

Lumitemp: sistema para monitoramento e secagem de motores elétricos usando IOT

System for monitoring the drying of electric motors using IoT

Engenharia de Computação

Enzo Brito Alves de Oliveira (enzobrito2003@hotmail.com)

Graduado em Engenharia de Computação pela Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA).

Erikson Vieira Queiroz (erikson.vieira@hotmail.com)

Graduado em Engenharia de Computação pela Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA).

Guilherme Alves Barbosa (guilhermelondres10@hotmail.com)

Graduado em Engenharia de Computação pela Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA).

Heitor Santos Ferreira (heitor.santos.ferreira211203@gmail.com)

Graduado em Engenharia de Computação pela Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA).

Tainara do Nascimento Casimiro (tainara.casimiro@hotmail.com)

Graduada em Engenharia de Computação pela Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA).

William Santim (willsantim@hotmail.com)

Graduado em Engenharia de Computação pela Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA).

Márcio Rodrigues da Silva (pro10964@cefsa.edu.br)

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (USP) e professor da Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA).

FTT Journal of Engineering and Business

• SÃO BERNARDO DO CAMPO, SP JUN. 2026

• ISSN 2525-8729

Submissão: 11 dez. 2024 Aceitação: 22 maio 2026

Sistema de avaliação: às cegas dupla (double blind review)

FACULDADE ENGENHEIRO SALVADOR ARENA, p. 126 – p. 156

FTT JOURNAL
of Engineering and Business



Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle térmico para uma estufa destinada à secagem de motores elétricos. A solução integra Internet das Coisas (IoT), sistemas embarcados e a arquitetura de software Modelo-Visão-Controlador (MVC). A dinâmica térmica da planta foi modelada matematicamente, explorando fenômenos de transporte como condução, convecção e a resistência térmica do ar, além da geração de calor por efeito Joule na resistência elétrica. O hardware utiliza o módulo ESP-32 para a aquisição de dados de temperatura em tempo real e atuação dinâmica sobre o sinal PWM responsável pelo aquecimento. O controle foi avaliado em dois cenários: malha aberta, devido à sua simplicidade e baixo custo, e malha fechada, empregando um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para maior precisão e estabilidade térmica. A infraestrutura MVC organiza as funções do sistema e promove a modularidade, integrando-se ao Orion Context Broker para o monitoramento remoto. Os resultados demonstram a eficácia da abordagem, garantindo uniformidade no processo de secagem, otimização energética e manutenção de condições ideais para os equipamentos.

Palavras-chave: Controle Térmico. Sistemas Embarcados. Secagem de Motores Elétricos.

Abstract

This article presents the development of a thermal control system for an oven dedicated to the drying process of electric motors. The solution integrates Internet of Things (IoT), embedded systems, and the Model-View-Controller (MVC) software architecture. The thermal dynamics of the plant were mathematically modeled, exploring transport phenomena such as conduction, convection, and air thermal resistance, in addition to Joule heating generated by the electric resistance. The hardware utilizes an ESP-32 module for real-time temperature data acquisition and dynamic actuation via a PWM signal responsible for heating. The control performance was evaluated in two scenarios: open-loop, due to its simplicity and low cost, and closed-loop, employing a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller for greater precision and thermal stability. The MVC infrastructure organizes system functions and promotes modularity, integrating with the Orion Context Broker for remote monitoring. Results demonstrate the effectiveness of the approach, ensuring uniformity in the drying process, energy optimization, and the maintenance of ideal conditions for the equipment.

Keywords: Thermal Control. Embedded Systems. Electric Motor Drying.

Introdução

A manutenção e a recuperação de motores elétricos são atividades críticas no ambiente industrial moderno. Durante processos de rebobinagem, manutenção preventiva ou após exposição a ambientes severos, a isolação dos enrolamentos sofre degradação e absorve umidade, tornando estritamente necessária a secagem térmica para restaurar a resistência de isolamento e prevenir curtos-circuitos. Historicamente, essa etapa de secagem é realizada em estufas, onde o controle rigoroso da temperatura é essencial: o subaquecimento prolonga ineficientemente o processo, enquanto o superaquecimento pode comprometer irremediavelmente a vida útil do equipamento.

Apesar de sua importância operacional, muitas estufas industriais ainda operam de forma subótima. O controle térmico tradicionalmente empregado costuma ser rudimentar, baseando-se em sistemas de malha aberta que não compensam perturbações externas, ou dependendo de monitoramento manual contínuo. Esse cenário acarreta instabilidades térmicas, elevado consumo energético e risco de falhas no processo de secagem, evidenciando uma lacuna tecnológica que onera a eficiência produtiva.

Nesse contexto, a ascensão da Indústria 4.0 e da Internet das Coisas (IoT), originada da computação ubíqua, oferece um novo paradigma para a automação e o monitoramento industrial. A integração da IoT em estufas viabiliza a coleta de dados em tempo real e o controle automatizado, otimizando processos, melhorando a gestão energética e possibilitando estratégias de manutenção preditiva. Embora a adoção dessas tecnologias enfrente desafios históricos, como a falta de padronização e dificuldades de integração, tais barreiras podem ser superadas mediante o emprego de protocolos de comunicação adequados e padrões arquiteturais abertos.

Para preencher essa lacuna, este estudo propõe a implementação do sistema LumiTemp: uma plataforma fundamentada em IoT para o controle térmico de estufas destinadas à secagem de motores elétricos. O projeto visa resolver instabilidades térmicas e garantir um ambiente rigorosamente controlado, avaliando o desempenho comparativo entre estratégias de controle em malha aberta e malha fechada (PID). A solução integra sistemas embarcados e a arquitetura Modelo-Visão-Controlador (MVC), facilitando a tomada de decisões por meio da análise de dados em tempo real e oferecendo uma alternativa inovadora, eficiente e sustentável para o setor.

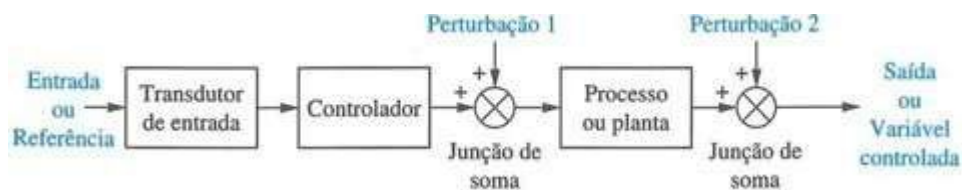
Revisão de literatura e fundamentação teórica

Teoria da automação e controle

A automação industrial moderna baseia-se na capacidade de gerenciar o comportamento de sistemas dinâmicos para que operem de forma previsível e segura. No contexto de processos térmicos, um sistema de controle busca, fundamentalmente, manipular as variáveis físicas para que elas atinjam e mantenham uma saída desejada a partir de uma entrada de referência (*setpoint*).

Historicamente, e muitas vezes por razões de simplificação de custos, diversas plantas operam com topologias de controle em malha aberta. Nessa configuração, o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada. Isso impede ajustes automáticos caso ocorram anomalias no processo, tornando o sistema dependente exclusivamente do sinal inicial programado para o funcionamento dos atuadores e altamente suscetível a distúrbios externos (Nise, 2017); esse comportamento, está devidamente ilustrado na figura 1.

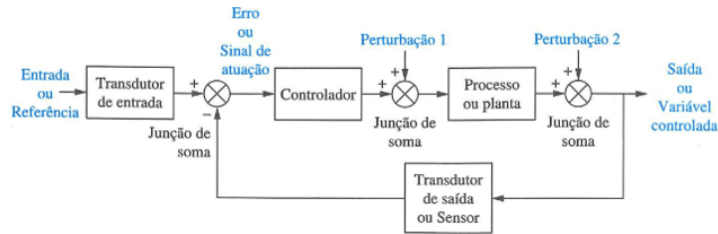
Figura 1: Representação genérica de um sistema de controle em malha aberta.



Fonte: Nise (2017).

Por outro lado, conforme demonstrado na figura 2, para processos industriais críticos, onde variações bruscas de temperatura podem causar danos estruturais, a Engenharia de Controle exige o uso de sistemas em malha fechada. Estes sistemas estabelecem uma relação de comparação contínua entre a saída real e o valor desejado. A diferença entre esses valores gera um sinal de erro, que atua realimentando o controlador para ajustar o esforço de controle de forma dinâmica, compensando imediatamente os efeitos de perturbações externas (Ogata, 2010).

Figura 2: Representação genérica de um sistema de controle em malha fechada.



