



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**TRANSMISSÃO IOT E SISTEMA FUZZY PARA DETECÇÃO DOS NÍVEIS DE
INTERFERÊNCIA EM SENSORES DE TEMPERATURA AFETADOS PELA
FORMAÇÃO DE BIOFILME**

TATIANE FERRAZ BALBINOT

DM 05/2024

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TATIANE FERRAZ BALBINOT

**TRANSMISSÃO IOT E SISTEMA FUZZY PARA DETECÇÃO DOS NÍVEIS DE
INTERFERÊNCIA EM SENSORES DE TEMPERATURA AFETADOS PELA
FORMAÇÃO DE BIOFILME**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Computação Aplicada.

Orientadora: Prof^a Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Rommel Thiago Jucá Ramos

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

F368t Ferraz Balbinot, Tatiane.
Transmissão IoT e Sistema Fuzzy Para Detecção dos
Níveis de Interferência em Sensores de Temperatura
Afetados Pela Formação de Biofilme / Tatiane Ferraz
Balbinot. — 2024.
XV, 48 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Jasmine Priscyla Leite de
Araújo
Coorientador(a): Prof. Dr. Rommel Thiago Jucá Ramos
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2024.

1. Biofilme. 2. Sensor de Temperatura. 3.
Manutenção Preditiva. 4. IoT. 5. Fuzzy. I. Título.

CDD 384

“TRANSMISSÃO IOT E SISTEMA FUZZY PARA DETECÇÃO DOS NÍVEIS DE INTERFERÊNCIA EM SENSORES DE TEMPERATURA AFETADOS PELA FORMAÇÃO DE BIOFILME”

AUTORA: **TATIANE FERRAZ BALBINOT**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 28/02/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Jasmine Priscyla Leite de Araújo
(Orientadora – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros
(Avaliador Interno – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Rommel Thiago Jucá Ramos
(Avaliador Externo ao Programa – ICB/UFPA)

Prof.^a Dr.^a Leslye Estefânia Castro Eras
(Avaliadora Externa – UNIFESSPA)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

À jornada que se desenha nas linhas destas páginas, dedico o suspiro da alma que encontra nas palavras o eco de seus sonhos. Que cada letra seja um passo, cada vírgula uma pausa para contemplação, e que o resultado seja a celebração do esforço, da busca incessante pela verdade e da beleza que se revela no caminho da descoberta.

À ciência...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, cuja orientação e força foram fundamentais ao longo dessa jornada acadêmica. Sua sabedoria e graça proporcionaram o discernimento necessário para enfrentar os desafios e superar os obstáculos encontrados durante todo o processo de pesquisa. Que minha dedicação e empenho neste trabalho possam glorificar Seu nome e servir como testemunho de Sua bondade e fidelidade em minha vida. Aos meus pais, Ivanir Balbinot e Neuza Ferraz Balbinot e irmão Bruno Ferraz Balbinot, pelo apoio moral e incentivo.

Agradeço à sabedoria que se entrelaça com cada linha destas palavras, à jornada do pensamento que se revela nas páginas deste trabalho. A gratidão se estende às mentes que inspiraram meu caminhar, aos mestres que iluminaram a escuridão do desconhecido: Professora Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araújo, Professor Dr. Fabrício José Brito Barros e ao Professor Rommel Thiago Jucá Ramos.

Aos questionamentos que forjaram a força das ideias, às dúvidas que se transformaram em portais para novos entendimentos. Agradeço à paciência do tempo, que permitiu a maturação das ideias, e à resiliência da mente, que persistiu diante dos desafios intelectuais. Cada obstáculo, uma pedra preciosa lapidando o brilho do conhecimento.

A expressão perene da minha gratidão se estende a um notável ser humano, meu estimado amigo Wilson Cosmo, que incansavelmente me incentivou em cada passo dessa jornada, jamais permitindo que eu cedesse diante dos desafios.

Assim, com gratidão profunda e a consciência de que este é apenas um pequeno elo na corrente do conhecimento, encerro esta jornada, abraçando a incerteza do amanhã, ciente de que a busca pelo entendimento é uma jornada sem fim. Que este trabalho seja um tributo à busca incessante pelo saber, à dança eterna entre a mente e o universo.

*“A ciência é muito mais do que um corpo de conhecimento.
É uma maneira de pensar”. (Carl Sagan)*

RESUMO

O desenvolvimento de biofilme na superfície dos sensores em contato prolongado com a água pode acarretar na coleta de dados inconsistentes e até mesmo no desgaste do equipamento. Por isso o monitoramento constante dos equipamentos se torna necessário, e para manter a integridade dos dados a manutenção preditiva é fundamental. Diante deste cenário a IoT (*Internet of Things*) e suas aplicações se apresentam como uma das alternativas viáveis para o envio de dados em tempo real, pois ela apresenta soluções de comunicação distribuídas, de menor custo e fácil acesso por seus usuários. Este estudo analisa os dados dos sensores de temperatura armazenados na nuvem através de cálculos estatísticos. A partir destas análises são definidos os limiares do sistema *Fuzzy* desenvolvido que indicará a necessidade de limpeza dos sensores de acordo com o nível de ruído gerado pela presença de biofilme, para que se mantenha a integridade dos dados coletados.

Palavras chave: Biofilme, Sensor de Temperatura, Manutenção Preditiva, IoT, Fuzzy

ABSTRACT

The development of biofilm on the surface of sensors in prolonged contact with water can result in inconsistent data collection and even equipment wear. Therefore, constant monitoring of the equipment becomes necessary, and for maintaining data integrity, predictive maintenance is essential. In this scenario, the Internet of Things (IoT) and its applications emerge as one of the viable alternatives for real-time data transmission, as it offers distributed communication solutions, lower costs, and easy access for users. This study analyzes temperature sensor data stored in the cloud through statistical calculations. Based on these analyses, the thresholds of the developed Fuzzy system are defined, indicating the need for sensor cleaning according to the noise level generated by the presence of biofilm, to maintain the integrity of the collected data.

Keywords: Biofilm, Temperature Sensor, Predictive Maintenance, IoT, Fuzzy

LISTA DE SIGLAS

6LoWPAN	<i>IPv6 over Lower power Wireless Personal Area</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
BBC	<i>British Broadcasting Corporation</i>
CBM	<i>Condition-Based Maintenance</i>
CNN	<i>Cable News Network</i>
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CSV	<i>Character-Separated Values</i>
DGA	<i>Dissolved Gas Analysis</i>
DTLS	<i>Datagram Transport Layer Security</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
HTTP	<i>Hyper Text Transfer Protocol</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ID	<i>Identity</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple Output</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
OEE	<i>Overall Equipment Efficiency</i>
PFC	<i>Potential Failure Curve</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RTOS	<i>Real Time Operating System</i>
SCL	<i>Serial Clock</i>
SDA	<i>Serial Data</i>
SGB	Segundo Serviço Geológico Brasil
SPE	Substâncias Poliméricas Extracelulares

TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de formação do biofilme segundo Stoodley	7
Figura 2 – Superfície hidrofílica e hidrofóbica segundo o modelo de Wenzel.....	8
Figura 3 – Exemplo de curva do Potencial de Falha, ou curva PF	9
Figura 4 – Arquitetura do Protocolo MQTT	10
Figura 5 – Comparação do Protocolo CoAP com o protocolo HTTP	11
Figura 6 – Exemplo de envio de dados utilizando o método HTTP POST	12
Figura 7 – Arquitetura I2C (Mestre-Escravo)	13
Figura 8 – Interface de criação de canais da plataforma ThingSpeak.....	13
Figura 9 – Dashboard do sistema IoT implementado	14
Figura 10 – Sistema Fuzzy convencional	15
Figura 11 – Comparação dos graus de pertinência do sistema Fuzzy com a teoria clássica dos conjuntos	18
Figura 12 – Representação da função triangular	19
Figura 13 – Representação da função trapezoidal	20
Figura 14 – Representação da função gaussiana.....	21
Figura 15 – Representação da função sino generalizada.....	21
Figura 16 – Cenário proposto	28
Figura 17 – Fluxograma da metodologia implementada	28
Figura 18 – Sensor de temperatura DS18B20 à prova d'água	30
Figura 19 – Interface de configuração da conexão da placa Wemos utilizando a IDE Arduino	31
Figura 20 – Pinagem da placa Wemos LOLIN D1 Mini.....	31
Figura 21 – Configuração dos <i>fields</i> do canal.....	32
Figura 22 – Configuração do <i>dashboard</i>	33
Figura 23 – <i>Dashboard</i> configurado	34
Figura 24 – Gráfico da média de ruído por dias de medição	35
Figura 25 – Diferença de temperatura entre o sensor de referência e o sensor de biofilme.....	36
Figura 26 – Definição das funções de pertinência da entrada e saída do sistema	37
Figura 27 – Entrada (esquerda) e saída (direita) do sistema <i>Fuzzy</i>	37
Figura 28 – Entrada do sistema <i>Fuzzy</i>	39
Figura 29 – Verificação das saídas dos dias 1 (esquerda) e 2 (direita)	40
Figura 30 – Verificação das saídas dos dias 3 (esquerda) e 4 (direita)	40
Figura 31 – Verificação das saídas dos dias 5 (esquerda) e 6 (direita)	41
Figura 32 – Verificação das saídas dos dias 7 (esquerda) e 8 (direita)	41
Figura 33 – Verificação das saídas dos dias 9 (esquerda) e 10 (direita)	42
Figura 34 – Verificação das saídas dos dias 11 (esquerda) e 12 (direita)	42
Figura 35 – Verificação das saídas dos dias 13 (esquerda) e 14 (direita)	43
Figura 36 – Verificação das saídas dos dias 15 (esquerda) e 16 (direita)	43
Figura 37 – Verificação das saídas dos dias 17 (esquerda) e 18 (direita)	44
Figura 38 – Verificação das saídas dos dias 19 (esquerda) e 20 (direita)	44
Figura 39 – Verificação da saída do dia 21 de medições	45
Figura 40 – Desempenho do sistema <i>Fuzzy</i>	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre os Trabalhos Correlatos e a Presente Pesquisa	25
Tabela 2 – Especificações do Sensor de Temperatura DS18B20	30
Tabela 3 – Base de regras do sistema <i>Fuzzy</i> implementado.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Objetivo Geral.....	4
1.3.2	Objetivos Específicos	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1	Considerações Iniciais	6
2.2	Características do Biofilme e Superfícies de Adesão	6
2.3	Manutenção Preditiva.....	8
2.4	Internet das Coisas (IoT)	9
2.4.1	Protocolos HTTP POST e I2C	12
2.4.2	ThingSpeak.....	13
2.5	Microcontrolador ESP8266.....	14
2.6	Sistema Fuzzy	15
2.6.1	Fuzzyficação.....	16
2.6.2	Inferência.....	16
2.6.3	Base de Regras	17
2.6.4	Grau de Pertinência.....	17
2.6.4.1	Função Triângular	18
2.6.4.2	Função Trapezoidal	19
2.6.4.3	Função Gaussiana	20
2.6.4.4	Função Sino Generalizada	21
2.6.5	Defuzzificação	22
2.7	Considerações Finais	22
3	Trabalhos Correlatos.....	23
3.1	Considerações Iniciais	23
3.2	Descrição dos Trabalhos Correlatos.....	23
3.3	Comparativo entre o presente Trabalho e os Trabalhos Correlatos.....	25
3.4	Considerações Finais	26
4	Metodologia	27
4.1	Considerações Iniciais	27

4.2	Cenário Proposto	27
4.3	Monitoramento e Coleta de Dados.....	29
4.3.1	Sensores de Temperatura DS18B20	29
4.3.2	Wemos LOLIN D1 Mini	30
4.3.2.1	ThingSpeak API.....	32
4.4	Modelagem do Sistema <i>Fuzzy</i>	34
4.4.1	Pré-Processamento dos Dados.....	34
4.4.2	Base de Regras do Sistema Implementado.....	36
4.5	Considerações Finais	37
5	Resultados	38
5.1	Considerações Iniciais	38
5.2	Resultados obtidos	38
5.3	Performance do Sistema	44
5.4	Considerações Finais	44
6	Conclusão	46
6.1	Contribuições do Trabalho.....	46
6.2	Trabalhos Futuros	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

O Brasil possui a maior reserva de água doce do nosso planeta, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) cerca de 80% dessa reserva do país encontra-se fortemente presente nas dependências do território amazônico (IBGE EDUCA, 20–). A água é um recurso abundante e fundamental que sustenta a vida no planeta, e por ser um recurso de tamanha relevância, se torna necessário que haja um monitoramento constante sobre seu estado, ainda mais com o recente aumento das temperaturas por todo o globo.

No cenário atual é perceptível que a ação antrópica trouxe consequências climáticas de séculos de exploração de recursos e poluição. Segundo a BBC (*British Broadcasting Corporation*) o mês de outubro de 2023 foi considerado o mês mais quente já registrado na história (MCGRATH et al, 2023), neste mesmo mês, de acordo com o Segundo Serviço Geológico do Brasil (SGB) o Rio Amazonas atingiu a maior seca já registrada na ilha de Parintins, sendo considerada a pior seca da cidade de Garantido e Caprichoso em 49 anos de medição (BELTRÃO, 2023). A seca extrema que atingiu o Amazonas acabou afetando fortemente a fauna aquática, e segundo a CNN Brasil (*Cable News Network* Brasil) informou, os pesquisadores acreditam que a causa da mortandade desses animais está ligada às altas temperaturas das águas (CNN Brasil, 2023).

A partir das ações antrópicas é possível observar que há o impacto na qualidade da água dos rios que são utilizados para abastecimento das grandes cidades a partir das empresas de captação e tratamento de água. Estudos apontam que existem dois tipos de problemas de qualidade da água que podem ocorrer em um sistema de distribuição: o primeiro problema são os erros operacionais e o segundo problema surge de interrupções intermitentes ou únicas na qualidade da água causadas por contaminação deliberada ou acidental (BANNA et al, 2014). Em geral, esses problemas não podem ser detectados de forma confiável por meios de amostragem e métodos analíticos convencionais, o que pode levar a impactos potencialmente catastróficos para a

saúde humana. Os métodos analíticos convencionais utilizados por laboratório, especialmente para análises microbiológicas, não fornecem alertas em tempo real e são muito lentos para o desenvolvimento de uma resposta operacional no caso de uma falha.

Diante deste cenário, o monitoramento da qualidade da água e da sua temperatura em tempo real se tornam extremamente importantes para manter a segurança dos recursos hídricos utilizados para diversos fins. A qualidade da água é determinada por fatores físicos e microbianos independentes, incluindo, mas não se limitando ao pH, cloro livre, oxigênio dissolvido, carbono orgânico, temperatura, entre outros (QIN et al, 2018). As medições de cada parâmetro são feitas por sensores presentes na água que coletam e enviam informações, gerando dados que posteriormente serão analisados. Contudo, a exposição prolongada desses sensores na natureza, sem a devida manutenção, pode acarretar no desgaste do equipamento e conseqüentemente a geração de dados inconsistentes que podem comprometer as análises.

Existem alguns fatores que levam à inconsistência de dados e falhas no equipamento, entre eles está o crescimento e a proliferação de microrganismos em sua superfície. Essa adesão e o crescimento de microrganismos na interface entre qualquer meio não estéril e uma superfície sólida são fenômenos generalizados na maioria dos ambientes da terra (DELGADO; BRICIU-BURGHINA; REGAN, 2021), sendo o desenvolvimento do biofilme na superfície dos sensores um dos principais parâmetros de falhas no equipamento a ser analisado neste trabalho. O desenvolvimento de biofilmes em equipamentos, causam prejuízos econômicos em sistemas de abastecimento de água potável, além de que seu acúmulo pode deteriorar materiais metálicos e causar prejuízos associados à corrosão de natureza microbiológica (PEREIRAA et al, 2014).

