

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**  
**Faculdade de Medicina - Campus de Botucatu**

**ANA LUIZA COSTA DE ÁVILA**

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E UMIDADE PARA AMBIENTES  
HOSPITALARES**

**BOTUCATU**

**2025**



**ANA LUIZA COSTA DE ÁVILA**

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E UMIDADE PARA AMBIENTES  
HOSPITALARES**

Trabalho de Conclusão de Residência apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Medicina, Botucatu, para obtenção do título de Especialista em Radiodiagnóstico.

Orientador(a): Prof. Titular. Diana Rodrigues de Pina

Coorientador(a): Dr. Matheus Alvarez

**BOTUCATU**

**2025**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.  
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CAMPUS DE BOTUCATU – UNESP  
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: **ANA CLARA GATTO – CRB 8/10577**

---

Ávila, Ana Luiza Costa de

Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento de temperatura e  
umidade para ambientes hospitalares / Ana Luiza Costa de Ávila. - Botucatu, 2025.

72 p.

Trabalho acadêmico (Residência em Radiodiagnóstico) – Universidade Estadual  
Paulista (UNESP), Faculdade de Medicina, Botucatu.

Orientador(a): Diana Rodrigues de Pina

Coorientador: Matheus Alvarez

1. Monitoramento ambiental. 2. Radiodiagnóstico. 3. Internet das coisas.  
4. Manutenção preditiva. 5. Física médica. I. Título

---

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

O Sistema de Monitoramento de Temperatura e Umidade (SMTU) demonstra um impacto potencial significativo, diretamente alinhado à gestão de risco e Controle de Qualidade na Física Médica. O projeto valida uma solução baseada em *Internet of Things* (IoT) de baixo custo, promovendo inovação na gestão tecnológica hospitalar. Seu principal benefício é permitir a migração da manutenção reativa para a preditiva e proativa, protegendo equipamentos de diagnóstico de alto valor agregado contra danos por desvios ambientais e prevenindo a paralisação do serviço. Adicionalmente, o monitoramento contínuo garante a conformidade com normativas e internacionais, assegurando a qualidade diagnóstica dos exames e, conseqüentemente, a segurança do paciente e a continuidade operacional do HCFMB/UNESP.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

The Temperature and Humidity Monitoring System (SMTU) demonstrates a significant potential impact, directly aligned with Risk Management and Quality Control in Medical Physics. The project validates a low-cost Internet of Things (IoT)-based solution, promoting innovation in hospital technology management. Its main benefit is enabling the shift from reactive to predictive and proactive maintenance, protecting high-value diagnostic equipment against damage from environmental deviations and preventing service downtime. Additionally, continuous monitoring ensures compliance with national and international standards, guaranteeing the diagnostic quality of exams and, consequently, patient safety and the operational continuity of HCFMB/UNESP.

**ANA LUIZA COSTA DE ÁVILA**


**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E UMIDADE PARA AMBIENTES  
HOSPITALARES**

Trabalho de Conclusão de Residência apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Medicina, Botucatu, para obtenção do título de Especialista em Física Médica do Radiodiagnóstico.

Área de Concentração: Radiodiagnóstico

Data da defesa: 17 / 12 / 2025

Banca Examinadora:



---

Prof. Titular. Diana Rodrigues de Pina  
UNESP – Departamento de Infectologia, Dermatologia, Diagnóstico por Imagem e Radioterapia da Faculdade de Medicina de Botucatu (FMB-UNESP).



---

Me. Raissa Alexia Camargo Guassu  
UNESP – Aluna de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Ciências Biomoleculares e Farmacológicas do Instituto de Biociências de Botucatu



---

Especialista em Radiodiagnóstico Túlio Guilherme Soares Marques  
HCFMB – Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina de Botucatu

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, antes de tudo, à minha família, que sempre foi meu maior porto seguro. À minha mãe, Suely, pelo amor incondicional, pela força diária e por me lembrar, nos momentos mais difíceis, que eu era capaz. Aos meus irmãos, João Pedro e Rafael, por serem parceria, leveza e presença indispensável na minha vida.

À memória da minha avó Maria, que foi tudo para mim. Seu carinho, sua sabedoria e sua maneira única de cuidar deixaram marcas eternas em quem sou. Muito do meu caminho foi guiado pelos valores e pelo amor que ela me ensinou.

Ao meu pai, Sidney, que segue comigo na saudade e na lembrança afetuosa. Sua história e seus ensinamentos continuam sendo parte da minha força e da minha identidade.

Agradeço com todo o carinho à Amanda e à Raissa, que transformaram minha jornada em Botucatu e tornaram meus dias mais leves. Amanda, minha R2, foi exemplo de generosidade, paciência e profissionalismo. Raissa também esteve comigo no dia a dia da residência, compartilhando desafios, risadas e apoio constante. Amo vocês, e sou imensamente grata a vocês e às suas famílias pelo acolhimento tão especial.

Meu agradecimento também ao Sr. Mário, secretário do Núcleo de Física Médica, pela atenção e gentileza sempre que precisei. À Vitória, que me acompanhou ao longo desses dois anos. Aos meus R1s, Moara e Renan, obrigada pela parceria e pelo convívio; espero ter sido uma boa R2 e contribuído para a trajetória de vocês.

À professora Diana, coordenadora do Programa de Residência, pela dedicação e compromisso com nossa formação, e à Faculdade de Medicina de Botucatu, pela estrutura que tornou possível minha especialização. Ao meu preceptor Matheus, agradeço pela orientação clara e pelo conhecimento compartilhado, fundamentais para minha formação.

Aos funcionários que me acolheram com respeito e gentileza, deixo meu muito obrigada.

Ao Ministério da Saúde, agradeço a bolsa que possibilitou minha dedicação integral ao programa.

E por fim, mas não menos importante, ao meu amor, Daniel, obrigada pelo apoio, pela paciência, pelo companheirismo e por caminhar comigo mesmo nos dias mais difíceis. Seu carinho fez toda a diferença para que eu chegasse até aqui.

" No fim, tudo dá certo. Se não deu certo, é porque ainda não chegou ao fim."

Fernando Sabino

## RESUMO

A manutenção de condições ambientais estáveis em salas de Radiodiagnóstico é fundamental para o desempenho de equipamentos de alto custo, a qualidade diagnóstica e a segurança do paciente. Variações térmicas e de umidade podem causar degradação de componentes e perda de conformidade regulatória. Este trabalho descreve o desenvolvimento do Sistema de Monitoramento de Temperatura e Umidade (SMTU), uma solução baseada em *Internet of Things* (IoT) voltada para o controle de qualidade e manutenção preditiva hospitalar. O sistema utiliza sensores digitais DHT22 integrados a microcontroladores ESP32 para a coleta e transmissão de dados via *Wi-Fi*. As informações são armazenadas na plataforma *ThingSpeak*, que permite visualização em tempo real e configuração de alertas. A validação metrológica foi realizada por comparação com um instrumento de referência, utilizando o cálculo do Desvio Médio Absoluto. Os resultados confirmaram um desempenho satisfatório, com desvios dentro dos limites recomendados. A implementação prática permitiu identificar tendências de não conformidade precocemente, possibilitando intervenções antes da ocorrência de paralisações operacionais ou danos severos aos equipamentos. Conclui-se que o SMTU é uma alternativa de baixo custo e alta aplicabilidade, auxiliando na transição da manutenção reativa para a preditiva e fortalecendo a gestão tecnológica em Física Médica.

**Palavras-chave:** monitoramento ambiental; radiodiagnóstico; *Internet of Things*; manutenção preditiva; Física Médica.

## ABSTRACT

The maintenance of stable environmental conditions in Radiodiagnosis rooms is essential for the performance of high-cost equipment, diagnostic quality, and patient safety. Thermal and humidity variations can cause component degradation and loss of regulatory compliance. This paper describes the development of the Temperature and Humidity Monitoring System (SMTU), an **Internet of Things** (IoT)-based solution aimed at quality control and hospital predictive maintenance. The system utilizes DHT22 digital sensors integrated with ESP32 microcontrollers for data collection and transmission via **Wi-Fi**. Information is stored on the **ThingSpeak** platform, which enables real-time visualization and alert configuration. Metrological validation was performed through comparison with a reference instrument, using the Mean Absolute Deviation calculation. Results confirmed satisfactory performance, with deviations within recommended limits. Practical implementation allowed for the early identification of non-compliance trends, enabling interventions before the occurrence of operational shutdowns or severe equipment damage. It is concluded that the SMTU is a low-cost, high-applicability alternative, aiding the transition from reactive to predictive maintenance and strengthening technological management in Medical Physics.

**Keywords:** Environmental monitoring; Radiodiagnosis; *Internet of Things*; Predictive maintenance; Medical Physics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Taxa de falha do equipamento em função do tempo. ....	6
Figura 2: Sensor DHT22.....	8
Figura 3: Vistas frontal e traseira do ESP32.....	12
Figura 4: Modelo 3D esquemático do suporte, obtido na plataforma Printables, exibindo a estrutura geral com tampa removível e aberturas laterais para ventilação. ....	17
Figura 5: Cabos jumper ligando o sensor DHT22 e o microcontrolador ESP32 dentro da case.....	19
Figura 6. (a) Vista superior do suporte montado, com o sensor DHT22 visível através do recorte retangular da tampa. (b) Vista inferior do suporte, destacando as aberturas para passagem dos cabos e ventilação. (c) Visão interna do suporte aberto, mostrando o microcontrolador ESP32 fixado na base da caixa e o sensor DHT22 acoplado à tampa, com as conexões realizadas por cabos jumper.....	20
Figura 7: Esquema de ligação do sensor DHT22 ao ESP32.....	21
Figura 8: Sensor instalado na sala do tomógrafo 1. Figura 9: Sensor instalado na sala do tomógrafo 2. ....	26
Figura 10: Sensor instalado na sala do angiógrafo. Figura 11: Sensor instalado na sala do mamógrafo.....	26
Figura 12: Fluxograma do processo de aquisição e visualização de dados via ThingSpeak. ....	27
Figura 13: Dashboard do canal 1 do ThingSpeak. ....	36
Figura 14: Gráfico de controle ambiental da sala GE OPTIMA 670 (umidade e temperatura) ao longo dos meses.....	37
Figura 15: Gráfico de controle ambiental da sala do TOSHIBA 1 (umidade e temperatura) ao longo dos meses.....	38
Figura 16: Gráfico de controle ambiental da sala do TOSHIBA 2 (umidade e temperatura) ao longo dos meses.....	39
Figura 17: Gráfico de controle ambiental da sala do SPECT/CT (umidade e temperatura) ao longo dos meses.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estrutura do pacote de dados de 40 bits do sensor DHT22. ....	9
Tabela 2: Especificações técnicas metrológicas do DHT22. ....	10
Tabela 3: Locais de instalação dos sensores. ....	24
Tabela 4: Recomendações de parâmetros – Toshiba Activion 16 ....	25
Tabela 5: Recomendações de parâmetros – GE (Optima 660 e Discovery 670).....	25
Tabela 6: Estimativa de custos do sistema. ....	29
Tabela 7: Resumo da validação metrológica com <i>gold-standard</i> .....	32
Tabela 8: Comparação de custos do sistema desenvolvido e modelos comerciais. .	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógica-Digital
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
BLE	Bluetooth Low Energy
DHT22	Digital Humidity and Temperature (Sensor)
ESP32	Série de Microcontroladores com Wi-Fi e Bluetooth
ESD	Electrostatic Discharge
GE	General Electric (Healthcare)
HU	Hounsfield Units
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
MATLAB	Matrix Laboratory
NTC	Negative Temperature Coefficient
PaaS	Platform as a Service

PMT	Photomultiplier Tube
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
SMS	Short Message Service
SoC	System-on-Chip

## LISTA DE SÍMBOLOS

T Temperatura

UR Umidade Relativa

$\Omega$  Ohm (Unidade de resistência elétrica)

$^{\circ}\text{C}$  Grau Celsius (Unidade de temperatura)

$\mu\text{s}$  Microsegundo (Unidade de tempo)

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
2.1.	IMPACTO DA TEMPERATURA E UMIDADE EM EQUIPAMENTOS DE ALTA COMPLEXIDADE .....	4
2.2.	CONTROLE DE QUALIDADE E MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	7
2.3.	CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA E UMIDADE .....	7
2.3.1	Protocolo de Comunicação Digital .....	9
2.3.2	Especificações Metrológicas e Protocolo de Comunicação do DHT22 ..	10
2.3.3	Saída de Dados e Protocolo Single-Wire .....	10
2.4	A IMPORTÂNCIA DA CALIBRAÇÃO METROLÓGICA .....	11
2.5	MICROCONTROLADOR ESP32 .....	11
2.5.1	Arquitetura e Desempenho do ESP32 .....	12
2.5.2	Conectividade Integrada e Segurança.....	12
2.5.3.	Eficiência Energética .....	13
2.6.	ARDUINO IDE- <i>INTEGRATED DEVELOPMENT ENVIRONMENT</i> .....	13
2.6.1.	Linguagem e Estrutura de Programação .....	13
2.6.2.	Uso de Bibliotecas .....	14
2.7.	PLATAFORMA CLOUD PARA IOT ( <i>THINGSPEAK</i> ).....	14
2.7.1.	Segurança da Comunicação ( <i>API Keys</i> ) .....	16
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>16</b>
3.1.	CONFECÇÃO DOS SENSORES .....	16
3.2.	MONTAGEM DO CIRCUITO E PROGRAMAÇÃO DOS SENSORES ..	20
3.2.1.	Desenvolvimento do Firmware e Comunicação IoT .....	22
3.3.	INSTALAÇÃO DOS SENSORES .....	24
3.4.	Comunicação dos sensores com a plataforma <i>Thingspeak</i> .....	26
3.5.	Validação dos sensores (método <i>Gold Standard</i> ) .....	28
3.6.	Segurança da Informação e Confiabilidade .....	28
3.7.	Custos e Escalabilidade .....	29
3.8.	Envio de alertas .....	30
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>31</b>
4.1.	VALIDAÇÃO E CONFIABILIDADE METROLÓGICA.....	31

4.2.	Análise de custos e vantagem econômica.....	32
4.3.	PROCESSAMENTO DE DADOS EM PYTHON .....	33
4.4.	DESEMPENHO EM OPERAÇÃO REAL .....	34
4.5.	VISUALIZAÇÃO E INTERFACE <i>THINGSPEAK</i> .....	35
4.6.	VISUALIZAÇÃO DOS GRÁFICOS DE TENDÊNCIA.....	36
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>42</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>43</b>
<b>8.</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>45</b>
	<i>APÊNDICE A - CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO PARA LEITURA DHT22 E ENVIO AO THINGSPEAK .....</i>	<i>45</i>
	<i>APÊNDICE B - CÓDIGO MATLAB PARA ANÁLISE DE DADOS E ENVIO DE ALERTAS VIA THINGSPEAK.....</i>	<i>48</i>
	<i>APÊNDICE C – CÓDIGO PYTHON PARA EXTRAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS DO THINGSPEAK (COLAB).....</i>	<i>50</i>

## 1. INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia na área da saúde proporcionou melhorias significativas na qualidade do diagnóstico por imagem, especialmente com a adoção de sistemas digitais na radiologia. Equipamentos modernos como tomógrafos computadorizados, mamógrafos digitais e sistemas de radiografia operam com base em circuitos eletrônicos sensíveis e softwares sofisticados, exigindo condições ambientais estáveis para o seu funcionamento adequado. Entre os fatores ambientais mais críticos para a operação segura e eficaz desses equipamentos estão a temperatura e a umidade relativa do ar. Variações significativas nesses parâmetros podem comprometer tanto o desempenho dos dispositivos quanto a qualidade das imagens geradas, afetando diretamente o diagnóstico clínico (IAEA, 2015) (AKILESH, 2022).