Fonte: Nise (2017)

Para lidar com a inércia térmica inerente a estufas, o controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) consolidou-se como a abordagem padrão na indústria. Esse algoritmo une três ações matemáticas corretivas: a ação proporcional (P) responde instantaneamente ao erro atual; a ação integral (I) atua eliminando o erro acumulado em regime permanente; e a ação derivativa (D) previne variações bruscas, atuando como um amortecedor para a curva de aquecimento (Silva *et al.*, 2025).

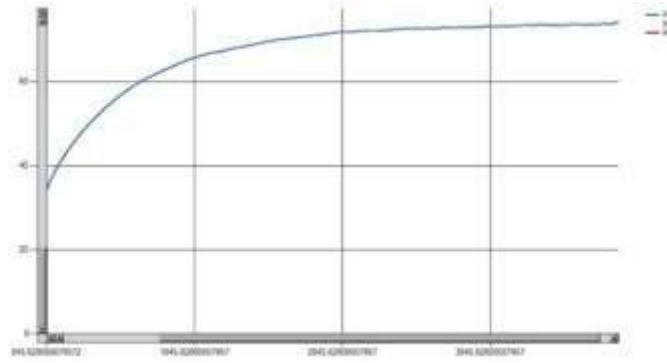
Modelagem térmica e fenômenos de transporte

Antes de aplicar qualquer lógica de controle, é imperativo compreender o comportamento físico do ambiente que será automatizado. O aquecimento interno de uma câmara de secagem não é instantâneo e está sujeito a complexos fenômenos de transporte.

No sistema proposto, a injeção de energia térmica fundamenta-se nos princípios da Termodinâmica, ocorrendo através da dissipação de potência de uma resistência elétrica regida pelo Efeito Joule. A eficiência com que esse calor gerado é transferido para o ar confinado e, consequentemente, para o motor elétrico, depende de processos de convecção, descritos pela Lei de Resfriamento de Newton, e das perdas por condução através das paredes da estufa, modeladas pela Lei de Fourier (Santos, 2022; Prates, 2016).

Conforme demonstrado na figura 3, devido à sua característica natural de acumular e ceder calor gradativamente, a estufa comporta-se, na perspectiva da engenharia de controle, como um sistema térmico de primeira ordem. O comportamento transitório desse modelo físico, ao receber um degrau de tensão constante, descreve uma curva de aquecimento exponencial que se prolonga até atingir o equilíbrio térmico.

Figura 3: Curva de resposta térmica de um sistema de primeira ordem.



Fonte: elaboração dos autores (2024)

Para parametrizar o controlador PID adequadamente, esse comportamento físico precisa ser traduzido matematicamente. No domínio da frequência, aplicando-se a Transformada de Laplace, a relação entre a temperatura interna (Variável de Processo, $Y(s)$) e a tensão aplicada (Variável Manipulada, $X(s)$) resulta na função de transferência genérica da planta:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

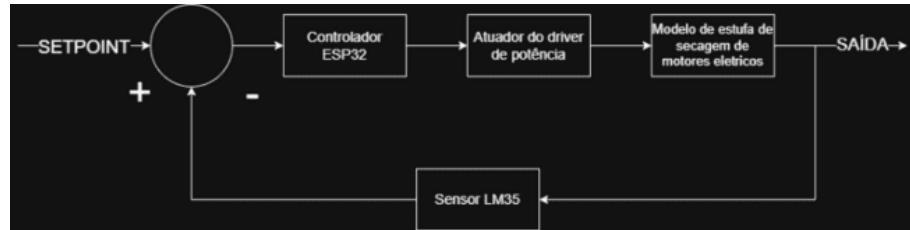
Nesta equação, a constante de ganho estático (K) representa a variação da temperatura em regime permanente para cada incremento no esforço de controle (Δu), sendo definida por $K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$. Por sua vez, a constante de tempo (τ) quantifica a inércia térmica da estufa, correspondendo ao tempo necessário para que a temperatura alcance 63,2% de sua variação total esperada.

Operar esse sistema em malha aberta reflete diretamente a dinâmica natural da planta ($G_a(s)$). No entanto, ao empregar a malha fechada, o sistema realoca o ganho e a inércia da planta no denominador da equação característica global ($G_f(s)$), alterando profundamente sua dinâmica para garantir a estabilidade e a rejeição a distúrbios:

$$G_f(s) = \frac{K}{\tau s + 1 + K}$$

A implementação física desta realimentação no projeto LumiTemp pode ser observada no diagrama de blocos do sistema térmico da figura 4, onde o processador embarcado ajusta continuamente o PWM da resistência com base nas leituras instantâneas do sensor, fechando assim a malha de controle.

Figura 4: Diagrama de blocos do sistema térmico



Fonte: elaboração dos autores (2026)

Internet das coisas (IoT) aplicada à indústria

A adoção da IoT (*Internet of Things*) transformou a automação industrial, originando o paradigma da Indústria 4.0. Em estufas, a integração de nós de sensores sem fio viabiliza a coleta de dados de temperatura em tempo real e o ajuste automatizado das variáveis físicas, mitigando o risco de falhas operacionais humanas e otimizando a eficiência do processo de secagem (Rocha, 2023).

Pesquisas contemporâneas demonstram a eficácia da utilização de processadores embarcados com Wi-Fi nativo, como o módulo ESP-32, em conjunto com bancos de dados relacionais e plataformas gráficas (*dashboards*), para a supervisão remota de parâmetros térmicos com excelente relação custo-benefício (SATURI, 2022). A principal vantagem dessa integração é permitir a parametrização remota, através da qual ganhos e calibrações do equipamento podem ser ajustados via internet sem a necessidade de intervenção física no chão de fábrica. Contudo, a expansão massiva dessas arquiteturas distribuídas exige atenção rigorosa às diretrizes de segurança da informação, visto que a vulnerabilidade de dispositivos na borda da rede (*edge*) e a interceptação de pacotes representam desafios críticos para a integridade dos processos e proteção dos dados industriais (Sheng et al., 2022).

Arquitetura de software Modelo-Visão-Controlador (MVC)

No contexto de sistemas supervisórios modernos e IoT, a estruturação do software é essencial para gerenciar o grande e constante fluxo de dados telemétricos oriundos da planta física. O padrão arquitetural Modelo-Visão-Controlador (MVC) organiza as funcionalidades da aplicação de forma estritamente modular, sendo amplamente adotado no desenvolvimento web e no de sistemas distribuídos.

O "Modelo" (*Model*) abstrai as regras de negócio e gerencia a estrutura de dados e o armazenamento no banco de dados relacional; a "Visão" (*View*) fornece a interface gráfica do usuário para o acompanhamento da evolução térmica e emissão de alertas em tempo real; por fim, o "Controlador" (*Controller*) atua como intermediário, processando a lógica de integração, recebendo as requisições da interface e gerenciando os *payloads* trafegados com o hardware. A aplicação do padrão MVC transcende o desenvolvimento web tradicional, mostrando-se altamente eficaz na estruturação de arquiteturas para a integração automatizada de sensores e simulações físicas, pois garante alta coesão e modularidade na coleta de dados (Jesus Júnior, 2026). Essa separação facilita manutenções futuras, a escalabilidade da planta e a integração simplificada com *brokers* de mensagens MQTT para estratégias de manutenção preditiva.

Materiais e métodos

A metodologia aplicada neste projeto caracteriza-se como uma pesquisa aplicada e experimental. Com a fundamentação teórica e a modelagem matemática estabelecidas, o desenvolvimento do protótipo LumiTemp foi dividido em três frentes de implementação: a infraestrutura de *hardware* na borda, a topologia de rede IoT e a arquitetura do sistema supervisor de banco de dados.

Infraestrutura de hardware e aquisição de dados

A concepção física do protótipo foi desenvolvida para simular a dinâmica térmica de uma estufa industrial, adotando componentes que mimetizam a robustez exigida no chão de fábrica. O processamento na borda da rede (*edge computing*) é gerido pelo microcontrolador ESP32. A escolha deste *hardware* justifica-se não apenas pelo seu custo-benefício, mas pela sua arquitetura *dual-core* Xtensa LX6, operando a 240 MHz, que permite a implementação de paralelismo real através do sistema operacional de tempo real nativo, o FreeRTOS (Silva *et al.*, 2025).