Portanto o monitoramento dos equipamentos, neste cenário, definirá a partir de que ponto será necessário a realização de uma manutenção preditiva, uma ferramenta utilizada baseando-se no monitoramento contínuo da máquina ou processo que possibilita a detecção precoce de falhas, como por exemplo, o desgaste do equipamento (LI et al, 2019). Partindo dessa premissa, para auxiliar o calendário de manutenções dos sensores, soluções IoT (*Internet of Things*)

forneem o suporte necessário para que os dados sejam analisados de forma remota e em tempo real através da internet.

A aplicao dos conceitos de transmissão IoT e computao em nuvem apresentadas pela Indústria 4.0 tem motivado diversas pesquisas nas áreas de computao aplicada e telecomunicaes, colaborando para o desenvolvimento de sistemas inteligentes capazes de estimar e tomar decisões a partir de análises e cculos matemáticos. Partindo dessa premissa apresentada, se torna fundamental o desenvolvimento de um sistema que englobe tais conceitos para o monitoramento em tempo real dos equipamentos em contato com a água e expostos ao meio.

Neste trabalho, um sistema baseado na regra *Fuzzy* foi desenvolvido para a análise dos dados coletados pelos sensores de temperatura que estão armazenados na nuvem, objetivando auxiliar no monitoramento do estado do equipamento ao informar ao usuário se há a necessidade da realizao da manuteno de acordo com ruído, caso provocado pela adesão do biofilme, que  a saída determinada.

1.2 Motivao

A preservao da qualidade da água  uma questão de interesse global, especialmente diante dos desafios apresentados pelas mudanças climáticas em decorrência das aes antrópicas. Os avanços tecnológicos na área de monitoramento ambiental, impulsionados por aplicaes IoT e computao em nuvem da Indústria 4.0, tem permitido o desenvolvimento de sistemas inteligentes capazes de analisar e otimizar tomada de decisões a partir de dados coletados em tempo real. Dados estes que são obtidos através de sensores presentes na natureza, que por consequência da longa exposio desses equipamentos ao meio, com destaque no meio aquático, pode resultar em problemas cuja a ocorrência se dá pela formao de biofilme na superfície desses sensores.

 notável que a Indústria 4.0 abriu um leque de possibilidades ao apresentar um amplo sistema que engloba tecnologias avançadas como inteligência artificial, IoT e computao em nuvem. Esse cenário apresentado

pela nova versão da indústria proporcionou a organização de uma estrutura de transmissão e armazenamento de dados em tempo real voltadas para o sistema baseado na regra *fuzzy* desenvolvido neste trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é criar um modelo baseado na regra *Fuzzy* para a predição do tempo de manutenção de sensores submersos na água afetados pela formação do biofilme.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estabelecer um contexto experimental em um ambiente controlado visando o monitoramento do processo de formação do biofilme;
- Transmitir os dados obtidos pelos sensores para armazenamento e processamento na infraestrutura de computação em nuvem;
- Desenvolver um sistema *Fuzzy* utilizando os dados pré-processados, com o propósito de criar um controlador capaz de realizar inferências quanto ao grau de ruído causado pela presença de biofilme nas superfícies dos sensores;
- Realizar uma avaliação dos resultados obtidos para verificar a conformidade do desempenho do sistema desenvolvido com a proposta do trabalho.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este segmento aborda a estruturação do trabalho, a qual se compõe de seis capítulos.

- No segundo capítulo são abordados os conceitos e tecnologias subjacentes empregadas na elaboração deste estudo.
- Na sequência, compreendida pelo terceiro capítulo, expõe a seleção de estudos correlatos que abordam aplicações semelhantes, ao mesmo tempo que ressalta as discrepâncias entre estes estudos e a proposta apresentada nesta dissertação.

- O capítulo quatro é referente a metodologia aplicada para o desenvolvimento do trabalho, detalhando cada etapa, desde a implementação do cenário proposto ao desenvolvimento do sistema *Fuzzy*.
- No capítulo cinco, são destacados os resultados obtidos pelo sistema *Fuzzy*.
- A conclusão, contribuição e propostas futuras, estão presentes no capítulo seis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados conceitos e as tecnologias utilizadas para a realização do trabalho, iniciando com uma visão geral sobre biofilme, conceitos sobre manutenção preditiva, internet das coisas (IoT), bem como a descrição do dispositivo, utilizada como *end-node*. Em seguida é descrito os aspectos mais relevantes para o trabalho a respeito da lógica *fuzzy*.

2.2 Características do Biofilme e Superfícies de Adesão

Os biofilmes são definidos como um agregado de células de microrganismos incorporadas em uma matriz autoproduzida de substâncias poliméricas extracelulares (SPE) que se aderem uma às outras em uma superfície em contato com a água (DE MATOS et al, 2022). Estas substâncias são produzidas pelos próprios microrganismos com a finalidade de aumentar sua sobrevivência em um determinado meio em função do estresse sofrido. O crescimento e a adesão indesejada de biofilmes afetam uma grande diversidade de habitats microbianos, tais como instrumentos médicos, próteses, trocadores de calor, membranas de filtração e sistemas de distribuição de água potável. Quando crescidos sobre superfícies metálicas, estes biofilmes podem acelerar processos corrosivos, alterando o tempo de vida útil de materiais metálicos (PEREIRAA et al, 2014).

A formação do filme bacteriano consiste em cinco etapas segundo a definição de Stoodley *et al* (2002): aderência das células à superfície (1), produção de SPE (2), que resulta na aderência (3); maturação da arquitetura do biofilme (4) e dispersão das células individuais(5) (STOOLEY et al, 2002), ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Ciclo de formação do biofilme segundo Stoodley



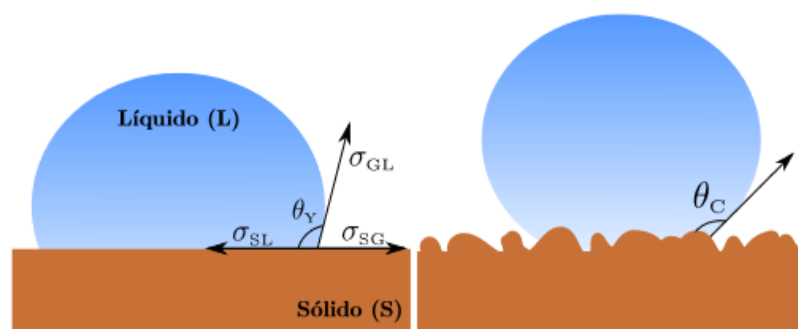
Fonte: bullishow.com

Durante o desenvolvimento, a velocidade de formação do biofilme varia, dependendo do meio suporte e das células bacterianas que irão formá-lo, pois cada espécie bacteriana excreta um ou vários tipos de substâncias extracelulares específicas que irão interferir em sua estrutura (SPÍNOLA, 2015). Em geral, a formação do biofilme maduro ocorre de 3 a 6 dias após a adesão inicial, podendo chegar a 10 dias (HEYDORN et al, 2000). Sendo assim alguns fatores ambientais também são utilizados como parâmetros para compreender e analisar as condições para o tempo de formação do biofilme, entre esses fatores estão o pH, cloro livre, oxigênio dissolvido, carbono orgânico, potencial de oxidação-redução, temperatura e vários cátions e ânions (QIN et al, 2018).

O principal parâmetro utilizado na avaliação da formação de biofilme em superfícies neste trabalho, é a temperatura, pois é considerada um dos fatores ambientais mais importantes que influenciam no crescimento dos microrganismos. É observado em (PEREIRA DA SILVA, 2018) que na condição de temperaturas entre 30° e 40° C, consideradas ótimas para a maioria das bactérias, há uma diminuição do tempo de formação e aumento da taxa de multiplicação, já em baixas temperaturas é observado comportamentos contrários. Dessarte, o autor Sanly reforça em sua pesquisa, através de testes realizados em diferentes bactérias que compõem o biofilme, que a variação de temperatura modula a hidrofobicidade da superfície celular (LIU, et al, 2016).

A adesão microbiana nas superfícies dos objetos em contato prolongado com a água se torna melhor com o aumento da hidrofobicidade, tanto da superfície celular como do substrato de adesão (DONLAN et al, 2002). As propriedades físico-químicas da superfície podem exercer uma forte influência sobre a adesão dos microrganismos, podendo aderir-se tanto às superfícies hidrofóbicas ou hidrofílicas (RODRIGUES, et al, 2009).

Figura 2 – Superfície hidrofílica e hidrofóbica segundo o modelo de Wenzel



Fonte: Marion Lucia Silvestrini

A molhabilidade é determinada pela capacidade de uma gota em se manter sobre uma superfície sólida. Quando maior o grau de molhabilidade, o líquido tem maior afinidade com a superfície, logo, é absorvido pelo substrato até formar um filme. Estados super hidrofóbicos são caracterizados por terem ângulo de contato muito alto, na ordem $\theta_c \geq 150^\circ$ e baixo ângulo de histerese, definido como $\theta_h = \theta_a - \theta_r$, onde θ_a é o ângulo avançado e θ_r o ângulo retardado. Quanto menor o ângulo de histerese mais a gota se mantém no formato esférico, facilitando sua molhabilidade (SILVESTRINI, 2017). No trabalho de Wenzel, o autor argumentou que a rugosidade aumenta o estado de molhabilidade: superfície hidrofóbica se tornaria super hidrofóbica ao adicionar rugosidade. A Figura 2 mostra o comparativo do modelo de superfície hidrofílica e hidrofóbica.

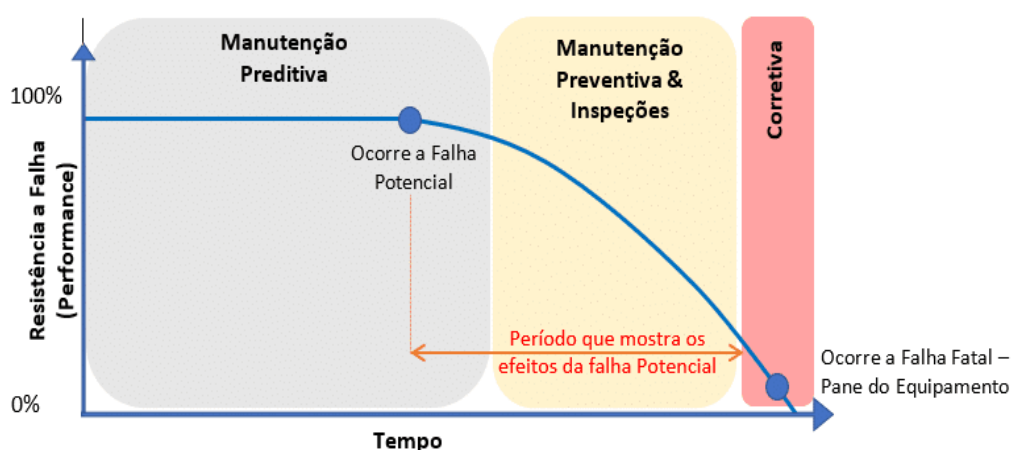
2.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é uma metodologia que se baseia em análises para o acompanhamento constante dos equipamentos, possibilitando traçar parâmetros ideais de funcionamento e prever tendências futuras (WILLICH, 2023). Tratando-se de um conjunto de técnicas a manutenção preditiva é uma forma eficiente de acompanhar equipamentos periodicamente. Um método muito

comum utilizado para a realização das manutenções em geral é o desenvolvimento da curva PFC (*Potential Failure Curve*), que ganha forma calculando a eficiência global de equipamentos (OEE) multiplicando três fatores: disponibilidade, performance e qualidade (ALBERTIN et al, 2012).

No contexto da Indústria 4.0, a manutenção preditiva apresenta um novo escopo que auxilia os usuários na organização e montagem do calendário de manutenções, pois com a integração de soluções IoT é possível realizar o monitoramento em tempo real do estado do equipamento e, com isso, desenvolver a curva PF, exemplificada na Figura 3, de maneira mais eficiente.

Figura 3 – Exemplo de curva do Potencial de Falha, ou curva PF



Fonte: modularcursos.com

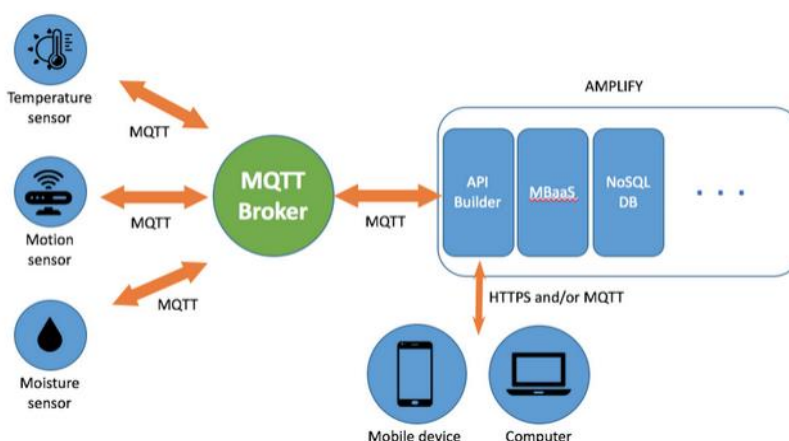
2.4 Internet das Coisas (IoT)

Conceituada pela primeira vez por Kevin Ashton na década de 1990, a IoT representa uma convergência exponencial de dispositivos interconectados que torna possível a transferência de dados, não apenas de homem para máquina, mas também entre dispositivos (máquina para máquina) (ORACLE, 20–). Essa interconexão entre dispositivos é alimentada por protocolos de comunicação MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) e CoAP (*Constrained Application Protocol*), projetados para facilitar a troca eficiente de mensagens em redes de dispositivos IoT.

O MQTT é um protocolo leve de mensagens assíncronas projetado para ambientes de largura de banda limitada e conexões instáveis, ele opera sobre o protocolo TCP/IP e utiliza um modelo de publicação/assinatura. No MQTT, os

dispositivos são categorizados como editores, que enviam mensagens, e assinantes, que recebem mensagens sobre tópicos específicos (PRAYOGO et al, 2019). Em outras palavras, a função deste protocolo é reduzir o consumo de energia e a largura de banda, tornando-se um protocolo facilmente aplicado em sistemas embarcados. O funcionamento da arquitetura do protocolo MQTT é ilustrada na Figura 4.

Figura 4 – Arquitetura do Protocolo MQTT



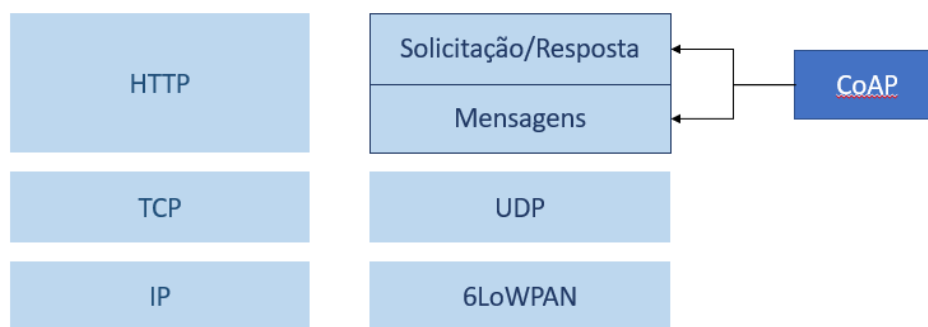
Fonte: alfacom.net

O CoAP é um protocolo de aplicação projetado para ser leve e eficiente em ambientes com restrições de recursos. O CoAP opera sobre o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) e é adequado para dispositivos de CPU, memória e energia. Ele é otimizado para operações em redes restritas, proporcionando uma comunicação eficaz entre dispositivos IoT (THANGAVEL et al, 2014). Sendo assim, é perceptível que tanto o protocolo MQTT quanto o protocolo CoAP são essenciais para a comunicação eficiente em ambientes IoT, proporcionando soluções adaptadas às diferentes necessidades e limitações desses dispositivos interconectados. Entretanto, vale reforçar que a IoT não está exclusivamente atrelada aos protocolos MQTT e CoAP.

