figura 25, onde pode-se observar o nível atual do tanque, assim como sua temperatura, humidade e sensação térmica (medições fornecidas pelo sensor DHT11), também é disponibilizado um gráfico com as medições individuais de cada um dos 3 sensores realizadas nas últimas duas horas. Este painel permite o armazenamento das medições realizadas, possibilitando também o acesso e *download* das medições antigas presentes no histórico.

Um manual do usuário será disponibilizado no laboratório com instruções para realização de todos os procedimentos de utilização do sistema, desde sua inicialização até o acesso online aos dados e armazenamento deles.

## 5 Considerações finais

Neste trabalho foi desenvolvida uma aplicação de técnicas de fusão de dados e ferramentas de IoT através de um sistema de medição de nível, implementado no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). O objetivo permaneceu concentrado em utilizar das técnicas e ferramentas citadas para demonstrar sua efetividade, assim como prover um sistema que auxiliará a imersão do laboratório no patamar tecnológico da indústria 4.0, através da utilização de sistemas inteligentes e aplicação do campo da internet das coisas.

Diante do que foi proposto, foram utilizados algoritmos de estimação através da fusão de dados de sensores redundantes. Esta fusão de dados possibilitou a detecção de falhas nos sensores, técnica de extrema importância para evitar medições errôneas ou dependência do bom funcionamento de um único sensor na planta. Além da detecção de falhas realizada com sucesso, as técnicas implementadas apresentaram melhorias em torno de 40% no desvio padrão da estimação quando comparado às medições individuais dos sensores. Portanto conclui-se que um resultado excelente foi obtido, justificando a aplicação destas técnicas e comprovando a eficácia desta abordagem.

O LENHS está constantemente evoluindo tecnologicamente visando se manter atualizado para seus alunos e beneficiários desfrutarem de ferramentas cada vez mais tecnológicas, provendo confiabilidade e segurança em suas aplicações, assim como preparando os futuros engenheiros para a indústria 4.0. Através das ferramentas de internet das coisas (IoT), o trabalho realizado foi de extrema importância para possibilitar a interconexão deste reservatório a um projeto maior de um sistema de supervisório do laboratório, conectado à rede, previamente carente destes dados.

O reservatório utilizado é conectado ao sistema de tubulação do laboratório, sistema este que é comandado desde a sala de controle. Este trabalho ao fornecer medições de nível do reservatório possibilitou o fechamento do ciclo de controle (feedback), onde anteriormente qualquer controle de nível deveria ser realizado em malha aberta.

Finalmente, cabe destacar que este trabalho de conclusão de curso encontra-se enquadrado nas atividades do projeto intitulado: 'Núcleo de Excelência em Internet das Coisas', suportado pelo Programa de Apoio a Núcleos de Excelência EDITAL 006/2018 - PRONEX 2018/FAPESQPB/CNPQ.

## 6 Referências bibliográficas

- [1] **SMAR**. Disponível em: <<http://www.smar.com.br>>. Acesso em: 30 nov. 2019.
- [2] Yamada K, Honda H, Horiuchi S e Kinai T **Liquid-level sensing by trapped-energy-mode thickness vibration**. Japanese Journal of Applied Physics, 48 07GB08, 2009.
- [3] PEREIRA, B. **Aplicação da instrumentação no controle de nível**.
- [4] **ICOS**. Disponível em: <<http://icos.blog.br/sensor-de-nivel-o-que-e/>>. Acesso em: 30 nov. 2019.
- [5] Loizou K e Koutroulis E **Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system** Measurement. 89 04-214, 2016.
- [6] Kalidoss R, Praniha R, Raveena P e Revathy C **Petrol level indicator with automated audio alert system in Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)**. 2017 International Conference, pp. 537-539, 2017.
- [7] Antunes P, Dias J, Paixão T, Mesquita E, Varum H e André P **Liquid level gauge based in plastic optical fiber** Measurement. 66 238-243, 2015.
- [8] Zhang B, Wei Y J, Liu Y J, Zhang Y J, Yao Z, Zhao L H and Xiong J J **A liquid level measurement technique outside a sealed metal container based on ultrasonic impedance and echo energy** Sensors. 17 185, 2017.
- [9] Terzic J, Nagarajah C e Alamgir M **Fluid level measurement in dynamic environments using a single ultrasonic sensor and Support Vector Machine (SVM)** Sensors and Actuators A: Physical. 161 278-287, 2010.
- [10] Li P, Cai Y, Shen X, Nabuzaale S, Yin J e Li J **An accurate detection for dynamic liquid level based on MIMO ultrasonic transducer array** IEEE Transactions

on Instrumentation and Measurement. 64 582-595.

[11] Sakharov V, Kuznetsov S, Zaitsev B, Kuznetsova I e Joshi S **Liquid level sensor using ultrasonic Lamb waves** *Ultrasonics*. 41 319-322, 2003.

[12] Nikolov G e Nikolova B **Virtual techniques for liquid level monitoring using differential pressure sensors**. 9 49-54, 2008.

[13] Shim J **Liquid level measurement system using capacitive sensor and optical sensor** *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*. 37 778-783, 2013.

[14] Pozo A M, Pérez-Ocón F e Rabaza O **A continuous liquid-level sensor for fuel tanks based on surface plasmon resonance** *Sensors*. 16 724, 2016.