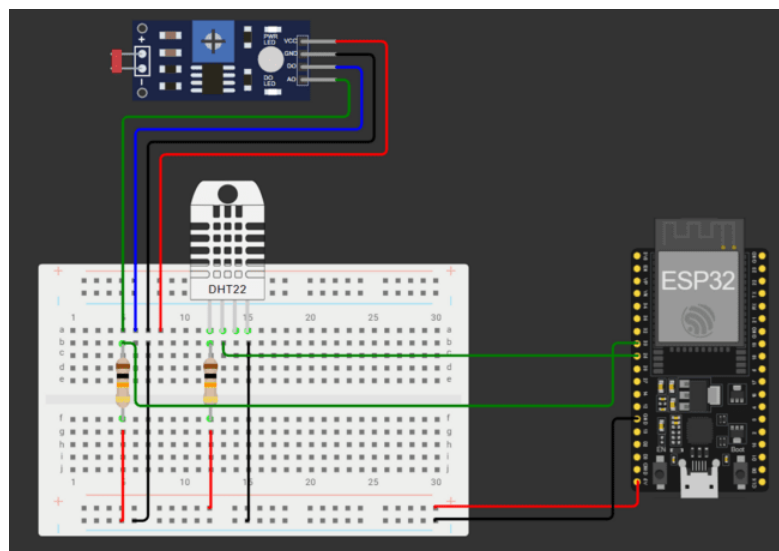
Através da técnica de alocação de tarefas (*Task Pinning*), o projeto garantiu que o Núcleo 0 (PRO_CPU) gerenciasse exclusivamente a pilha de protocolos de rede Wi-Fi e rotinas assíncronas do MQTT. Simultaneamente, o Núcleo 1 (APP_CPU) foi dedicado à execução determinística da malha

de controle PID e à leitura de sensores. Essa segregação arquitetural impede que latências de rede ou perdas de conexão interrompam o cálculo crítico de aquecimento da estufa.

O monitoramento da Variável de Processo (PV), ou seja, a temperatura interna, é realizado por um sensor digital DHT22, acoplado diretamente aos pinos GPIO do ESP32. Esta topologia de fio único (*single-wire*) blinda a aquisição contra ruídos eletromagnéticos industriais (Costa; Cavalcante, 2026). Devido às restrições do transdutor capacitivo integrado ao módulo, a taxa de amostragem foi configurada para operar a 0,5 Hz (uma leitura a cada dois segundos). Esta frequência é perfeitamente adequada à aplicação, visto que o sistema térmico apresenta alta inércia, dispensando amostragens em milissegundos.

Como boa prática de Engenharia, antes da montagem física, a topologia do circuito e a lógica de comunicação foram validadas em um ambiente de simulação virtual usando a plataforma Wokwi, fato que pode ser conferido na figura 5, cujo procedimento acaba permitindo a depuração prévia do código e do seu funcionamento no sistema.

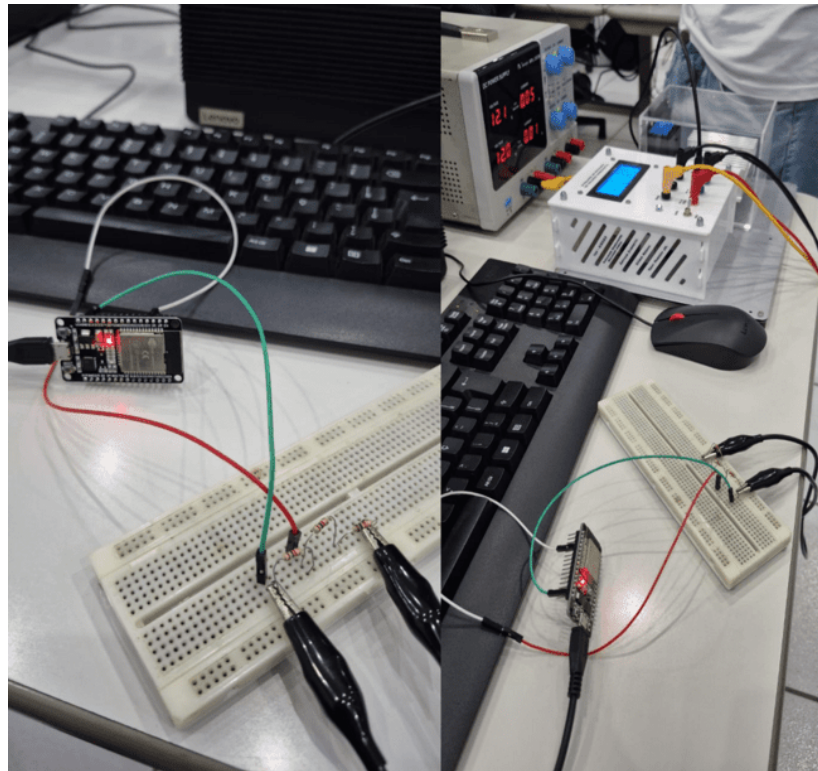
Figura 5: Validação virtual da arquitetura de hardware e rotinas de comunicação IoT no simulador Wokwi.



Fonte: elaboração dos autores (2024).

Após a validação digital, a montagem física foi executada, evidenciando a interligação estrutural entre a camada de controle (baixa tensão) e a camada de potência, conforme demonstrado na figura 6:

Figura 6: Montagem física do protótipo LumiTemp, destacando-se o módulo ESP32 e as interfaces de ligação.



Fonte: elaboração dos autores (2024).

Para atuar sobre o elemento resistivo de aquecimento, o sistema exige uma interface de potência segura. A fim de transcrever o esforço de controle contínuo do PID, $u(t)$, em potência real, o ESP32 converte a saída do algoritmo em um sinal discreto de Modulação por Largura de Pulso (PWM), respeitando a relação matemática $D = \frac{u(t)}{100} \times (2^n - 1)$ onde n é a resolução em *bits* do microcontrolador.

O sinal PWM de 3.3V gerado no pino atua sobre a entrada de um Relé de Estado Sólido (SSR) de 40A. O uso do SSR garante isolamento galvânica e óptica, protegendo a lógica digital do ESP32 contra os transientes da rede de corrente alternada que alimenta a resistência elétrica. A modulação de alta frequência permite ao SSR atuar como um comutador rápido, garantindo um ajuste fino, linear e ininterrupto da potência dissipada por Efeito Joule. Simultaneamente ao aquecimento, um sistema de ventilação (*cooler* 12V DC) é mantido em operação constante no interior da câmara para forçar a convecção do ar, garantindo um perfil térmico homogêneo em todas as seções do estator durante o ciclo de secagem (Melo; Sousa, 2025).

Comunicação IoT e Ecossistema FIWARE

A transição dos dados sensoriais físicos para o ambiente em nuvem é orquestrada por uma arquitetura de microsserviços baseada na plataforma FIWARE. A escolha deste ecossistema justifica-se pela sua aderência aos padrões abertos da Indústria 4.0 e pela adoção do protocolo NGSI-v2 (*Next Generation Service Interfaces*), que uniformiza a representação do contexto das entidades geridas (Cabrini *et al.*, 2024).

O fluxo de telemetria inicia-se no envio das amostras de temperatura e do estado de atuação do relé. Para contornar as restrições de largura de banda e minimizar o consumo de recursos na borda, o transporte dos dados assenta-se no protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Este protocolo opera sob o paradigma de publicação e subscrição (*publish/subscribe*), estabelecendo uma comunicação assíncrona robusta. O ESP32 (dispositivo cliente) encapsula os dados num *payload* estruturado em formato JSON (*JavaScript Object Notation*) e os publica em tópicos específicos geridos por um servidor *broker* (Mosquitto). Esse servidor atua como um mediador central, isolando a camada de *hardware* da camada de aplicação e garantindo a entrega eficiente das mensagens.

A integração entre o tráfego MQTT bruto e o padrão FIWARE é realizada pelo componente IoT Agent JSON. Este serviço atua como um *gateway* de tradução bidirecional, convertendo as mensagens JSON recebidas dos tópicos MQTT em requisições RESTful no formato padronizado NGSI-v2. Esta tradução semântica é o que permite mapear o dispositivo físico (a estufa) numa "Entidade Virtual" coerente dentro da nuvem.

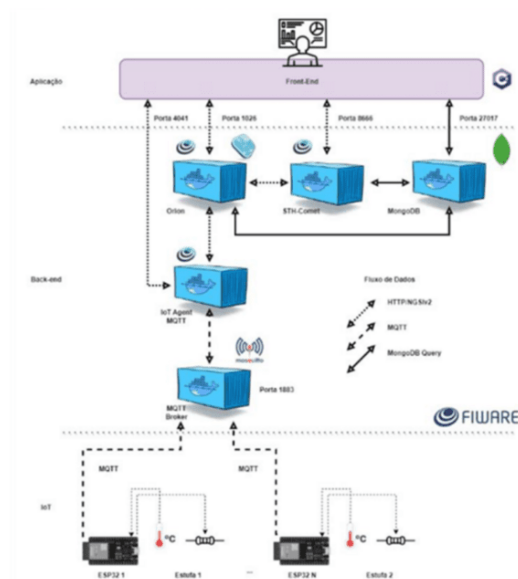
O núcleo desta arquitetura telemétrica é o Orion Context Broker, o módulo responsável por manter o estado atual (em tempo real) de todos os parâmetros da planta. Quando a aplicação necessita de avaliar a temperatura no instante presente, utiliza os dados diretamente através das APIs do Orion.