O protocolo CoAP foi projetado para funcionar em conjunto com a rede HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), Figura 5 (LEVÄ; MAZHELIS; SUOMI, 2014). No entanto, se comparado ao HTTP, o protocolo CoAP oferece diversas características potencialmente benéficas ao implementar aplicações IoT (NIKOLOV, 2020). O CoAP propõe o uso do DTLS (*Datagram Transport Layer*

Security), a versão baseada em UDP (*User Datagram Protocol*) para fornecer segurança de ponta a ponta, além de se tratar de um protocolo da camada de aplicação desenvolvido para dispositivos com recursos limitados e aplicações M2M (máquina a máquina), possibilita a comunicação via internet entre objetos que suportam UDP e 6LoWPAN, alcançando baixa sobrecarga e oferecendo suporte *multicast* (CAPOSSELE et al, 2015). A estrutura de comunicação do protocolo CoAP está representada na Figura 5.

Figura 5 – Comparação do protocolo CoAP com o protocolo HTTP



Fonte: Autora

Os protocolos adotados para o desenvolvimento desta pesquisa foram o CoAP, pois este protocolo segue o modelo cliente servidor e utiliza métodos HTTP POST e GET, e o protocolo I2C para a comunicação entre os dispositivos embarcados. A combinação desses protocolos oferece uma solução abrangente para atender às variadas necessidades de comunicação no cenário da IoT.

Ao analisar os tipos de protocolos empregados na comunicação entre dispositivos no contexto da Internet das Coisas, é essencial ressaltar uma outra dimensão desse cenário: o *Big Data*. A interseção entre *Big Data* e a Internet das Coisas representa uma convergência estratégica no panorama tecnológico contemporâneo. A IoT sendo composta por uma rede de dispositivos interconectados, gera volumes massivos de dados proveniente de sensores. Esses dados, caracterizados por sua diversidade e velocidade de geração, compõem o conceito de *Big Data* (TAURION, 2013).

A coleta constante de informações em tempo real alimenta o ecossistema do *Big Data*, proporcionando uma riqueza de dados. Sua capacidade de processar, armazenar e analisar os dados não apenas otimiza a eficiência

operacional na IoT, mas também impulsiona a inovação, facilitando a tomada de decisões informadas e a criação de soluções avançadas em diversos setores.

A oferta de soluções IoT para diferentes dispositivos inteligentes e de diversos fabricantes impulsionou o desenvolvimento de plataformas que conectam dispositivos à Internet. Entre as várias plataformas, a *ThingSpeak* foi selecionada para o desenvolvimento deste trabalho, pois permite que o usuário gerencie os dados em diferentes formatos e compartilhe informações de diversas origens.

2.4.1 Protocolos HTTP POST e I2C

O protocolo HTTP é responsável pela transferência de dados na Internet, criando bases necessárias para a conexão cliente-servidor (TANENBAUM, 2003). O POST é um dos métodos do HTTP utilizado para comunicação e transferência de dados, indicando ao servidor o envio de dados do cliente (LAUBHAN et al, 2016). No exemplo da Figura 6 os dados (nome=Usuario&idade=25) estão sendo enviados ao servidor usando o método POST. O servidor irá processar esses dados conforme o solicitado, dependendo do contexto da aplicação *web*.

Figura 6 – Exemplo de envio de dados utilizando o método HTTP POST

A imagem mostra um exemplo de uma requisição HTTP POST em um terminal. O texto da requisição é: "POST /exemplo/recurso HTTP/1.1", "Host: www.exemplo.com", "Content-Type: application/x-www-form-urlencoded", e "nome=Usuario&idade=25". No canto superior direito do terminal, há um ícone de uma pasta e o texto "Copy code".

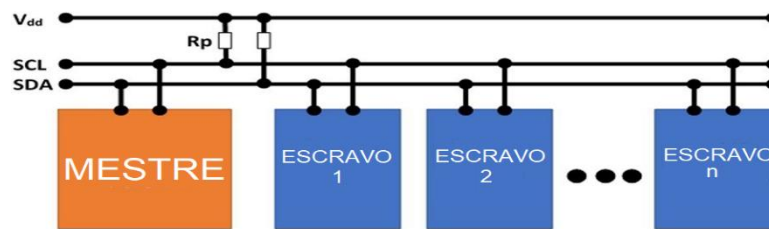
```
http Copy code
POST /exemplo/recurso HTTP/1.1
Host: www.exemplo.com
Content-Type: application/x-www-form-urlencoded

nome=Usuario&idade=25
```

Fonte: Autora

O protocolo I2C segue a arquitetura de barramento serial mestre-escravo, Figura 7, que tem como característica um barramento que aplica dois fios bidirecionais: o SDA (*Serial Data*) e o SCL (*Serial Clock*). O SDA permite a transmissão de dados para dispositivos escravos, enquanto o sinal SCL, gerado pelo mestre, é utilizado para sincronizar a entrada ou saída de dados dos dispositivos escravos (HAFEEZ et al, 2014).

Figura 7 – Arquitetura I2C (Mestre-Escravo)



Fonte: Autora

2.4.2 ThingSpeak

A *ThingSpeak* é um serviço de plataforma *open-source* de análise para a IoT que permite agregar, visualizar e analisar fluxos de dados na nuvem, tornando possível o envio de dados a partir de dispositivos interconectados e gerando visualizações instantâneas dos dados em tempo real (THINGSPEAK, 2017). De acordo com a *MathWorks*, desenvolvedora da plataforma, a *ThingSpeak* utiliza canais para armazenar os dados enviados por aplicativos ou dispositivos, permitindo ao usuário escrever dados nos canais através dos protocolos HTTP (chamadas da API REST), MQTT e da função *thingSpeakWrite* do MATLAB (MATHWORKS, 2010).

Figura 8 – Interface de criação de canais da plataforma *ThingSpeak*

My Channels

[New Channel](#)

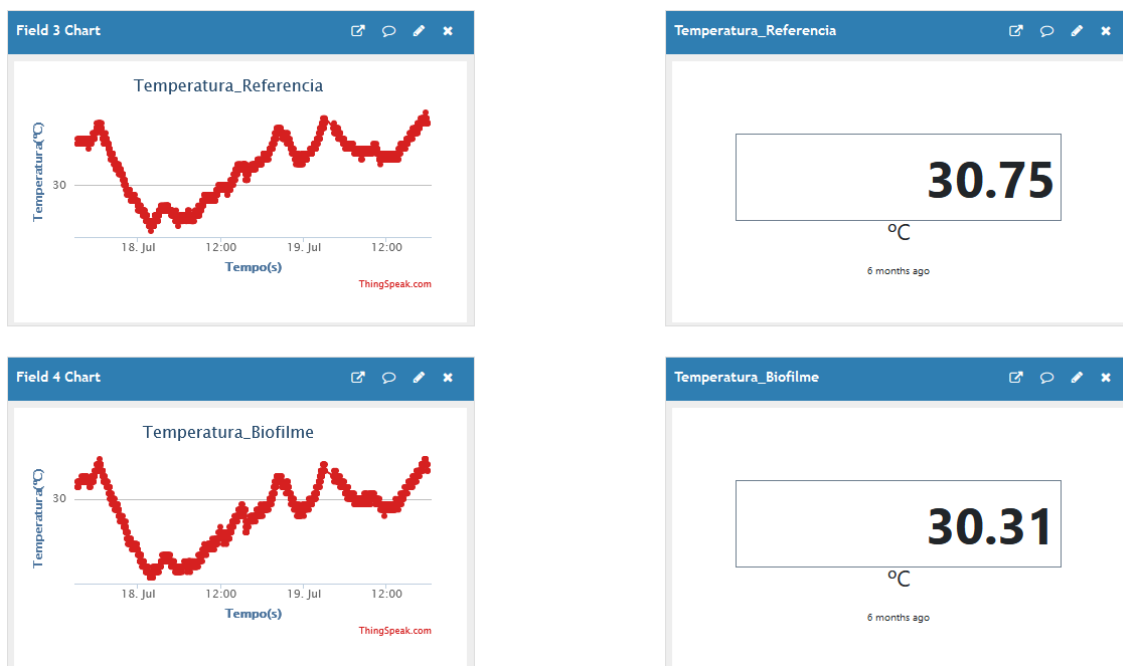
Name ↕	Created ↕	Updated ↕
Transmitter_temp_01 Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2023-05-09	2023-06-07 21:40
Temperature Monitor - ESP8266 Endnode Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2023-06-02	2023-06-20 17:54
RAK_4631_Endnode_Test Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2023-10-04	2023-11-13 23:07

Fonte: Autora

A interface de criação de canais na plataforma é exemplificada na Figura 8, destacando a capacidade de gerenciar vários canais simultaneamente. Cada canal é identificado com um ID (*Identity*) único e está associado a duas chaves

API (*Application Programming Interface*) distintas para o acesso: uma destinada à escrita e armazenamento de dados, enquanto a outra é utilizada para a leitura desses dados em um canal privado. Na Figura 9, é exibido o *dashboard* dos dados enviados pelos dispositivos para o servidor da *ThingSpeak*, no qual o experimento pode ser acompanhado em tempo real.

Figura 9 – *Dashboard* do sistema IoT implementado



Fonte: Autora

2.5 Microcontrolador ESP8266

O microcontrolador ESP8266 é uma tecnologia desenvolvida pela *Espressif* que integra um processador RISC de 32 bits Tensilica L106, que alcança um consumo de energia muito baixo e, de acordo com o *datasheet* apresentado pela desenvolvedora, atinge uma velocidade máxima de 160 MHz. A placa dispõe de um Sistema Operacional em Tempo Real (RTOS) e a pilha Wi-Fi, que em conjunto com o sistema operacional, permitem que cerca de 80% da potência de processamento esteja disponível para a programação e desenvolvimento de aplicações do usuário (ESPRESSIF, 2013).

O *framework* de desenvolvimento de software da *Espressif* é destinado ao desenvolvimento rápido de aplicações IoT. Assim sendo, o microcontrolador

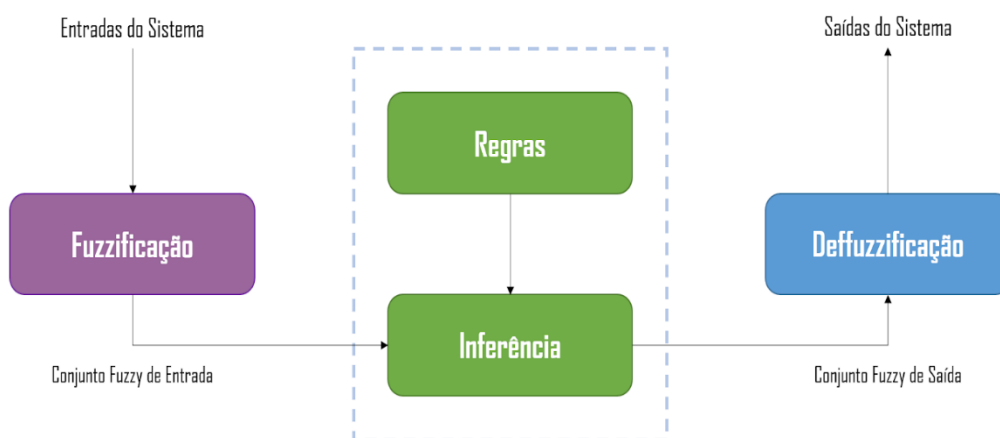
ESP8266 é frequentemente empregado em placas de desenvolvimento, como a placa Wemos D1, utilizada como *end-node* neste trabalho.

2.6 Sistema Fuzzy

Os sistemas *Fuzzy* são baseados na teoria clássica dos conjuntos que é construída sobre o conceito fundamental de conjunto, no qual um indivíduo é ou não membro. Em outras palavras, a teoria clássica dos conjuntos se baseia em respostas Booleanas do “sim” ou “não”, “pertence” ou “não pertence”. Contudo, muitos problemas de aplicação do mundo real não podem ser tratados pela teoria clássica dos conjuntos, incluindo todos aqueles que envolvem elementos com pertencimento parcial a um conjunto (GUANRONG, 2001) (CHEN; PHAN, 2000).

Em decorrência da limitação apresentada pelo conjunto clássico, a teoria dos conjuntos *Fuzzy* foi introduzida por Lofti A. Zadeh na década de 1960, ao apresentar um sistema que posteriormente seria capaz de lidar com a complexidade e a incerteza inerentes. Um sistema *Fuzzy* convencional é composto por etapas para seu desenvolvimento, a Figura 10 mostra o modelo convencional de um sistema *Fuzzy*, no qual possui o elemento de entrada, a base de regras associada com a inferência, que segue a estrutura “SE...ENTÃO”, a defuzzificação, etapa que transforma a saída da fuzzificação em valores nítidos, e por fim, a saída do sistema.

Figura 10 – Sistema *Fuzzy* convencional



Fonte: Autora

2.6.1 Fuzzyficação

A *Fuzzificação* é um método quantitativo que avalia dados do mundo real em um sistema *Fuzzy*. O processo de fuzzificação é determinado através do uso de funções *Fuzzy* que avalia o grau de pertencimento entre as entradas *crisp* e as saídas do sistema. Existem vários métodos de fuzzificação, e cada método depende do tipo de aplicação e de como serão mensuradas e interpretadas (LILLY, 2011).

No início do processo de fuzzificação, identificam-se as variáveis de entrada do sistema. Essas variáveis representam as condições ou características que irão afetar o comportamento do sistema. Para cada variável são definidos os conjuntos *Fuzzy* que representam categorias ou intervalos possíveis para essa variável e, para cada valor de entrada, são atribuídos os graus de pertinência que indicarão o quanto um valor específico pertence a cada categoria.

2.6.2 Inferência

A inferência *Fuzzy* é um componente fundamental em sistemas baseados na lógica *Fuzzy*, pois se refere ao processo de dedução de conclusões imprecisas a partir de proposições imprecisas ou variáveis *Fuzzy*. No sistema *Fuzzy*, a inferência é realizada por meio de regras que relacionam as variáveis de entrada às variáveis de saída, utilizando graus de pertinência (SILER; BUCKLEY, 2005). A inferência pode ser aplicada através de dois métodos (MACHADO, 2023):

- **Inferência Direta:** Neste método, as regras são avaliadas diretamente com base nas entradas do sistema. Ele é geralmente usado em sistemas *Fuzzy* simples com poucas regras e entradas.
- **Inferência Indireta:** Neste método, as entradas do sistema são primeiro fuzzificadas e depois usadas para ativar as regras. Em seguida, as saídas das regras são combinadas através de operações lógicas *Fuzzy* (como interseção e união) para inferir os graus de pertinência das saídas. Este método é usado em sistemas *Fuzzy* complexos com muitas regras e entradas.

Após a inferência, os resultados passam pelo processo de defuzzificação a fim de produzir uma saída numérica compreensível para o sistema.

2.6.3 Base de Regras

A base de regras é caracterizada pela base de conhecimento, todos os conjuntos *Fuzzy* que representam as variáveis relacionadas por funções de pertinência formam a base de conhecimento. O algoritmo processa as funções de pertinência de cada um dos conjuntos *Fuzzy*, com isso a combinação dos resultados através de instruções gera a base de regra (BARBOSA, 2005). Essas regras são fundamentais para o processo de inferência *Fuzzy*, onde decisões ou conclusões imprecisas são deduzidas a partir de condições imprecisas.

As regras na base de regras *Fuzzy* seguem o formato “SE-ENTÃO”, onde o SE é a condição e o ENTÃO a conclusão. Cada regra é formulada em termos *Fuzzy*, que formam a base de conhecimento do sistema *Fuzzy*. O formato “SE-ENTÃO” da base de regras segue o modelo controlador Mamdani, introduzido pelo matemático Ebrahim Mamdani (1975), na qual as regras são descritas por variáveis linguísticas (MAMDANI; ASSILIAN, 1999).