[15] Kumar B, Rajita G e Mandal N **A review on capacitive-type sensor for measurement of height of liquid level** *Measurement and Control*. 47 219-224, 2014.

[16] Dunn W C **Introduction to instrumentation, sensors and process control**. Artech House, 2006.

[17] Jeny Rajan et al **Maximum likelihood estimation-based denoising of magnetic resonance images using restricted local neighborhoods**. *Phys. Med. Biol.* 56 5221, 2011.

[18] Hangtian Qi and Xiaolin Zhang **Research on Two Types of Estimation Algorithms in Carrier Tracking Loop**. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1325 012113, 2019.

[19] Martin Carolan et al **An MLE method for finding LKB NTCP model parameters using Monte Carlo uncertainty estimates**. *J. Phys.: Conf. Ser.* 489 012087, 2014.

[20] **What is an Ultrasonic Sensor?**. Disponível em: <<https://www.keyence.com/ultrasonic/info/>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

- [21] **Understanding How Ultrasonic Sensors Work**. Disponível em: <<https://www.maxbotix.com/articles/how-ultrasonic-sensors-work.htm>>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- [22] **The Speed Of Sound**. Disponível em: <<https://www.mathpages.com/home/kmath109/kmath109.htm>>. Acesso em: 30 abr. 2019.
- [23] Haghighat, Mohammad; Abdel-Mottaleb, Mohamed; Alhalabi, Wadee **Discriminant Correlation Analysis: Real-Time Feature Level Fusion for Multimodal Biometric Recognition**. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2016.
- [24] F. Kousar, M. Abid, A. Q. Khan **Sensor Fault Detection in Coupled Liquid Tank System**. 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, 2012.
- [25] Yasser M. Madany, El-Sayed A. El-Badawy, Adel M. Soliman **Fault Detection Prediction Analysis of Multi-Sensor Data Fusion Architecture and Isolation Using Pseudo Sensor Enhancement Method (PSEM)**. 7th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, 2016.
- [26] Luiz G. S. Bezerra, Daniel L. Martins, Adrião D. Dória Neto, Jorge D. Melo **Detecção e Diagnóstico de Falhas em Sensores de Uma Rede Industrial Foundation Fieldbus Utilizando Sistemas Inteligentes**. UFRN.
- [27] Rossi, Richard J. **Mathematical Statistics : An Introduction to Likelihood Based Inference**. New York: John Wiley & Sons. p. 227, 2018.
- [28] Chambers, Raymond L.; Steel, David G.; Wang, Suojin; Welsh, Alan **Maximum Likelihood Estimation for Sample Surveys**. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [29] Yi Qi et al. **A fast Maximum Likelihood Estimation algorithm for demodulating Fiber White-Light Interferometry**. J. Phys.: Conf. Ser, 2018.
- [30] Hall, David L.; Llinas, James **An introduction to multisensor data fusion**.

Proceedings of the IEEE. 85 (1): 6–23, 1997.

[31] Elmenreich, W. **Sensor Fusion in Time-Triggered Systems**. Vienna University of Technology. p. 173, 2002.

[32] Haghghat, Mohammad Bagher Akbari; Aghagolzadeh, Ali; Seyedarabi, Hadi **Multi-focus image fusion for visual sensor networks in DCT domain**. Computers & Electrical Engineering. 37 (5): 789–797, 2011.

[33] Zhiliang Xiao **A Comparative Study on the Architecture Internet of Things and its' Implementation method**. IOP Conf. Ser.: Earth Environ, Volume 81, conference 1, 2017.

[34] **MQTT Protocol**. Disponível em: <<http://mqtt.org/>>. Acesso em: 30 nov. 2019.

[35] **What is IoT and how does it work?**. Disponível em: <<https://internetofthingsagenda.techtarget.com>>. Acesso em: 30 nov. 2019.

[36] Y Syafarinda et al **The Precision Agriculture Based on Wireless Sensor Network with MQTT Protocol**. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci, 2018.

[37] M V Masdani e D Darlis **A comprehensive study on MQTT as a low power protocol for internet of things application**. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2018.

[38] **Ubidots - About Us**. Disponível em: <<https://ubidots.com/about/>>. Acesso em: 30 nov. 2019.

[39] Lampkin V et al. **Building smarter planet solutions with MQTT and IBM WebSphere MQ telemetry**. IBM, ITSO, 2012.

[40] Colitti W, Steenhaut K, De Caro N **Integrating Wireless Sensor Networks with the Web Proc. IP+SN**. Chicago, 2011.

[41] Vergara E J, Prihodko M, Nadjm-Tehrani S **Mobile Location Sharing: An Energy**

**Consumption Study e-Energy.** pp 289-290, 2013.

[42] De Caro N, Colitti W, Steenhaut K, Mangino G, Reali G **Comparison of Two Lightweight Protocols for Smartphone-based Sensing.** IEEE 20th SCVT, pp. 1-6, 2013.

[43] **Industrial Internet of Things.** Disponível em:  
<<https://punetechnol.com/blogs/iiot-and-automation>>. Acesso em: 5 dez. 2019.

[44] Anton, Howard **Elementary Linear Algebra (7th ed.)**. John Wiley & Sons, pp. 170–171, 1994.