De acordo com a *International Atomic Energy Agency* (IAEA), em seu documento *Quality Assurance Programme for Digital Radiography* (Human Health Series No. 28), a maioria dos equipamentos digitais de radiologia é projetada para operar dentro de uma faixa específica de temperatura ambiente, geralmente entre 18 °C e 30 °C, e umidade relativa entre 20% e 80%, sem condensação (IAEA, 2013). O não cumprimento dessas especificações pode resultar em instabilidades operacionais, falhas nos componentes eletrônicos, artefatos nas imagens obtidas e, em casos extremos, danos irreversíveis ao equipamento. Além disso, muitas garantias de fabricantes e contratos de manutenção preveem a perda de cobertura em caso de utilização do equipamento fora das condições ambientais recomendadas (IAEA, 2015).

A IAEA recomenda que, antes da instalação de equipamentos de radiologia digital, as salas designadas sejam monitoradas por um período mínimo de algumas semanas, com a finalidade de verificar a conformidade com os requisitos ambientais. Após a instalação, esse monitoramento deve ser mantido por pelo menos quatro semanas, preferencialmente com o uso de sistemas de alarme automáticos, capazes de notificar operadores por meio de SMS ou aplicativos. Em ambientes onde tais soluções automatizadas não são viáveis, recomenda-se ao menos o uso de medidores com alarmes sonoros que possam alertar a equipe em tempo real sobre desvios críticos de temperatura ou umidade (IAEA, 2015).

Entretanto, a implementação prática desse monitoramento enfrenta barreiras operacionais críticas. Na rotina hospitalar, o uso de termo-higrômetros convencionais exige que o operador entre fisicamente na sala de exames para conferir o visor. Em salas de radiologia, essa prática é dificultada pelo alto fluxo de pacientes e, principalmente, pela restrição de acesso devido à emissão de radiação ionizante durante os procedimentos. Essa dinâmica cria uma invisibilidade de dados, já que desvios climáticos significativos podem ocorrer ao longo do dia sem que a equipe técnica perceba, sendo detectados apenas quando o equipamento já apresenta falhas ou interrupções súbitas.

A lacuna clínica reside na fragilidade desse modelo de controle. A ausência de dados em tempo real impede uma postura preditiva, dificultando a identificação de variações na calibração dos detectores digitais causadas por variações térmicas. Isso pode resultar na degradação sutil da qualidade da imagem, como aumento de ruído ou perda de contraste, que, embora não interrompa o funcionamento da máquina, compromete a precisão do diagnóstico, podendo levar a interpretações errôneas ou à repetição de exames, expondo o paciente a doses desnecessárias de radiação (Bushberg, Seibert, Leidholdt Jr., & Boone, 2020). Além do impacto clínico, a exposição prolongada a condições inadequadas acelera o desgaste dos componentes eletrônicos sensíveis, antecipando falhas graves. Sem o registro contínuo que comprove a estabilidade ambiental, tais falhas podem ser classificadas como mau uso do equipamento, resultando na perda de garantias contratuais e em prejuízos financeiros significativos para a instituição.

Diante desse cenário, o uso de tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT- *Internet of Things*) tem se mostrado uma alternativa eficiente e de baixo custo para o monitoramento ambiental em tempo real. Sensores integrados a microcontroladores, como o ESP8266 ou ESP32, permitem a coleta de dados com alta frequência e a transmissão automática dessas informações para plataformas online. Entre as diversas soluções disponíveis, destaca-se a plataforma *ThingSpeak*, desenvolvida pela MathWorks, que permite a visualização, armazenamento e análise de dados ambientais em tempo real. Essa ferramenta online é especialmente útil por ser compatível com diversos dispositivos IoT, possibilitar a criação de gráficos

personalizados, envio de alertas automáticos e integração com aplicativos como o MATLAB para análises mais complexas. (MATHWORKS, 2025)

A adoção de plataformas como o *ThingSpeak* representa um avanço significativo na gestão ambiental de ambientes hospitalares, ao oferecer uma solução acessível, de fácil implementação e adaptável a diferentes necessidades. Essas tecnologias permitem o monitoramento contínuo das condições ambientais, automatizando a coleta e análise de dados, o que reduz a necessidade de intervenção humana, aumenta a confiabilidade das medições e possibilita respostas mais rápidas a falhas no sistema de climatização. Além disso, o armazenamento dos dados na nuvem facilita auditorias, elaboração de relatórios técnicos e a comprovação de conformidade com exigências normativas e contratuais (Gonçalves, 2024).

Como um sistema automatizado de monitoramento contínuo de temperatura e umidade, baseado em tecnologia de *Internet of Things* (IoT), pode contribuir para o controle de qualidade ambiental e para a manutenção preditiva em salas de radiodiagnóstico, assegurando a conformidade normativa e o adequado desempenho dos equipamentos?

## **OBJETIVO**

Este estudo tem como objetivo principal desenvolver e implementar um sistema automatizado de monitoramento contínuo da temperatura e da umidade em salas que abrigam equipamentos de radiologia digital, utilizando sensores de baixo custo e a plataforma online *ThingSpeak*. A proposta busca oferecer uma solução eficaz, acessível e de simples operação, capaz de garantir a estabilidade das condições ambientais, contribuir para a preservação dos equipamentos e assegurar a qualidade dos exames diagnósticos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Impacto da Temperatura e Umidade em Equipamentos de Alta Complexidade

O controle ambiental em salas com equipamentos médico-hospitalares é um requisito fundamental para garantir a segurança, o desempenho e a vida útil dos dispositivos, conforme estabelece a ISO 14971, que orienta a gestão de riscos ao longo do ciclo de vida de equipamentos médicos. Em ambientes clínicos, variações de temperatura e umidade constituem fatores ambientais capazes de gerar riscos técnicos e operacionais, exigindo monitoramento contínuo como medida preventiva (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020).

Equipamentos de radiologia em geral, como tomógrafos, mamógrafos e angiógrafos, dependem de condições ambientais estáveis para operar dentro das suas tolerâncias. Alterações nessas variáveis impactam diretamente no desempenho físico e eletrônico dos componentes internos, na estabilidade dos sistemas de alta tensão, na precisão dos detectores e sensores radiológicos, na longevidade dos módulos eletrônicos e mecânicos e riscos associados à não conformidade ambiental (ISO, 2020) (IEC, 2020).

Uma temperatura elevada aumenta a taxa de degradação de componentes eletrônicos, eleva a resistência térmica dos circuitos e pode desencadear sobreaquecimento de tubos de Raios-X e detectores, risco reconhecido pela ISO 14971 como um *dangerous situation* decorrente de falha ambiental. Enquanto uma temperatura abaixo do recomendado pode causar instabilidade em fontes de alimentação, deslocamento de calibrações internas e menor eficiência dos sistemas de refrigeração (ISO, 2020).

Já a umidade elevada promove condensação, corrosão, falhas de isolamento e danos em detectores sensíveis (incluindo módulos de cintilação, PMTs e fotodiodos). A ISO 14971 classifica umidade inadequada como fator capaz de originar falhas sistemáticas decorrentes do ambiente. Uma umidade baixa favorece o acúmulo de eletricidade estática, podendo causar descargas eletrostáticas que danificam circuitos, um tipo de risco fisiologicamente não detectável pelo equipamento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020).

Este conjunto de riscos justifica a implementação de sistemas de monitoramento contínuo, que auxiliam na mitigação de perigos identificados conforme as diretrizes do gerenciamento de risco normativo.

Além disso, a Física Médica desempenha um papel complementar e essencial nesse processo. O controle adequado de temperatura e umidade impacta diretamente os testes de desempenho e os procedimentos de controle de qualidade realizados rotineiramente nos setores de Radiodiagnóstico. Variações ambientais podem alterar respostas de detectores, modificar condições de estabilidade térmica de componentes e influenciar parâmetros críticos como ruído, uniformidade, HU e sensibilidade dos sistemas de aquisição. Assim, a atuação integrada entre Engenharia Clínica e Física Médica é fundamental para garantir não apenas a segurança e a confiabilidade operacional dos equipamentos, mas também a qualidade das imagens e a precisão dos testes que subsidiam decisões diagnósticas (IAEA, 2015) (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2002).

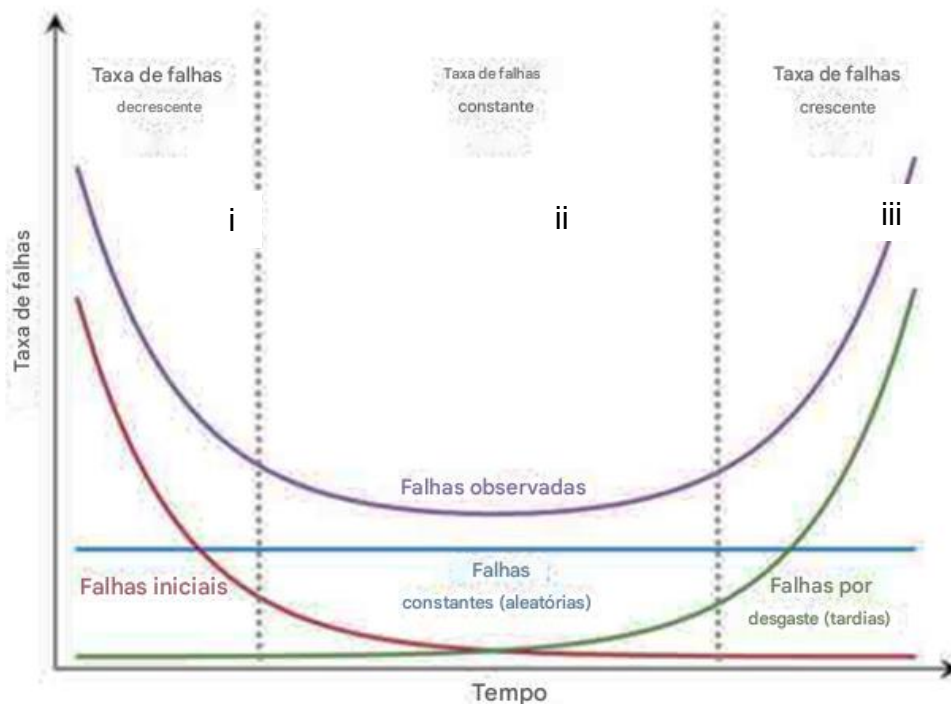
A manutenção da temperatura e da umidade dentro dos limites especificados pelos fabricantes constitui um requisito técnico fundamental para a segurança, o desempenho e a integridade funcional de equipamentos médico-hospitalares. Esse controle ambiental não representa apenas uma boa prática operacional, mas está amparado por normas regulatórias nacionais e internacionais que tratam de infraestrutura, gestão da qualidade e mitigação de riscos relacionados a dispositivos médicos (Sekkat, Madkouri, Khallouqi, & Rhazouani).

No contexto brasileiro, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) estabelece diretrizes relevantes, como a RDC nº 50/2002, voltada ao planejamento físico de ambientes assistenciais, e a RDC nº 665/2022, que determina requisitos para sistemas de gestão da qualidade em estabelecimentos que utilizam dispositivos médicos. Ambas reforçam a importância de ambientes controlados para garantir condições adequadas de segurança, desempenho e durabilidade dos equipamentos.

As variáveis ambientais como temperatura e umidade como fatores capazes de gerar *falhas sistemáticas* e, portanto, devem ser monitoradas e controladas de forma contínua (ISO, 2020).

A importância do controle ambiental também se reflete na gestão do ciclo de vida dos equipamentos. Segundo o documento *Worldwide Implementation of Digital Imaging in Radiology* (IAEA Human Health Series No. 28), o comportamento das falhas em sistemas de imagem digital é representado pela curva da banheira (Figura 1). Esse modelo demonstra que, após o período inicial de ajuste, a estabilidade das operações depende da manutenção de condições ideais, evitando que fatores externos acelerem o desgaste dos componentes eletrônicos.

Figura 1: Taxa de falha do equipamento em função do tempo.



*Adaptado de INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Worldwide implementation of digital imaging in radiology. Vienna: IAEA, 2015. (IAEA Human Health Series, n. 28).*

A Figura 1 mostra o gráfico conhecido como “Curva da Banheira”, modelo que representa a taxa de falhas de um equipamento em função do tempo, e pode ser dividido em três fases distintas:

- i. **Falhas iniciais:** correspondem ao período inicial de operação, no qual o equipamento passa por ajustes, estabilização de componentes e possível manifestação de vulnerabilidades latentes. A IAEA destaca que condições ambientais inadequadas aumentam a probabilidade dessas falhas, favorecendo processos como condensação, instabilidade térmica e defeitos elétricos.
- ii. **Fase estável de operação:** representa o intervalo de menor taxa de falhas, desde que o equipamento opere sob condições ambientais controladas, em conformidade com os limites definidos pelo fabricante. A estabilidade térmica e higrométrica é determinante para manter o sistema dentro dessa faixa de menor risco.
- iii. **Fase de desgaste:** ocorre quando os mecanismos de envelhecimento dos materiais passam a predominar. Nessa etapa, oscilações de temperatura e umidade atuam como estressores ambientais que aceleram corrosão, fadiga

estrutural e degradação de componentes eletrônicos, reduzindo a vida útil remanescente do equipamento.

Dessa forma, a manutenção da temperatura e da umidade dentro dos limites recomendados integra as estratégias de confiabilidade, pois contribui para minimizar falhas precoces, prolongar o período operacional estável e retardar o início da fase de desgaste (IEC, 2021).

## **2.2. Controle de Qualidade e Manutenção Preditiva**

O Controle de Qualidade Ambiental integra o escopo da Engenharia Clínica e Física Médica do Radiodiagnóstico e atua como barreira preventiva contra riscos identificados no ciclo de vida dos equipamentos médicos. Enquanto a manutenção corretiva age após a falha, a manutenção preditiva utiliza dados contínuos para antecipar anomalias, reduzindo paradas inesperadas e mitigando riscos (IEC, 2014).

O sistema desenvolvido neste trabalho caracteriza-se como uma ferramenta de suporte à manutenção preditiva, pois:

- i. Detecta tendências de aumento de temperatura antes de um evento crítico.
- ii. Identifica padrões de falha no sistema de climatização.
- iii. Reduz probabilidade de falhas graves apontadas pela ISO 14971 como *hazardous situations*.

## **2.3. Caracterização dos sensores de temperatura e umidade**

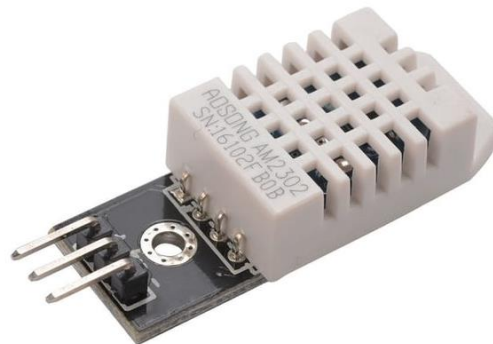
O DHT22 é um sensor termo-higrométrico digital de baixo custo e alta precisão, amplamente utilizado em projetos de monitoramento ambiental e automação. Ele combina dois elementos de medição distintos e um chip de conversão analógica-digital (A/D) e processamento em um único encapsulamento (AOSONG (Guangzhou) Electronics Co., 2022).