No entanto, a validação de processos de secagem térmica exige rigor na análise da curva de aquecimento ao longo do tempo. Como o Orion gere apenas o estado presente, a arquitetura incorpora o microsserviço STH-Comet (*Short Time Historic*). O STH-Comet subscreve as alterações de estado publicadas no Orion e mantém o histórico completo das leituras numa base de dados orientada a documentos (MongoDB). Esta persistência de séries temporais (*time-series*) é vital para

a operação, pois fornece a base de dados histórica necessária para renderizar os gráficos de secagem, permitindo a auditoria e a rastreabilidade do processo exigidas na manutenção de motores elétricos.

A integração estrutural de todas as tecnologias que compõem este sistema de mensageria e o fluxo dos dados podem ser observados no diagrama de arquitetura da figura 7:

Figura 7: Diagrama da arquitetura de software e fluxo de comunicação IoT do sistema LumiTemp.



Fonte: PBL FESA (2024).

Sistema supervisorio, banco de dados relacional e arquitetura MVC

Para o consumo dos dados telemétricos e a operação remota da estufa, desenvolveu-se uma aplicação *backend* em linguagem C# (*framework* .NET Core 3.1) estruturada estritamente sob o padrão de arquitetura Modelo-Visão-Controlador (MVC). Esta abordagem garante a separação de responsabilidades (alta coesão e baixo acoplamento), segmentando a lógica de negócios, a interface gráfica e a persistência de dados.

A camada de "Modelo" (*Model*) é suportada por um Banco de Dados Relacional projetado para garantir a integridade das informações operacionais e gerenciais da planta. O diagrama de Entidade-Relacionamento (ER) foi normalizado e estruturado em tabelas essenciais para o rastreamento logístico e técnico, destacando-se:

- `cadr_sens` (cadastro de sensores): armazena os metadados dos dispositivos de borda e microcontroladores, permitindo o gerenciamento dos ativos de *hardware* vinculados à estufa;
- `cadr_empr_parc` (empresas parceiras): gerencia os dados dos clientes proprietários dos motores elétricos, assegurando a rastreabilidade do lote em processo de secagem;
- `cadr_func` (quadro de funcionários): controla o credenciamento e os níveis de acesso dos operadores do sistema.

Figura 8: Diagrama Entidade Relacionamento (DER) das tabelas.



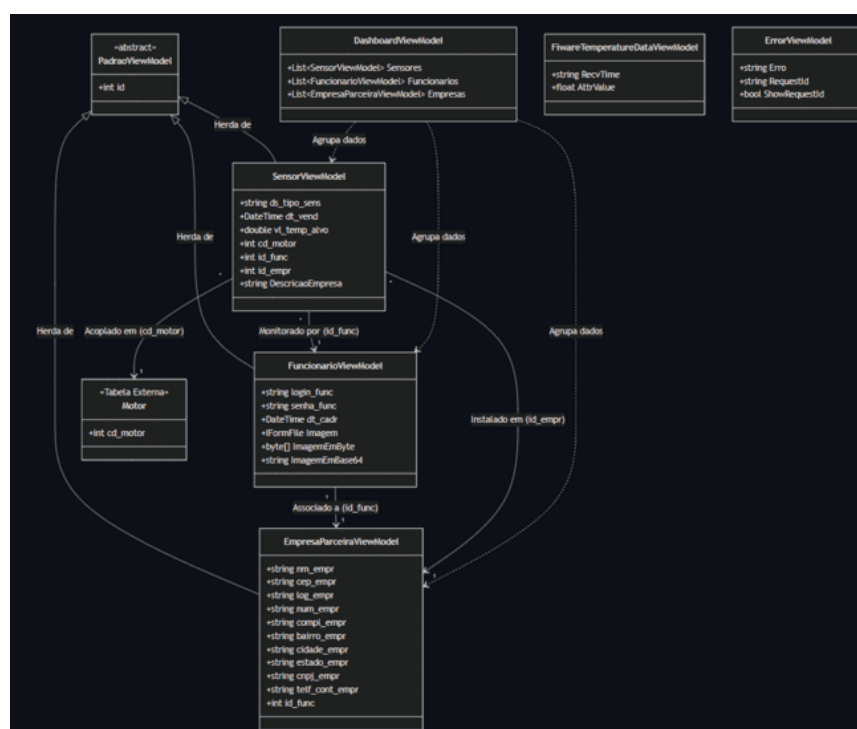
Fonte: elaboração dos autores (2026)

Para assegurar a integridade referencial, a segurança contra-ataques de injeção SQL (*SQL Injection*) e a otimização de desempenho, a manipulação das tabelas não é realizada por *queries* brutas (*inline SQL*). Toda a interação de inserção, atualização e deleção (CRUD) foi encapsulada no banco de dados através de *Stored Procedures* (procedimentos armazenados).

No *backend* em C#, a comunicação com o banco de dados é intermediada por classes que implementam o padrão de projeto DAO (*Data Access Object*). Classes como *SensorDAO* e *FuncionarioDAO* instanciam a conexão com o banco e executam as *Stored Procedures*, traduzindo os registros relacionais em objetos para a aplicação (Jesus Júnior, 2026).

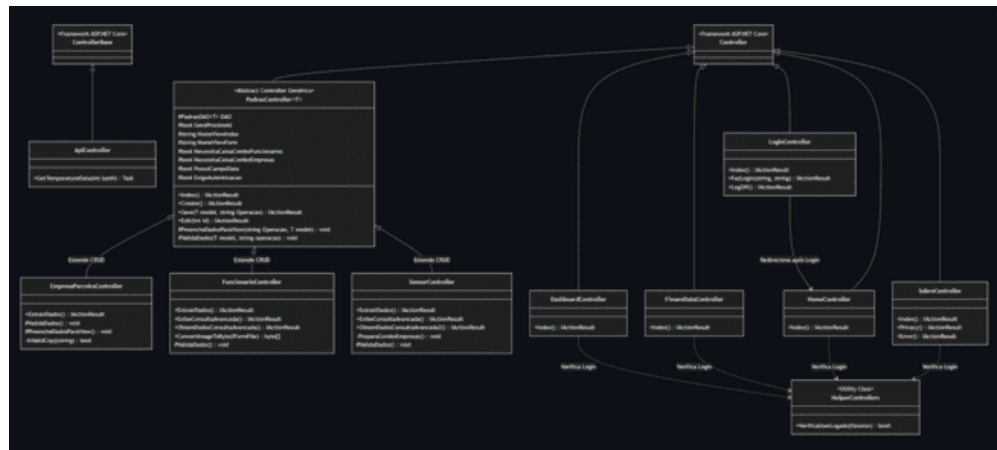
A camada do "Controlador" (*Controller*) atua como a espinha dorsal de orquestração do sistema. É responsabilidade dos controladores cruzar os dados estáticos do banco de dados relacional com os dados dinâmicos da rede IoT. O controlador *FiwareDataController*, por exemplo, é encarregado de consumir as APIs RESTful do Orion Context Broker e do STH-Comet. Dessa forma, o controlador funde o contexto do ambiente físico (temperatura em tempo real) com a lógica de negócios (qual motor está na estufa), preparando o pacote final de informações (*ViewModels*), conforme demonstrado nos fluxogramas de relacionamentos e mapeamento das figuras 9 e 10.

Figura 9: Diagrama de fluxo e mapeamento das *Models* na arquitetura MVC do sistema LumiTemp.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

Figura 10: Diagrama do fluxo e mapeamento das *Controllers* na arquitetura MVC do sistema LumiTemp.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

Por fim, a camada de "Visão" (*View*) renderiza a interface do usuário (UI) utilizando as páginas *Razor* (.cshtml). O *frontend* foi estilizado com o *framework* Bootstrap, CSS e JavaScript, garantindo a responsividade da aplicação. Isso permite que operadores no chão de fábrica ou engenheiros de manutenção em regime remoto acessem painéis (*dashboards*) dinâmicos de qualquer dispositivo, monitorando as curvas de temperatura e o estado dos relés, e administrando o ciclo de secagem térmica de maneira visual e intuitiva, conforme demonstrado no fluxograma de relacionamento presente na figura 11.

