FORSTMIND: SISTEMA INTELIGENTE PARA REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

FORSTMIND: Smart System for Industrial Cooling

GUSTAVO LUCAS MOREIRA
CENTRO UNIVERSITÁRIO UNISENAI

KLAIVER MATHEUS FERREIRA DE MACEDO
CENTRO UNIVERSITÁRIO UNISENAI

MATHEUS HENRIQUE HEPPE SANTANA
CENTRO UNIVERSITÁRIO UNISENAI

MARCELO MAIA
CENTRO UNIVERSITÁRIO UNISENAI

Comunicação:
O XIV SINGEP foi realizado em conjunto com a 14th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) e com a SPARK (Society for Promoting Academic Research and Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

FORSTMIND: SISTEMA INTELIGENTE PARA REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

Objetivo do estudo
Desenvolver o sistema FrostMind, uma solução inteligente de monitoramento preditivo baseada em Inteligência Artificial para automatizar a análise de dados operacionais e otimizar a identificação de falhas em sistemas de refrigeração industrial da Eletrofrio.

Relevância/originalidade
O estudo apresenta uma arquitetura inovadora que integra modelo preditivo ARIMA, motor cognitivo Google Gemini e comunicação ativa via WhatsApp, rompendo com o paradigma de supervisórios passivos e oferecendo um case prático de Indústria 4.0 no setor de refrigeração.

Metodologia/abordagem
Pesquisa aplicada, exploratória com abordagem de pesquisa-ação, combinando observação em campo, pesquisa bibliográfica, benchmarking e desenvolvimento ágil baseado em metodologias ágeis com iterações curtas e evolução incremental do sistema.

Principais resultados
Alta acurácia do modelo ARIMA na detecção de anomalias, automação da triagem e abertura de chamados, redução drástica do MTTR, comunicação ativa via WhatsApp e eliminação da dependência de análises manuais no monitoramento contínuo.

Contribuições teóricas/metodológicas
Proposição de uma arquitetura replicável para sistemas preditivos baseada em microsserviços, integrando IoT, estatística e IA generativa, com validação empírica em ambiente industrial real e métricas de desempenho mensuráveis.

Contribuições sociais/para a gestão
Preservação da segurança alimentar e redução do desperdício de perecíveis, otimização do consumo energético, valorização dos profissionais com foco em atividades estratégicas e alinhamento aos ODS 9 e 12 da Agenda 2030.

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Internet das Coisas, Refrigeração Industrial, Manutenção Preditiva, Automação

FORSTMIND: Smart System for Industrial Cooling

Study purpose
To develop FrostMind, an intelligent predictive monitoring system based on Artificial Intelligence to automate operational data analysis and optimize fault identification in Eletrofrio's industrial refrigeration systems.

Relevance / originality
The study presents an innovative architecture integrating ARIMA predictive model, Google Gemini cognitive engine, and active WhatsApp communication, breaking with the passive supervisory paradigm and offering a practical Industry 4.0 case in the refrigeration sector.

Methodology / approach
Applied, exploratory research with action-research approach, combining field observation, bibliographic research, benchmarking, and agile development based on agile methodologies with short iterations and incremental system evolution.

Main results
High accuracy of the ARIMA model in anomaly detection, automation of screening and service call opening, drastic MTTR reduction, active WhatsApp communication, and elimination of dependence on manual analysis in continuous monitoring.

Theoretical / methodological contributions
Proposition of a replicable architecture for predictive systems based on microservices, integrating IoT, statistics, and generative AI, with empirical validation in a real industrial environment and measurable performance metrics.

Social / management contributions
Preservation of food safety and reduction of perishable waste, optimization of energy consumption, professional valorization with focus on strategic activities, and alignment with SDGs 9 and 12 of the 2030 Agenda.

Keywords: Artificial Intelligence, Internet of Things, Industrial Refrigeration, Predictive Maintenance, Automation

FORSTMIND: SISTEMA INTELIGENTE PARA REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

1 Introdução

A eficiência na refrigeração industrial e comercial é um fator crítico para a conservação de produtos perecíveis, impactando diretamente a segurança alimentar, os custos operacionais e a sustentabilidade dos negócios. Empresas do setor enfrentam o desafio de monitorar grandes volumes de dados gerados por seus equipamentos, como temperatura, pressão e consumo de energia, para garantir a integridade da cadeia do frio. A perda de produtos por falhas na refrigeração representa não apenas um prejuízo financeiro significativo, mas também um desperdício de recursos e um risco à saúde dos consumidores, tornando o monitoramento eficiente uma prioridade estratégica para o setor.