A medição de umidade é baseada no princípio da capacitância, ou seja, a capacidade de um componente, o capacitor, de armazenar energia elétrica na forma de um campo elétrico entre dois condutores separados por um isolante (dielétrico). Quando uma tensão é aplicada, elétrons se acumulam em uma placa e se afastam da outra, criando uma diferença de potencial e armazenando carga. Essa capacidade de armazenamento, chamada de capacitância, é medida em *faradays* (F) e depende da

área das placas, da distância entre elas e do tipo de material dielétrico utilizado (Halliday, Resnick, & Walker, 2020).

O sensor de umidade é um higrômetro capacitivo. Ele é composto por duas placas condutoras (eletrodos) com um substrato de polímero sensível à umidade entre elas, como demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Sensor DHT22.



Fonte: ARDUINO E CIA. Sensor de Temperatura e Umidade DHT22. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://arduinoocia.com.br/sensor-de-temperatura-e-umidade-dht22/>. Acesso em: 20 nov. 2025.

O substrato de polímero tem uma constante dielétrica que varia em função da umidade do ar. Quando a umidade aumenta, o polímero absorve vapor d'água, o que altera sua constante dielétrica. Essa mudança na constante dielétrica provoca uma variação na capacitância  $C$  do capacitor formado pelas placas, como mostrado na equação (1):

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

onde  $A$  é a área da placa,  $d$  é a distância entre as placas,  $\epsilon_0$  é a constante de permissividade do vácuo, e  $\epsilon_r$  é a permissividade relativa (constante dielétrica) do material, que muda com a umidade (Halliday, Resnick, & Walker, 2020)

Um circuito integrado no sensor (ASIC) mede essa variação de capacitância e a converte em um sinal digital que representa a Umidade Relativa (UR) do ambiente.

A medição de temperatura é geralmente feita usando um termistor ou um sensor de temperatura resistivo. O DHT22 utiliza tipicamente um termistor com coeficiente de temperatura negativo (NTC) (AOSONG (Guangzhou) Electronics Co., 2022).

Um termistor NTC é um resistor semiconductor cuja resistência elétrica diminui exponencialmente à medida que a temperatura aumenta. A relação entre resistência  $R$  e temperatura  $T$  para um termistor NTC é bem definida (muitas vezes modelada pela equação de Steinhart-Hart, embora o circuito interno do sensor faça a leitura e compensação). O circuito interno mede a resistência do termistor, converte esse valor de resistência em uma tensão analógica e, em seguida, utiliza seu conversor A/D para gerar um valor digital calibrado de temperatura em Celsius (AOSONG (Guangzhou) Electronics Co., 2022).

### 2.3.1 Protocolo de Comunicação Digital

O DHT22 utiliza um protocolo de comunicação digital proprietário de "Single-Wire" (um fio). Este protocolo permite que o microcontrolador se comunique com o sensor usando apenas um pino de dados, além da alimentação e do fio terra, simplificando a interface.

#### A. Sequência de Comunicação (Handshake)

- i. O microcontrolador (*host*) inicia a comunicação enviando um sinal de *start*, requisição de dados, que consiste em um pulso de nível lógico baixo por um período mínimo (tipicamente  $\approx 1$  milissegundo, mas em muitos casos  $\approx 18$  ms para garantir o reconhecimento). Em seguida, o *host* puxa a linha de dados para nível lógico alto (*high*) e espera um curto período,  $\approx 20$  a  $40 \mu\text{s}$ .
- ii. O sensor responde com um pulso *low* de espera de  $\approx 80 \mu\text{s}$ , seguido de um pulso *high* de  $\approx 80 \mu\text{s}$  para indicar que está pronto para enviar os dados.

#### B. Transmissão de Dados

Após a resposta, o sensor transmite um pacote de 40 bits de dados (5 bytes) em formato binário. A organização desses dados segue a estrutura apresentada na Tabela 1. O tempo de duração de cada pulso de nível alto é o que codifica o bit.

Tabela 1: Estrutura do pacote de dados de 40 bits do sensor DHT22.

Posição	Conteúdo (8 bits)
Byte 1	Umidade (Parte Inteira)
Byte 2	Umidade (Parte Decimal)
Byte 3	Temperatura (Parte Inteira)
Byte 4	Temperatura (Parte Decimal)
Byte 5	Checksum (Soma de Verificação)

A codificação do bit funciona da seguinte maneira, se o sensor envia um pulso *high* curto  $\approx 50 \mu\text{s}$ , ele representa o bit 0. Se o sensor envia um pulso *high* longo  $\approx 70 \mu\text{s}$ , ele representa o bit 1.

O último byte (Byte 5) é a soma dos quatro bytes anteriores (Byte 1 + Byte 2 + Byte 3 + Byte 4). O host utiliza esse valor para verificar a integridade da transmissão e garantir que os dados não foram corrompidos.

### 2.3.2 Especificações Metrológicas e Protocolo de Comunicação do DHT22

O sensor DHT22, também conhecido como AM2302, é um módulo digital capacitivo de medição de temperatura e umidade que fornece sinal de saída calibrado. Suas especificações metrológicas, que garantem sua adequação para o monitoramento de precisão, estão detalhadas na Tabela 2, conforme apresentado em sua documentação técnica (Oliveira, 2022).

O sensor DHT22 incorpora um componente capacitivo de detecção de umidade e dispositivos de medição de temperatura de alta precisão (AOSONG (Guangzhou) Electronics Co., 2022).

Tabela 2: Especificações técnicas metrológicas do DHT22.

Parâmetro	Umidade Relativa- UR (%)	Temperatura- T (°C)
<b>Faixa de Medição</b>	0 a 99.9	-40 a 80
<b>Resolução</b>	0.1	0.1 (16-bit)
<b>Precisão</b>	$\pm 2$ (a 25 °C)	$\pm 0.5$
<b>Repetibilidade</b>	$\pm 0.3$	$\pm 0.2$

### 2.3.3 Saída de Dados e Protocolo Single-Wire

O DHT22 utiliza uma interface digital padrão de barramento único, o que facilita e agiliza sua integração em sistemas.

O sensor possui uma interface de 3 *leads* para conexão. O pino SDA (Serial Data) é uma porta bidirecional de estrutura *tri-state* (três estados) usada para a leitura e escrita de dados (Petroli & Oliveira, 2014)

O protocolo de comunicação empregado é simplificado, utilizando apenas uma linha de dados (Single-Bus). O barramento único requer tipicamente um resistor *pull-up* externo de aproximadamente 5.1 k $\Omega$  conectado ao pino SDA, garantindo que o barramento permaneça em nível lógico alto (*high*) quando estiver inativo (AOSONG (Guangzhou) Electronics Co., 2022)

Para leituras precisas, é essencial respeitar o intervalo mínimo de amostragem de 2 segundos entre as leituras. Além disso, a leitura de temperatura e umidade é sempre o último valor medido pelo sensor.

## **2.4 A Importância da Calibração Metrológica**

No contexto da metrologia, a calibração é definida como o conjunto de operações que estabelecem, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento, ou sistema de medição, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por referências (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2002).

O objetivo principal da calibração não é o ajuste do instrumento, mas sim a quantificação do desvio e a determinação da incerteza de medição do dispositivo. O resultado documentado permite, posteriormente, a aplicação de fatores de correção para garantir a rastreabilidade metrológica das medições realizadas (IAEA, 2015).

A utilização de sensores de baixo custo, como o DHT22/AM2302, embora eficiente e economicamente viável, introduz inerentemente desvios em suas leituras. Tais desvios podem ser de natureza aleatória ou, mais frequentemente em componentes eletrônicos, sistemática. A calibração justifica-se, portanto, pela necessidade de assegurar que os dados de temperatura e umidade, que são vitais para a garantia e monitoramento de equipamentos sensíveis, estejam dentro dos limites de tolerância exigidos. Além disso, corrige erros sistemáticos aplicando a teoria da metrologia para identificar e quantificar qualquer desvio constante entre a leitura do sensor e o valor real, permitindo a implementação de ajustes ou correções digitais no *firmware* do sistema (Oliveira, 2022).

## **2.5 Microcontrolador ESP32**

O ESP32, conforme mostrado na Figura 3, foi selecionado como microcontrolador principal devido à sua arquitetura avançada, que oferece uma combinação de alto desempenho, conectividade integrada e eficiência energética, superando as capacidades de microcontroladores de 8 bits mais comuns para aplicações IoT (Internet das Coisas) robustas. Sua escolha é fundamental para um sistema de monitoramento que exige precisão e comunicação remota segura (Espressif Systems, 2023).

Figura 3: Vistas frontal e traseira do ESP32.



Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/placa-doit-esp32-wroom-32d-usb-c.html>. Acesso em: 10 nov. 2025.

### 2.5.1 Arquitetura e Desempenho do ESP32

O ESP32 é um *System-on-Chip* (SoC) que otimiza o processamento e a comunicação, conforme detalhado no seu *Datasheet*: O chip integra dois núcleos de processamento Tensilica Xtensa LX6 de 32 bits, operando em frequências de até 240 MHz. Essa característica é vital, pois permite que um núcleo seja dedicado exclusivamente a tarefas de comunicação de rede Wi-Fi e o outro, ao processamento de dados e controle de periféricos, como o DHT22. Isso garante multitarefa eficiente e estabilidade do sistema (Espressif Systems, 2023); (Petroli & Oliveira, 2014).

A arquitetura de 32 bits o torna superior a plataformas mais simples em termos de processamento de dados. Ele consegue manusear grandes blocos de dados por ciclo de *clock* e gerenciar as bibliotecas de comunicação e segurança. Essa capacidade é essencial para gerenciar o protocolo *Single-Wire* (tempo-dependente) do DHT22 e executar o fator de correção de calibração no *firmware* de forma rápida e precisa.

### 2.5.2 Conectividade Integrada e Segurança

A principal vantagem do ESP32 para este projeto reside na sua integração nativa de comunicação sem fio, permitindo a implementação de um sistema IoT totalmente autônomo. O suporte ao padrão Wi-Fi 802.11 b/g/n é a base para a comunicação remota contínua. Permite que os dados metrológicos coletados sejam enviados de forma eficiente para uma plataforma de nuvem ou servidor local para visualização e arquivamento, independentemente do local de instalação do equipamento (Espressif Systems, 2023) (Gonçalves, 2024)

A inclusão do *bluetooth* oferece versatilidade para tarefas auxiliares. O BLE (*Bluetooth Low Energy*) pode ser usado para o comissionamento inicial do dispositivo, facilitando a configuração da rede Wi-Fi e o diagnóstico local via *smartphone* (Espressif Systems, 2023) (Santos & et, 2020).

Para garantir a segurança de comunicação, o ESP32 possui recursos avançados de segurança de *hardware*, incluindo módulos dedicados à criptografia acelerada. Este recurso é um requisito crucial para um sistema de monitoramento de equipamentos de radiologia, pois garante que a transmissão dos dados seja segura e esteja em conformidade com as diretrizes de proteção de dados (Espressif Systems, 2023) (IEC, 2021).

### **2.5.3. Eficiência Energética**

O design do ESP32 é otimizado para baixo consumo de energia, o que garante a viabilidade de operação contínua e a longo prazo, mesmo em cenários de alimentação restrita. O *chip* suporta diversos modos de hibernação e *Light Sleep*, permitindo que o sistema consuma minimamente,  $\mu\text{W}$ , quando a amostragem de dados é infrequente, maximizando a vida útil de qualquer bateria de *backup* ou fonte de alimentação (Espressif Systems, 2023).

## **2.6. Arduino IDE- *Integrated Development Environment***

O Arduino IDE é o principal ambiente de programação utilizado para o desenvolvimento de *firmware* em microcontroladores como o ESP32, sendo um elemento crucial na fundamentação teórica de projetos de *hardware* de código aberto. Além disso, é uma plataforma de código aberto (*open-source*), o que o torna acessível, gratuito e sustentado por uma vasta comunidade global. Esta filosofia é fundamental por padronização, que fornece um ambiente de desenvolvimento unificado e consistente, independentemente do sistema operacional do usuário (Windows, macOS ou Linux). E a grande comunidade de usuários e desenvolvedores garante a rápida identificação de *bugs* e a constante criação e atualização de bibliotecas de *software* (Santos & et, 2020).

### **2.6.1. Linguagem e Estrutura de Programação**

O ambiente utiliza uma linguagem de programação baseada em C/C++, mas simplificada através de um *framework* próprio. Os programas são denominados Sketches e seguem uma estrutura básica:

1. void setup(): função executada apenas uma vez no início da operação do microcontrolador, utilizada para inicializar pinos, portas seriais, e configurar conexões de rede, como, por exemplo, o Wi-Fi do ESP32.
2. void loop(): função central executada continuamente em um laço infinito, onde a lógica principal do programa reside. É aqui que são realizadas as leituras de sensores (DHT22), o processamento de dados e a transmissão de informações. (Oliveira, 2022)

### 2.6.2. Uso de Bibliotecas

O maior valor do Arduino IDE reside no seu gerenciador de bibliotecas. Estas bibliotecas são coleções de código pré-escrito que abstraem a complexidade do *hardware* de baixo nível. As bibliotecas, como a dedicada ao DHT22, eliminam a necessidade de programar manualmente protocolos complexos (*Single-Wire*), temporização e *checksum*. Além de que permitem que o mesmo código lógico seja facilmente adaptado para diferentes microcontroladores, focando na funcionalidade em vez da configuração detalhada do *hardware* (Oliveira, 2022).

Em essência, o Arduino IDE serve como uma ponte de desenvolvimento que permite a desenvolvedores e engenheiros focarem na lógica da aplicação em vez dos detalhes de *hardware*, acelerando o ciclo de prototipagem e implementação (Oliveira, 2022).

### 2.7. Plataforma Cloud para IoT (*ThingSpeak*)

A plataforma *Cloud* representa a camada superior na arquitetura de um sistema de *Internet of Things* (IoT), responsável por receber, armazenar e transformar dados brutos em inteligência acionável. O *ThingSpeak* é uma das plataformas de *software* mais utilizadas neste contexto. (Gonçalves, 2024)

O *ThingSpeak* é classificado como uma Plataforma de Aplicações e Serviços (PaaS) de código aberto, operada pela *MathWorks*, desenvolvida especificamente para a Internet das Coisas. Sua especialização reside no gerenciamento de séries temporais, permitindo que dados provenientes de sensores e microcontroladores sejam armazenados e indexados de forma cronológica (*timestamp*). (MATHWORKS, 2025)

Essa plataforma é fundamental porque atua como a infraestrutura de retaguarda (*backend*) que permite a comunicação bidirecional entre dispositivos de campo (como o ESP32) e aplicações de *software* de nível superior, provendo persistência de dados e funcionalidades de análise (MATHWORKS, 2025). O *ThingSpeak* oferece um conjunto de ferramentas que permitem a criação de sistemas de monitoramento e controle verdadeiramente inteligentes, utilizando os seguintes recursos:

i. Canais (*Channels*) e Armazenamento Estruturado

Os *Channels* são os contêineres lógicos primários para a organização de dados na plataforma. Cada *Channel* permite o armazenamento de dados em até oito campos (*Fields*) distintos. Esta estrutura garante que os dados de diferentes grandezas, como temperatura e umidade, sejam armazenados de forma organizada e rastreável. A funcionalidade de série temporal assegura que cada entrada de dados seja carimbada com o tempo exato de sua ocorrência, crucial para análises estatísticas e de controle (MATHWORKS, 2025).

ii. Visualização e *Dashboards*

O recurso de visualização permite a representação gráfica imediata dos dados armazenados nos canais. Esta funcionalidade é essencial para o monitoramento em tempo real e a análise de tendências de longo prazo. A capacidade de gerar gráficos dinâmicos e *dashboards* permite aos usuários técnicos identificarem padrões, desvios e anomalias rapidamente, transformando a série numérica em informação visual compreensível.

iii. Automação e Análise em Nuvem

A plataforma vai além do armazenamento, oferecendo ferramentas para processamento de dados e automação de tarefas na nuvem (*in-cloud processing*). A ferramenta *MATLAB Analysis* permite a execução de código *MATLAB* diretamente nos dados armazenados. Este recurso é vital para implementar a lógica de alerta, onde

algoritmos podem realizar cálculos complexos, verificar condições críticas (como limites metrológicos) e acionar ações de resposta. O *TimeControl* facilita o agendamento dessas rotinas de análise *MATLAB* ou de controle em intervalos definidos, garantindo que o sistema de alerta opere de forma contínua e eficiente. (MATHWORKS, 2025)

### **2.7.1. Segurança da Comunicação (API Keys)**

Em qualquer aplicação IoT, a segurança dos dados e o controle de acesso são primordiais. O ThingSpeak utiliza chaves de autenticação (*API Keys*) para proteger seus *Channels* e serviços. O uso de chaves como a *Write Key* (Chave de Escrita) garante que apenas dispositivos e *softwares* autorizados possam enviar dados aos *Channels*, protegendo a integridade da série temporal. Similarmente, a *Read Key* (Chave de Leitura) controla quem pode acessar os dados.