Figura 11: Diagrama do fluxo e mapeamento das *Views* na arquitetura MVC do sistema LumiTemp.

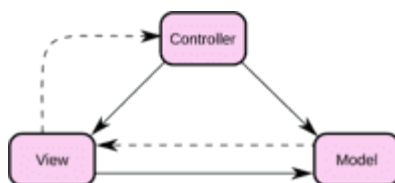


Fonte: elaboração dos autores (2026).

A integração entre as camadas descritas culmina em um fluxo de dados unificado, onde a complexidade da rede IoT e do armazenamento de dados é abstraída para o usuário final. A figura 12 sintetiza a interdependência entre os componentes do sistema, detalhando como a requisição

HTTP é processada pelo *Controller*, validada pelas regras de negócio, persistida via *Stored Procedures* no banco de dados e, finalmente, entregue à interface de visualização.

Figura 12: Diagrama de conceito geral do funcionamento da arquitetura MVC.



Fonte: Wikipedia (2020).

Esta síntese arquitetural demonstra que o sistema não apenas monitora, mas integra o ciclo de vida da informação: desde a captura bruta pelo sensor no *hardware* (nível físico), passando pela tradução semântica do FIWARE (nível de contexto), até chegando à persistência organizada e à consulta inteligente no banco de dados relacional (nível de negócio). Tal estruturação confere ao LumiTemp a robustez exigida em ambientes de produção industrial, garantindo que qualquer decisão operacional seja embasada em dados históricos fidedignos e em leituras precisas de temperatura em tempo real.

Fluxo operacional e telas do sistema supervisorio

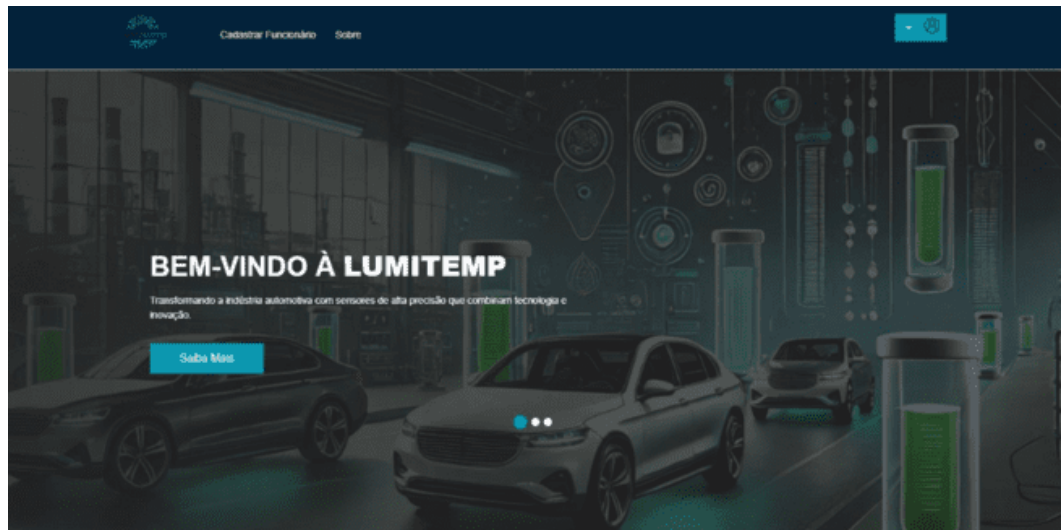
Para que a arquitetura de software MVC interaja de forma coordenada com o banco de dados relacional e a infraestrutura IoT, o sistema LumiTemp foi projetado sob um fluxo operacional rigoroso. A organização desses processos visa garantir a rastreabilidade e a eficiência na gestão de ativos, elementos cruciais em ambientes industriais modernos onde a coleta e o armazenamento de dados precisam ser estruturados para permitir análises históricas precisas (Gilio; Oliveira, 2025).

Autenticação e navegação central

Diferente de sistemas que permitem acesso irrestrito, o LumiTemp adota uma política de segurança desde o início. O fluxo operacional inicia-se na Tela Inicial (HOME), evidenciada na figura 13, que atua como o *hub* de entrada. Para acessar as funcionalidades restritas, o usuário deve, primeiramente, realizar a criação de sua conta, garantindo que o controle de acesso seja estabelecido desde o primeiro contato (Faleiro, 2024). Após o registro, o operador é direcionado à Tela de Login, evidenciada na figura 14, onde a autenticação das credenciais é validada em relação ao banco de dados, protegendo os dados sensíveis da planta contra acessos não autorizados. Após

o login, a navegação segue diretrizes de ergonomia para sistemas supervisórios, que recomendam que IHMs (Interface Homem-Máquina) ofereçam uma navegação intuitiva para reduzir a carga cognitiva do operador durante a supervisão de processos críticos (Freitas; Balthazar, 2025).

Figura 13: Tela inicial (HOME). Hub de navegação central e porta de entrada para criação de conta.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

Figura 14: Tela de Login - interface de controle de acesso para autenticação de operadores.

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Parametrização gerencial e rastreabilidade relacional

Com o acesso estabelecido, o operador executa a parametrização dos dados. O ciclo cadastral inicia-se pelo gerenciamento dos Recursos Humanos através do Cadastro de Funcionários, como evidenciado na figura 15 e da Listagem de Funcionários, evidenciado na figura 16. A organização de dados estruturados em bancos relacionais é uma prática recomendada para viabilizar a individualização de responsabilidades em processos de telemetria, garantindo transparência no rateio de tarefas e na manutenção (Gilio; Oliveira, 2025).

Figura 15: Tela de cadastro de funcionarios.

Inclusão de Funcionário

Código de Empresa
2

Login
Digite o login

Senha
Digite a senha

Data de Cadastro
17 jun 2026

Imagem do Funcionário
Escolher arquivo | Nenhum arquivo escolhido
Pré-visualização da imagem

Salvar Dados

Voltar para a listagem

[Página Inicial](#)

© Todos os direitos reservados por LumTemp

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Figura 16: Tela de listagem de funcionários.

Funcionários

Novo Registro

Página Inicial

Excluir Dados

Ação	Número do Usuário	Login do Usuário	Data de Cadastro	Imagem Funcionário
Editar Apagar	1	helio_temas	17 jun 2026 00:00:00	

© Todos os direitos reservados por LumTemp

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Sequencialmente, a Tela de Cadastro de Empresas, apresentada na figura 17 e a respectiva listagem, mostrada na figura 18 estruturam os dados dos clientes. Este nível de organização

de ativos, conforme discutido por Souza (2013), é fundamental para a gerência da manutenção, permitindo associar telemetrias específicas a contratos ou departamentos distintos dentro de uma rede de automação.

Figura 17: Tela de Cadastro de Empresas.

Inclusão de Empresa

Código do Ramo: 1

Nome da Empresa: Indústria XYZ

Indústria XYZ

CNPJ da Empresa: 000000000000000000

Legenda da Empresa: Atividade das Máquinas

Número da Empresa: 45

Complemento da Empresa: Endereço do Complemento

Bairro da Empresa: Centro Novo

Cidade da Empresa: São Paulo

Estado da Empresa: SP

CNPJ da Empresa: 000000000000000000

Telefone do Contato: 000 0000 0000

Endereço Alternativo: Rua, Número

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Figura 18: Tela de Listagem de Empresas.

