

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES / ENGENHARIA ELÉTRICA E ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO
Projeto Final de Curso

Gabriel Pereira
Luckas Simões Barcelos

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO EM TEMPO
REAL DE PARÂMETROS OPERACIONAIS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA COM
SUPERVISÃO VIA DASHBOARD E NOTIFICAÇÕES CRÍTICAS

Projeto Final de Curso como parte dos requisitos para
obtenção do título de bacharel em Engenharia Controle e
Automação e Engenharia Elétrica apresentado à
Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fabio Manoel SA Simões – Orientador. POLI-PUC Goiás.
Prof. Dr. Wanderson Rainer Hilario Araujo – Orientador. POLI-PUC Goiás.
Prof. Dr. Antônio Marcos de M. Medeiros – Avaliador. POLI-PUC Goiás.

Goiânia, 04 de dezembro de 2025

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE PARÂMETROS OPERACIONAIS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA COM SUPERVISÃO VIA DASHBOARD E NOTIFICAÇÕES CRÍTICAS

Gabriel Pereira, Luckas Simões Barcelos e Fábio Manoel Sá Simões

Abstract— This work presents the development of an IoT device for real-time monitoring of the cryogenic parameters of magnetic resonance imaging (MRI) systems, aiming at greater reliability and operational efficiency. The solution integrates embedded technologies and cloud platforms for the collection, processing, and remote supervision of critical variables such as helium level, internal pressure, temperatures of the thermal stages, compressor status, and quench detection. The device uses an ESP32 microcontroller for data acquisition and secure data transmission via the MQTT protocol, with visualization on interactive dashboards (ThingsBoard) and automatic generation of alerts (Node-RED) sent via API. This approach contributes to predictive maintenance, reduction of failures, and preservation of cryogenic resources, in line with the guidelines of Industry 4.0.

Keywords – Magnetic Resonance Imaging (MRI), Cryogenics, Remote Supervision, MQTT, ThingsBoard, Node-RED, Alarms.

Resumo — Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo IoT para monitoramento em tempo real dos parâmetros criogênicos de sistemas de ressonância magnética, visando maior confiabilidade e eficiência operacional. A solução integra tecnologias embarcadas e plataformas em nuvem para coleta, processamento e supervisão remota de variáveis críticas, como nível de hélio, pressão interna, temperaturas dos estágios térmicos, status do compressor e detecção de quench. O dispositivo utiliza um microcontrolador ESP32 para aquisição e transmissão segura dos dados via protocolo MQTT, com visualização em dashboards interativos (ThingsBoard) e geração automática de alertas (Node-RED) enviados por API. Essa abordagem contribui para manutenção preditiva, redução de falhas e preservação de recursos criogênicos, alinhando-se às diretrizes da Indústria 4.0.

Palavras-chave – Ressonância Magnética, Criogenia, Supervisão Remota, MQTT, ThingsBoard, Node-RED, Alarmes.

I. INTRODUÇÃO

A ressonância magnética (RM) é uma tecnologia essencial para diagnósticos médicos avançados, baseada em ímãs supercondutores que geram campos magnéticos intensos e estáveis. Para manter esses ímãs em estado supercondutor, é necessário resfriá-los a temperaturas próximas de 4 Kelvin (-269 °C), utilizando hélio líquido como refrigerante. Esse processo, denominado criogenia, é crítico para o

funcionamento seguro e eficiente do equipamento.

O sistema criogênico é composto por elementos como o cryostat (reservatório de hélio líquido), compressor, cold head e sensores que monitoram parâmetros fundamentais: nível de hélio, pressão do magneto, temperatura, corrente do ímã e estado dos aquecedores. Qualquer falha nesses parâmetros pode levar a eventos graves, como o quench, que resulta na perda da supercondutividade, vaporização rápida do hélio e danos significativos ao equipamento, além de custos elevados para reabastecimento.

Diante dessa complexidade, torna-se indispensável um sistema de supervisão eficiente, capaz de monitorar continuamente esses parâmetros e emitir alertas em tempo real. Nesse contexto, dashboards interativos desempenham papel fundamental, pois permitem a visualização clara e organizada dos dados, facilitando a tomada de decisão e a identificação de tendências. A integração de alarmes automáticos é igualmente importante, garantindo que qualquer anomalia seja detectada e comunicada imediatamente, evitando falhas críticas e reduzindo riscos operacionais.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de supervisão e alarmes para criogenia em equipamentos de ressonância magnética, com monitoramento remoto e notificação via WhatsApp. A solução proposta integra diferentes tecnologias para garantir confiabilidade e agilidade:

1. Coleta de dados: realizada pelo módulo MSUP do equipamento, que disponibiliza informações via protocolo VT100.
2. Processamento embarcado: um microcontrolador ESP32-S3 recebe os dados via interface serial RS232 (com conversão pelo MAX3232), organiza-os em variáveis e gera pacotes JSON.
3. Visualização e análise: os dados são enviados via protocolo MQTT para a plataforma ThingsBoard, onde são exibidos em dashboards interativos e armazenados para histórico.
4. Alarmística inteligente: por meio do Node-RED, os valores são comparados com limites previamente estabelecidos. Ao serem detectadas condições críticas, são gerados alertas e encaminhados para uma interface de programação de aplicações (Evolution API), que notifica o cliente via WhatsApp com informações detalhadas sobre o parâmetro que excedeu o limite.