Através do uso da linguagem natural é possível condensar as informações de modo que uma palavra x seja um conjunto *Fuzzy* e $M(x)$ pertence ao universo U , onde $M(x)$ é o significado da palavra x (ZADEH, 1973). Um exemplo de aplicação da linguagem natural segue a equação 1.1:

$$M(\textit{média}) = \{\textit{insuficiente}, \textit{regular}, \textit{bom}, \textit{excelente}\} \quad (1.1)$$

2.6.4 Grau de Pertinência

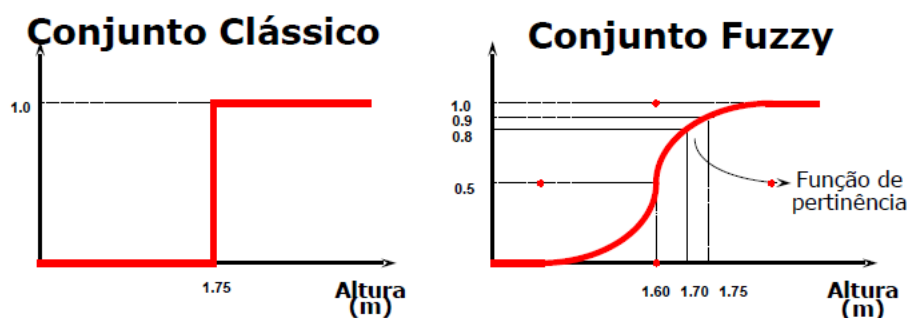
O sistema *Fuzzy* tem como uma de suas características os graus de pertinência entre um intervalo de 0 e 1, capazes de apresentar as intersecções entre os elementos analisados. O grau de pertinência é o indicador se um elemento pertence ou não a um conjunto (WANG, 1996).

Na teoria clássica dos conjuntos, dado um universo U e um elemento particular $x \in U$, o grau de pertinência $A(x)$ em decorrência de um conjunto $A \subseteq U$ é dado por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

Logo a função $A(x) : U \rightarrow \{0,1\}$ é chamada de função característica segundo a teoria clássica. A representação do grau de pertinência do conjunto clássico é restrita, não permitindo a consideração de valores parciais (IBRAHIM, 2004). Através desta definição, Zadeh introduziu o sistema *Fuzzy*, no qual os limites entre as categorias são difusos, permitindo uma representação mais flexível e adequada para lidar com a incerteza e a imprecisão de nas informações.

Figura 11 – Comparação dos graus de pertinência do sistema *Fuzzy* com a teoria clássica dos conjuntos



Fonte: João Alberto Fabro e Luciana Rech (UFSC)

É observado na Figura 11, que no conjunto clássico, o grau de pertinência não é aplicável da mesma forma que no sistema *Fuzzy*, pois apresenta uma saída determinística, sem considerar os graus parciais de pertinência. Sendo assim, sabe-se que a função pertinência é um componente fundamental na teoria dos conjuntos *Fuzzy* e desempenha um papel crucial na representação da incerteza e imprecisão em sistemas *Fuzzy*. Outra característica das funções de pertinência, é que estas podem assumir diferentes formas de acordo com a aplicação, podendo ser representadas por uma função triangular, trapezoidal, gaussiana e a função sino generalizada (TANSCHKEIT, 2004).

2.6.4.1 Função Triangular

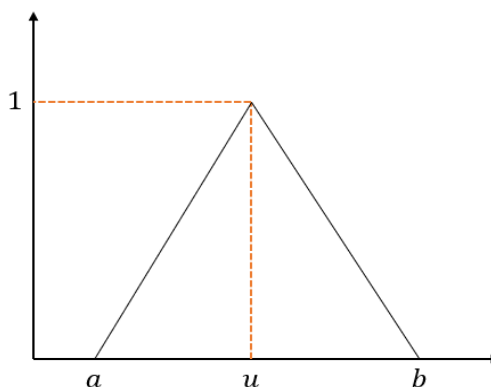
A função triangular é um tipo específico de função de pertinência que é comumente usada na modelagem de variáveis com valores intermediários. Um

valor A é definido como triangular se sua função pertinência segue (DE BARROS, 2017):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{Se } x \leq a \\ \frac{x-a}{u-a} & \text{Se } a < x \leq u \\ \frac{x-b}{u-b} & \text{Se } u < x \leq b \\ 0 & \text{Se } x \geq b \end{cases}$$

Onde $[a, b]$ representa os pontos que definem a base do triângulo e u é representado como o único vértice. Sendo assim, esses valores reais definem o valor triangular A denotado por $(a; u; b)$. Na Figura 12 é ilustrada a função triangular.

Figura 12 – Representação da função triangular



Fonte: Autora

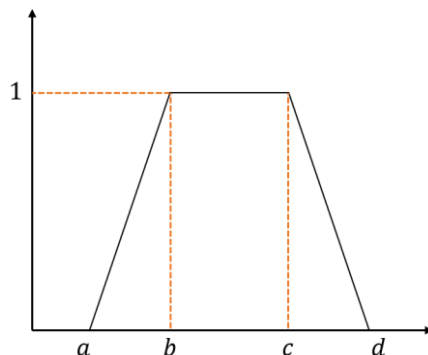
2.6.4.2 Função Trapezoidal

A função trapezoidal é outro tipo de função de pertinência usada na lógica *Fuzzy* para modelar a relação entre um elemento e um conjunto *Fuzzy* trapezoidal. No entanto, diferente da função triangular que engloba três pontos a, u e b , a função trapezoidal é definida pelos pontos a, b, c e d . Um valor A é definido como trapézio se sua função pertinência é dada por (DE BARROS, 2017):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{Se } a \leq x < b \\ 1 & \text{Se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{Se } c < x \leq d \\ 0 & \text{Caso contrário} \end{cases}$$

O grau de pertinência tem valor 0 fora do intervalo definido pelos pontos a , b , c e d . A Figura 13 demonstra a divisão da função trapezoidal.

Figura 13 – Representação da função trapezoidal



Fonte: Autora

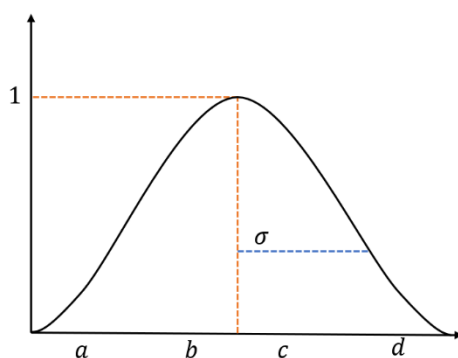
2.6.4.3 Função Gaussiana

A função gaussiana é uma função pertinência usada para modelar a relação entre um elemento e um conjunto *Fuzzy* com uma distribuição gaussiana. A expressão da função gaussiana é dada por (WANG, 1996):

$$\mu_A = e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.2)$$

Na fórmula 1.3, x é o valor da variável de entrada, c é o centro da função gaussiana (pico), onde σ é o desvio padrão que controla a largura da curva. A função gaussiana é simétrica em torno do ponto central m e a função pertinência de uma variável diminui gradualmente à medida que se afasta do ponto central, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Representação da função gaussiana



Fonte: Autora

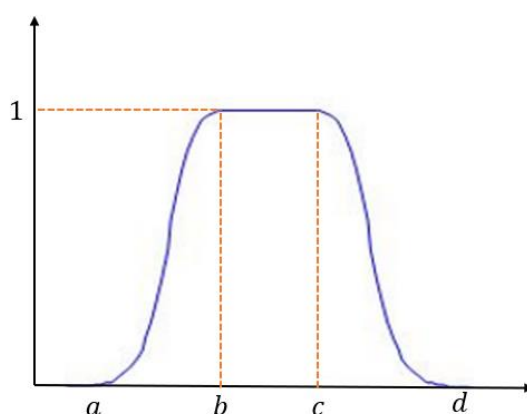
2.6.4.4 Função Sino Generalizada

A função sino generalizada é uma generalização da função sino clássica e oferece mais flexibilidade ao permitir ajustes em parâmetros que influenciam a largura e a simetria da função. O modelo da curva da função sino generalizada é dado por (MENEGOTTO; BARROS, 2011):

$$\mu A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (1.3)$$

Nesta fórmula, x é o valor da variável de entrada, c é o ponto de inflexão ou centro do sino, a representa o controle da largura da base do sino e b controla a inclinação ou suavidade da curva sino, representada na Figura 15.

Figura 15 – Representação da função sino generalizada



Fonte: Autora

2.6.5 Defuzzificação

A defuzzificação consiste no processo de transformar uma representação *Fuzzy* em um valor numérico. Esse processo é modelado usando técnicas que combinam os graus de pertinência de diferentes conjuntos do sistema *Fuzzy* e objetivam transformá-los em um único valor numérico. Em outras palavras, a defuzzificação é uma etapa que permite traduzir as saídas *Fuzzy* em valores numéricos compreensíveis para o sistema (SIMÕES; SHAW, 2007).

Podem ser encontradas diversas técnicas de conversão de valores *Fuzzy* em valores *crisp*, no entanto, o centróide é preferido devido à sua eficácia e simplicidade de implementação. A defuzzificação centróide é uma técnica utilizada para converter o resultado de uma inferência *Fuzzy* em uma resposta numérica. Ela é baseada na teoria da integração que consiste em calcular o centro de massa (ou centróide) da função de pertencimento *Fuzzy* resultante da inferência *Fuzzy* (MACHADO, 2023). O centro de massa é calculado pela média ponderada dos valores da função de pertencimento (LILLY, 2011).

2.7 Considerações Finais

O capítulo apresentou uma visão geral do estado da arte relacionado aos assuntos de interesse para o desenvolvimento deste trabalho. No capítulo subsequente, serão apresentados os estudos correlatos que adotam o sistema *Fuzzy* com o objetivo similar ao desta pesquisa.

3 Trabalhos Correlatos

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, são discutidos os estudos correlatos que empregam o sistema *Fuzzy* com propósitos semelhantes, enfatizando a relevância da manutenção preditiva e implementação IoT como ferramenta de auxílio para o acompanhamento dos dados em tempo real.

3.2 Descrição dos Trabalhos Correlatos

O trabalho de (VAF AEI; RIBEIRO, 2019) propõe um sistema de alerta utilizando regras de inferência *Fuzzy*, objetivando aprimorar estratégias diagnósticas de Manutenção Baseada em Condição (CBM) proativas em empresas de manufatura, fornecendo alertas precoces sobre possíveis quebras na linha de produção. Os autores descrevem a construção de variáveis linguísticas, o conjunto de regras para a aplicação em questão e validam o sistema por meio de testes, demonstrando sua consistência e robustez por meio de uma simulação com valores de entrada aleatórios. Em conclusão, o artigo sugere que o sistema *Fuzzy* desenvolvido para a aplicação pode contribuir significativamente para a melhoria de estratégias de manutenção, especialmente em situações nas quais o conhecimento sobre condições defeituosas é impreciso e o comportamento da linha de produção é complexo e não linear.

O artigo (PAOLANTI et al, 2018) explora o uso de uma arquitetura de *Machine Learning* para manutenção preditiva, com foco na abordagem *Random Forest*. Ele detalha o teste do sistema em um exemplo do setor, envolvendo coleta de dados, análise e aplicação de aprendizado de máquina. Vários sensores, PLCs (*Programmable Logic Controller*) de máquinas e protocolos de comunicação, com ênfase no cenário IoT, foram aplicados para a coleta dos dados, com a ferramenta de análise de dados implementada na arquitetura *Azure Cloud*, realizando o acompanhamento em tempo real dos dados. O algoritmo obteve uma acurácia de 95%, mostrando uma precisão na abordagem de previsão em diferentes estados da máquina. O artigo também discute a evolução da manutenção preditiva, enfatizando sua importância para evitar

perdas econômicas e melhorar a confiabilidade do sistema em ambientes industriais.

A abordagem feita por (WANG; CHU, 2007) avalia diferentes estratégias de manutenção de equipamentos industriais (corretiva, preventiva e preditiva), visando aumentar a disponibilidade e confiabilidade das instalações de produção sem grandes aumentos de investimento. O artigo introduz uma versão *Fuzzy* que utiliza o processo hierárquico analítico (AHP) para lidar com a incerteza na tomada de decisões, demonstrando sua aplicação na seleção de estratégias de manutenção em uma usina elétrica. Os resultados obtidos pelo sistema implementado sugerem que o método *Fuzzy* AHP é eficaz para lidar com incerteza em problemas de tomada de decisão, fornecendo um estudo de caso detalhado para apoiar suas conclusões.

Na pesquisa desenvolvida por (FARHAM et al, 2022) é apresentado um novo método baseado em lógica *Fuzzy* para prever o estado de conservação de transformadores de potência, enfatizando a importância da manutenção preditiva para operações eficientes. Os autores utilizam o método de análise triângulo de Duval para interpretar os resultados do DGA (*Dissolved Gas - Gás dissolvido*). O DGA é um indicador do estado de conservação do transformador e auxilia na determinação de eventos anormais no equipamento. O sistema *Fuzzy* aplicado funciona utilizando os dados obtidos a partir de testes diagnóstico, utilizando como parâmetros a resistência dielétrica, análise de gás dissolvido, resistência de isolamento e índice de polarização, temperatura do enrolamento e o fator de dissipação de calor do sistema de isolamento. Com base nas análises e resultados obtidos nos testes, conclui-se que o método proposto prevê com precisão o estado de conservação e vida remanescente dos transformadores de energia.

O trabalho de (DELGADO et al, 2021) aborda estratégias anti-incrustação para sensores utilizados em monitoramento de água, discutindo bioincrustação, métodos anti-incrustação estabelecidos e emergentes, soluções implementadas em sensores comerciais e tendências atuais. O artigo destaca os principais desafios enfrentados pelos sensores utilizados em monitoramento de água devido ao biofilme, que incluem: a redução da eficiência, contaminação, corrosão

e falha dos componentes, podendo aumentar os custos de manutenção, prejudicar a qualidade dos dados coletados e limitar o tempo de implantação dos sensores. Em decorrência da problemática apresentada, os autores realizam testes utilizando diferentes substratos na superfície de cada sensor selecionado para avaliar a eficácia das substâncias, além de abordar os métodos de limpeza de equipamentos mais utilizados na área. O artigo conclui, afirmando que não há um método de limpeza padronizado e que mais estratégias anti-incrustação devem ser estudadas para garantir a funcionalidade dos equipamentos a longo prazo.

3.3 Comparativo entre o presente Trabalho e os Trabalhos Correlatos

A Tabela 1 mostra a comparação dos trabalhos correlatos relacionados ao presente estudo, destacando a relevância da manutenção preditiva como parâmetro de comparação, além do sistema *Fuzzy*.

Tabela 1 – Comparativo entre os Trabalhos Correlatos e a Presente Pesquisa

Trabalhos	Fuzzy	Machine Learning (ML)	Biofilme	Aplicação IoT	Manutenção Preditiva
(VAFAEI; RIBEIRO, 2019)	X				X
(PAOLANTI et al, 2018)		X		X	
(WANG; CHU, 2007)	X				X
(FARHAM et al, 2022)	X				X
(DELGADO et al, 2021)			X		
Proposta	X		X	X	X

Fonte: Autora

Conforme observado na Tabela 1, o presente estudo alinha-se com três artigos que empregam o sistema *Fuzzy* como ferramenta fundamental em suas abordagens metodológicas, aplicando-as no contexto da manutenção preditiva. Além disso, no artigo (PAOLANTI et al, 2018) emprega-se soluções IoT para a coleta e armazenamento de dados, bem como para o monitoramento em tempo real conforme o descrito na seção 3.2, parágrafo 2. O trabalho de (DELGADO,

et al, 2021) apresenta diferentes estratégias de limpeza de sensores inseridos na água, alinhando-se com a proposta do presente trabalho.