Empresas Parceiras

Ativo Inativo

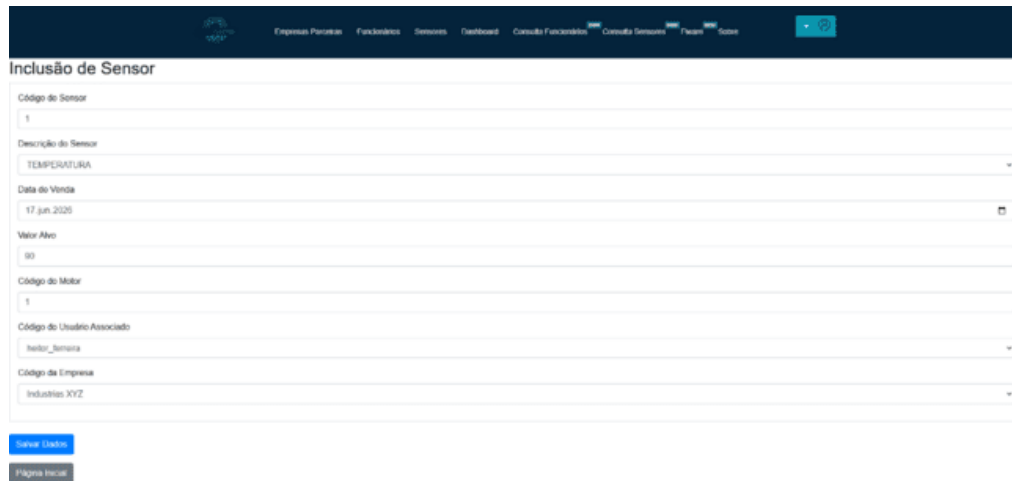
Código da Empresa	Nome da Empresa	CNPJ	Legenda da Empresa	Número	Complemento	Bairro	Cidade	Estado	CNPJ
1	Indústria XYZ	000000000000000000	Atividade das Máquinas	45	Endereço do Complemento	Centro Novo	São Paulo	SP	000000000000000000

8 Total: 10 itens resumidos por Lupa/Tempo

Fonte: elaboração dos autores (2026).

O elo final entre a infraestrutura de TI e a planta física é realizado no Cadastro de Sensores, evidenciado na figura 19, e sua respectiva listagem, exibida na figura 20. Conforme apontado por Camargo (2025), a interoperabilidade entre controladores industriais e plataformas de monitoramento web depende estritamente de um cadastro de ativos bem definido, que permita ao sistema traduzir valores brutos de sensores (como o DHT22) em informações de processo úteis (Silva; Santos, 2023).

Figura 19: Tela de Cadastro de Sensores.



Fonte: elaboração doas autores (2026).

Figura 20: Tela de listagem de sensores.



Ação	Código do Sensor	Descrição do Tipo de Sensor	Data de Venda	Valor de Temperatura Atrib Configurada	Código do Motor Associado ao Sensor	Código do Funcionário Associado ao Motor	Código de Empresa Associado ao Sensor
Editar Excluir	1	TEMPERATURA	17 jun 2026 00:00:00	90	1	1	1

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Supervisão telemétrica e visões executivas

Encerrando o fluxo arquitetural, projetou-se a camada de apresentação, segmentada em duas frentes analíticas. A primeira frente, de caráter gerencial, é o Dashboard de Visões Executivas (evidenciado na figura 21), que consolida indicadores de desempenho operacionais e de recursos humanos. Esta visão facilita a tomada de decisão gerencial baseada em dados reais, contribuindo para a eficiência global do processo (Alves, 2023).

A segunda frente, analítica, corresponde à supervisão telemétrica em tempo real (Data Viewer). Durante o desenvolvimento desta camada técnica, a arquitetura original baseada no padrão monolítico MVC (Model-View-Controller) em C# apresentou limitações quanto à flexibilidade na

renderização de dados em alta frequência e na integração com bibliotecas de cálculo numérico avançado.

Para contornar essa limitação e permitir o processamento dinâmico das equações de controle (Malha Aberta e PID) diretamente na interface, a arquitetura de visualização foi refatorada para um modelo em Python, utilizando o *framework* Streamlit. Essa abordagem viabilizou o acoplamento nativo com bibliotecas de computação científica, como NumPy e SciPy, fundamentais para manipulações algébricas, e a ferramenta Plotly para renderização gráfica, utilizando de forma otimizada os dados persistidos(apresentados) no banco NoSQL (MongoDB) via arquitetura FIWARE.

Figura 21: Dashboard de Visões Executivas.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

Resultados e discussão

Validação da alteração estrutural do fluxo de comunicação

Para validar a viabilidade técnica da solução proposta, o ambiente de telemetria foi configurado em uma infraestrutura containerizada utilizando *Docker*, visando a portabilidade e a independência de fornecedores de nuvem (*cloud-agnostic*). A arquitetura consiste na orquestração de dois serviços principais: o *Orion Context Broker*, que atua como o *broker* de contexto para gerenciar entidades

IoT e processar mensagens em formato JSON, e um banco de dados *MongoDB*, responsável pela persistência histórica dos dados de telemetria.

Esta abordagem de isolamento por containers permite que o sistema LumiTemp seja replicado em diferentes ambientes de hardware com configuração mínima, mitigando problemas de dependência de bibliotecas e garantindo a paridade entre o ambiente de desenvolvimento e o ambiente de operação. O uso *Docker* torna-se válido, pois a implementação de serviços de *middleware* em containers facilita a integração entre sensores de campo e a camada de aplicação, estabelecendo uma rede de dados consistente e preparada para a escala industrial (Camargo, 2025).

A validação da conectividade é confirmada através da execução orquestrada via *Docker Compose*, conforme demonstrado na figura 22, que garante que os serviços de integração estejam operacionais e prontos para o tráfego de dados. A utilização de containers é uma estratégia eficaz para sistemas de gerenciamento de dispositivos IoT, pois simplifica a instalação, o escalonamento e a manutenção de serviços complexos (FREITAS; BALTHAZAR, 2025). Esse fluxo garante que a telemetria não seja apenas um dado volátil, mas uma informação comprovada e auditável, essencial para qualquer sistema de gestão de ativos que vise a rastreabilidade integral do processo (Gilio; Oliveira, 2025).

Figura 22: Validação do ambiente de telemetria IoT via Docker, demonstrando a operacionalidade dos serviços Orion e MongoDB.

```
root@HEITOR-GLXBOOKW:/home/heitor/projects/lumitemp/iot-infrastructure# docker-compose up -d
[WARN] [0000] /home/heitor/projects/lumitemp/iot-infrastructure/docker-compose.yml: the attribute `version` is obsolete, it will be ignored, please remove it to avoid potential confusion
[*] up 8/16
[*] up 19/19go:4.4 [MongoDB 4] 6.31MB / 166.2MB Pulling [*] up 10/16
✓ Image mongo:4.4 Pulled 22.7%
✓ Image fiware/orion:3.10.0 Pulled 16.6%
✓ Network iot-infrastructure_default Created 0.1%
✓ Container iot-infrastructure-mongo-1 Started 1.9%
✓ Container iot-infrastructure-orion-1 Started 1.7%

root@HEITOR-GLXBOOKW:/home/heitor/projects/lumitemp/iot-infrastructure# docker ps
CONTAINER ID        IMAGE               COMMAND                  CREATED      STATUS        PORTS                NAMES
daef7627e86f       fiware/orion:3.10.0 "/usr/bin/contextBro..." 20 seconds ago Up 18 seconds (healthy) 0.0.0.0:1026->1026/tcp, :::1026->1026/tcp iot-infrastructure-orion-1
8f9ed599bc8        mongo:4.4          "docker-entrypoint.s..." 20 seconds ago Up 19 seconds         0.0.0.0:27017->27017/tcp, :::27017->27017/tcp iot-infrastructure-mongo-1
```

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Arquitetura da camada de aplicação e supervisão

Com a camada de aplicação consolidada em Python e Streamlit, conforme delineado na Seção Supervisão telemétrica e visões executivas, o painel de monitoramento técnico foi submetido à operação com dados dinâmicos da estufa. A interface validou com sucesso o fluxo assíncrono do

ecossistema IoT: a telemetria adquirida pelo ESP-32 na borda (*Edge*) foi corretamente roteada pelo *broker* MQTT, contextualizada pelo FIWARE Orion e persistida(mantida) no MongoDB, sendo então aproveitada e plotada pelo *dashboard* em tempo real.

Além da renderização contínua da Variável de Processo (PV) em contraposição à Média Histórica e ao *Setpoint* (SP), a interface demonstrou eficácia em seu subsistema algorítmico de detecção de anomalias. Durante os ensaios, o painel calculou ininterruptamente a média móvel das temperaturas em regime, acionando *flags* visuais de alerta (vermelho) sempre que a derivada temporal do aquecimento indicou valores acima dos limites de segurança preestabelecidos para a secagem do verniz.

A figura 23 ilustra a interface de operação em regime estabilizado, evidenciando a assertividade da telemetria de ponta a ponta, a renderização limpa proporcionada pela biblioteca Plotly e a pronta visualização da resposta temporal da estufa pelos operadores.

Figura 23: Painel de monitoramento de temperatura em Python.



Fonte: elaboração dos autores (2026)

Análise e comparativo do protótipo frente ao mercado

Conforme detalhado e ilustrado na seção Infraestrutura de hardware e aquisição de dados (figuras 5 e 6), a topologia elétrica e a montagem física do protótipo foram consolidadas utilizando o microcontrolador ESP32 e uma interface de potência com isolamento galvânica (SSR). Com a arquitetura de *hardware* e *software* plenamente operacional, a avaliação de resultados desta etapa consiste em dimensionar o impacto tecnológico e a viabilidade comercial do sistema LumiTemp em comparação aos equipamentos tradicionais do setor.