Essa arquitetura garante monitoramento contínuo, resposta rápida a eventos e integração com sistemas de notificação amplamente utilizados, contribuindo para a segurança operacional e redução de custos em ambientes clínicos.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o progresso tecnológico e o advento da Internet das Coisas (IoT), a interconexão entre dispositivos tornou-se viável, possibilitando a coleta e transmissão de dados provenientes de sensores e parâmetros operacionais de equipamentos a distância, com um atraso mínimo, praticamente em tempo real. Através da conexão à rede mundial de computadores, é possível obter informações de qualquer localidade global, armazená-las em servidores e utilizá-las para análises, automação e tomada de decisão.

Uma das áreas em que essa tecnologia tem se mostrado de grande relevância é o monitoramento da criogenia de equipamentos de ressonância magnética. O acompanhamento em tempo real dos parâmetros criogênicos permite identificar e até mesmo antecipar falhas que poderiam causar danos ao sistema, perda de hélio e, em casos mais graves, a paralisação completa do equipamento.

O uso da IoT aplicada a sistemas de ressonância magnética possibilita o desenvolvimento de soluções inteligentes de monitoramento remoto, com geração de alertas automáticos, criação de alarmes personalizados e envio de notificações por meio de plataformas de mensagens instantâneas, como o WhatsApp. Dessa forma, é possível realizar um acompanhamento contínuo do sistema criogênico, garantindo maior segurança operacional, redução de custos e prevenção de falhas críticas.

Nesta seção, são apresentados os fundamentos teóricos que orientam o processo de desenvolvimento do sistema proposto, descrevendo os principais elementos que compõem o monitor de criogenia para ressonância magnética, bem como sua arquitetura de comunicação e suas funcionalidades de notificação automatizada.

A. Criogenia em Ressonância Magnética:

O monitor de criogenia tem como principal função receber os dados provenientes do módulo da ressonância magnética, além de enviar comandos específicos para a obtenção de informações adicionais do sistema. Esses dados são processados, tratados e armazenados em variáveis internas, sendo posteriormente publicados em um servidor MQTT. Paralelamente, o sistema integra sensores de temperatura e umidade instalados na sala de máquinas, permitindo o monitoramento contínuo das condições ambientais que influenciam diretamente o desempenho do sistema criogênico.

Os monitores baseados em Internet das Coisas (IoT) são responsáveis por coletar informações via interface serial, utilizando o protocolo VT100, o qual organiza o envio de mensagens associando valores a coordenadas de linha. Essa estrutura possibilita a leitura precisa dos dados por meio de um código de varredura, que identifica as coordenadas correspondentes e armazena os valores em variáveis específicas para posterior tratamento e análise.

Os magnetos supercondutores utilizados em RM operam em temperaturas próximas a 4 K, obtidas pela imersão das bobinas em hélio líquido. O nível de hélio deve ser mantido acima de 60% da capacidade do tanque, sendo considerado crítico quando inferior a 50%, pois aumenta o risco de quench — evento caracterizado pela perda súbita da supercondutividade e liberação rápida de hélio gasoso [1]. Além disso, a pressão interna do criostato deve permanecer estável, com alarmes configurados para valores acima dos

valores permitidos, indicando falhas no cold head ou aquecimento excessivo [2].

O sistema criogênico é composto por um compressor e um cold head de dois estágios, responsáveis pela recondensação do hélio evaporado. O primeiro estágio opera entre 40 K e 80 K, enquanto o segundo estágio mantém temperaturas próximas a 4 K. Leituras acima de 77 K no escudo térmico ou acima de 6 K no estágio frio indicam degradação do desempenho do cold head, exigindo intervenção preventiva [3].

Sensores de carbono e resistores térmicos monitoram pontos críticos do magneto, fornecendo dados para manutenção preditiva. Alterações graduais nas leituras desses sensores são indicativos de falhas iminentes no sistema de refrigeração [4].

O gerenciamento automatizado desses parâmetros permite o acionamento de válvulas e atuadores para corrigir variações anormais de pressão e temperatura, mantendo o sistema em condições estáveis. Caso os valores ultrapassem os limites seguros definidos pelo fabricante, alarmes são disparados para evitar que o equipamento entre em estado crítico.

B. Fenômeno de Quench:

O termo quench descreve a perda súbita da supercondutividade no magneto de uma ressonância magnética. Esse fenômeno ocorre quando as bobinas supercondutoras, mantidas a temperaturas próximas de ~4 K, sofrem aumento térmico acima do limite crítico, fazendo com que deixem de atuar como supercondutoras e passem a apresentar resistência elétrica. Quando isso acontece, a grande quantidade de energia armazenada no campo magnético é convertida rapidamente em calor, provocando a ebulição instantânea do hélio líquido e um aumento abrupto da pressão interna do sistema criogênico. Para evitar danos estruturais, o equipamento direciona o hélio gasoso para o exterior através das válvulas de alívio e do quench pipe.