Chaves específicas são dedicadas a proteger os serviços de notificação e alerta, assegurando que apenas a lógica de automação aprovada possa acionar a comunicação de emergência. Este sistema de chaves mantém o princípio do privilégio mínimo e é um requisito de segurança básico para a implementação de qualquer sistema de monitoramento profissional. (MATHWORKS, 2025) (Gonçalves, 2024)

## **3. METODOLOGIA**

### **3.1. Confeção dos sensores**

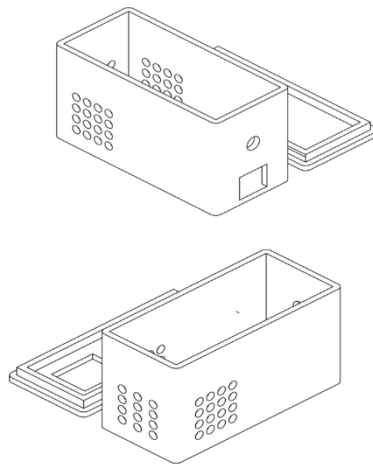
A confeção dos sensores constituiu uma etapa essencial para viabilizar o monitoramento contínuo das variáveis ambientais. Nessa fase, foram integrados aspectos de projeto, construção e adequação dos dispositivos, abrangendo desde a montagem física do circuito até a proteção e encapsulamento dos componentes. Também foram considerados requisitos de segurança elétrica e de higiene, fundamentais em ambientes hospitalares. Assim, todo o processo foi planejado para assegurar a confiabilidade das medições, a durabilidade do sistema e a adequada interação entre *hardware* e *software*.

Os suportes utilizados para a fixação dos sensores de temperatura e umidade foram produzidos por meio de impressão 3D, com o objetivo de garantir proteção mecânica, estabilidade dos componentes e posicionamento adequado nos ambientes monitorados.

O modelo tridimensional foi obtido na plataforma Printables.com, sendo compatível com o microcontrolador ESP32 e o sensor DHT22. A Figura 4 mostra o design da caixa e seus principais elementos. O projeto incluiu uma caixa com tampa destacável e elementos estruturais que favorecem tanto a ventilação quanto a organização dos componentes eletrônicos. A escolha deste design priorizou três aspectos funcionais:

- **Acomodação e Segurança:** As dimensões internas foram especificadas para acomodar de forma otimizada a placa ESP32 e o sensor DHT22, garantindo proteção mecânica e montagem organizada;
- **Manutenção e Acesso:** A tampa destacável foi incorporada para facilitar a montagem inicial e permitir acesso rápido para manutenção ou debug do hardware sem a necessidade de desinstalação. Além disso, os recortes garantem o acesso à porta Micro USB/USB-C do microcontrolador ESP32 para programação e alimentação contínua;
- **Desempenho do Sensor:** Os furos de ventilação laterais são um elemento crítico de *design*, pois foram dimensionados e posicionados para garantir um fluxo de ar constante entre o ambiente externo e o sensor DHT22, prevenindo o acúmulo de calor gerado pelo microcontrolador (ESP32) e assegurando a precisão nas medições de temperatura e umidade ambiente.

Figura 4: Modelo 3D esquemático do suporte, obtido na plataforma Printables, exibindo a estrutura geral com tampa removível e aberturas laterais para ventilação.



Fonte: o autor (2025)

O arquivo STL foi processado no software *PrusaSlicer*, e a impressão foi realizada com a impressora *Creativity Ender 3 S1 Plus*, utilizando filamento PLA (1,75 mm). A seleção dos parâmetros de impressão 3D (fatiamento) buscou um equilíbrio otimizado entre resistência mecânica da peça, qualidade de acabamento e eficiência de tempo de fabricação. Os parâmetros adotados e suas respectivas justificativas técnicas são detalhados a seguir:

- Diâmetro do bico: 0,4 mm; escolhido pelo melhor equilíbrio entre detalhe (necessário para os furos de ventilação) e tempo de impressão (padrão);
- Altura de camada: 0,2 mm; configuração que oferece uma superfície com qualidade aceitável e um tempo de fabricação reduzido em comparação com camadas mais finas, adequando-se a uma peça funcional;
- Preenchimento (*infill*): 25%. Densidade suficiente para conferir a resistência mecânica necessária à função de suporte, maximizando a economia de material e tempo;
- Temperatura do bico: 200 °C. Temperatura ideal para o filamento PLA, garantindo a fusão e boa adesão entre camadas;
- Temperatura da mesa: 60 °C. Crítica para garantir a adesão da primeira camada e prevenir o empenamento da peça;
- Velocidade de impressão: 50 mm/s. Velocidade moderada, que equilibra a produtividade com a necessidade de precisão dimensional em peças com detalhes como aberturas.

Após a impressão, cada case foi montado com o microcontrolador ESP32 posicionado na base e o sensor DHT22 fixado na tampa superior, alinhado com um recorte retangular que permite a exposição direta do sensor ao ambiente externo (ver figura 5). As laterais do case apresentam múltiplos orifícios circulares, permitindo a circulação de ar interna e favorecendo leituras mais realistas da umidade e temperatura.

As conexões elétricas entre o ESP32 e o DHT22 foram realizadas por meio de cabos jumper, garantindo mobilidade interna sem comprometer o fechamento da caixa, mostrado na Figura 5. Com os sensores devidamente montados, os dispositivos foram instalados em locais estratégicos do ambiente monitorado, respeitando critérios

de altura, ventilação e distanciamento de fontes de calor, luz solar direta ou umidade excessiva.

Figura 5: Cabos jumper ligando o sensor DHT22 e o microcontrolador ESP32 dentro da case.



Fonte: o autor (2025)

A opção pela impressão 3D como solução para a estrutura dos sensores foi motivada por sua flexibilidade de design, baixo custo e viabilidade de produção sob demanda. Esse método permitiu adaptar rapidamente a estrutura às dimensões dos componentes utilizados, otimizando o espaço interno e garantindo um encaixe firme dos dispositivos. Além disso, a produção local e imediata dos cases possibilitou ajustes rápidos, sem depender de fornecedores externos ou componentes industriais padronizados.

A Figura 6 ilustra como o case impresso em 3D acomoda os componentes internos do sistema. Na vista superior (Fig. 6a), observa-se o sensor DHT22 alinhado ao recorte frontal da tampa, permitindo sua exposição direta ao ambiente externo. A vista inferior (Fig. 6b) destaca as aberturas que facilitam a ventilação e a passagem dos cabos, essenciais para o funcionamento adequado do conjunto. Já a visão interna (Fig. 6c) mostra a disposição final dos componentes, com o ESP32 fixado na base e o DHT22 acoplado à tampa, conectados por cabos jumper.

Figura 6. (a) Vista superior do suporte montado, com o sensor DHT22 visível através do recorte retangular da tampa. (b) Vista inferior do suporte, destacando as aberturas para passagem dos cabos e ventilação. (c) Visão interna do suporte aberto, mostrando o microcontrolador ESP32 fixado na base da caixa e o sensor DHT22 acoplado à tampa, com as conexões realizadas por cabos jumper.



Fonte: o autor (2025)

### 3.2. Montagem do circuito e programação dos sensores

Para a aquisição dos dados ambientais, o sistema foi concebido com uma arquitetura de *hardware* flexível e com capacidade de comunicação em rede. O componente central é o microcontrolador ESP32, um *System on a Chip* (SoC) escolhido por sua capacidade de processamento *dual-core* e pela integração nativa dos módulos de comunicação Wi-Fi e *Bluetooth* no mesmo chip. Esta característica foi fundamental para a integração direta com plataformas de *Internet of Things* (IoT) baseadas em nuvem, minimizando a complexidade do circuito e otimizando a conectividade.

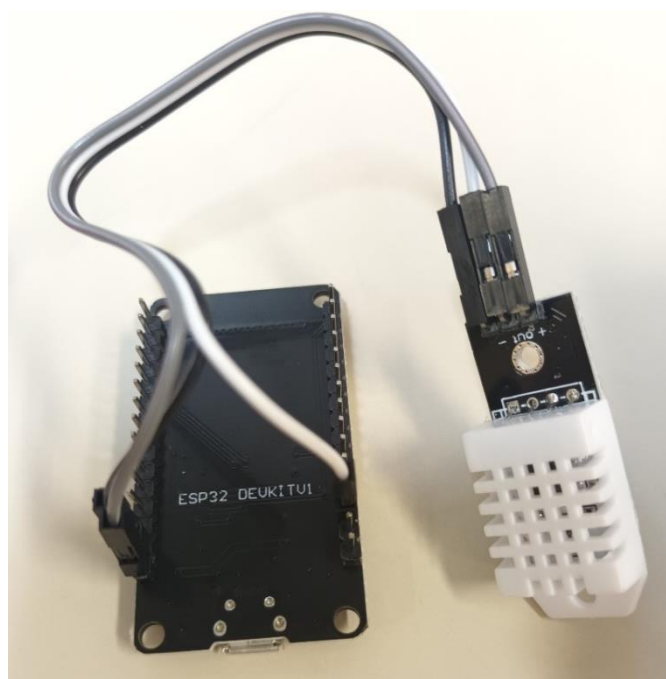
A medição de temperatura e umidade relativa do ar foi confiada ao sensor DHT22. Optou-se por este modelo devido à sua melhor resolução e maior precisão em comparação com seus antecessores, apresentando uma faixa de medição de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  (com precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e faixa de umidade de 0 % a 100 % (com precisão de  $\pm 2$  %). O DHT22 opera com um protocolo de comunicação

digital de fio único, que realiza a conversão analógico-digital (A/D) internamente e envia os dados serialmente ao microcontrolador.

Foi escolhido o microcontrolador ESP32 devido à sua capacidade de processamento, conectividade Wi-Fi integrada e baixo consumo energético, facilitando a comunicação com a plataforma online de monitoramento. O sensor DHT22 foi selecionado por sua precisão e estabilidade na medição de temperatura e umidade em ambientes internos. A plataforma *ThingSpeak* foi adotada para o armazenamento, visualização dos dados e configuração de alertas, permitindo monitoramento remoto e contínuo pela equipe técnica, favorecendo a manutenção preventiva e a garantia da qualidade ambiental hospitalar.

A montagem física do circuito seguiu uma configuração minimalista, mas tecnicamente rigorosa. O pino de sinal do DHT22 foi interligado a uma das portas digitais do ESP32 (GPIO 27), como pode ser visto na figura 7. Os pinos de alimentação (VCC e GND) foram conectados, respectivamente, aos pinos de 3,3 V e GND do microcontrolador. Foi crucial a adição de um resistor *pull-up* de 10 k $\Omega$  entre o pino de sinal e o VCC. A função desse resistor é garantir a estabilidade do nível lógico alto na linha de dados, assegurando a integridade e a correta sincronização do protocolo de comunicação digital do sensor.

Figura 7: Esquema de ligação do sensor DHT22 ao ESP32.



Fonte: o autor (2025)

É importante salientar que, embora os sensores DHT22 forneçam dados digitais diretos, a calibração metrológica é crucial para a precisão do sistema. Para corrigir eventuais desvios de fabricação ou do ambiente de operação, o sistema foi configurado para permitir a aplicação de um fator de correção sistemático no *firmware* do ESP32, ajustando as leituras de temperatura e umidade para corresponderem aos valores aferidos por um termômetro/higrômetro de referência certificado. Este procedimento garante a validade dos dados de monitoramento utilizados nas análises do controle dos parâmetros.

### 3.2.1. Desenvolvimento do Firmware e Comunicação IoT

A programação do ESP32, conhecida como *firmware*, foi desenvolvida no Ambiente de Desenvolvimento Integrado Arduino IDE (versão 1), que forneceu as ferramentas necessárias para a criação, edição e carregamento dos programas (*sketches*), além do gerenciamento de bibliotecas e o monitor serial para depuração.

O fluxo de programação iniciou-se com a escrita do código no editor do Arduino IDE utilizando a extensão de arquivo *ino*, seguida da verificação para detecção de eventuais erros de sintaxe e da compilação para geração do binário executável. Após essa etapa, o código foi carregado para o ESP32 por meio da interface USB.

O programa desenvolvido para o ESP32 integra três funcionalidades principais:

- i. Comunicação Wi-Fi: Utilização da biblioteca WiFi.h para que o microcontrolador se conecte à rede local com as credenciais previamente inseridas no código-fonte.
- ii. Aquisição de Dados: Uso das bibliotecas dedicadas ao sensor DHT22 (e.g., *Adafruit Unified Sensor* e *DHT Library*) para realizar a leitura das variáveis através das funções *readTemperature()* e *readHumidity()*, garantindo a correta interpretação do sinal digital.
- iii. Integração IoT (*ThingSpeak*): Implementação da biblioteca HTTPClient.h para envio dos dados coletados. As leituras de temperatura e umidade são empacotadas e enviadas via protocolo HTTP/GET para o *endpoint* da plataforma *ThingSpeak*, permitindo o armazenamento e a visualização gráfica em tempo real na nuvem, de forma semelhante ao descrito por Akilesh et al. (2022), mas adaptado às necessidades deste projeto.

Uma vez energizado, o ESP32 executa automaticamente o *firmware* carregado. As leituras são realizadas em intervalos regulares, definidos por temporizações no programa, garantindo a coleta sistemática e o envio contínuo dos dados ambientais para a plataforma de monitoramento. O código utilizado para a programação dos sensores encontra-se detalhado na íntegra no Apêndice A.

Para o envio das informações, foi implementada a comunicação com a plataforma *ThingSpeak*, um serviço voltado para aplicações de Internet das Coisas (IoT) que permite o armazenamento, análise e visualização de dados em tempo real. O envio ocorre por meio de requisições HTTP utilizando o método GET, em que os valores de temperatura e umidade são incorporados à URL de requisição e transmitidos ao servidor do *ThingSpeak*. O canal privado configurado na plataforma armazena esses registros em ordem cronológica, possibilitando o acesso ao histórico completo.