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas algumas pesquisas que possuem pontos em comum com o presente trabalho. Cada pesquisa foi resumida de maneira compreensiva, destacando os principais pontos das pesquisas com suas devidas conclusões, para em seguida compará-las destacando a abordagem utilizada por cada uma.

4 Metodologia

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão descritas cada fase da metodologia empregada na condução deste estudo, abordando detalhadamente as ferramentas de desenvolvimento empregadas, bem como componentes de hardware e software utilizados. Após isso, será discutida a abordagem para a aquisição de dados, destacando-se a metodologia e instrumentação aplicadas.

A etapa subsequente contemplará o tratamento de dados, apresentando as técnicas aplicadas para o processamento, limpeza e análise estatística. Além disso, será introduzido o sistema *Fuzzy*, evidenciando sua aplicação e relevância na modelagem e interpretação de dados. Esta abordagem *Fuzzy* desempenha um papel fundamental na análise de incertezas e na representação de conceitos imprecisos, contribuindo para a robustez e eficácia do trabalho desenvolvido.

4.2 Cenário Proposto

Com o objetivo de avaliar o impacto da formação de biofilme na superfície dos sensores de temperatura, o cenário proposto foi construído em um ambiente controlado, no qual dispôs de um aquário de vidro com uma capacidade de aproximadamente 2 litros. A água adicionada ao aquário foi coletada diretamente do rio Guamá nas dependências do campus da UFPA. A realização desta coleta objetivou manter os microrganismos presentes na água, desenvolvendo um ambiente propício para a formação do biofilme, assim simulando um cenário real.

Na etapa seguinte, foi adicionado um filtro de aquário sem os elementos filtrantes, buscando manter as propriedades da água coletada e seu fluxo, facilitando o ciclo de proliferação do biofilme. Posteriormente, foram adicionados dois sensores de temperatura DS18B20, ligados a um microcontrolador ESP8266, que por sua vez, possui um módulo Wi-Fi. Por fim, para manter a temperatura em um *range* de 29° C e 33° C, foi utilizada uma pastilha de peltier. A Figura 16 mostra a composição do cenário descrita:

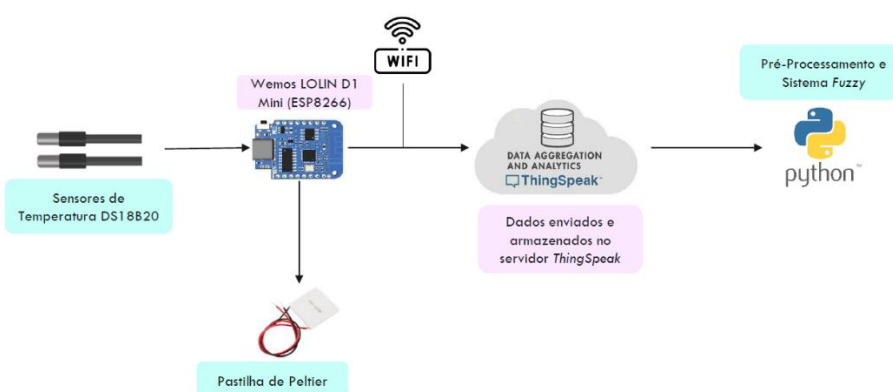
Figura 16 – Cenário Proposto



Fonte: Autora

Na Figura 16, à esquerda, é retratado o ambiente previamente configurado para as medições, evidenciando cada componente, como o aquário, o filtro, os sensores e a pastilha de Peltier. Posteriormente é apresentado o microcontrolador ESP8266, destacando a interconexão dos sensores com a placa. À direita, são destacados os sensores de temperatura, identificados por termo retrátil de cores distintas. Essa codificação visual foi aplicada para diferenciar o sensor de referência do sensor de biofilme. A seguir, a Figura 17 apresenta o fluxograma da metodologia adotada com o propósito de aprimorar a compreensão das etapas envolvidas no cenário desenvolvido. Este diagrama delinea a sequência de procedimentos para a montagem do hardware, incluindo os sensores, a pastilha de Peltier e o microcontrolador, bem como a sua integração. Em seguida, destaca-se a etapa de estabelecimento de conexão via Wi-Fi para a transmissão dos dados coletados para o servidor da *ThingSpeak*. Por fim, a última fase do processo aborda a codificação dos dados adquiridos, utilizando a linguagem de programação *Python*.

Figura 17 – Fluxograma do Trabalho



Fonte: Autora

No decorrer das medições, o sensor de referência, identificado em vermelho, era submetido a limpezas regulares, em intervalos de 12 horas, enquanto o sensor de biofilme, marcado em verde, permanecia submerso e sem limpeza para permitir a proliferação de biofilme em sua superfície.

4.3 Monitoramento e Coleta de Dados

Nesta etapa da metodologia, os dados provenientes dos sensores de temperatura DS18B20 eram periodicamente transmitidos, utilizando a conectividade Wi-Fi, para a API do *ThingSpeak*, com uma taxa de envio a cada minuto, permitindo o acompanhamento em tempo real. A consecução dessa comunicação foi possível por meio da utilização da placa Wemos LOLIN D1 Mini, que integra o módulo ESP8266, e que atuou como *end-node* na rede.

4.3.1 Sensores de Temperatura DS18B20

O modelo de sensor DS18B20 é uma versão desenvolvida para ser aplicada nos mais diversos ambientes, incluindo medir temperaturas em locais úmidos e até mesmo estando submerso na água. O tipo de material usado para o revestimento de proteção do circuito é de aço inox. De acordo com o *datasheet*, o sensor possibilita leituras com uma resolução entre 9 a 12-bits, sua comunicação é feita através de um protocolo de barramento *1-wire*, que usa uma linha de dados para se comunicar com o microprocessador interno do dispositivo.

A Figura 18 ilustra as características físicas do dispositivo, na qual é possível observar a ponta de aço inox e as conexões de alimentação, VCC, *ground* e a conexão por onde serão passados os dados coletados para o microcontrolador. Subsequente a Tabela 2 das especificações básicas do sensor.

Figura 18 – Sensor de temperatura DS18B20 à prova d'água



Fonte: blog.eletrogate.com

Tabela 2 – Especificações do Sensor de Temperatura DS18B20

Faixa de Alimentação de Energia	3,0 V a 5,5 V
Faixa de Temperatura Operacional	-55° C a 125° C
Amplitude Térmica de Armazenamento	-55° C a 125° C
Precisão na faixa de -10° C a 85° C	+/- 0,5° C
Tamanho do Revestimento	6 por 50 mm
Conector	RJ11/RJ12, 3P-2510 USB
Definição dos Pinos	Vermelho: VCC Preto: GND Amarelo: Dados
Comprimento do Cabo	1m

Fonte: Autora

4.3.2 Wemos LOLIN D1 Mini

A placa Wemos D1 Mini é um dispositivo de desenvolvimento compacto, baseado no módulo ESP8266, e foi projetado para aplicações IoT. Sua capacidade de comunicação sem fio facilita a transmissão de dados para serviços em nuvem ou para outras plataformas IoT. Além de apresentar suporte Wi-Fi integrado, a placa Wemos LOLIN D1 Mini é compatível com a IDE

(*Integrated Development Environment*) Arduino, possibilitando a programação e a carga de códigos de maneira eficiente.

Figura 19 – Interface de configuração da conexão da placa Wemos utilizando a IDE Arduino

```
// ThingSpeak Settings
char thingSpeakAddress[] = "api.thingspeak.com";

String APIKey = "XXXXXXXXXXXXXXXXX"; // enter your channel's Write API Key

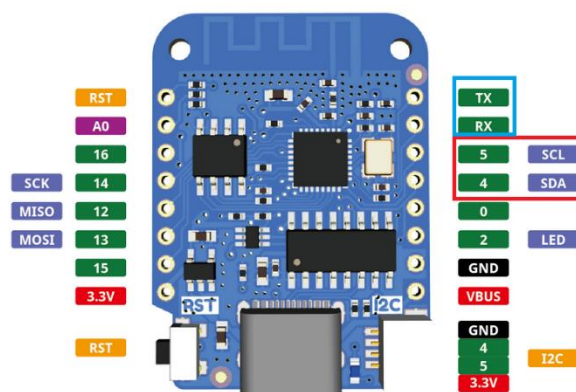
const int updateThingSpeakInterval = 60 * 1000; // 60 seconds interval at which to update ThingSpeak
```

Fonte: Autora

A Figura 19, exemplifica o processo de configuração da placa para a transmissão de dados para API do *ThingSpeak*. A princípio, procede-se com a inserção do endereço da API, seguida pela inclusão da chave de identificação do canal designado para a recepção dos dados coletados pelos sensores de temperatura. Subsequente, é definida a taxa de atualização dos dados, configurada a cada 60 segundos.

Para realizar a transmissão dos dados, a placa dispõe de pinos SDA e SCL. Sendo assim, o pino SDA é responsável pela transmissão dos dados no barramento I2C, usado para enviar e receber informações entre a placa e os dispositivos conectados. Por outro lado, o SCL é dedicado à sincronização de tempo entre a placa e os dispositivos I2C, fornecendo pulsos de *clock* necessários para coordenar a comunicação entre os dispositivos. A Figura 20 destaca a pinagem utilizada para conectar os sensores de temperatura à placa

Figura 20 – Pinagem da placa Wemos LOLIN D1 Mini



Fonte: wemos.cc

4.3.2.1 ThingSpeak API

A *ThingSpeak* API é uma interface que habilita a interação do usuário com a plataforma, possibilitando operações como o envio de dados para um canal, a recuperação das informações e o controle de configurações. Esta API opera sobre o protocolo HTTP que suporta os métodos HTTP POST e HTTP GET. O método HTTP POST é empregado para o envio de dados ao canal, representando a operação de escrita. Por outro lado, o método HTTP GET é utilizado para análises de leitura dos dados, proporcionando uma abordagem de leitura.

Os dados enviados para a *ThingSpeak* API são geralmente formatados em JSON (*JavaScript Object Notation*) ou em uma estrutura de parâmetros URL (*Uniform Resource Locator*). O formato exato dos dados depende do método utilizado pelo usuário para enviar as informações. Os dados enviados através do HTTP POST, método usado para a realização deste trabalho, geralmente possuem formato JSON. O acesso bruto a esses dados pode ser feito através da aba de *download* do canal, no qual esses dados são baixados no formato CSV (*comma-separated-values*).

Cada parâmetro analisado na API é organizado em *fields*. Os *fields* referem-se aos diferentes tipos de dados que podem ser armazenados em um canal específico.

Figura 21 – Configurações dos *fields* do canal

Field 1	<input type="text" value="e_tag"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 2	<input type="text" value="bat"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 3	<input type="text" value="temp_ref"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 4	<input type="text" value="temp_bio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 5	<input type="text" value="d_temp"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 6	<input type="text" value="d_percent"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Fonte: Autora

A Figura 21 mostra os diferentes campos em um mesmo canal. Antes da inicialização do processo de envio de dados para a API, o usuário determina explicitamente o valor atribuído para cada campo (*field*). Posteriormente, procede-se com a configuração do *dashboard* para a visualização efetiva dos dados, Figura 22.

Figura 22 – Configuração do *dashboard*

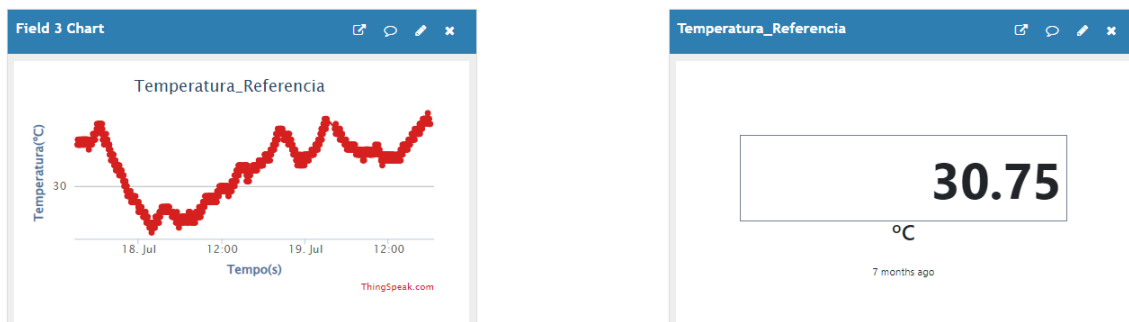
Field 3 Chart Options
? X

Title:	<input type="text" value="Temperatura_Re"/>	Timescale:	<input type="text" value="v"/>
X-Axis:	<input type="text" value="Tempo(s)"/>	Average:	<input type="text" value="v"/>
Y-Axis:	<input type="text" value="Temperatura(°C)"/>	Median:	<input type="text" value="v"/>
Color:	<input type="text" value="#d62020"/>	Sum:	<input type="text" value="v"/>
Background:	<input type="text" value="#ffffff"/>	Rounding:	<input type="text"/>
Type:	<input style="border: none; background: none; text-decoration: none; cursor: pointer; padding: 2px 5px; border-bottom: 1px solid #ccc; border-right: 1px solid #ccc; border-left: 1px solid #ccc; border-top: 1px solid #ccc; width: 100%;" type="text" value="line"/> v	Data Min:	<input type="text"/>
Dynamic?:	<input style="border: none; background: none; text-decoration: none; cursor: pointer; padding: 2px 5px; border-bottom: 1px solid #ccc; border-right: 1px solid #ccc; border-left: 1px solid #ccc; border-top: 1px solid #ccc; width: 100%;" type="text" value="true"/> v	Data Max:	<input type="text"/>
Days:	<input type="text"/>	Y-Axis Min:	<input type="text"/>
Results:	<input type="text" value="1440"/>	Y-Axis Max:	<input type="text"/>

Fonte: Autora

O resultado desta configuração, pode ser observado na Figura 23. O gráfico observado à esquerda do *dashboard* mostra a representação gráfica dos dados enviados pelo sensor de referência à API. Ao lado é exibido o valor numérico do último dado recebido, permitindo assim o acompanhamento em tempo real dos valores.

Figura 23 – *Dashboard* configurado



Fonte: Autora

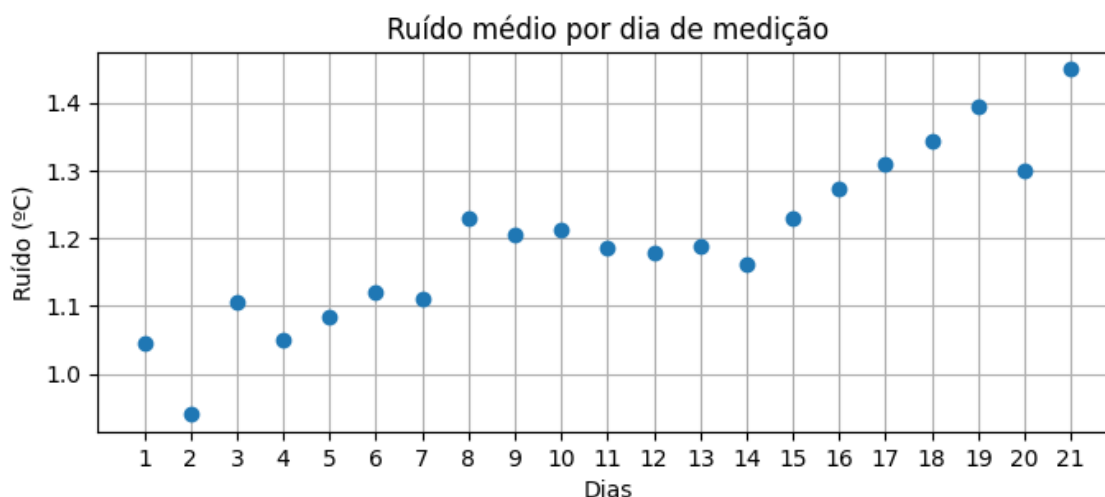
4.4 Modelagem do Sistema *Fuzzy*

O sistema *Fuzzy* desenvolvido foi implementado mediante a obtenção dos dados por meio da *ThingSpeak* API. Os dados foram adquiridos no formato CSV e incorporados ao código para organização e tratamento dos dados. A partir disso, definiu-se os valores de entrada do sistema, gerada através de análises estatísticas, e a saída. A linguagem de programação adotada no desenvolvimento do sistema foi o *Python*, uma linguagem de programação de alto nível e de código aberto, que inclui uma biblioteca específica para aplicações *Fuzzy*.