O quench pode ocorrer espontaneamente, geralmente devido a falhas térmicas ou elétricas, como degradação do cold head, redução do nível de hélio, falhas no compressor ou perda de vácuo. Também pode ser induzido manualmente em situações emergenciais, quando é necessário desenergizar o magneto de forma rápida e controlada.

Os sistemas modernos de criogenia utilizam sensores para identificar alterações que antecedem o quench, incluindo aumentos anormais de pressão, elevações nas temperaturas dos sensores de carbono e reduções rápidas do nível de hélio. Caso o evento se inicie, os sensores QuenchTr1 e QuenchTr2 detectam variações críticas de tensão e corrente nas bobinas, acionando automaticamente os mecanismos de segurança.

A ocorrência de um quench representa prejuízos significativos devido à perda de hélio e aos riscos de danos ao magneto, podendo interromper o funcionamento clínico por longos períodos. Por esse motivo, o monitoramento contínuo dos parâmetros criogênicos, aliado a sistemas inteligentes baseados em IoT, é fundamental para prevenir o quench e garantir a segurança e longevidade do equipamento.

C. Monitoramento de variáveis, Temperatura e umidade da Sala de Máquinas:

O monitoramento da temperatura e umidade da sala de máquinas tem como finalidade garantir o funcionamento adequado do sistema de climatização e assegurar que as condições ambientais permaneçam dentro dos limites

recomendados pelos fabricantes de ressonância magnética. A estabilidade desses parâmetros é fundamental para preservar o desempenho e a segurança dos sistemas criogênicos e eletrônicos.

A sala de máquinas abriga elementos críticos, como o compressor de hélio, a bomba d'água e os armários eletrônicos de controle. O compressor é responsável por manter o cold head em funcionamento, garantindo o resfriamento do hélio líquido, enquanto a bomba d'água circula o fluido refrigerante utilizado na dissipação de calor dos módulos eletrônicos. Já os armários de controle dependem de ventilação forçada, o que os torna sensíveis ao aumento da temperatura ambiente.

Para assegurar a operação estável, fabricantes como Siemens, GE e Philips recomendam manter a temperatura da sala entre 20 °C e 24 °C (ideal de 22 °C) e a umidade relativa entre 40% e 60% (com alvo próximo de 50%). Esses limites evitam condensação, corrosão e riscos de descargas eletrostáticas, além de minimizar o sobreaquecimento dos módulos de potência.

O monitoramento contínuo desses parâmetros permite detectar rapidamente falhas na climatização e garante condições adequadas para o funcionamento seguro e eficiente da ressonância magnética.

D. Parâmetros Operacionais e Segurança:

Além dos parâmetros criogênicos, outros indicadores são fundamentais para a operação segura do magneto. A corrente de campo, responsável pela geração do campo magnético principal (B0), deve permanecer estável em modo persistente, tipicamente em torno de 500–650 A para magnetos de 1,5 T [5]. Variações abruptas indicam quench ou falhas no circuito persistente. O switch heater, utilizado para alternar entre modo persistente e rampagem, deve permanecer desligado durante a operação normal [6].

A tensão da bateria do módulo de supervisão (MSUP) é outro parâmetro crítico, garantindo a continuidade do monitoramento em caso de falha elétrica. Valores abaixo de 22 V indicam necessidade de substituição ou recarga [7].

A pressão do magneto também é um parâmetro essencial, pois reflete o equilíbrio térmico do sistema criogênico. Valores elevados de pressão podem indicar falhas no cold head (recondensador) ou aquecimento excessivo do hélio, enquanto pressões muito baixas podem sugerir quebra de vácuo ou entrada de umidade, situações que comprometem a integridade do sistema.

Além disso, as temperaturas dos estágios criogênicos — monitoradas pelos sensores associados aos parâmetros *Shield* e *Turret*, além da temperatura do cold head — fornecem dados fundamentais para a avaliação do desempenho térmico do sistema. A elevação progressiva desses valores configura um dos principais indicativos de degradação operacional e de potencial falha iminente no sistema de refrigeração.

E. Monitoramento Remoto e IoT:

Com o avanço da Internet das Coisas (IoT), tornou-se viável integrar sensores, microcontroladores e plataformas em nuvem para monitoramento remoto de sistemas complexos. Protocolos como MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) são amplamente utilizados por sua leveza e confiabilidade em aplicações embarcadas [8]. Plataformas como ThingsBoard permitem a visualização dos dados em dashboards interativos, enquanto ferramentas como Node-RED possibilitam a implementação de fluxos lógicos para análise e geração de alarmes [9].

A integração dessas tecnologias com APIs de comunicação, como Evolution, viabiliza o envio de notificações automáticas via aplicativos de mensagens, garantindo resposta rápida a eventos críticos. Essa abordagem contribui para a manutenção preditiva, redução de custos e aumento da disponibilidade operacional, alinhando-se às diretrizes da Indústria 4.0 [10].

F. Protocolos de comunicação:

O desenvolvimento de sistemas IoT aplicados ao monitoramento remoto de equipamentos de ressonância magnética exige protocolos de comunicação que sejam leves, confiáveis e compatíveis com dispositivos embarcados de baixo consumo energético. A integração entre hardware, software e plataformas em nuvem deve garantir a transmissão segura e eficiente dos dados coletados, mesmo em ambientes críticos como salas de RM, onde a estabilidade operacional é essencial.