Além do armazenamento, a integração com o *ThingSpeak* permite gerar gráficos automáticos para acompanhamento das medições, bem como configurar rotinas de alerta que podem ser disparadas quando valores pré-estabelecidos são excedidos. O acesso é feito remotamente por meio de navegadores ou aplicativos compatíveis, em qualquer dispositivo conectado à internet, o que viabiliza o monitoramento contínuo das condições ambientais das salas analisadas. Esse processo elimina a necessidade de intervenção manual frequente, garantindo atualizações automáticas e confiáveis.

A escolha do Arduino IDE como ambiente de desenvolvimento deve-se à sua ampla compatibilidade com diferentes microcontroladores, à extensa base de bibliotecas já prontas para sensores e módulos de comunicação, e à comunidade ativa que oferece suporte e exemplos de código. Sua interface intuitiva facilita tanto a implementação de projetos simples quanto o desenvolvimento de aplicações mais complexas, tornando-o uma ferramenta adequada para prototipagem rápida e integração com plataformas *IoT* como o *ThingSpeak*. Essa combinação de simplicidade, flexibilidade e suporte consolidado contribuiu para a eficiência do processo de programação e para a confiabilidade do sistema desenvolvido.

### 3.3. Instalação dos Sensores

Inicialmente, os sensores foram instalados nas salas dos tomógrafos, totalizando três sensores no setor de tomografia e um sensor na sala do SPECT/CT, localizada no setor de medicina nuclear. Posteriormente, foram adicionados sensores na sala de mamografia e na sala do angiógrafo da Siemens, no setor de hemodinâmica. Essa distribuição visa monitorar as condições ambientais específicas em cada sala onde os equipamentos estão instalados, garantindo a adequação dos parâmetros às exigências técnicas dos fabricantes, conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3: Locais de instalação dos sensores.

<b>Local de instalação</b>	<b>Setor</b>	<b>Equipamento</b>
Sala de Exames Tomógrafo 1	Tomografia	Tomógrafo Toshiba Activion 16
Sala de Exames Tomógrafo 2		Tomógrafo Toshiba Activion 16
Sala de Exames Tomógrafo 3		Tomógrafo GE Optima 670
Sala de Exames Gama Câmara	Medicina Nuclear	Gama Câmara Discovery NM/CT 670 (GE Healthcare)
Sala de Exames Mamografia	Radiologia	Mamógrafo Siemens Mammomat Fusion
Sala de Exames Hemodinâmica	Hemodinâmica	Angiógrafo Artis Zee Ceiling (Siemens Healthcare)

A quantidade de sensores foi definida considerando as áreas críticas onde os equipamentos mais sensíveis estão localizados. Para cada sala de equipamento foi instalado pelo menos um sensor, garantindo uma cobertura adequada e representativa das condições ambientais locais.

Os sensores foram posicionados afastados de fontes diretas de calor, ventilação, janelas ou equipamentos que possam gerar interferência eletromagnética, para evitar leituras falsas. A altura de instalação foi padronizada para refletir as condições ambientais que afetam diretamente o funcionamento dos equipamentos e o conforto dos operadores.

A manutenção da garantia de cada equipamento está condicionada ao respeito dos limites recomendados pelos fabricantes de temperatura e umidade. Esses valores de referência estão expostos nas Tabelas 4 e 5 e correspondem aos fabricantes Toshiba (modelo Activion 16) e GE Healthcare (modelos Optima 660 e Gama Câmara Discovery 670).

Tabela 4: Recomendações de parâmetros – Toshiba Activion 16

<b>RECOMENDAÇÕES FABRICANTE</b>			
	MÁXIMA	MÍNIMA	RECOMENDADA
<b>TEMPERATURA</b>	26 °C	20 °C	-
<b>UMIDADE</b>	80%	40%	-

Tabela 5: Recomendações de parâmetros – GE (Optima 660 e Discovery 670)

<b>RECOMENDAÇÕES FABRICANTE</b>			
	MÁXIMA	MÍNIMA	RECOMENDADA
<b>TEMPERATURA</b>	26 °C	18 °C	22 °C
<b>UMIDADE</b>	60%	30%	-

O sistema deve ser capaz de enviar alertas em tempo real caso os parâmetros ambientais ultrapassem os limites predefinidos, possibilitando ações corretivas imediatas. É necessário o armazenamento histórico dos dados para análises periódicas e auditorias, garantindo rastreabilidade e comprovação de conformidade. Ademais, o acesso remoto via plataforma web permite monitoramento contínuo por equipes técnicas, independentemente da localização física, facilitando a manutenção preventiva e o controle da qualidade ambiental hospitalar.

A montagem finalizada do sistema de monitoramento foi instalada estrategicamente nas salas dos equipamentos de diagnóstico por imagem, como as salas de tomografia, mamografia e hemodinâmica. Esta etapa garantiu que os sensores estivessem posicionados em locais representativos das condições ambientais que afetam a operação dos dispositivos, que pode ser visto na figura. Os sensores DHT22, integrados ao microcontrolador ESP32, realizam leituras automáticas de temperatura e umidade em intervalos curtos e regulares. Cada registro é, então, enviado em tempo real para a plataforma em nuvem *ThingSpeak*, garantindo armazenamento contínuo e rastreável das condições ambientais.



Figura 8: Sensor instalado na sala do tomógrafo 1. Figura 9: Sensor instalado na sala do tomógrafo 2.



Figura 10: Sensor instalado na sala do angiógrafo. Figura 11: Sensor instalado na sala do mamógrafo.

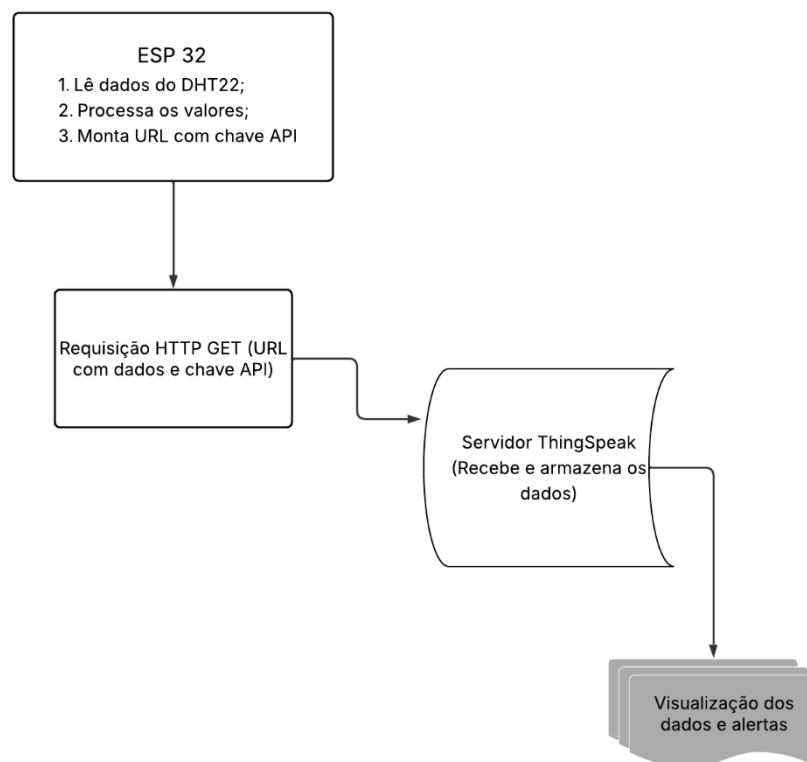
### 3.4. Comunicação dos sensores com a plataforma *Thingspeak*

O sistema de monitoramento ambiental desenvolvido neste projeto integra sensores de temperatura e umidade DHT22 a microcontroladores ESP32, responsáveis por realizar as medições, processar os dados e transmiti-los automaticamente para a plataforma *ThingSpeak* utilizando a rede Wi-Fi do hospital. Essa solução, baseada no paradigma de IoT, possibilita o acompanhamento remoto e contínuo das condições ambientais nas salas monitoradas, em tempo real.

A comunicação com a nuvem segue um fluxo operacional bem definido. Ao ser energizado, o ESP32 executa o firmware previamente gravado e estabelece conexão automática com a rede sem fio do hospital, utilizando as credenciais configuradas no código-fonte. Em intervalos regulares, determinados por temporizadores no programa, o microcontrolador aciona o DHT22 para realizar as leituras de temperatura (°C) e umidade relativa (%). Esses valores são processados e convertidos para o formato adequado de transmissão, sendo incorporados a uma requisição HTTP GET.

Cada envio é direcionado a um canal exclusivo na plataforma *ThingSpeak*, identificado por um *Channel ID* e protegido por uma chave de *API* única, garantindo a segurança e a correta associação dos dados ao sensor de origem. Ao receber as informações, a plataforma as armazena em seu banco de dados e as disponibiliza em forma de gráficos e tabelas dinâmicas, permitindo acesso por meio de navegadores ou aplicativos. A sequência lógica desde a coleta até a disponibilização das informações está detalhada no fluxograma da Figura 12.

Figura 12: Fluxograma do processo de aquisição e visualização de dados via ThingSpeak.



Fonte: o autor (2025)

Além do registro histórico, a *ThingSpeak* oferece funcionalidades adicionais, como geração automática de alertas (via e-mail ou SMS) quando valores predefinidos são ultrapassados, integração com MATLAB para análise avançada e personalização das visualizações. A utilização da infraestrutura de rede Wi-Fi já existente no hospital reduz custos de implantação, elimina a necessidade de módulos de comunicação adicionais e contribui para a simplicidade e eficiência do sistema.

### 3.5. Validação dos sensores (método *Gold Standard*)

Para garantir a acurácia dos dados coletados e responder às exigências de validação, o sistema de monitoramento baseado no sensor DHT22 foi comparado com um instrumento de referência (*gold standard*).

O instrumento de referência utilizado foi o termo-higrômetro digital MT-240 (Minipa), um dispositivo comercial comumente empregado em medições ambientais, apresentando precisão típica de  $\pm 1^\circ \text{C}$  para temperatura e 5% para umidade.

O ensaio comparativo foi realizado posicionando o sensor DHT22 e o termo-higrômetro MT-240 lado a lado. As leituras foram registradas simultaneamente durante um período contínuo de dez horas em intervalos das 7h às 17h, somente em dias úteis, por um mês, abrangendo variações ambientais típicas do horário de trabalho.

As amostras de dados foram coletadas a cada trinta minutos, gerando assim o volume total de dados  $N$  para o cálculo do desvio médio absoluto (DMA), a métrica fundamental utilizada para quantificar o erro médio de acurácia do sensor em relação ao *gold standard*.

O DMA foi calculado pela média das diferenças absolutas entre as leituras do SMTU e as leituras de referência conforme a equação (2):

$$DMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (2)$$

onde  $N$  representa o número total de medições simultâneas,  $x_i$  é a leitura coletada pelo sensor DHT22 no ponto de medição  $i$  e  $y_i$  é a leitura coletada pelo instrumento de referência, o termo-higrômetro digital MT-240, no mesmo ponto de medição  $i$ . O emprego do valor absoluto garante que a soma dos desvios não seja anulada por erros de sinais opostos.

### 3.6. Segurança da Informação e Confiabilidade

A segurança e a integridade dos dados são tratadas como prioridades no sistema, sendo implementadas por meio de um controle de acesso rigoroso à plataforma *ThingSpeak*, que utiliza chaves *Application Programming Interface (API)* distintas para segmentação. A *Write API Key* (chave de escrita) é utilizada exclusivamente pelos dispositivos *IoT* para enviar dados aos canais, enquanto a *Read API Key* (chave de leitura) permite o acesso seguro aos dados para geração de relatórios e análises,

impedindo modificações não autorizadas. A comunicação entre os sensores e o servidor é realizada por meio de requisição *HTTP GET* utilizando a *URL* e a chave *API*, com as credenciais sendo armazenadas de forma protegida no código-fonte dos microcontroladores.

A confiabilidade do sistema é reforçada pelo uso de um sensor digital de temperatura e umidade, que realiza a conversão direta dos valores medidos em sinal digital, minimizando erros associados a interferências eletromagnéticas, perdas em cabeamento e instabilidades típicas de sistemas analógicos. Em ambientes críticos, como as salas de Tomografia e Hemodinâmica, a utilização de um sensor digital devidamente posicionado e operando em regime contínuo é tecnicamente adequada para o monitoramento ambiental, assegurando a estabilidade dos registros e a aderência aos limites recomendados pelos fabricantes e diretrizes normativas.

### 3.7. Custos e Escalabilidade

O projeto foi desenvolvido com foco em baixo custo e alta escalabilidade, garantindo viabilidade econômica mesmo para hospitais que necessitam monitorar múltiplas salas simultaneamente. Cada ponto de medição apresenta um custo aproximado de R\$ 95,00, conforme detalhado na Tabela 6, valor que engloba o microcontrolador ESP32, o sensor digital DHT22, a fonte de alimentação, a fiação e o suporte em 3D em PLA. Esse baixo custo somente é possível devido à adoção de componentes amplamente disponíveis no mercado nacional e ao uso estratégico da impressão 3D, que elimina a dependência de suportes industriais ou processos de fabricação terceirizados. Além disso, a simplicidade na montagem e substituição dos módulos contribui para a redução de custos operacionais e facilita a expansão do sistema conforme a demanda.

Tabela 6: Estimativa de custos do sistema.

Item	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Sensor DHT22	6	25–40	150–240
ESP32	6	35–70	210–420
Fontes 5V + cabos	6	20–40	120–240
Suportes (impressão 3D)	6	10–25	60–150
Conectores + jumpers + pequenos materiais	—	—	30–80

<i>ThingSpeak</i> (plano gratuito)	—	0	0
Custo inicial total	—	—	570 – 1.130
Custo anual de operação	—	0	0

### 3.8. Envio de alertas

Para operacionalizar o monitoramento em tempo real e garantir a pronta resposta a desvios ambientais, a própria plataforma *ThingSpeak* foi utilizada para programar um sistema de alerta automático. Este sistema foi desenvolvido na aba *Apps*, aproveitando a funcionalidade *MATLAB Analysis* em conjunto com o recurso *TimeControl*, o que permitiu a criação de rotinas de verificação periódica e o acionamento automatizado de notificações.

Alertas individuais foram configurados para cada par de *fields* correspondentes aos sensores de temperatura e umidade de cada equipamento (GE OPTIMA, TOSHIBA 1, TOSHIBA 2 e SPECT). O código desenvolvido, baseado em uma modificação substancial do *template 'Read Channel to Trigger Email'* da plataforma, realiza a leitura periódica dos valores mais recentes registrados no canal do equipamento e compara esses dados diretamente com os limites de controle dos parâmetros ambientais preestabelecidos para cada sala, de acordo com as recomendações dos fabricantes.

A lógica de programação segue três etapas principais:

- i. Leitura de Dados: Utiliza-se a função *thingSpeakRead* para obter o valor mais recente do parâmetro monitorado (*lastValue*).
- ii. Comparação de Limites: O *lastValue* é comparado com os limites superior (*maxTemp* ou *maxHumid*) e inferior (*minTemp* ou *minHumid*) definidos no código. Se o valor ultrapassar o limite superior, é gerada uma notificação de "parâmetro alto"; se estiver abaixo do limite inferior, é emitido um aviso de "parâmetro baixo". Caso o valor esteja dentro da faixa recomendada, o sistema encerra a rotina sem enviar alertas, confirmando as condições adequadas.
- iii. Envio do Alerta: A mensagem de desvio é transmitida instantaneamente por meio da função *webwrite* para a API de alertas do *ThingSpeak*. Essa API é responsável por encaminhar automaticamente a notificação por e-mail ao usuário cadastrado.

Esse processo garante uma comunicação ágil e automática de qualquer desvio nos parâmetros ambientais, assegurando a rápida resposta da equipe responsável e a proteção dos equipamentos monitorados.