Historicamente, os fornos e estufas industriais de pequeno e médio porte destinados à secagem de motores elétricos operam com lógicas de controle termostáticas puramente mecânicas ou eletromecânicas (*On/Off*). Além disso, possuem painéis de operação locais e carecem de conectividade, o que inviabiliza a rastreabilidade do processo.

Para evidenciar a evolução proposta, a tabela 1 sintetiza o *benchmarking* realizado entre o comportamento operacional do protótipo LumiTemp e as especificações de estufas convencionais.

Tabela 1 – Comparativo tecnológico: LumiTemp Vs. estufas convencionais.

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Critério de análise	Estufas convencionais (padrão de mercado)	Protótipo LumiTemp (proposta IoT)
Lógica de controle	<i>On/Off</i> (acionamento via termostato mecânico)	Algoritmo PID atuando via sinal PWM
Histerese térmica	Alta (oscilações contínuas da temperatura interna)	Baixa (estabilização fina e contínua no <i>Setpoint</i>)
Arquitetura de dados	Isolada (sistemas <i>stand-alone</i> , sem histórico)	Integrada (microserviços, MQTT e banco NoSQL)
Supervisão operacional	Exclusivamente <i>in loco</i> (painéis analógicos/IHM local)	Remota em nuvem (<i>Dashboard</i> web em tempo real)
Custo e escalabilidade	Alto custo de aquisição e arquitetura fechada	Baixo custo (<i>Open-Source</i> e componentes COTS)

A análise comparativa demonstra que a adoção do controle térmico em malha fechada (PID), integrada a uma arquitetura IoT ponta a ponta, resolve as principais deficiências dos sistemas legados. O sistema proposto não apenas elimina o risco de estresse térmico no verniz do estator, garantindo secagem uniforme e preservando as propriedades dielétricas, como também transforma a estufa em um ativo produtivo rastreável, gerando os *logs* e telemetrias exigidos pelos padrões da Indústria 4.0.

Resultados experimentais

Esta seção apresenta a validação experimental do sistema, dividida entre a modelagem da dinâmica térmica da estufa (malha aberta) e o desempenho do algoritmo de controle de temperatura (malha fechada).

Análise em malha aberta: identificação da planta

A análise em malha aberta foi conduzida para o levantamento da curva de reação da estufa, procedimento fundamental para a caracterização da inércia térmica do sistema. O ensaio consistiu na aplicação de um degrau unitário (acionamento de 100% da potência da resistência elétrica) após uma fase de repouso inicial de 10 segundos, monitorando-se a resposta da planta até a estabilização em regime permanente e o posterior resfriamento natural.

O comportamento térmico do sistema inicia-se com a fase de repouso, compreendida entre os instantes de 0 e 10 segundos, período no qual a planta permanece em completo equilíbrio térmico com a temperatura ambiente estabilizada em 25°C.

Em seguida, a fase de aquecimento ocorre no intervalo de 10 a 610 segundos, na qual se observa a resposta dinâmica da planta. Esse comportamento é inicialmente caracterizado por um tempo morto (θ) de aproximadamente 10 segundos, que representa o atraso físico necessário para o calor percorrer a câmara até ser detectado pelo transdutor. Superado esse intervalo, o sistema exibe uma trajetória de crescimento exponencial típica de primeira ordem, com uma constante de tempo (τ) de 120 segundos, até atingir a estabilização térmica em torno de 65°C.

Por fim, a fase de resfriamento é deflagrada logo após os 610 segundos com a desativação da resistência elétrica, dando início ao processo de decaimento térmico passivo. Durante essa etapa, a taxa de perda de calor segue uma curva exponencial negativa, o que confirma tanto a eficiência do isolamento térmico quanto a atuação da convecção natural no interior da câmara. Todo esse comportamento descrito, fica evidenciado na figura 24.

Figura 24: Resposta do sistema em malha aberta evidenciando o atraso do transporte, a constante de tempo da planta e o decaimento termico passivo.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

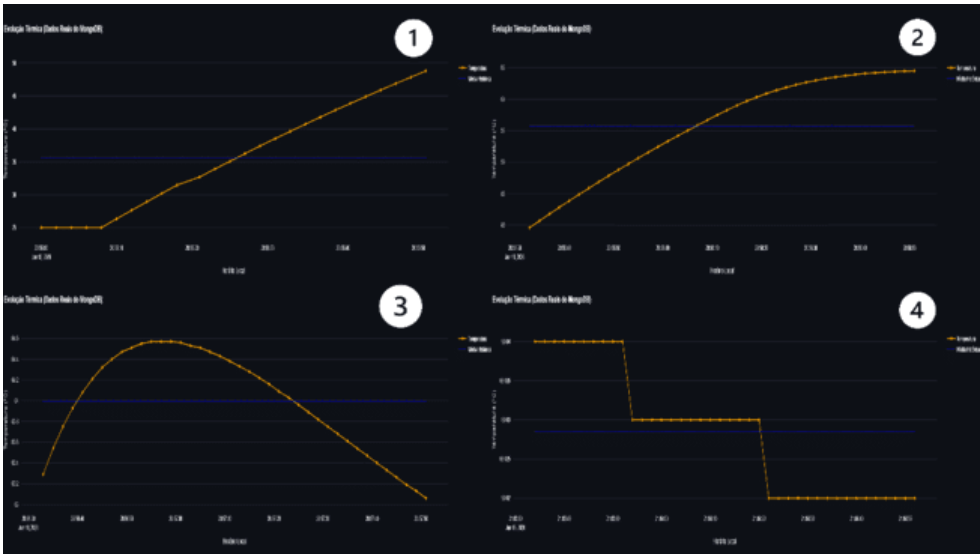
Esta caracterização empírica foi decisiva para a etapa de projeto do controlador PID. A identificação precisa do ganho estático (K) e da inércia térmica (τ) permitiu a calibração dos ganhos do controlador, garantindo que o sistema operasse dentro de limites que preservam a integridade dielétrica do verniz isolante dos motores elétricos durante o processo de cura.

Análise em malha fechada: performance do controle PID

A validação da estratégia de controle foi realizada através da implementação de um algoritmo PID (*Proportional-Integral-Derivative*) sobre o modelo da estufa. O controlador foi ajustado para manter a temperatura interna em um *Setpoint* fixo de 60°C, valor crítico para a polimerização uniforme do verniz isolante em motores elétricos.

A figura 25 ilustra o desempenho do sistema, demonstrando a convergência rápida da variável de processo em direção ao alvo. A ação proporcional (K_P) permitiu uma resposta ágil na fase inicial de aquecimento, enquanto a ação integral (K_I) garantiu a eliminação do erro em regime permanente, e a ação derivativa (K_D) atuou como um amortecedor, prevenindo o *overshoot* e garantindo que a temperatura não ultrapassasse o limite seguro para os componentes internos do motor.

Figura 25: Resposta temporal do sistema sob controle PID, evidenciando a estabilização precisa no setpoint de 60°C.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

Para quantificar a eficácia do controle, foram extraídos os indicadores de desempenho temporal e de erro, conforme consolidado nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Indicadores de performance temporal.

Parâmetro	Valor
Overshoot (Sobresinal)	7.62%
Tempo de subida (Rise Time)	54.0s
Erro em regime permanente	0.01°C

Fonte: elaboração dos autores (2026).

Tabela 3 – Índices de erro (desempenho algorítmico)

Índice	Valor
IAE (Integral Absolute Error)	2.062,95
ISE (Integral Square Error)	39.337,45
ITAE (Integral Time Absolute Error)	143.001,61
ITSE (Integral Time Square Error)	934.400,37

Fonte: elaboração dos autores (2026).

A análise dos índices de erro (especialmente o ITAE e o ITSE) confirma que o controlador PID foi adequadamente sintonizado, apresentando uma convergência rápida e estável. Esses resultados validam a proposta de automação, demonstrando que a integração entre a arquitetura IoT e o controle PID oferecem uma solução técnica superior aos termostatos convencionais, promovendo maior qualidade no processo de cura e otimização do consumo energético da estufa.

Considerações finais

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento e a implementação do sistema LumiTemp, uma solução integrada para o controle térmico de estufas de secagem de motores elétricos. A evolução arquitetural conduzida ao longo da pesquisa, que migrou de um modelo monolítico para um ecossistema de microsserviços baseado em IoT e processamento analítico em Python, provou ser o diferencial determinante para a eficácia do sistema.