Para conectar o microcontrolador ao módulo de supervisão (MSUP), foi utilizada a interface RS-232, padrão consolidado em equipamentos Siemens, que permite comunicação serial robusta e compatível com protocolos VT100. Essa escolha assegura a integridade dos dados na aquisição local, mesmo em ambientes com interferência eletromagnética.

Na camada de comunicação com a nuvem, o protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) foi adotado por suas características ideais para aplicações IoT: baixo consumo de largura de banda, confiabilidade e suporte ao modelo publish/subscribe. O MQTT utiliza um broker para gerenciar mensagens entre dispositivos e servidores, garantindo escalabilidade e segurança. Essa arquitetura é especialmente adequada para telemetria, permitindo que os dados dos sensores sejam enviados continuamente para a plataforma ThingsBoard, onde são processados e exibidos em dashboards interativos.

G. Trabalhos Relacionados:

Pesquisas recentes têm mostrado que tecnologias de Internet das Coisas vêm sendo incorporadas a sistemas de monitoramento remoto em setores que exigem alto nível de confiabilidade, como centros de dados e equipamentos médicos. Os autores dessas soluções relatam melhorias relevantes, entre elas a diminuição de ocorrências de falhas, maior eficiência no uso dos recursos e aumento da segurança operacional [11][12]. Para aplicações em ressonância magnética, a integração entre hardware dedicado, protocolos de comunicação apropriados e plataformas em nuvem surge como um avanço em relação aos métodos tradicionais baseados em inspeções locais.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Desenvolver e implementar um sistema de monitoramento dos parâmetros de criogenia de um equipamento de ressonância magnética requer uma abordagem estruturada, baseada em coleta, tratamento e transmissão de dados em tempo real. Para isso, foi estabelecida comunicação direta com o equipamento por meio da interface RS-232, permitindo a captura contínua dos parâmetros críticos disponibilizados pelo módulo MSUP, ilustrado na Figura 01.

Após o processamento, as informações foram transmitidas para a nuvem utilizando o protocolo MQTT,

um suporte físico confiável e modular para o processamento, aquisição e transmissão dos dados monitorados pela solução proposta. A Figura 03 ilustra a organização completa das trilhas e componentes, enquanto a Figura 04 apresenta a perspectiva 3D utilizada durante a validação da montagem e análise de interferências físicas entre os elementos da PCI.

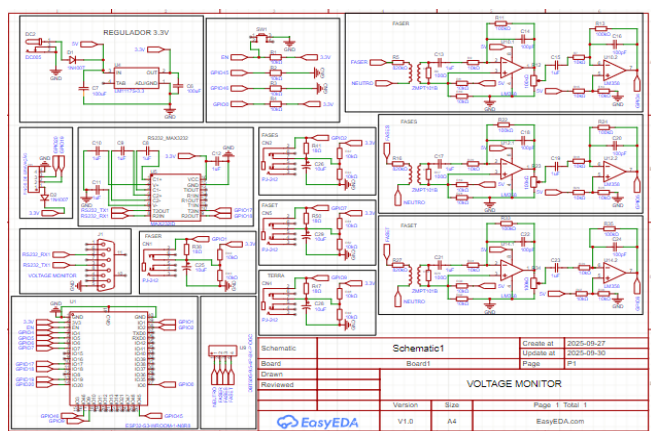


Figura 03 – Diagrama da PCI principal.

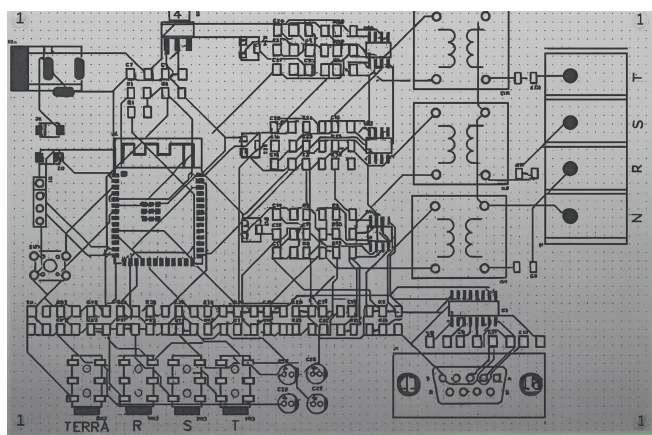


Figura 04 – Perspectiva 3D da PCI principal.

C. Etapa da implementação remota:

A segunda etapa consistiu no desenvolvimento do sistema de supervisão remota, responsável por apresentar, organizar e disponibilizar de forma estruturada todos os parâmetros criogênicos coletados pelo módulo MSUP. Como os dados transmitidos pela interface serial chegavam em formato VT100, composto por mensagens brutas, tornou-se necessário aplicar uma metodologia de tratamento, padronização e visualização. Essa abordagem visou garantir que usuários de diferentes perfis — técnicos operacionais, equipes de manutenção e gestores — pudessem acessar as informações de maneira prática, clara e segura.