Para consulta e replicação detalhada do sistema de alerta, o código MATLAB completo, desenvolvido e adaptado para a plataforma *ThingSpeak*, encontra-se disponível na íntegra no Apêndice B deste trabalho.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos demonstram que a implementação de um sistema automatizado baseado em IoT responde de forma positiva ao problema proposto nesta pesquisa. Verificou-se que a automação do monitoramento contínuo elimina as falhas das medições manuais e fornece uma base de dados robusta para a manutenção preditiva. O sistema não apenas assegura a conformidade normativa em tempo real, mas também identifica padrões de estresse térmico e variações de umidade que antes eram invisíveis à gestão, permitindo intervenções técnicas antes da ocorrência de paradas críticas nos equipamentos de radiodiagnóstico.

### 4.1. Validação e confiabilidade metrológica

A etapa inicial de validação do SMTU foi crucial para atestar sua adequação metrológica e garantir a confiabilidade dos dados em um ambiente crítico. Inicialmente, foi conduzido um período de monitoramento piloto (iniciado em abril de 2024), onde ajustes de posicionamento e no código de programação foram realizados até que fosse alcançada estabilidade e concordância preliminar com instrumentos de referência.

A validação final do sistema foi realizada através de um ensaio comparativo direto com um instrumento de referência (*gold standard*), o termo-higrômetro digital MT-240 (Minipa). Conforme detalhado na Metodologia (item 3.5), o teste consistiu no registro simultâneo de dados por 10 horas, durante um mês. Os resultados foram analisados pelo cálculo do Desvio Médio Absoluto (DMA), que é a métrica fundamental para quantificar o erro médio de acurácia, sendo determinado pela Equação 2 descrita no item 3.5 da metodologia. A validação final demonstrou uma baixa margem de erro, atestando a precisão do sistema. Os resultados de acurácia estão resumidos na Tabela 7:

Tabela 7: Resumo da validação metrológica com *gold-standard*

Variável	Desvio Médio Absoluto (DMA)	Desvio Máximo	Precisão Típica do DHT22 (Fabricante)	Conformidade com requisitos hospitalares
Temperatura (°C)	0,57	2,00	± 0,5	Satisfatória
Umidade Relativa (%)	1,17	3,00	± 2,0	Satisfatória

Estes resultados confirmam a confiabilidade metrológica do SMTU. O Desvio Médio Absoluto (DMA) de 0,57° C para temperatura e 1,17% para umidade é altamente satisfatório, demonstrando que a acurácia média do sistema se mantém próxima ou dentro das especificações de fábrica ( $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 2\%$ ). Mesmo o Desvio Máximo, que representa o pior caso de desvio pontual, ainda é aceitável para o propósito do monitoramento de tendências. A validação atesta a precisão do sistema para a tomada de decisão técnica e clínica, validando a escolha dos sensores e o processamento de dados embarcado.

O SMTU, baseado em ESP32/DHT22 e *ThingSpeak*, foi implantado com sucesso em todas as seis salas críticas, conforme planejado na Metodologia. A comunicação via Wi-Fi se mostrou estável, e o sistema demonstrou capacidade de coletar e transmitir dados continuamente, com um intervalo de atualização mantido em 5 minutos.

Durante os primeiros seis meses de monitoramento contínuo (abril a outubro de 2024), o sistema registrou um tempo de atividade (*uptime*) de 98,5%. As falhas foram majoritariamente pontuais, relacionadas a interrupções de energia na rede local, e não a falhas de *hardware* dos sensores.

#### 4.2. Análise de custos e vantagem econômica

A proposta de arquitetura de baixo custo do SMTU foi quantificada para demonstrar sua viabilidade econômica e vantagem estratégica em comparação com as soluções de monitoramento existentes. Conforme detalhado na Metodologia (Tabela 6), o custo unitário de *hardware* para cada ponto de medição é de, aproximadamente, R\$ 95,00. Este valor de investimento inicial é fundamental para sustentar a alta escalabilidade do sistema.

Com base neste custo unitário, o investimento total de *hardware* para a implantação completa nas seis salas críticas é de R\$ 570,00. A Tabela 8 apresenta a

comparação deste custo total com os modelos de preços anuais das soluções comerciais de mercado.

Tabela 8: Comparação de custos do sistema desenvolvido e modelos comerciais.

<b>Empresa / Categoria</b>	<b>Modelo de Custo</b>	<b>Custo anual estimado para 6 salas (R\$)</b>
SMTU Proposto	Investimento em Hardware	570,00
Soluções SaaS (Loggatto, Pulse, etc.)	Mensalidade + Licença	18.000 – 28.800
Soluções Premium 24/7	Mensalidade + Serviço	21.600 – 50.400
Empresas Brasileiras de HVAC/R	Aquisição de Hardware	12.000 – 24.000

A comparação de custos (Tabela 8) demonstra de forma categórica a superioridade econômica do sistema desenvolvido. O baixo custo inicial de R\$ 570,00 contrasta drasticamente com os modelos de custo recorrente e de aquisição das soluções comerciais.

Em comparação com a faixa de preço das soluções SaaS, que exigem custos anuais entre R\$ 18.000 e R\$ 50.400, o SMTU proposto (utilizando *hardware* próprio e plataforma *cloud* gratuita/baixo custo) oferece uma redução de custo superior a 97% no primeiro ano de operação.

Este resultado não apenas comprova o princípio do baixo custo, mas também confirma a alta escalabilidade do projeto. A capacidade de expandir o sistema para um número significativamente maior de pontos de monitoramento com um custo marginal por ponto de apenas R\$ 95,00 torna o SMTU uma alternativa economicamente sustentável e superior para instituições com restrições orçamentárias.

#### **4.3. Processamento de dados em Python**

Devido à alta frequência de amostragem, o volume de dados superou o limite de linhas do Excel a partir de agosto de 2024, impedindo a extração integral em um único arquivo pela plataforma *ThingSpeak*. Para superar essa limitação e garantir a rastreabilidade completa, foi desenvolvido um *script* em linguagem Python, executado no ambiente Google Colab (Apêndice C).

O código lê a planilha principal exportada do *ThingSpeak*, separa automaticamente os registros por mês e armazena os arquivos segmentados no Google Drive. Esta solução assegurou a organização e o acesso a todo o histórico de medições, permitindo a elaboração de relatórios mensais e anuais consolidados para auditorias e comprovação de conformidade com as normativas.

#### 4.4. Desempenho em operação real

Alertas automáticos configurados na plataforma são disparados quando a temperatura ou a umidade ultrapassam os limites pré-estabelecidos (18 °C a 23 °C e 40 % a 60 %, respectivamente). Essa notificação imediata permite ações corretivas, como ajuste do sistema de climatização ou inspeção dos equipamentos médicos, preservando a qualidade dos exames e a vida útil dos dispositivos de diagnóstico por imagem.

O resultado mais significativo da implementação reside na capacidade do SMTU de transformar o processo de manutenção, permitindo intervir antes que as falhas causassem danos, ou seja, migrando para uma postura proativa e preditiva.

Durante o período de monitoramento, a funcionalidade de alertas via e-mail foi ativada em vinte e sete ocasiões distintas. As ocorrências foram por exceder o limite superior de temperatura (dezenove alertas por > 23° C ou por atingir o limite inferior de umidade (oito alertas por <40%). O sistema demonstrou uma taxa de sucesso de 100% na emissão de alertas.

Os limites estabelecidos em protocolo foram: temperatura 18°C a 23°C e Umidade 40% a 60%.

- **Temperatura:** A conformidade média com o limite de temperatura foi de 92,1% entre todas as salas. A sala do angiógrafo (Siemens) apresentou a maior conformidade, de 95,8%, enquanto a Sala do Tomógrafo 3 apresentou a menor 89,3%.
- **Umidade:** A conformidade média com o limite de umidade foi de 97,5%. As excursões de umidade foram predominantemente para o limite inferior 40%, concentradas nos meses de julho e agosto (período de baixa umidade sazonal).

Os eventos de não conformidade mais críticos foram os de temperatura alta. O tempo médio que as salas permaneceram com temperatura acima de 23°C foi de 35 minutos por evento. O evento mais longo registrado foi de 98 minutos na Sala do

Tomógrafo 3, o que reforça a importância do monitoramento contínuo para evitar exposições prolongadas ao estresse térmico.

#### 4.5. Visualização e Interface *ThingSpeak*

A implementação do *dashboard* no *ThingSpeak* foi o ponto de convergência do projeto, fornecendo a interface humana-máquina essencial para a equipe de manutenção e operação.

A Figura 13 apresenta o painel de controle em tempo real, tal como é visualizado pelos operadores, exibindo os elementos cruciais para a monitorização contínua:

1. **Indicadores Numéricos e Medidores:** Localizados na parte superior da interface, estes *widgets* fornecem a leitura instantânea da última medição registrada de temperatura e umidade, permitindo uma verificação rápida do *status* do ambiente;
2. **Gráficos de Série Temporal:** O elemento central do painel, os gráficos dinâmicos, exibe a evolução histórica das variáveis (temperatura e umidade) ao longo do tempo, possibilitando a identificação de desvios significativos;
3. **Metadados do Canal:** A interface centraliza a informação (canal 1) e valida o acesso remoto, permitindo que os operadores monitorem o estado de conformidade de qualquer lugar com acesso à internet.

Figura 13: Dashboard do canal 1 do ThingSpeak.



Em síntese, a interface simplificada do *ThingSpeak* facilitou a adoção do SMTU pela equipe técnica, garantindo uma visualização instantânea, leitura rápida e centralizada dos parâmetros, conforme demonstrado na figura 13. Esta funcionalidade complementa o sistema de alertas, assegurando que a informação visual e a notificação automática trabalhem em conjunto para manter a conformidade dos ambientes hospitalares, validando a facilidade de uso e o acesso remoto como resultados concretos da implementação.

#### 4.6. Visualização dos Gráficos de Tendência

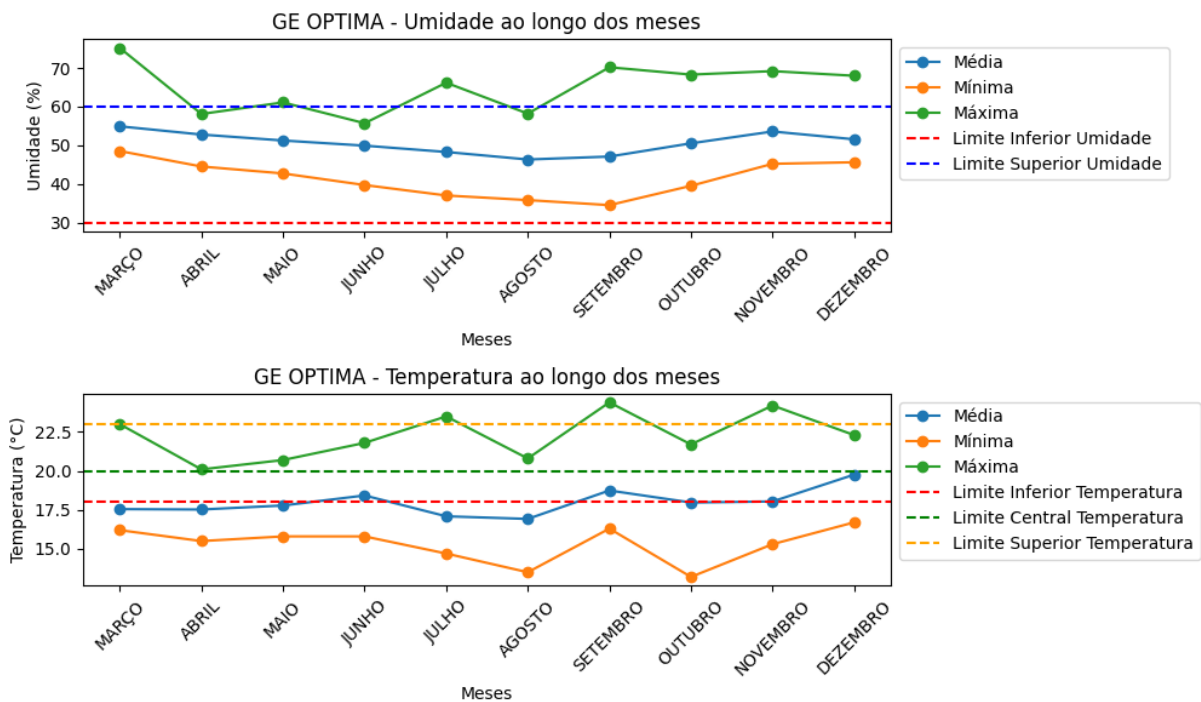
Para avaliar a eficácia do sistema de monitoramento ambiental e garantir a longevidade e a precisão dos equipamentos de diagnóstico, estão apresentados, a partir da figura 14, os gráficos de controle que detalham a performance de Temperatura e Umidade nas salas dos equipamentos GE OPTIMA, TOSHIBA 1, TOSHIBA 2 e SPECT/CT. O período de análise compreende os meses de março a

dezembro do ano de 2024, abrangendo diferentes estações climáticas e seus respectivos desafios para o controle ambiental.

As linhas de controle nos gráficos indicam os limites estabelecidos em protocolo: a linha pontilhada azul representa o Limite Superior de Umidade, a linha pontilhada vermelha o limite Inferior de umidade e/ou temperatura; e, para temperatura, a linha pontilhada verde indica o limite central, complementada pela linha pontilhada amarela para o limite superior. Cada gráfico apresenta a média, mínima e máxima das leituras de cada mês, fornecendo uma visão abrangente da variabilidade ambiental.

A Figura 14, detalha a variação mensal de temperatura e umidade entre março e dezembro de 2024 para o ambiente do tomógrafo GE OPTIMA.

Figura 14: Gráfico de controle ambiental da sala GE OPTIMA 670 (umidade e temperatura) ao longo dos meses.

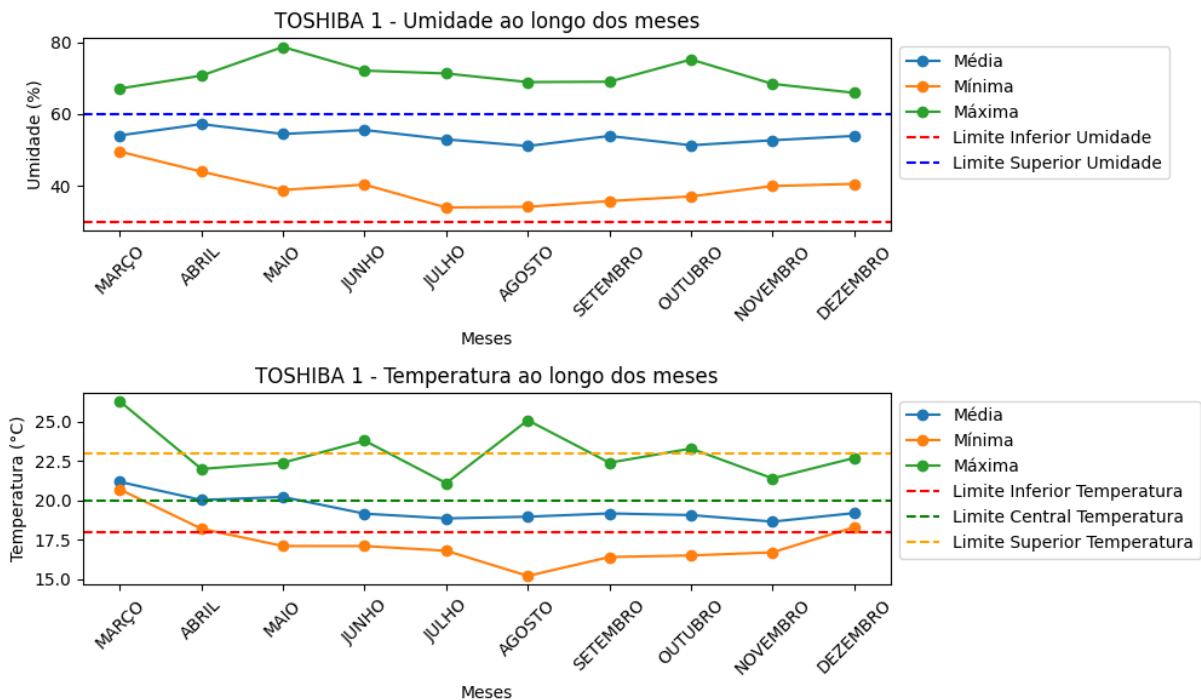


O ambiente do equipamento GE OPTIMA demonstrou um controle de temperatura com uma média consistentemente próxima ao limite central, indicando uma boa estabilidade térmica. No entanto, observam-se picos na temperatura máxima em setembro e novembro, cruzando sutilmente o limite superior de controle, o que sinaliza uma possível sobrecarga ou falha pontual do sistema de climatização nesses meses de transição. Em relação à umidade, a média permanece dentro dos

parâmetros ideais, mas a amplitude entre a mínima e a máxima é notável, com a mínima chegando a 35% em agosto, demonstrando que, embora não cruzem os limites de forma crítica, a variação é um fator a ser monitorado para garantir o conforto e a segurança eletrônica.