A modelagem matemática da planta, caracterizada como um sistema de Primeira Ordem com Tempo Morto (FOPDT), forneceu o suporte teórico necessário para a sintonia do controlador PID. Os resultados experimentais, validados por métricas de desempenho no domínio do tempo e do erro (como IAE, ISE e ITAE), atestaram a superioridade do controle em malha fechada sobre as soluções de mercado baseadas em termostatos simples. O sistema LumiTemp demonstrou capacidade de estabilização precisa no *Setpoint*, garantindo condições térmicas ideais para a preservação do verniz isolante e prevenindo o estresse térmico dos componentes, além de promover uma gestão energética mais eficiente.

A utilização de protocolos industriais e abertos (MQTT) integrada a uma plataforma de dados não-relacionais (MongoDB) conferiu ao sistema a robustez exigida para a Indústria 4.0, transformando um processo legado em um ativo inteligente, rastreável e supervisionável remotamente.

Em trabalhos futuros, sugere-se a implementação de técnicas de manutenção preditiva baseadas em *Machine Learning*, utilizando o histórico de dados persistido no *Data Lake* para se prever falhas no aquecedor antes que elas comprometam o lote em secagem. Em suma, o LumiTemp cumpriu seus objetivos, apresentando uma solução tecnológica viável, escalável e de alto desempenho para a automação industrial de processos térmicos.

Referências

- AGHENTA, L. O.; IQBAL, M. T. Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design Using Thingier.IO and ESP32 Thing. **Electronics**, v. 8, n. 822, 2019.
- ALEXANDRE, Gerônimo Barbosa; FILHO, Múcio d'Emery Alves; SANTANA, Vitoria Borges. Projeto e montagem de um medidor de energia elétrica didático e de baixo custo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 47.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA DA ABENGE, 2., 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ABENGE, 2019.
- ALVES, M. P. **Desenvolvimento de plataforma web para monitoramento de dados para agricultura de precisão**. 2023. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2023.
- ANTONIO, Claodomir et al. Comparação entre três tipos de sensores de temperatura em associação com Arduino. p. 96, 2016.
- BAJIC, V. et al. Desafios na implementação da Indústria 4.0: uma revisão da literatura. **Revista Brasileira de Engenharia de Produção**, v. 21, n. 2, p. 45-62, 2020.
- CABRINI, F. H. et al. Digital twins: controle dos movimentos de um braço robótico utilizando MQTT e NGSI. **FTT Journal of Engineering and Business**, São Bernardo do Campo, p. 41-62, jun. 2024.
- CABRINI, Fábio Henrique et al. Digital twins: controle dos movimentos de um braço robótico utilizando MQTT e NGSI. In: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO. Faculdade Engenheiro Salvador Arena, São Bernardo do Campo, 2023.
- CAMARGO, G. R. P. **Interoperabilidade entre controladores industriais, sistema de monitoramento web e armazenamento de dados**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2025.
- COSTA, F. M.; CAVALCANTE, M. S. Desenvolvimento de um sistema IoT para monitoramento ambiental em linhas SMT com ESP32. **RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, São Paulo, v. 1, ano 7, 2026.
- CRUZ, I. S. et al. **Plataforma Arduino para coleta de dados ambientais**, 2011.
- DORIN PETREUS, M. Controle ambiental em estufas: desafios e soluções. **Revista de Agricultura Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 90-98, 2012.
- ESPRESSIF. **Espressif announces the launch of esp32 cloud on chip and funding by fosun group**. Setembro 2016. Disponível em: [Inserir URL se houver]. Acesso em: 07 ago. 2020.
- FALEIRO, J. A. **Segurança de dados em aplicações de Internet das Coisas**. 2024. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Redes de Computadores) – Universidade Estadual de Goiás, Pires do Rio, 2024.
- FERNANDES, A. B. et al. A eficácia da irrigação inteligente na agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Agricultura de Precisão**, v. 7, n. 1, p. 12-25, 2020.
- FREITAS, Â. G. H.; BALTHAZAR, G. R. Sistema web de gerenciamento de dispositivos IoT. **Lumen et Virtus**, São José dos Pinhais, v. XVI, n. LIII, p. 1-25, 2025.
- GALANTE, A. C.; GARCIA, R. F. **Sistema de aquisição de dados de sensores de baixo custo baseado no Arduino**, 2011.
- GILIO, P. H. S.; OLIVEIRA, L. M. **Banco de dados para telemetria de água em condomínios: eficiência, economia e detecção de vazamentos**. 2025. Fatec Bauru, Bauru, 2025.
- GUIMARÃES JUNIOR, C. S. S. A importância da IoT na automação de processos. **Revista de Tecnologia e Inovação**, v. 15, n. 4, p. 122-135, 2019.
- HASSAN, M. et al. IoT e Agricultura de Precisão: um novo paradigma. **Revista de Tecnologia Agrícola**, v. 12, n. 2, p. 76-85, 2021.

JESUS JÚNIOR, I. A. de. **Inserção automatizada de sensores por meio de simulação em uma Arquitetura Model-View-Controller (MVC)**. 2026. 26 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2026.

LIU, Y. et al. Big data e IoT: o futuro da manufatura inteligente. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 50, p. 123-135, 2022.

MARQUES, T. A. et al. Sensores IoT na gestão de recursos em estufas: um estudo de caso. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 1, p. 11-30, 2021.

MCROBERTS, M. **Beginning Arduino**. Apress, 2018.

MELO, G. M. D.; SOUSA, H. I. de. **Desenvolvimento de bancada didática para sistemas de automação e controle em processos térmicos**. 2025. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal da Paraíba, Cajazeiras, 2025.

MELO, Marcelo Marques. **Modelagem de uma estufa térmica e sintonia do controlador PID**. 2007. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

NASCIMENTO, Y. M. M. do. **Análise da redução dos custos de manutenção de motores elétricos a partir do uso de técnicas preditivas fundamentadas na manutenção centrada na confiabilidade**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2024.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

NÓBREGA, C. B.; OLIVEIRA, F. R.; SILVA, A. C. Aplicações de microcontroladores em sistemas de monitoramento industrial. **Revista de Automação e Controle**, 2020.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 30 set. 2024.

OLIVEIRA, A. R. M. D. **O uso do Arduino em uma mini estação meteorológica: comparação com a estação automática de Caraúbas-RN**, 2001.

PORTELLA, G. **Projeto de impregnadora a vácuo para manutenção de estatores em motores elétricos**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2024.

PRATES, Mauro de Oliveira. **Modelagem matemática de um sistema de secagem de um secador de plantas medicinais e aromáticas**. 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

ROCHA, Lucas Bez. **Sistema de monitoramento, controle e automação de parâmetros ambientais em estufas agrícolas utilizando conceitos de IoT**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

SANTOS, R. M. A. dos. **Análise experimental e modelagem matemática da transferência de calor em forno de cocção doméstico a gás**. 2022. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

SATURI, Geise Gulart. **Monitoramento, controle e aquisição de dados de uma estufa utilizando ESP32, MySQL e Grafana**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

SHENG, Q. et al. Segurança na IoT: desafios e soluções. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 4, p. 2883-2894, 2022.

SILVA, E. B. da; SCHNEIDER, J. C.; LAVRADO FILHO, C. Sistema PID em motor sem escovas com Arduino e IoT. **Iguazu Science**, v. 3, n. 7, p. 126-135, jun. 2025.

SILVA, J. C.; SANTOS, R. M. Sensores digitais de temperatura e umidade: uma revisão sobre o sensor DHT22. **Revista de Tecnologia em Sistemas Embarcados**, v. 15, n. 3, p. 45-60, 2023.

SILVA, N. et al. FreeRTOS Application in a Real-Time Air Quality Monitoring Architecture for Smart Campus. **IEEE Latin America Transactions**, v. 23, n. 4, p. 266-273, abr. 2025.

SILVA NETO, Antônio Monteiro da; SANTOS, Nathan Adrian dos. **Sistemas de controle e supervisão de dados em uma estufa didática**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.

SOUZA, R. F. et al. A importância da análise de dados na agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Agricultura Inteligente**, v. 8, n. 2, p. 30-45, 2022.

SOUZA, V. C. **Organização e gerência da manutenção**. 5. ed. São Paulo: All Print, 2013.

THIRUPATHI, V.; SAGAR, K. Implementation of Home Automation System using MQTT Protocol and ESP32. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, v. 8, n. 2C2, p. 111-113, 1 dez. 2018.