Durante a definição da arquitetura de supervisão, foram avaliadas diversas alternativas para o gerenciamento dos dados, incluindo servidores próprios, dashboards personalizados, aplicativos locais e plataformas IoT de código aberto. A análise dos requisitos indicou a necessidade de uma solução que oferecesse suporte nativo ao protocolo MQTT, dashboards personalizáveis e responsivos, armazenamento histórico, controle de acesso por perfil, integração com mecanismos de alarmes, comunicação segura e flexibilidade para expansão futura.

Com base nesses critérios, a plataforma ThingsBoard foi escolhida como a solução mais adequada. Essa escolha representou um marco importante no projeto, pois a

ferramenta atende integralmente às necessidades de visualização, organização e tratamento dos dados, permitindo a construção de um sistema robusto e completo. O ThingsBoard Cloud se destacou por oferecer interfaces gráficas avançadas para criação de dashboards customizáveis, telemetria em tempo real com sincronização imediata via MQTT, armazenamento histórico para análises técnicas e manutenção preventiva, além de mecanismos de automação (Rule Chains) e arquitetura em nuvem que assegura acesso remoto independente da localização do usuário.

Após a seleção da plataforma, iniciou-se a organização e modelagem das interfaces do dashboard. A construção seguiu princípios de clareza visual, separando grupos de dados conforme o tipo de informação monitorada, destacando parâmetros críticos e garantindo compatibilidade com diferentes dispositivos, como computadores, tablets e smartphones. Essa estrutura assegurou que a visualização dos dados fosse não apenas precisa, mas também acessível e funcional para todos os perfis envolvidos no processo de supervisão.

D. Estruturação do Dashboard de Monitoramento:

O dashboard foi estruturado em seções que representam de forma organizada cada subsistema da ressonância magnética, abrangendo variáveis como nível e pressão do hélio, temperatura criogênica, corrente do magneto, status do compressor, indicadores dos resistores internos do circuito de criogenia, além da temperatura e umidade da sala de máquinas. Cada um desses parâmetros foi associado a widgets específicos — incluindo marcadores analógicos, gráficos de tendência, cartões com valores instantâneos e indicadores de alarme — o que proporcionou uma visualização clara, precisa e objetiva do estado geral da máquina, facilitando a interpretação pelo usuário e permitindo a identificação rápida de alterações operacionais relevantes.

E. Estrutura do Código-Fonte:

Os dados recebidos pelo microcontrolador foram inicialmente tratados localmente, convertidos em JSON estruturado e enviados ao ThingsBoard via MQTT. Uma vez na plataforma, as informações foram padronizadas e classificadas de acordo com sua natureza, criticidade e periodicidade de atualização.

A metodologia adotada permitiu:

- identificação precisa de cada parâmetro;
- normalização dos valores;
- associação com limites máximos e mínimos;
- geração de séries temporais para análises posteriores.

Esse processo assegurou a coerência das informações exibidas e sua disponibilidade para os diferentes módulos da plataforma.

F. Implementação da Lógica de Supervisão com Rule Chains:

A plataforma ThingsBoard possibilitou a criação de uma cadeia lógica de automação (Rule Chain) responsável pelo processamento de eventos críticos. A Rule Chain foi configurada para:

- verificar continuamente limites de segurança dos parâmetros monitorados;

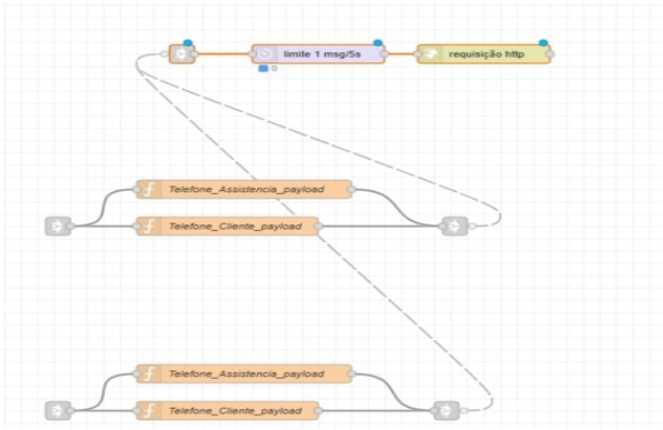


Figura 07 – Diagrama de requisição do Node-RED.

J. Desenvolvimento do Filtro de Blindagem para Comunicação Serial:

Como o módulo MSUP fica localizado na sala de exames — ambiente com alta restrição eletromagnética — e o módulo de supervisão (ESP32-S3) permanece na sala de máquinas, a passagem do cabo de comunicação exigiu o desenvolvimento de um filtro dedicado, garantindo total compatibilidade eletromagnética com o sistema da ressonância magnética. Sem essa filtragem, cabos de comunicação poderiam atuar como antenas, conduzindo frequências que interferem diretamente na faixa operacional da ressonância, comprometendo tanto a segurança quanto a qualidade das imagens.

A PCI desenvolvida contém um filtro LC em modo comum e modo diferencial, permitindo suprimir tanto interferências externas vindas da sala de máquinas quanto eventuais ruídos internos que poderiam se propagar por meio do cabo.