A Figura 15 apresenta o gráfico de controle ambiental para a sala do tomógrafo TOSHIBA 1, cobrindo o período de março a dezembro de 2024

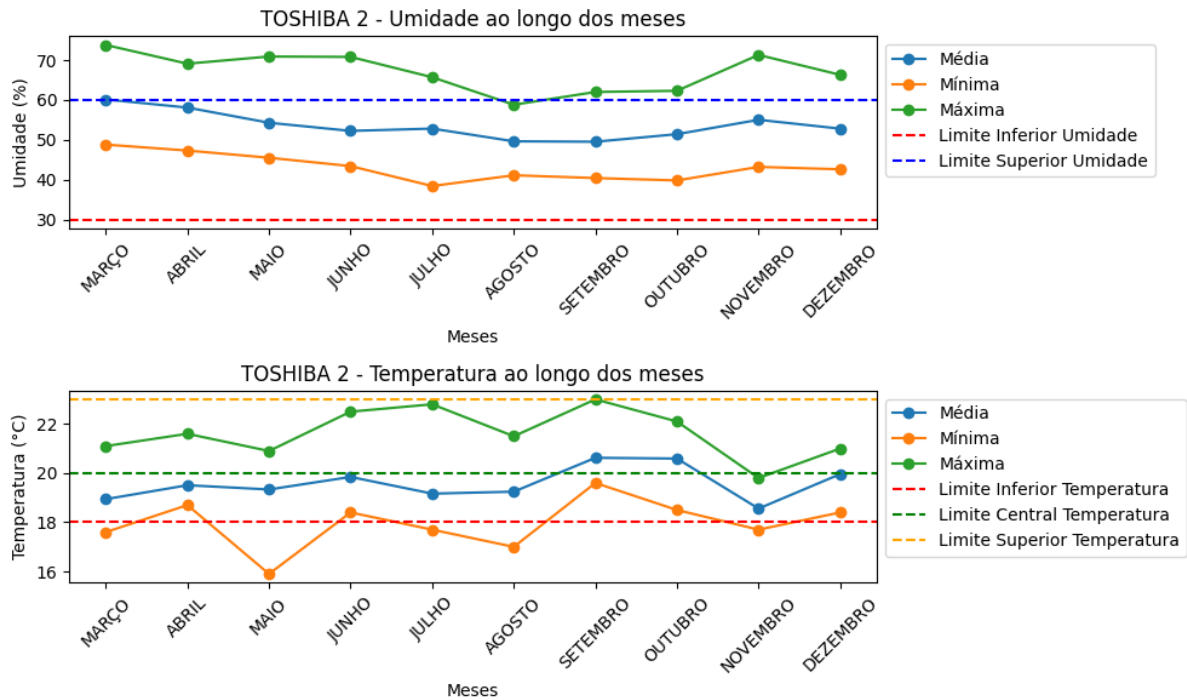
Figura 15: Gráfico de controle ambiental da sala do TOSHIBA 1 (umidade e temperatura) ao longo dos meses.



O ambiente TOSHIBA 1 se destaca pela alta estabilidade no controle de temperatura, com a média bem ajustada em torno do limite central e uma amplitude de variação (máxima e mínima) que respeita rigorosamente os limites estabelecidos. A umidade também se mostra bem gerenciada em termos médios e mínimos, mantendo-se em uma faixa segura de operação. Contudo, assim como em outros ambientes, há registro de picos na umidade máxima, especialmente em maio e outubro, onde a leitura chega a 80%, embora a média se mantenha abaixo do limite superior, exigindo atenção para o controle de desumidificação em períodos específicos de maior precipitação.

O desempenho do ambiente do tomógrafo TOSHIBA 2 é apresentado na Figura 16, com dados coletados ao longo do ano de 2024.

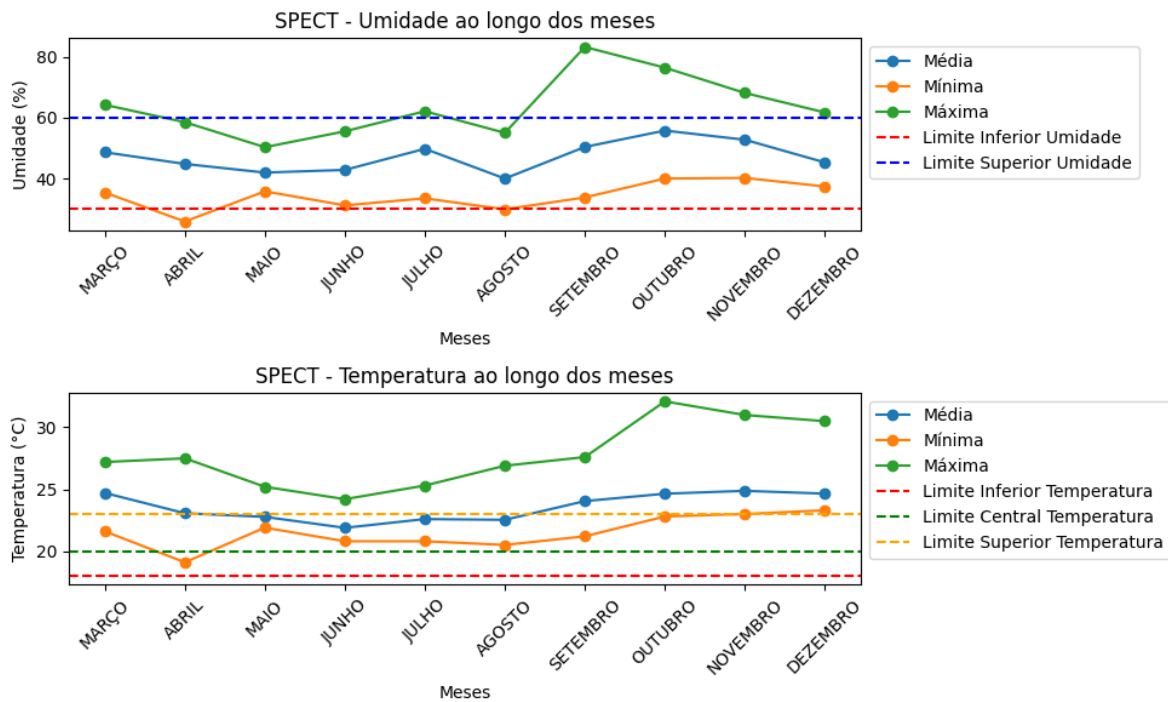
Figura 16: Gráfico de controle ambiental da sala do TOSHIBA 2 (umidade e temperatura) ao longo dos meses.



A sala deste equipamento apresenta um perfil de controle ambiental bastante robusto. A temperatura média se mantém próxima à faixa central, e os valores mínimos e máximos são bem contidos, com exceção de um leve pico da máxima em setembro, que se aproxima do limite superior. Na análise de umidade, as médias e mínimas demonstram excelente aderência aos requisitos. Assim como o TOSHIBA 1, este ambiente reforça a importância de um sistema de climatização eficaz, mostrando que é possível operar dentro de um controle rigoroso de temperatura e umidade, com as variações mínima e máxima sendo as principais indicações de estresse do sistema.

Já a Figura 17 ilustra o cenário de controle ambiental da sala SPECT/CT para o período analisado.

Figura 17: Gráfico de controle ambiental da sala do SPECT/CT (umidade e temperatura) ao longo dos meses.



O ambiente SPECT apresenta o cenário mais complexo. Na análise de umidade, observamos uma falha no controle, com o valor máximo ultrapassando o limite superior de 60% em setembro e outubro, chegando a mais de 80%, indicando um problema na desumidificação. Em relação à temperatura, foi constatada a necessidade de calibração do sensor, com o valor registrado estando, em média, 2 a 3 graus acima da temperatura real do ambiente. Ao aplicar este fator de correção (subtração), a temperatura média do ambiente se mostra bem controlada, ficando dentro da faixa aceitável.

No entanto, o problema se concentra nos extremos: o pico máximo de outubro, mesmo corrigido, permanece acima do limite superior de 25 °C, o que ainda representa um risco térmico elevado. adicionalmente, a correção faz com que as temperaturas mínimas em alguns meses caiam para  $\cong 17.5$  °C, cruzando o limite inferior de 20°C. Estes achados demonstram que, embora a média seja aceitável, o sistema de climatização da sala SPECT tem uma amplitude de oscilação excessiva, exigindo ajustes para conter tanto os picos de calor quanto os de frio, além de uma calibração imediata do sensor.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho alcançou os seguintes objetivos ao desenvolver e implementar o sistema de monitoramento de temperatura e umidade baseado em tecnologia *Internet of Things* (IoT) para os ambientes críticos do serviço de radiodiagnóstico do hospital:

- **Viabilidade e Eficácia da IoT:** A solução demonstrou a viabilidade técnica e a eficácia de utilizar componentes de baixo custo (ESP32/DHT22) e a plataforma *ThingSpeak* para o monitoramento contínuo em tempo real, validando o conceito de IoT no ambiente hospitalar;
- **Acurácia Metrológica Comprovada:** A validação pelo método *gold standard* (MT-240) comprovou a alta acurácia do sistema e o Desvio Médio Absoluto (DMA) de 0,57 °C para temperatura e 1,17% para umidade média está próximo à precisão típica dos sensores de fábrica;
- **Reprodutibilidade e Confiabilidade:** Os resultados atestam a reprodutibilidade do sistema em replicar consistentemente as medições do *gold standard*, com uma baixa margem de erro, garantindo a confiabilidade dos dados para a tomada de decisão técnica.
- **Ganho Operacional e Preditivo:** O SMTU substituiu com sucesso métodos manuais por monitoramento de maior periodicidade e precisão, com envio de alertas automáticos;
- **Conformidade e Segurança:** O sistema garante a manutenção das condições ambientais dentro das normativas regulatórias e das especificações dos fabricantes (protegendo contratos de garantia), resultando em maior segurança operacional e na preservação da longevidade dos equipamentos de diagnóstico por imagem de alto valor.

Em última análise, este estudo não só forneceu uma solução de monitoramento de baixo custo e alta acurácia, mas também possibilitou a adoção de tecnologias de IoT como um padrão essencial para a gestão de riscos e a excelência operacional no ambiente hospitalar de diagnóstico por imagem.

## **6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como etapa futura, recomenda-se a expansão deste modelo de monitoramento para outras áreas críticas do hospital e a integração dos dados de alerta diretamente com o sistema de gestão da manutenção, garantindo a abertura automática de ordens de serviço e consolidando o hospital como uma referência em gestão de infraestrutura baseada em dados IoT.

## 7. REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Vigilância Sanitária. (20 de Fevereiro de 2002). Resolução da Diretoria Colegiada - RDC n. 50 Dispõe sobre o Regulamento Técnico para planejamento, programação, elaboração e avaliação de projetos físicos de estabelecimentos assistenciais de saúde. Diário Oficial da União. Brasília, DF, Brasil.
- AKILESH, M. (2022). Impact of High Temperature and Humidity on the Performance of Positron Emission Tomography Scanner. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, pp. 301-305.
- AOSONG (Guangzhou) Electronics Co., L. (2022). AM2302 product manual: temperature and humidity module.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). *ABNT NBR ISO 14971: Dispositivos médicos - Aplicação de gerenciamento de risco a dispositivos médicos*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt Jr., E. M., & Boone, J. M. (2020). *The Essential Physics of Medical Imaging*. Philadelphia: Wolters Kluwer.
- Espressif Systems. (2023). *ESP32 series datasheet. Version 3.0. [S.l.]: Espressif Systems*.
- Gonçalves, H. d. (2024). *Manual de internet das coisas: IoT*. Brasília: Condor Digital.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2020). *Fundamentos de física, Volume 3: Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: LTC.
- IAEA. (2015). *Worldwide Implementation of Digital Imaging in Radiology IAEA human health series, No. 28*. Viena.
- IEC. (2014). *IEC 60601-1-2: Medical electrical equipment — Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance — Collateral Standard: Electromagnetic disturbances — Requirements and tests*. Genebra: IEC.
- IEC. (2020). *IEC 60601-2-44: Medical electrical equipment — Part 2-44: Particular requirements for the basic safety and essential performance of X-ray equipment for computed tomography*. Genebra: IEC.
- IEC. (2021). *IEC 60601-1: Medical electrical equipment — Part 1: General requirements for basic safety and essential performance*. Genebra: IEC.
- ISO. (2020). *ISO/TR 24971:2020 – Medical devices — Guidance on the application of ISO 14971*. Genebra.

- MATHWORKS. (2025). *ThingSpeak Internet of Things*. Fonte: ThingSpeak: <https://thingspeak.com>
- Oliveira, S. d. (2022). *Internet das coisas com EPS8266, Arduino e Raspberry Pi*. São Paulo: Novatec.
- Petroli, P., & Oliveira, P. (2014). *Microcontroladores PIC: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Érica.
- Santos, B., & et, a. (2020). *Internet das Coisas: da teoria à prática*. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS*. Belo Horizonte.
- Sekkat, H., Madkouri, Y., Khallouqi, A., & Rhazouani, O. E. (2024 de Agosto de 28). Risk Management and Failure Analysis in Diagnostic X-ray Equipment: A Comprehensive Analysis and Novel Approaches for Failure Prevention and System Reliability. *ASM International*, pp. 2327-2340.