4.4.1 Pré-Processamento dos Dados

O processo de medição durou cerca de 21 dias ininterruptos. Para cada dia de medição, foram coletados 1.440 pontos, representando cada minuto do dia. A partir desses pontos foi extraída a média de ruído por dia, definida como a saída do sistema *Fuzzy*, representados na Figura 24, na qual é possível observar uma tendência crescente na média a cada dia, com leves oscilações.

Figura 24 – Gráfico da média de ruído por dias de medição



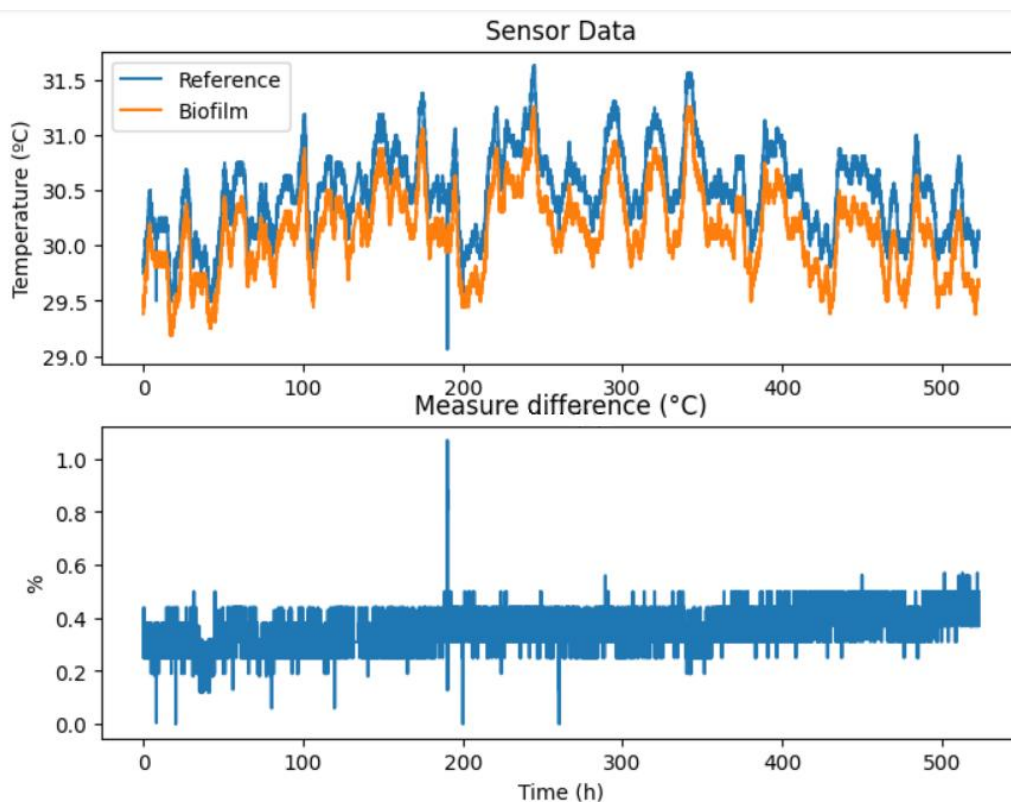
Fonte: Autora

Durante o período de medições foi observado, na etapa de tratamento dos dados, uma variação de temperatura entre a medida pelo sensor de referência e a medida pelo sensor de biofilme logo nas primeiras 12 horas, visto que a formação do biofilme leva em torno de 24 a 72 horas. A partir dessa observação,

formulou-se uma abordagem estatística que estimasse até que valor essa diferença seria considerada “ruído de fábrica”. Em outras palavras, o ruído que não se origina da formação do biofilme.

A Figura 25 mostra os gráficos gerados pelos sensores, o de referência representado pela linha azul e o de biofilme, representado pela linha alaranjada. Logo abaixo tem-se o gráfico da diferença de temperatura entre os dois sensores em porcentagem, obtida ao calcular o módulo da diferença, utilizando a métrica do erro médio absoluto.

Figura 25 – Diferença de temperatura entre o sensor de referência e o sensor de biofilme

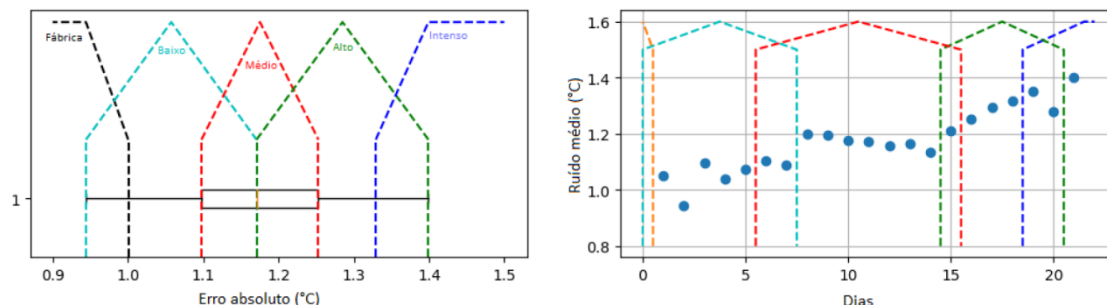


Fonte: Autora

Portanto, para estabelecer o limiar de ruído de fábrica, procedeu-se com a geração de um *boxplot* com o intuito de examinar a distribuição dos dados durante as 12 horas iniciais, em comparação com o restante do período de medição. O *boxplot* nada mais é do que um gráfico estatístico que representa os dados em forma de intervalos interquartil, na qual a linha no meio da caixa é a mediana. A partir das análises feitas, o limiar de ruído de fábrica foi estabelecido como um dos parâmetros do sistema *Fuzzy* desenvolvido. Na Figura 26, à

esquerda, mostra os intervalos das funções de entrada de acordo com a distribuição estatística dos valores de ruído, à direita os intervalos das funções estão definidos de acordo com o agrupamento dos dados do *boxplot*.

Figura 26 – Definição das funções de pertinência da entrada e saída do sistema



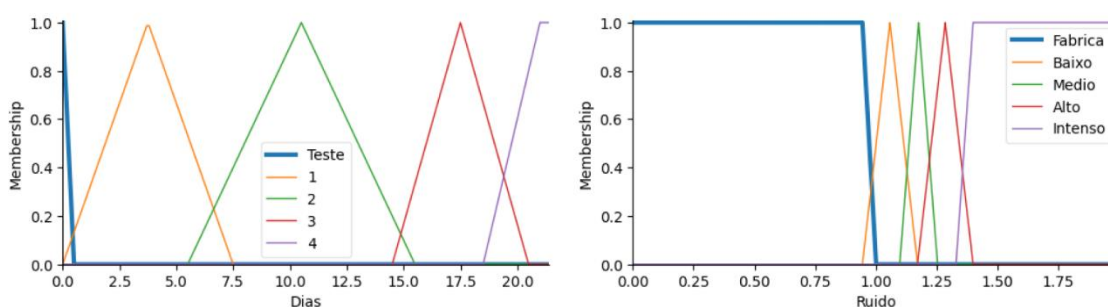
Fonte: Autora

4.4.2 Base de Regras do Sistema Implementado

A base de regras aplicada neste trabalho utiliza a variável linguística *Fuzzy*, definida no tópico de base de regras no capítulo 2. Em contraste com as variáveis tradicionais, que assumem valores precisos, a variável linguística *Fuzzy* permite a representação de valores imprecisos, expressos por meio de termos linguísticos como “baixo”, “médio” e “alto”, e suas respectivas funções de pertinência. Em outras palavras, a variável linguística representa de forma linguística o intervalo dos valores numéricos.

Para melhor compreensão da base de regras, a Figura 27 mostra as funções de pertinência de entrada e saída respectivamente, onde o eixo das abscissas (x) da entrada representa os dias e o eixo das ordenadas (y) denota o grau de pertinência. Por outro lado, à direita, saída do sistema, o eixo das abscissas (x) representa o nível de ruído.

Figura 27 – Entrada (esquerda) e saída (direita) do sistema *Fuzzy*



Fonte: Autora

Sendo assim, a Tabela 3 apresenta as regras estabelecidas no presente estudo:

Tabela 3 – Base de regras do sistema *Fuzzy* implementado

SE o dia medido pertence a função pertinência “Teste” ENTÃO o nível de ruído é “Fábrica”
SE o dia medido pertence a função pertinência “1” ENTÃO o nível de ruído é “Baixo”
SE o dia medido pertence a função pertinência “2” ENTÃO o nível de ruído é “Médio”
SE o dia medido pertence a função pertinência “3” ENTÃO o nível de ruído é “Alto”
SE o dia medido pertence a função pertinência “4” ENTÃO o nível de ruído é “Intenso”

Fonte: Autora

4.5 Considerações Finais

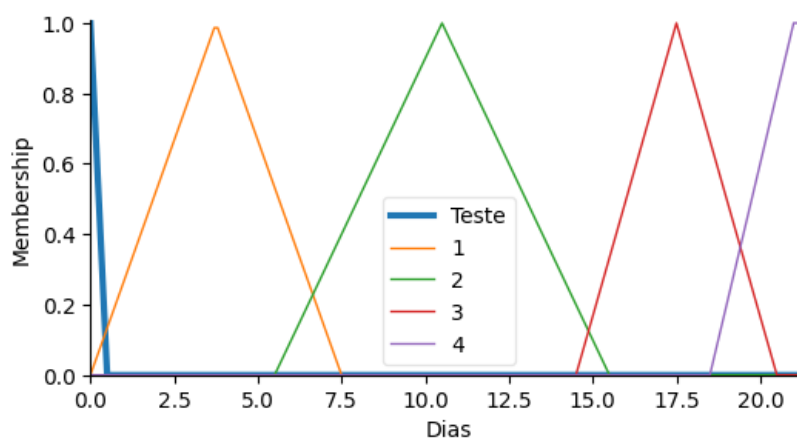
O capítulo aborda de maneira abrangente as tecnologias empregadas, englobando tanto aspectos de hardware quanto de software, no contexto do desenvolvimento deste trabalho. Além disso, destaca-se a etapa de pré-processamento e tratamento dos dados, reconhecida como um componente fundamental no desenvolvimento dos sistemas *Fuzzy*.

5 Resultados

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, são apresentados os resultados derivados da implementação do sistema *Fuzzy*, além de uma avaliação do desempenho do sistema em consonância com os resultados obtidos. As funções de pertinência utilizadas para as análises dos resultados foram as funções triangulares e trapezoidais. A entrada admitida para o sistema está representada na Figura 28, onde a função de pertinência denominada “Teste”, representa o conjunto das 12 horas de ruído de fábrica; a função de pertinência numerada por “1”, representa a primeira semana de medições; a função de pertinência numerada por “2”, representa a segunda semana, com interseção na primeira; a função de pertinência numerada por “3” representa a terceira semana de medições, com interseção na segunda semana; por último, a função de pertinência numerada por “4”, representa o último dia de medições com interseção na terceira semana.

Figura 28 – Entrada do sistema *Fuzzy*



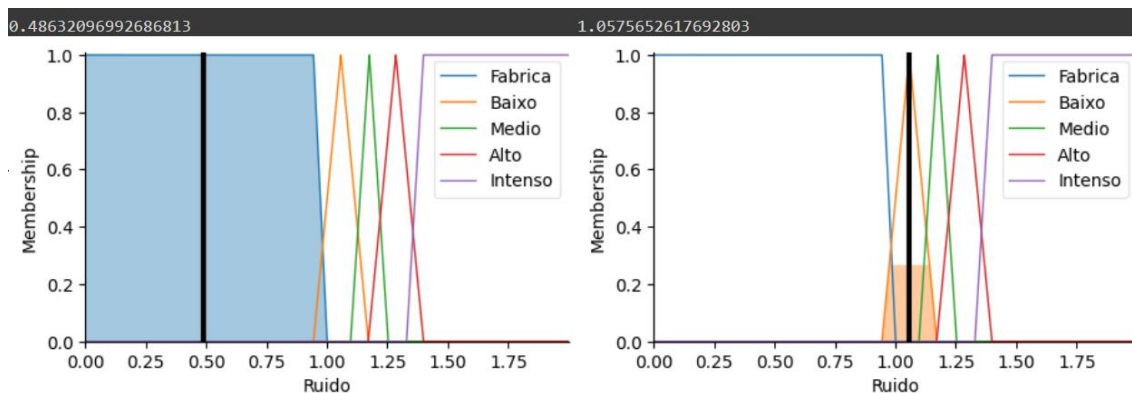
Fonte: Autora

5.2 Resultados obtidos

À esquerda da Figura 29 está representada a saída do sistema *Fuzzy* para as primeiras 12 horas, na qual apresenta o grau de pertinência como ruído de “Fábrica”, mostrando um desempenho ótimo e em consonância com as análises estatísticas feitas durante o pré-processamento dos dados. O grau de

pertinência representado ao lado do ruído de fábrica, remete ao dia 2 de medição, no qual se observa um grau de pertinência “Baixo” ruído.

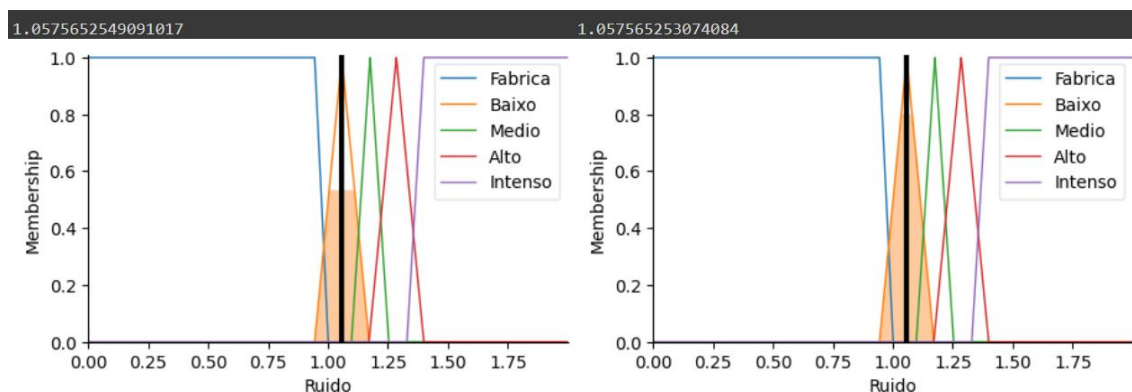
Figura 29 – Verificação das saídas dos dias 1 (esquerda) e 2 (direita)



Fonte: Autora

Na Figura 30 os graus de pertinência analisados estão relacionados aos dias 3 e 4 de medições, no qual à esquerda o grau de pertinência do dia 3 encontra-se bem próximo do grau de pertinência do dia 2, e é definido como ruído “Baixo”. Da mesma forma aplica-se ao dia 4, que se encontra com valores próximos aos dias 2 e 3, gerando o grau de pertinência de ruído “Baixo”.