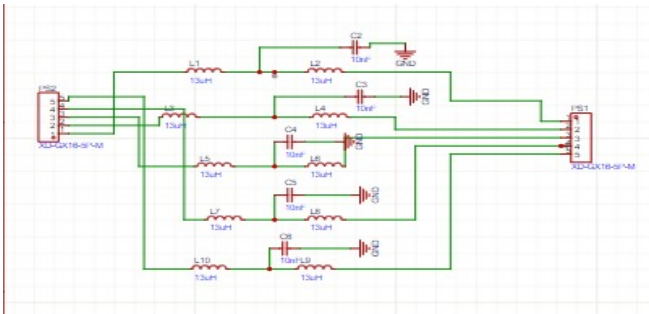


Figura 08 – Diagrama do filtro LC.

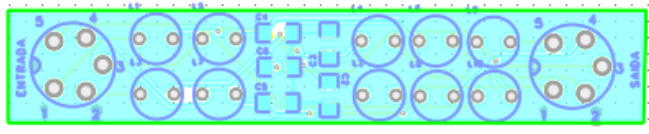


Figura 09 – Perspectiva 3D da PCI do filtro LC.

K. Encapsulamento do projeto:

Para a montagem do projeto, foi utilizada uma caixa com certificação IP66, garantindo proteção contra poeira e imersão em água. No interior da caixa, foi desenvolvido um suporte estrutural para acomodar a placa eletrônica de forma segura e organizada. Além disso, foram realizados furos técnicos destinados à passagem dos dutos e cabos, assegurando a integridade dos conectores e permitindo a

correta interligação entre os componentes internos e externos do sistema.

IV. RESULTADO E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento, integração e operação do Sistema de Monitoramento de Criogenia para Ressonância Magnética baseado em IoT. Os resultados demonstram o funcionamento do hardware embarcado, o fluxo de comunicação serial, o processamento dos dados, a transmissão via MQTT, a supervisão remota no ThingsBoard e a geração de alertas automáticos pelo Node-RED. Além disso, discute-se o comportamento dos parâmetros monitorados, a estabilidade da integração e a viabilidade prática do sistema como solução complementar para clínicas e hospitais.

A. Plataforma de Hardware para Monitoramento da Criogenia:

A Figura 11 apresenta o protótipo final do dispositivo desenvolvido, contendo o ESP32-S3, o conversor MAX3232, a PCI dedicada e o módulo de conexão com o filtro LC. O conjunto foi montado em uma caixa de PVC IP66, garantindo vedação contra poeira e umidade e proporcionando robustez para operação contínua na sala de máquinas da ressonância.



Figura 11 – Protótipo desenvolvido com o filtro LC.

Para garantir compatibilidade eletromagnética, foi implementado um filtro LC encapsulado em tubo de cobre, conforme a Figura 12, projetado com base em parâmetros de um filtro comercial Siemens.



Figura 12 – Filtro LC.

Durante os testes, o hardware apresentou comportamento estável, com leitura contínua dos parâmetros do MSUP e envio periódico ao servidor MQTT sem perdas significativas de pacotes.

B. Publicação e Transmissão de Telemetria via MQTT:

A transmissão dos dados foi implementada segundo o padrão *publish/subscribe*, utilizando o protocolo MQTT e uma estrutura padronizada em JSON. O microcontrolador ESP32-S3 ficou responsável por consolidar todos os parâmetros criogênicos em pacotes organizados, incluindo também as medições de temperatura e umidade obtidas pelo sensor DHT11. Essa arquitetura permitiu otimizar o consumo de banda, reduzir a latência na comunicação e facilitar a integração com diferentes plataformas de supervisão simultaneamente, além de possibilitar a expansão do sistema para novas variáveis ou dispositivos sem necessidade de alterações estruturais.

Os resultados obtidos durante os testes demonstraram que o sistema manteve comportamento estável mesmo com intervalos curtos de publicação, operando sem congestionamento no broker MQTT e apresentando variações mínimas no tempo de entrega das mensagens, o que reforça a confiabilidade da solução proposta para monitoramento contínuo em aplicações críticas.

C. Supervisão Remota na Plataforma ThingsBoard:

Os dados transmitidos pelo ESP32-S3 foram processados e exibidos no ThingsBoard em dashboards configurados para visualização técnica, contendo gráficos, indicadores digitais e histórico de variáveis. A Figura 13 apresenta um exemplo do painel utilizado durante os testes.

A plataforma demonstrou excelente desempenho para visualização e organização de telemetrias. O histórico permitiu observar variações naturais de pressão, comportamento das temperaturas do cold head e estabilidade do nível de hélio. A presença de múltiplos widgets facilitou a análise de condições operacionais e a identificação de tendências para manutenção preditiva.

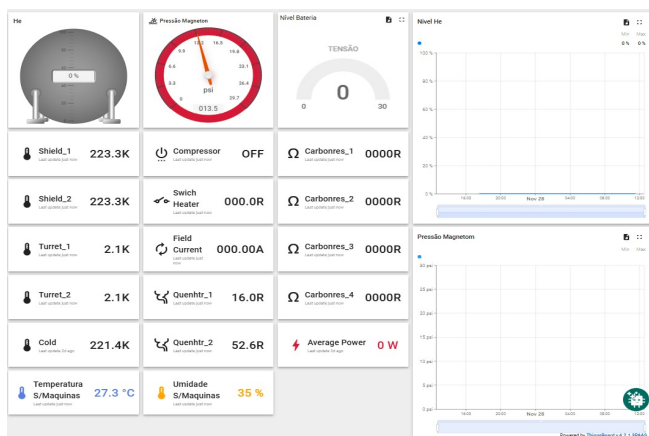


Figura 13 – Dashboard do Thingboard.