## 8. APÊNDICES

### APÊNDICE A - CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO PARA LEITURA DHT22 E ENVIO AO THINGSPEAK

CÓDIGO ARDUINO IDE

```
#include "WiFi.h"
#include "HTTPClient.h"
#include "DHT.h"

// Configurações Wi-Fi
const char* ssid = "NOME_DA_REDE";
const char* password = "SENHA_DA_REDE";

// Configurações ThingSpeak
String apiKey = "SUA_API_KEY"; // API Key do canal ThingSpeak
const char* server = "http://api.thingSpeak.com/update";

// Configurações do DHT22
#define DHTPIN 4 // Pino conectado ao sensor
#define DHTTYPE DHT22 // Definição do tipo de sensor
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  dht.begin();

  // Conexão Wi-Fi
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.print("Conectando ao Wi-Fi");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nConectado ao Wi-Fi!");
```

```
}

void loop() {
  // Leitura dos valores do sensor
  float temperatura = dht.readTemperature();
  float umidade = dht.readHumidity();

  if (isnan(temperatura) || isnan(umidade)) {
    Serial.println("Falha na leitura do sensor DHT!");
    return;
  }

  // Exibe os valores no Serial Monitor
  Serial.print("Temperatura: ");
  Serial.print(temperatura);
  Serial.print(" °C | Umidade: ");
  Serial.print(umidade);
  Serial.println(" %");

  // Envia os dados para o ThingSpeak
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    HTTPClient http;
    String url = String(server) +
      "?api_key=" + apiKey +
      "&field1=" + String(umidade) +
      "&field2=" + String(temperatura);

    http.begin(url.c_str());
    int httpResponseCode = http.GET();
    if (httpResponseCode > 0) {
      Serial.println("Dados enviados com sucesso ao ThingSpeak!");
    } else {
      Serial.print("Erro ao enviar: ");
      Serial.println(httpResponseCode);
    }
  }
}
```

```
    }  
    http.end();  
  } else {  
    Serial.println("Wi-Fi desconectado!");  
  }  
  
  delay(20000); // Intervalo mínimo de 15 segundos exigido pelo ThingSpeak  
}
```

## APÊNDICE B - CÓDIGO MATLAB PARA ANÁLISE DE DADOS E ENVIO DE ALERTAS VIA THINGSPEAK

```

% Store the channel ID for the temperature sensor channel.
channelID = 2326382;

% Provide the ThingSpeak alerts API key. All alerts API keys start with TAK.
alertApiKey = 'TAKdLqtFWyrWOI2uSwI';

% Set the address for the HTTP call.
alertUrl = "https://api.thingspeak.com/alerts/send";

% Webwrite uses weboptions to add required headers. Alerts needs a ThingSpeak-
Alerts-API-Key header.
options = weboptions("HeaderFields", ["ThingSpeak-Alerts-API-Key", alertApiKey]);

% Set the email subject.
alertSubject = "Alerta de temperatura Toshiba 2";

% Wait for data to be updated
pause(5); % Pause for 5 seconds to ensure data is updated

% Attempt to read the most recent temperature value from ThingSpeak.
try
    % Try reading the most recent 30 points.
    tempData = thingSpeakRead(channelID, 'NumPoints', 30, 'Fields', 6); % Altere para
Field 2 ou 8 conforme necessário
    fprintf("Last 30 temperature values read: ");
    disp(tempData);
catch someException
    fprintf("Error reading data from ThingSpeak: %s\n", someException.message);
    return; % Exit if data cannot be read
end

% Check if there are valid temperature data points.

```

```

if isempty(tempData) || all(isnan(tempData))
    fprintf("No valid temperature data available in Field 6.\n");
else
    % Use the most recent valid temperature value.
    lastValue = tempData(end);
    fprintf("Last temperature value read: %.2f °C\n", lastValue);

    % Define acceptable range for temperature.
    minTemp = 18.0;
    maxTemp = 22.0;

    % Check if the temperature is out of the acceptable range.
    if lastValue > maxTemp
        % Temperature is too high.
        alertBody = sprintf('Temperatura Alta no Toshiba 2! Valor atual: %.1f °C (Limite
máximo: %.1f °C)', lastValue, maxTemp);
    elseif lastValue < minTemp
        % Temperature is too low.
        alertBody = sprintf('Temperatura Baixa no Toshiba 2! Valor atual: %.1f °C (Limite
mínimo: %.1f °C)', lastValue, minTemp);
    else
        fprintf("Temperature within acceptable range; no alert sent.\n");
        return; % Exit without sending alert
    end

    % Send email alert if the temperature is out of range.
    try
        fprintf("Sending alert: %s\n", alertBody);
        webwrite(alertUrl, "body", alertBody, "subject", alertSubject, options);
        fprintf("Alert sent successfully.\n");
    catch someException
        fprintf("Failed to send alert: %s\n", someException.message);
    end
end

```

## APÊNDICE C – CÓDIGO PYTHON PARA EXTRAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS DO THINGSPEAK (COLAB)

```
import pandas as pd
import os
import numpy as np

# Caminho do arquivo CSV na Google Drive (adaptar conforme o seu caminho)
arquivo_origem = '/content/drive/My Drive/feeds/feeds.csv'

# Carregar o CSV para um DataFrame do pandas
df = pd.read_csv(arquivo_origem)

# 1. Limpeza e Pré-processamento
# Converter a coluna de data e limpar dados inválidos
df['created_at'] = pd.to_datetime(df['created_at'], errors='coerce').dt.tz_localize(None)
# Remove linhas onde a data de criação é inválida (NaT)
df = df.dropna(subset=['created_at'])

# Filtrar apenas dados do ano de 2025 (ou o ano relevante)
df_2025 = df[df['created_at'].dt.year == 2025].copy()

# Colunas a serem mantidas e lista de campos (fields)
colunas_fixas = ['created_at']
# Captura todas as colunas que começam com 'field'
fields = [col for col in df_2025.columns if col.startswith('field')]

# Mapeamento de nomes de equipamentos para os pares de fields (umidade e temperatura)
nomes_planilhas = ['SPECT CT', 'GE OPTIMA', 'TOSHIBA 2', 'TOSHIBA 1']

# Configuração de Output
# Pasta base onde os arquivos Excel serão salvos
output_base = '/content/drive/My Drive/feeds/arquivos_separados_2025/'
# Cria o diretório se ele não existir
```

```
os.makedirs(output_base, exist_ok=True)
```

## # 2. Função de Estatísticas

```
def calcular_estatisticas(df, nome_coluna):
```

```
    """Calcula média, máximo, data do máximo, mínimo e data do mínimo para uma
    coluna."""
```

```
    if df[nome_coluna].notna().sum() > 0:
```

```
        # Encontra o índice dos valores máximo e mínimo
```

```
        max_idx = df[nome_coluna].idxmax()
```

```
        min_idx = df[nome_coluna].idxmin()
```

```
        return [
```

```
            df[nome_coluna].mean(),
```

```
            df[nome_coluna].max(),
```

```
            # Usa o .loc para obter a 'data e hora' correspondente
```

```
            df.loc[max_idx, 'data e hora'] if pd.notna(max_idx) else np.nan,
```

```
            df[nome_coluna].min(),
```

```
            df.loc[min_idx, 'data e hora'] if pd.notna(min_idx) else np.nan
```

```
        ]
```

```
    else:
```

```
        # Retorna NaN se não houver dados válidos
```

```
        return [np.nan, np.nan, np.nan, np.nan, np.nan]
```

## # 3. Processamento e Exportação por Equipamento

```
# Loop que percorre os fields de 2 em 2 (umidade e temperatura)
```

```
for i in range(0, len(fields), 2):
```

```
    field_umidade = fields[i]
```

```
    field_temp = fields[i+1]
```

```
# O nome do equipamento é determinado pela posição no loop
```

```
nome Equipamento = nomes_planilhas[i // 2]
```

```
# Selecionar colunas específicas para o equipamento e remover linhas sem dados
```

```
df Equipamento = df_2025[colunas_fixas + [field_umidade, field_temp]].dropna(how='all',
subset=[field_umidade, field_temp])
```

```

# Renomear colunas para termos mais legíveis (português)
df_equip = df_equip.rename(columns={
    'created_at': 'data e hora',
    'field_umidade': 'umidade',
    'field_temp': 'temperatura'
})

# Criar e salvar a planilha Excel
caminho_arquivo = os.path.join(output_base, f'{nome_equipamento}_2025.xlsx')

# Usa pd.ExcelWriter para escrever em múltiplas abas
with pd.ExcelWriter(caminho_arquivo, engine='xlsxwriter') as writer:

    # Agrupar por mês e criar uma aba para cada mês
    for periodo, grupo in df_equip.groupby(df_equip['data e hora'].dt.to_period('M')):
        grupo.to_excel(writer, sheet_name=f'{periodo}', index=False)

# 4. Cálculo e Exportação de Estatísticas Mensais
estatisticas = {
    'Métrica': ['Média', 'Máximo', 'Data do Máximo', 'Mínimo', 'Data do Mínimo']
}
for coluna in ['umidade', 'temperatura']:
    estatisticas[coluna] = calcular_estatisticas(grupo, coluna)

df_est = pd.DataFrame(estatisticas)
df_est.to_excel(writer, sheet_name=f'Estatísticas {periodo}', index=False)

print(f'Salvo: {caminho_arquivo}')

```

## DADOS CURRICULARES

<b>IDENTIFICAÇÃO</b>	
	Ana Luiza Costa de Ávila 27/03/1999
<b>Nacionalidade</b>	Brasileira
<b>Nome em citações bibliográficas:</b>	Ávila, Ana Luiza Costa de Ávila, A. L. C.
<b>Currículo Lattes</b>	<a href="http://lattes.cnpq.br/1045102327359608">http://lattes.cnpq.br/1045102327359608</a>
<b>ORCID</b>	<a href="https://orcid.org/0009-0001-1513-9086">https://orcid.org/0009-0001-1513-9086</a>
<b>FORMAÇÃO ACADÊMICA</b>	
<b>2024/2026</b>	Residência em Física Médica com ênfase em Radiodiagnóstico – Universidade Estadual Paulista (UNESP)
<b>2017/2024</b>	Bacharelado em Física Médica Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
<b>2025/2025</b>	Estágio de Aperfeiçoamento Internacional Fondazione IRCCS Policlinico, Milão, IT
<b>PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	
ÁVILA, A. L. C.; ALVAREZ, M.; PINA, D. R. <b>Implementação de monitoramento ambiental em ambientes hospitalares utilizando IoT</b> . In: XIX Congresso de Física Aplicada à Medicina (CONFIAM), 2025, Botucatu. Anais [...]. Botucatu: IBB-UNESP, 2025.	
<b>PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES</b>	
<b>Bancas de trabalhos de conclusão</b>	
Nada Consta	
<b>Orientações</b>	
Nada consta	
<b>PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS</b>	

CONGRESSO DE FÍSICA APLICADA À MEDICINA (CONFIAM), 19., 2025, Botucatu. Implementação de monitoramento ambiental em ambientes hospitalares utilizando IoT. 2025. (Apresentação Oral).

CONGRESSO DE FÍSICA APLICADA À MEDICINA (CONFIAM), 19., 2025, Botucatu. Mesa redonda: Desafios e Perspectivas da Residência em Física Médica. 2025. (Palestrante Convidada).

CICLO DE PALESTRAS SOBRE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, 2025, Botucatu. Inteligência Artificial em Diagnóstico por Imagem. 2025. (Seminário).

MESA REDONDA: LIGA ACADÊMICA DE FÍSICA MÉDICA, 2024, Botucatu. O Físico Médico na Medicina Moderna: Perspectivas e Desafios. 2024. (Palestrante Convidada).

TREINAMENTO DE SEGURANÇA EM RESSONÂNCIA MAGNÉTICA, 2024, Botucatu. Hospital das Clínicas da FMB-UNESP. 2024. (Capacitação).

TREINAMENTO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM TOMOGRAFIA, 2024, Botucatu. Hospital das Clínicas da FMB-UNESP. 2024. (Capacitação).

CURSO DE PRÁTICAS HOSPITALARES, 2024, Botucatu. Hospital das Clínicas da FMB-UNESP. 2024. (Capacitação).

2ª REUNIÃO CLÍNICA DE RESIDÊNCIAS EM SAÚDE, 2024, Botucatu. Faculdade de Medicina de Botucatu (FMB-UNESP). 2024. (Encontro).

## **APRESENTAÇÃO CURRICULAR**

O percurso da proponente é notavelmente voltado à Inovação Tecnológica e à Física Médica Aplicada, demonstrando uma capacidade de conectar pesquisa e desenvolvimento prático no ambiente clínico. Seu perfil se consolidou com um foco estratégico na Engenharia Clínica e na segurança do paciente, comprovando a excelência da formação na Residência em Física Médica com ênfase em Radiodiagnóstico.

### **Projeto de Residência**

O Trabalho de Conclusão de Residência (TCR), intitulado "Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento de temperatura e umidade para ambientes hospitalares", estabelece uma ponte direta e necessária entre a Física Médica e a Engenharia Clínica. Este trabalho, que utiliza conceitos de *Internet of Things* (IoT) para monitoramento ambiental em salas críticas, sublinha a proficiência da proponente em desenvolver soluções tecnológicas de infraestrutura hospitalar. A

relevância e o domínio do tema foram comprovados com a apresentação de trabalho oral no XIX CONFIAM 2025 (Congresso de Física Aplicada à Medicina), com o título " Implementação de monitoramento ambiental em ambientes hospitalares utilizando IoT".

### **Inovação, Patenteamento e Controle de Qualidade**

A aptidão para a inovação é formalizada pela submissão de uma Patente à Agência UNESP de Inovação (AUIN), cujo pedido foi aprovado e encontra-se em fase de registro, que se refere ao "Dispositivo de teste de alinhamento de lasers em tomografia computadorizada por impressão 3D". Este desenvolvimento demonstra a habilidade de conceber ferramentas de Controle de Qualidade (CQ) precisas e economicamente viáveis, utilizando manufatura aditiva para otimizar a segurança e acurácia dos equipamentos.

Sua experiência em CQ é reforçada pela coautoria (segunda autora) no trabalho "Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação e otimização de protocolos de Tomografia Computadorizada com base em TTF e NPS utilizando o software *imquest*". Este estudo utilizou métricas objetivas (TTF e NPS) para a otimização de protocolos de TC, evidenciando profundo conhecimento em otimização de dose (ALARA) e qualidade de imagem.

### **Experiência Internacional e Endosso Profissional**

A proponente possui uma experiência formativa internacional de prestígio, tendo realizado um estágio internacional (176 horas) na *Fondazione IRCCS Ca' Granda Ospedale Maggiore Policlinico*, Milão (Itália), com bolsa da UNESP (Edital PROPG nº 11/2025). As atividades focaram em Radiodiagnóstico, Controle de Qualidade e Radioproteção, incluindo a execução prática de protocolos de diagnóstico por imagem.

O desempenho da proponente foi reconhecido pelo Dr. Mauro Campoleoni, Diretor da *SSD Física Sanitaria*, que a atestou como uma profissional "inteligente, preparada e altamente motivada", destacando sua "seriedade e competência", o que sublinha sua integração e excelência em um ambiente clínico e de pesquisa internacional de alto nível.

## **Disseminação Científica e Engajamento**

Seu papel de liderança na comunidade acadêmica é confirmado pela participação em mesas redondas relevantes:

- Em 2024, na Liga Acadêmica de Física Médica, sobre "Físico Médico na Medicina Moderna: Perspectivas e Desafios".
- Em 2025, no congresso XIX CONFIAM, participando de uma mesa redonda sobre a temática da Residência.

O período de Residência consolidou o perfil da proponente como uma Física Médica integral, inovadora e de alto impacto. A concretização do projeto de TCR que conecta Física Médica à Engenharia Clínica (monitoramento IoT), o registro da patente de CQ por impressão 3D, e a experiência prática validada internacionalmente em Milão, representam a plena e bem-sucedida consecução dos objetivos da formação. Este conjunto de realizações certifica a proponente não apenas pela conclusão da Residência, mas pela sua aptidão diferenciada para liderar e aplicar soluções tecnológicas de ponta no campo da Física Médica Hospitalar e Acadêmica, estando pronta para o próximo desafio profissional.