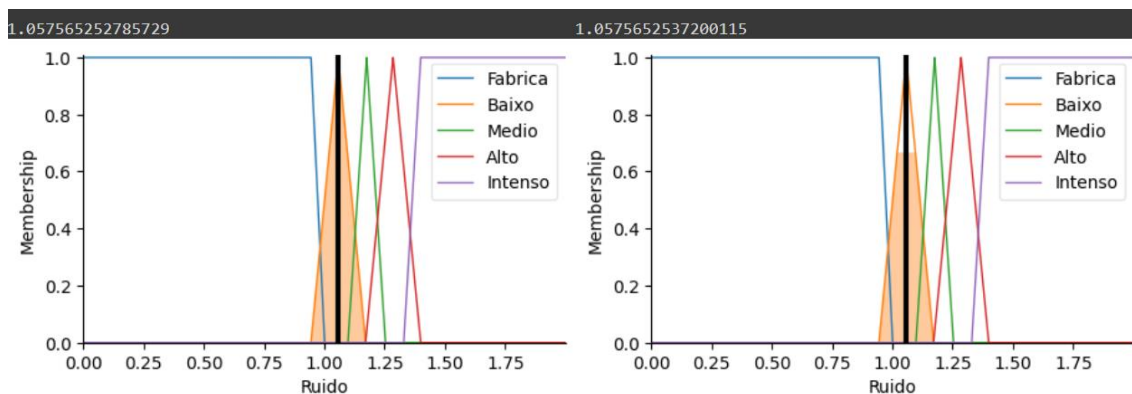
Figura 30 – Verificação das saídas dos dias 3 (esquerda) e 4 (direita)



Fonte: Autora

Na Figura 31 observa-se que o grau de pertinência dos dias 5 e 6 de medições permaneceu próximo dos dias precedentes, em outras palavras, o grau de pertinência permaneceu na função de pertinência de “Baixo” ruído, apresentando leves variações.

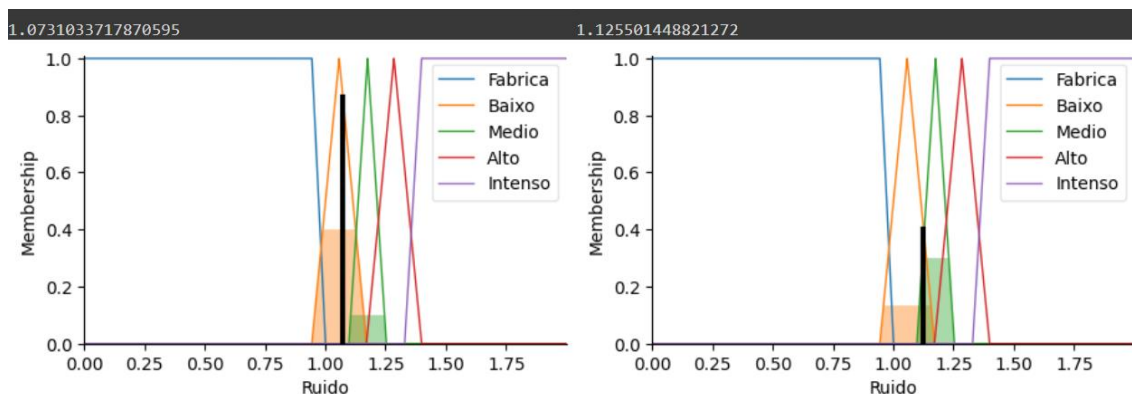
Figura 31 – Verificação das saídas dos dias 5 (esquerda) e 6 (direita)



Fonte: Autora

Na Figura 32 é possível notar que o grau de pertinência do dia 7 possui uma leve interseção entre as funções de pertinência “Baixo” e “Médio”, com tendência maior para o nível “Baixo” de ruído, ao passo que no dia 8 a tendência maior do ruído está para a função de pertinência “Médio”.

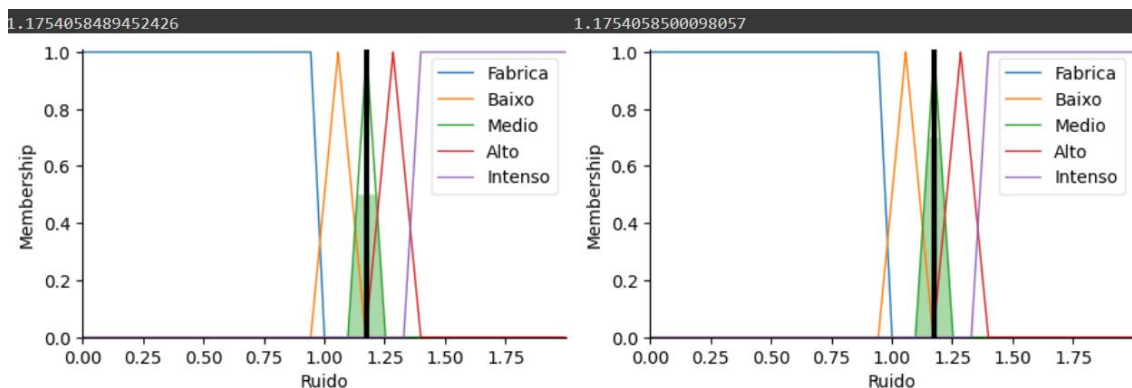
Figura 32 – Verificação das saídas dos dias 7 (esquerda) e 8 (direita)



Fonte: Autora

Na Figura 33 estão representados os dias 9 e 10 de medições, onde se observa que o grau de pertinência permaneceu na função de pertinência de ruído “Médio”, apresentando uma tendência maior de pertencer à função de pertinência “Médio” de um dia para outro.

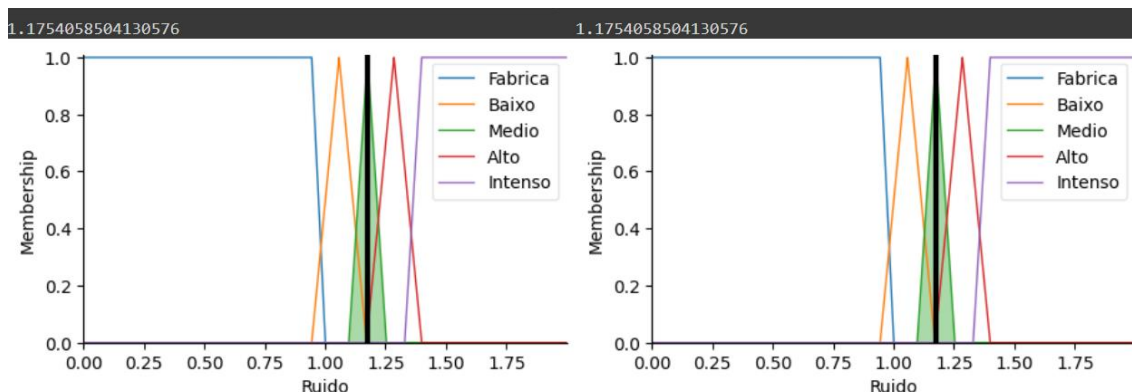
Figura 33 – Verificação das saídas dos dias 9 (esquerda) e 10 (direita)



Fonte: Autora

Na Figura 34, nos dias 11 e 12 de medições, o grau de pertinência permaneceu na função de pertinência de “Médio” ruído, sem apresentar tendências de uma função de pertinência para outra em ambos os dias.

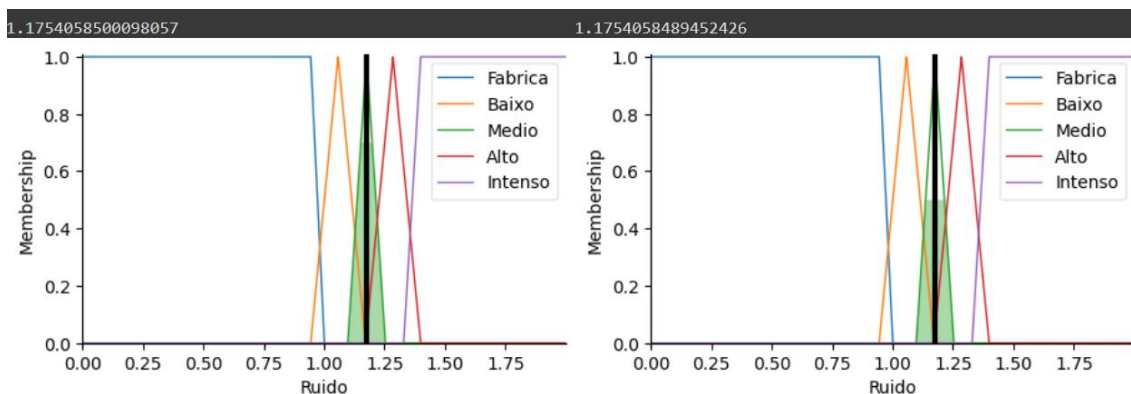
Figura 34 – Verificação das saídas dos dias 11 (esquerda) e 12 (direita)



Fonte: Autora

Na Figura 35, estão representados os dias 13 e 14 de medições, no qual se observa que o grau de pertinência permaneceu na função de pertinência “Médio”, apresentando uma tendência maior de pertencer à função de pertinência “Médio” no dia 13 do que no dia 14.

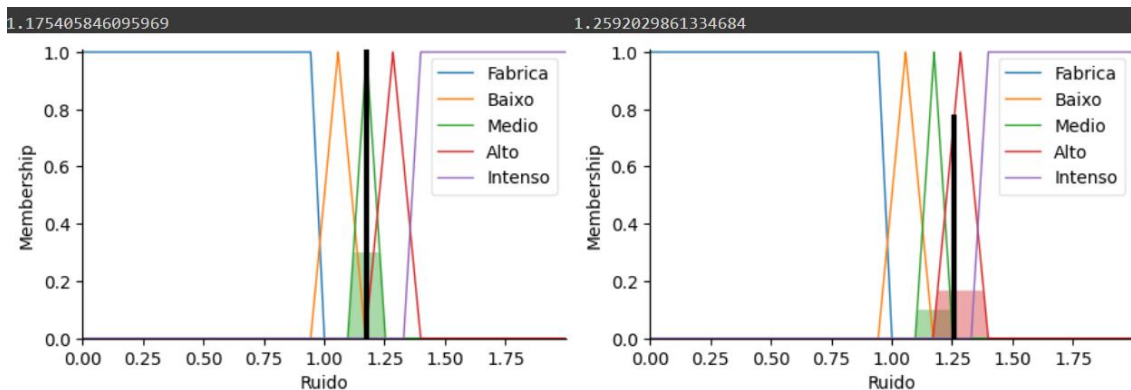
Figura 35 – Verificação das saídas dos dias 13 (esquerda) e 14 (direita)



Fonte: Autora

Na Figura 36 estão representados os dias 15 e 16 de medições, no qual se observa que o grau de pertinência permaneceu na função de pertinência “Médio” ruído no dia 15, apresentando uma tendência maior de pertencer à função de pertinência “Médio” ruído do que na função de pertinência de “Alto” ruído. Por outro lado, no dia 16 foi observado que essa tendência era maior na função de pertinência de “Alto” ruído do que na função de pertinência de “Médio” ruído.

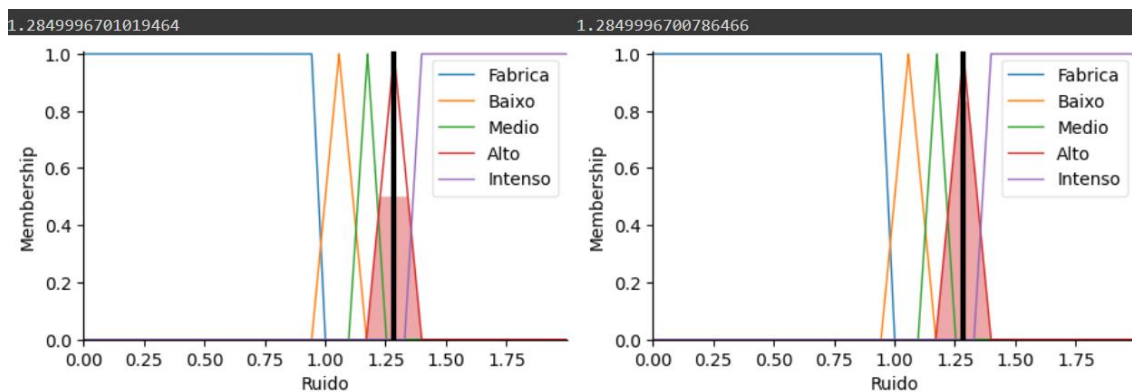
Figura 36 – Verificação das saídas dos dias 15 (esquerda) e 16 (direita)



Fonte: Autora

O dia 17, à direita da Figura 37, mostra que o grau de pertinência possui maior tendência a pertencer à função de pertinência de “Alto” ruído do que na função de pertinência de “Médio” ruído. Em contrapartida, no dia 18, o grau de pertinência apresenta um nível de pertencimento maior na função de pertinência do “Alto” ruído.

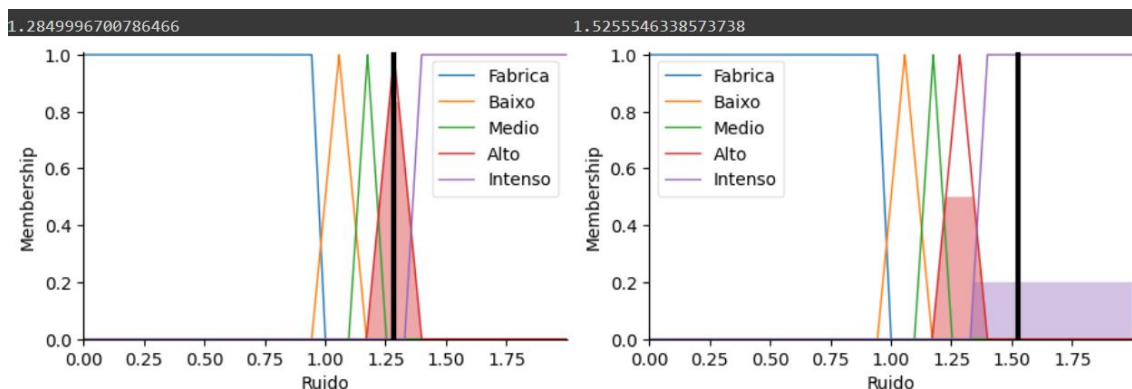
Figura 37 – Verificação das saídas dos dias 17 (esquerda) e 18 (direita)



Fonte: Autora

Na Figura 38, é observado que no dia 19 de medição o grau de pertinência permaneceu o mesmo do dia anterior ao mostrar maior nível de pertencimento à função de pertinência “Alto” ruído. Por outro lado, no dia 20, o grau de pertinência apresentou tendência entre as funções de pertinência de “Alto” ruído e ruído “Intenso”, com a maior sendo na função de pertinência de “Alto” ruído.

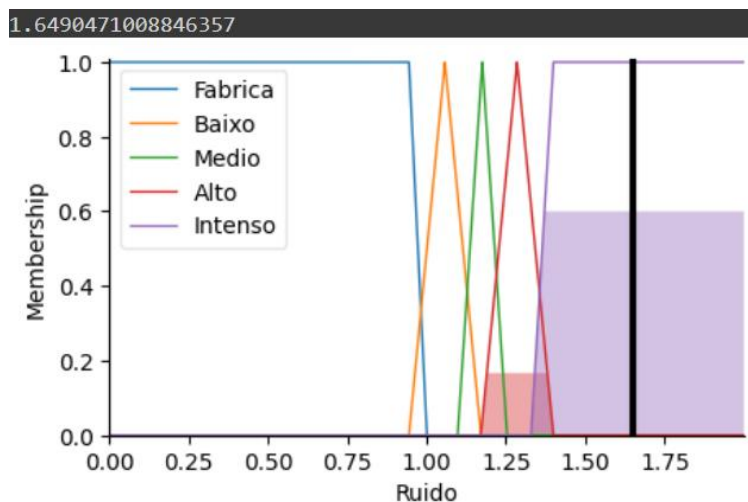
Figura 38 – Verificação das saídas dos dias 19 (esquerda) e 20 (direita)



Fonte: Autora

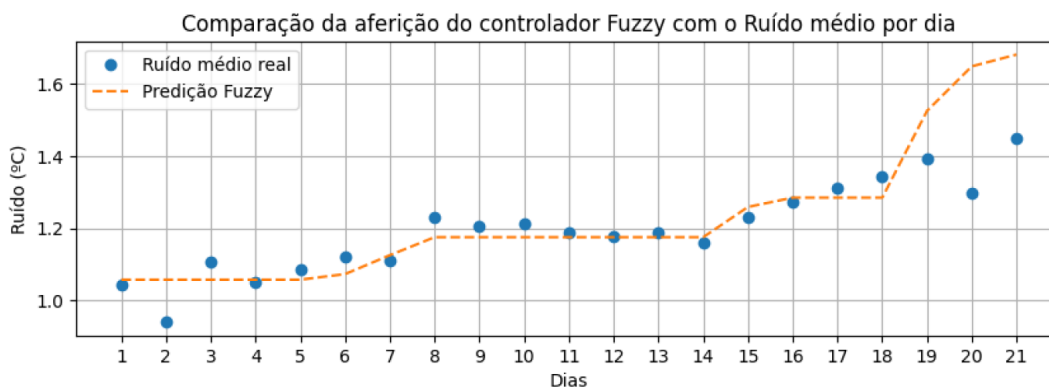
Por fim, na Figura 39, mostra o dia 21 de medições, no qual é observado que o grau de pertinência possui maior tendência a pertencer à função de pertinência de ruído “Intenso” do que na função de pertinência de “Alto” ruído.