D. Processamento Lógico e Geração de Alertas no Node-RED:

Para garantir maior confiabilidade na identificação de condições críticas, o Node-RED foi implementado como camada lógica do sistema. Essa ferramenta possibilitou a verificação contínua dos parâmetros, a criação de rotinas condicionais de forma intuitiva por meio de blocos, a montagem automática das mensagens em formato JSON e a integração direta com a API Evolution, permitindo o envio de alertas via WhatsApp.

O fluxo estruturado no Node-RED permitiu estabelecer regras específicas para situações como pressão do hélio fora

da faixa segura, comportamento anormal do compressor, quedas de pressão, elevação da temperatura na sala de máquinas e variações críticas na temperatura do cold head. Quando qualquer uma dessas condições era identificada, o sistema gerava automaticamente um payload contendo o nome da clínica, o parâmetro crítico associado, o valor medido, o horário da detecção e uma orientação inicial ao cliente.

A Figura 14 apresenta a estrutura lógica do fluxo desenvolvido no Node-RED.

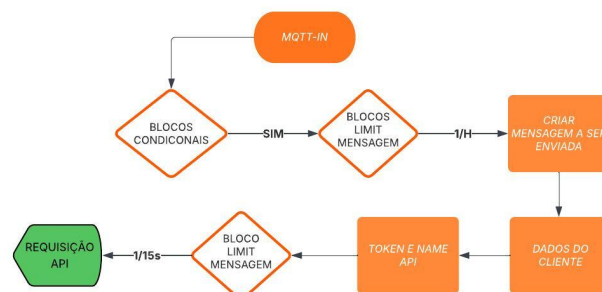


Figura 14 – Fluxograma do funcionamento do Node-RED.

A atuação do Node-RED demonstrou alta confiabilidade, sem perda de eventos e com envio consistente de notificações, tornando o processo mais seguro e previsível do que o mecanismo nativo do ThingsBoard.

E. Visualização Final e Interpretação dos Resultados:

Os testes demonstraram que o sistema foi capaz de monitorar continuamente todos os parâmetros provenientes do MSUP, mantendo a telemetria estável e sem interrupções. As informações foram apresentadas de forma clara e acessível no dashboard, permitindo uma interpretação rápida do estado operacional da máquina. Além disso, o sistema mostrou eficiência na detecção de anomalias e enviou notificações automáticas e informativas ao cliente sempre que um parâmetro ultrapassava os limites aceitáveis.

Os gráficos de histórico evidenciaram o comportamento dos principais indicadores, permitindo observar variações de pressão associadas à verificação de possíveis vazamentos, identificar problemas criogênicos, acompanhar a evolução do nível de hélio ao longo do tempo e detectar sinais de falhas no compressor. Essa visualização detalhada proporcionou uma compreensão mais profunda do desempenho do equipamento e auxiliou na tomada de decisões preventivas.

A integração entre as camadas de hardware, plataforma em nuvem e lógica de análise resultou em um sistema altamente funcional, com potencial direto para aplicação comercial e grande capacidade de expansão futura.

V. CONCLUSÃO

O avanço das tecnologias de automação, computação em nuvem e Internet das Coisas (IoT) tem possibilitado a criação de soluções cada vez mais eficientes para monitoramento remoto de sistemas críticos. Em ambientes hospitalares, especialmente na operação de equipamentos de ressonância magnética, a capacidade de coletar, interpretar e agir sobre dados operacionais em tempo real torna-se fundamental para garantir segurança, continuidade de operação e redução de custos associados a falhas e desperdícios de hélio. Nesse contexto, o presente trabalho apresentou o desenvolvimento

de um sistema IoT completo e integrado para supervisão dos parâmetros de criogenia de um equipamento Magnetom Essenza, demonstrando viabilidade técnica, estabilidade e potencial de aplicação prática.

O sistema desenvolvido permitiu a aquisição contínua de variáveis essenciais, como nível e pressão do hélio, temperaturas dos estágios térmicos, status do compressor, resistores de quench e tensão da bateria do módulo MSUP. A utilização da comunicação serial RS-232, aliada ao microcontrolador ESP32-S3, possibilitou a leitura confiável dos pacotes enviados pelo módulo de supervisão da ressonância, enquanto a publicação das informações via protocolo MQTT garantiu transmissão leve, rápida e escalável. A plataforma ThingsBoard mostrou-se adequada para visualização e acompanhamento em tempo real, permitindo ao usuário acessar o comportamento operacional do equipamento de forma intuitiva e organizada.

No entanto, para assegurar uma camada adicional de confiabilidade na geração de alertas, optou-se pela integração do Node-RED, que apresentou maior estabilidade e flexibilidade na criação de rotinas de verificação lógica. Essa escolha viabilizou a implementação de um sistema de notificações automáticas por WhatsApp, assegurando resposta imediata a condições críticas, como variação excessiva das temperaturas criogênicas, queda abrupta de pressão ou indicação de quench. A estrutura em blocos do Node-RED também facilitou a criação de mensagens padronizadas no formato JSON, tornando o processo mais robusto e profissional.

Outro aspecto essencial do projeto foi a compatibilidade eletromagnética. Como a ressonância magnética opera em ambiente de alta sensibilidade a interferências externas, tornou-se necessária a criação de um filtro LC dedicado, encapsulado em tubo de cobre, baseado no modelo utilizado pela fabricante Siemens. O filtro permitiu a passagem segura da comunicação RS-232 sem comprometimento da integridade do sinal nem risco de interferência na banda de radiofrequência da RM. O encapsulamento do sistema em caixa IP66 assegurou proteção ambiental e estabilidade mecânica, possibilitando instalação confiável na sala de máquinas.

Os resultados do protótipo demonstraram que o sistema atende plenamente ao objetivo proposto: oferecer supervisão clara, contínua e eficiente dos parâmetros críticos da criogenia, reduzindo o risco de falhas catastróficas, perda de hélio e interrupções na operação. A solução apresentou desempenho estável durante longos períodos de teste, confirmou a eficiência da comunicação, da visualização e das rotinas de alerta, e se mostrou suficientemente robusta para futura implementação comercial.

Como potenciais evoluções, destacam-se: a expansão do monitoramento para incluir módulos como ICS e Sheeler; a criação de uma placa dedicada para supervisão da rede elétrica da ressonância; ampliação da análise histórica para métodos de manutenção preditiva; e a futura integração com plataformas de machine learning para detecção automática de padrões anômalos. Tais aprimoramentos podem elevar ainda mais a confiabilidade do sistema e ampliar sua aplicação no contexto hospitalar.

Dessa forma, conclui-se que o projeto desenvolvido representa uma solução tecnicamente sólida, economicamente viável e alinhada às demandas da Indústria 4.0, oferecendo uma importante contribuição para o monitoramento inteligente de equipamentos de ressonância

magnética e para a modernização dos processos de manutenção e supervisão clínica.

VI.REFERENCIAS

- [1] MACEDO, Alderico da Silva; ESCOBAR, Isabela Lopes; SALES, Luciano Freitas; GOIS, Railan Martins de. A ressonância magnética como ferramenta essencial nos diagnósticos de patologias: uma revisão sistemática da literatura. *Revista JRG de Estudos Acadêmicos*, v. 7, n. 15, 2024.
- [2] OLIVEIRA, Sumaia Celle de. Revisão bibliográfica acerca dos princípios de ressonância magnética nuclear. 2008. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- [3] FERREIRA, Fernanda Guimarães Meireles; NACIF, Marcelo Souto. *Manual de técnicas em ressonância magnética*. Rio de Janeiro: Editora Rubio, 2011.
- [4] RODRIGUES JUNIOR, Durval. Criogenia: líquidos criogênicos. Lorena: Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de Lorena, 2022.
- [5] TEN KATE, Herman. Superconducting magnets: quench propagation and protection. CERN Accelerator School on Superconductivity for Accelerators, Erice, 2013.
- [6] BENITEZ, Leonardo da Silva Rodrigues. Estudo da supercondutividade e suas propriedades aplicadas a magnetos de equipamentos de ressonância magnética. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo.
- [7] AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Instrução Normativa nº 59, de 20 de dezembro de 2019. Dispõe sobre requisitos sanitários para sistemas de ressonância magnética nuclear. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 26 dez. 2019.
- [8] NUCLEORAD. Orientações para os ambientes com ressonância magnética. *Nucleorad Blog*, 6 maio 2020.
- [9] EXAME. Siemens lança ressonância magnética que economiza até 40% de energia e aposta na sustentabilidade. *Exame*, 2024.
- [10] CBDL. Grupo Fleury reduz em até 40% tempo de exames de ressonância magnética e em 25% de consumo de energia por exame com apoio de IA. *CBDL Notícias*, 2024.

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

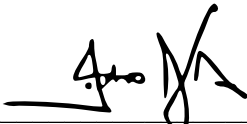
Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante Gabriel Pereira do
Curso de Engenharia de controle e automação matrícula
2020101180025-9, telefone: 62994156279
e-mail gabrielpereira78@outlook.com.br, na qualidade de titular dos
direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza
a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de
Conclusão de Curso intitulado Desenvolvimento de Dispositivo para Monitoramento em
Tempo Real de Parâmetros Operacionais de Ressonância Magnética com Supervisão via
Dashboard e Notificações Críticas
_____, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos
autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede
mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som
(WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área;
para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica
gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 13 de dezembro de 2025.

Assinatura do autor: _____

Nome completo do autor: Gabriel Pereira

Assinatura do professor-orientador:  _____



Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Pontifical Catholic University of Goiás
Av. Universitária, 1069, Setor Universitário
Caixa Postal 86 - CEP 74.605-010
Goiânia - Goiás - Brasil

Nome completo do professor-orientador: Fabio Manoel SA Simões