Figura 39 – Verificação da saída do dia 21 de medições



5.3 Performance do Sistema

Para conduzir uma análise abrangente, realizou-se a estimativa de todos os dias do experimento usando o sistema *Fuzzy*, comparando seu desempenho aos dados reais. A Figura 40 apresenta o desempenho do sistema de acordo com o problema proposto.

Figura 40 – Desempenho do sistema *Fuzzy*

É observado que o sistema se aproximou dos dados reais em quase todo o experimento, apresentando um desvio apenas nos últimos dois dias.

5.4 Considerações Finais

Neste capítulo, os resultados obtidos pelo sistema *Fuzzy* estão de acordo com a tendência crescente de ruído entre os sensores conforme o tempo,

provando a eficácia do sistema para o problema apresentado. Em termos gerais, o sistema apresentou bom desempenho, tornando-o aplicável para este cenário.

6 Conclusão

A integração de tecnologias emergentes, como dispositivos aplicados no cenário da Internet das Coisas (IoT) e a computação em nuvem, tem estabelecido os fundamentos essenciais para a aplicação de sistemas inteligentes de monitoramento em tempo real, viabilizando o acesso remoto às informações em qualquer ponto de conexão. O presente estudo descreve minuciosamente o desenvolvimento e implementação de um sistema *Fuzzy* destinado à análise do ruído em sensores de temperatura DS18B20, cujo a ocorrência é atribuída à formação de biofilme em suas superfícies. Este sistema foi empregado em um contexto IoT, sendo apresentados os detalhes dos componentes de hardware e software aplicados em um ambiente experimental controlado.

Ao longo do processo de desenvolvimento do sistema *Fuzzy*, foi elaborada uma análise estatística visando estabelecer seus limiares de entrada e saída. Para esse fim, o *boxplot* foi adotado como ferramenta analítica para avaliar a distribuição dos dados coletados pelos sensores. Como estratégia de análise dos resultados, optou-se por utilizar uma abordagem baseada em variáveis linguísticas, com o intuito de quantificar o grau de pertinência do ruído detectado.

Após as análises e comparação de desempenho do sistema, concluiu-se que utilização do sistema se revelou eficaz na condução do experimento ao alertar a necessidade da manutenção preditiva do sensor, identificando a tendência de surgimento de ruído atribuído ao biofilme. Tendência essa que será investigada a longo prazo em futuros estudos, visando a aplicação e adaptação do controlador desenvolvido em diversos contextos além do ambiente controlado aplicado neste trabalho.

6.1 Contribuições do Trabalho

- A proposta da implementação de um cenário IoT que promove o acompanhamento dos dados em tempo real, podendo otimizar o tempo de resposta em caso de falhas durante a obtenção dos dados por meio dos sensores;

- A aplicação da placa Wemos LOLIN D1 Mini como *end-node* que possibilita a conexão dos dispositivos à Internet.
- O armazenamento dos dados coletados, utilizando a plataforma *ThingSpeak* para o acompanhamento dos mesmos em tempo real;
- O uso do *Fuzzy* para determinar o grau de ruído ocorrido pela aderência de biofilme na superfície dos sensores;
- A metodologia é aplicável e flexível o suficiente para incluir novas variáveis que estejam em consonância com o problema apresentado;

6.2 Trabalhos Futuros

Nesta seção, serão listadas as perspectivas de estudos futuros, os quais consistem na implementação de aprimoramentos no sistema *Fuzzy* em conformidade com o cenário que será proposto:

- Aplicar a metodologia utilizada, nesta dissertação, em um cenário real;
- Utilizar transmissão de dados via GSM para o envio dos dados coletados pelos sensores;
- Realizar a aquisição de sensores a nível industrial para melhoria da precisão dos dados;
- Adicionar sensores de pH e de Oxigênio Dissolvido para análises completas do cenário;
- Desenvolver um controlador *Fuzzy* MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) que atenda às novas demandas do projeto.
- Empregar metodologias de inteligência computacional com o intuito de aprimorar a acurácia do controlador *Fuzzy* desenvolvido nesta dissertação.

Referências

ALBERTIN, Marcos Ronaldo et al. Aplicação da eficiência global de equipamentos com indicador de qualidade sem perdas. 2012. *Citado uma vez na página 8.*

BANNA, Muinul H. et al. Online drinking water quality monitoring: review on available and emerging technologies. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 12, p. 1370-1421, 2014. *Citado uma vez na Página 1.*

BARBOSA, Paulo Roberto. **Controle difuso em transportadores pneumáticos de sólidos: redução do consumo de potência.** 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. *Citado uma vez na página 17.*

BELTRÃO, Jean. **Rio Amazonas tem pior seca em 49 anos na ilha de Parintins, no AM.** 2023. Disponível em: <<https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2023/10/20/rio-amazonas-tem-pior-seca-em-49-anos-na-ilha-de-parintins-no-am.ghtml>>. Acesso em: 18 dez. 2023. *Citado uma vez na Página 1.*

CAPOSSELE, Angelo et al. Security as a CoAP resource: an optimized DTLS implementation for the IoT. In: **2015 IEEE international conference on communications (ICC)**. IEEE, 2015. p. 549-554. *Citado uma vez na Página 11.*

CHEN, Guanrong; PHAM, Trung Tat. **Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems.** CRC press, 2000. *Citado uma vez na Página 15.*

CNN Brasil. **Entenda por que mais de 100 botos morreram em água a 40° C na Amazônia.** Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/por-que-mais-de-100-botos-morreram-em-agua-a-40oc-na-amazonia/>>. Acesso em: 18 dez. 2023. *Citado uma vez na Página 1.*

DELGADO, Adrián; BRICIU-BURGHINA, Ciprian; REGAN, Fiona. Antifouling strategies for sensors used in water monitoring: review and future perspectives. **Sensors**, v. 21, n. 2, p. 389, 2021. *Citado uma vez na Página 2.*

DE BARROS, Laécio Carvalho. **A First Course in Fuzzy Logic, Fuzzy Dynamical Systems, and Biomathematics Theory and Applications**. Springer, 2017. *Citado uma vez nas Páginas 18 e 19.*

DE MATOS, R. et al. Biofilmes microbianos, você sabe o que são?. In: DE MATOS, Rafael et al. Biofilmes microbianos, você sabe o que são?. [S. l.], 2022. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/microbiologando/2022/09/06/biofilmesmicrobianos-voce-sabe-o-que-sao/>>. Acesso em: 20 jan. 2024. *Citado uma vez na Página 6.*

DONLAN, R.M. & Costerton, J.M. 2002. Biofilms: Survival Mechanisms of Clinically Relevant Microorganisms. *Clinical Microbiology Review*. 15: 167-193. *Citado uma vez na Página 8.*

ESPRESSIF. 2013. **ESP8266 RTOS SDK Programming Guide**. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp8266-rtos-sdk/en/latest/get-started/index.html>>. Acesso em: 24 Jan. 2024. *Citado uma vez na Página 14.*

FARHAN NAEEM, Muhammad et al. A novel method for life estimation of power transformers using fuzzy logic systems: An intelligent predictive maintenance approach. **Frontiers in Energy Research**, v. 10, p. 977665, 2022. *Citado uma vez na Página 24.*

HAFEEZ, Ayesha et al. Smart Home Area Networks Protocols within the Smart Grid Context. **J. Commun.**, v. 9, n. 9, p. 665-671, 2014. *Citado uma vez na Página 12.*

HEYDORN, A., et al (2000). Qualification of biofilm structures by the novel computer program COMSTAT. *Microbiology*, London, v. 146, n. 10, p. 2395-2407, Oct. *Citado uma vez na Página 7.*

IBGE EDUCA. **Conheça o Brasil – Território**. [2020?]. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18305-rios-do-brasil.htm>>. Acesso em 14 dez. 2023. *Citado uma vez na Página 1*

IBRAHIM, Ahmad. **Fuzzy logic for embedded systems applications**. Newnes, 2004. *Citado uma vez na Página 17.*

LAUBHAN, Kevin et al. A four-layer wireless sensor network framework for IoT applications. In: **2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)**. IEEE, 2016. p. 1-4. *Citado uma vez na Página 12.*

LEVÄ, Tapio; MAZHELIS, Oleksiy; SUOMI, Henna. Comparing the cost-efficiency of CoAP and HTTP in Web of Things applications. **Decision Support Systems**, v. 63, p. 23-38, 2014. *Citado uma vez na Página 10.*

LILLY, John H. **Fuzzy control and identification**. John Wiley & Sons, 2011. *Citado uma vez na Página 15.*

LIU, Sanly et al. Understanding, monitoring, and controlling biofilm growth in drinking water distribution systems. **Environmental science & technology**, v. 50, n. 17, p. 8954-8976, 2016. *Citado uma vez na Página 7.*

MACHADO, A. A. Desenvolvimento de Controles Fuzzy Adaptativos em Tempo Real Para Otimização do Canal LoRa Utilizando 915 MHz em Situações de Mobilidade. 2023. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, 2023. *Citado uma vez nas Páginas 16 e 22.*

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International journal of human-computer studies**, v. 51, n. 2, p. 135-147, 1999. *Citado uma vez na Página 17.*

MATHWORKS. 2010. **Write Data to Chanel**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/write-data.html?s_tid=CRUX_topnav> Acesso em: 20 Jan. 2024. *Citado uma vez na Página 13.*

MCGRATH, Matt, et. al. 2023. **'É praticamente certo' que 2023 será o ano mais quente já registrado, indicam novos dados**. 2023. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/articles/ce5pd5x7rrzo>>. Acesso em: 18 dez. 2023 *Citado uma vez na Página 1.*

MENEGOTTO, Juliana; BARROS, Laécio C. Aplicação de sistemas fuzzy em modelos farmacocinéticos multicompartmentais. 2011. *Citado uma vez na Página 21.*

NIKOLOV, Neven. Research of MQTT, CoAP, HTTP and XMPP IoT communication protocols for embedded systems. In: **2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET)**. IEEE, 2020. p. 1-4. *Citado uma vez na Página 10.*

ORACLE. [2018?]. **O que é IoT?**. Disponível em: <<https://www.oracle.com/br/internet-of-things/what-is-iot/>>. Acesso em: 05 Jan. 2024. *Citado uma vez na Página 9.*

PAOLANTI, Marina et al. Machine learning approach for predictive maintenance in industry 4.0. In: **2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)**. IEEE, 2018. p. 1-6. *Citado uma vez na Página 23 e duas vezes na Página 25.*

PEREIRA DA SILVA, Mírian. Efeito Do Ph e Temperatura na Adesão e Formação de Biofilmes de Diferentes Estirpes de Bacillus Cereus em Aço Inoxidável. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, [S. l.], 2018. *Citado uma vez na Página 7*

PEREIRAA, Suleima EB et al. Estudo preliminar da formação de biofilmes em superfícies de aço inox 304L. 2014. *Citado uma vez nas Páginas 2 e 6.*

PRAYOGO, Sandy Suryo; MUKHLIS, Yulisdin; YAKTI, Bayu Kumoro. The use and performance of MQTT and CoAP as internet of things application protocol using NodeMCU ESP8266. In: **2019 Fourth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)**. IEEE, 2019. p. 1-5. *Citado uma vez na Página 9.*

QIN, Yiheng et al. Integrated water quality monitoring system with pH, free chlorine, and temperature sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 255, p. 781-790, 2018. *Citado uma vez nas Páginas 2 e 7.*

RODRIGUES, Laura Beatriz et al. Avaliação da hidrofobicidade e da formação de biofilme em poliestireno por *Salmonella Heidelberg* isoladas de abatedouro avícola. **Acta scientiae veterinariae**, v. 37, n. 3, p. 225-230, 2009. *Citado uma vez na Página 8.*

SILER, William; BUCKLEY, James J. **Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning**. John Wiley & Sons, 2005. *Citado uma vez na Página 16.*

SILVESTRINI, Marion Lucia. Molhabilidade de superfícies reentrantes. 2017. *Citado uma vez na Página 8.*

SIMÕES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S. **Controle e modelagem fuzzy**. Editora Blucher, 2007. *Citado uma vez na Página 21.*

SPÍNOLA, Ana Lúcia Gerardi. **Biofilmes aeróbios para remoção de nitrogênio em células de fluxo, submetidos a diferentes velocidades superficiais e taxas de carregamento**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. *Citado uma vez na Página 7.*

STOOLEY, P. et. al. (2002). Biofilms as complex differentiated communities *Annual Review of Microbiology*, Palo Alto, v.56, p. 187-209, Oct. *Citado uma vez na Página 6.*

TANSCHKEIT, Ricardo. Sistemas fuzzy. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 338-353, 2004. *Citado uma vez na Página 18.*

TANENBAUM, Andrew S. Redes de computadores. Pearson educación, 2003. *Citado uma vez na Página 12.*

TAURION, Cezar. **Big data**. Brasport, 2013. *Citado uma vez na Página 11.*

THANGAVEL, Dinesh et al. Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware. In: **2014 IEEE ninth international conference on intelligent sensors, sensor networks and information processing (ISSNIP)**. IEEE, 2014. p. 1-6. *Citado uma vez na Página 10.*

THINGSPEAK: A plataforma que precisa para IoT. [S. l.], 9 ago. 2017. Disponível em: <https://pplware.sapo.pt/internet/thingspeak-a-plataforma-que-precisa-para-iot/>. Acesso em: 7 jun. 2023. *Citado uma vez na Página 13.*

VAFAEI, Nazanin; RIBEIRO, Rita A.; CAMARINHA-MATOS, Luis M. Fuzzy early warning systems for condition based maintenance. **Computers & Industrial Engineering**, v. 128, p. 736-746, 2019. *Citado uma vez nas Páginas 23 e 25.*

WANG, Ling; CHU, Jian; WU, Jun. Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. **International journal of production economics**, v. 107, n. 1, p. 151-163, 2007. *Citado uma vez nas Páginas 24 e 25.*

WANG, Li-Xin. **A course in fuzzy systems and control**. Prentice-Hall, Inc., 1996. *Citado uma vez nas Páginas 17 e 20.*

WENZEL, R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind. Eng. Chem.*, v. 28, n. 8, p. 988–994, 1936. *Citado uma vez na Página 8.*

WILLICH, Julia. 2023. **O que é manutenção preditiva, quais são as vantagens e exemplos**. Disponível em: <<https://www.produttivo.com.br/blog/manutencao-preditiva-o-que-e-exemplos-e-tendencias-do-setor/>>. Acesso em: 18 Jan. 2024. *Citado uma vez na Página 8.*

ZADEH, Lotfi A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics**, n. 1, p. 28-44, 1973. *Citado uma vez na Página 17.*