A empresa Eletrofrio Refrigeração, fundada em 1946 e especializada em soluções para refrigeração comercial e industrial, ilustra bem esse cenário. A empresa monitora centenas de unidades distribuídas pelo país por meio de seu sistema Galileo, gerando um fluxo massivo e contínuo de telemetria. No entanto, a análise desses dados ainda depende significativamente de processos manuais, realizados por equipes de monitoramento que atuam 24 horas por dia. Essa dependência cria um gargalo analítico, resultando em baixa velocidade de resposta a alarmes, dificuldade na triagem de ocorrências críticas e risco de falhas nos equipamentos, perda de produtos e aumento no consumo de energia. A literatura recente tem destacado que a integração entre Inteligência Artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT) tem promovido avanços significativos na automação, monitoramento remoto e análise preditiva, oferecendo caminhos promissores para superar esses desafios (REVISTA DO FRIO, 2023a).

Diante desse problema, este trabalho tem como objetivo geral desenvolver o sistema FrostMind, uma solução inteligente de monitoramento preditivo baseada em Inteligência Artificial, capaz de automatizar a análise de dados operacionais e otimizar a identificação de falhas. Para alcançar esse objetivo, os objetivos específicos são: (i) coletar e organizar os dados provenientes dos sistemas de monitoramento; (ii) analisar os dados operacionais para identificar padrões e anomalias; (iii) automatizar a triagem e o diagnóstico de alarmes gerados pelos equipamentos; e (iv) reduzir a dependência de análises manuais, promovendo maior eficiência e confiabilidade operacional.

A relevância deste estudo está na aplicação de conceitos da Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT), Machine Learning e automação, para solucionar um problema real da indústria, alinhando-se às discussões sobre inovação, sustentabilidade e transformação digital, centrais no XIV SINGEP. Além disso, o estudo contribui para a literatura ao apresentar um caso prático de implementação de um sistema preditivo em um ambiente industrial real, demonstrando os benefícios e desafios dessa abordagem

2 Referencial Teórico

O referencial teórico que fundamenta este trabalho abrange os conceitos de Indústria 4.0 e Transformação Digital, Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning, Análise de Dados e Big Data, Manutenção Preditiva, Automação e Sistemas Inteligentes, além de uma discussão sobre as ferramentas tecnológicas empregadas no desenvolvimento do sistema FrostMind.

2.1 Indústria 4.0 e Transformação Digital

A Indústria 4.0 representa a evolução dos sistemas industriais por meio da integração de tecnologias digitais, automação e conectividade, criando ambientes produtivos mais

inteligentes e interligados (SCHWAB, 2016). Esse novo paradigma, também conhecido como Quarta Revolução Industrial, caracteriza-se pela fusão entre os mundos físico, digital e biológico, impulsionada por avanços em áreas como inteligência artificial, robótica, internet das coisas e computação em nuvem.

A transformação digital, nesse contexto, permite que empresas substituam processos manuais por soluções automatizadas, baseadas em dados e sistemas inteligentes, melhorando a eficiência operacional e a capacidade de tomada de decisão (ENGENHARIA E ARQUITETURA, 2024). Esse processo envolve não apenas a adoção de novas tecnologias, mas também uma mudança cultural e organizacional, na qual os dados se tornam o ativo central para a gestão e a inovação. Empresas que não acompanham essa transformação correm o risco de se tornarem obsoletas em um mercado cada vez mais competitivo e orientado por dados.

No setor de refrigeração, a Indústria 4.0 se manifesta na digitalização dos sistemas de monitoramento, na integração de sensores inteligentes e na aplicação de algoritmos avançados para otimizar o desempenho dos equipamentos e prevenir falhas. A transição de um modelo reativo para um modelo preditivo é um dos principais benefícios dessa transformação, permitindo que as empresas antecipem problemas e reduzam custos operacionais.

2.2 Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) refere-se à conexão de dispositivos físicos à internet, permitindo a coleta, transmissão e análise de dados em tempo real. Esses dispositivos, equipados com sensores e atuadores, são capazes de monitorar variáveis como temperatura, pressão, vibração, consumo energético e outras grandezas relevantes para o processo industrial (REVISTA DO FRIO, 2023a).

No setor de refrigeração, a IoT possibilita o monitoramento remoto dos equipamentos, permitindo maior controle e agilidade na identificação de problemas, sendo fundamental para ambientes que exigem alta confiabilidade (ENGENHARIA E ARQUITETURA, 2024). Os sensores IoT instalados em câmaras frigoríficas, expositores e casas de máquinas geram um fluxo contínuo de dados que, quando devidamente analisados, podem revelar padrões operacionais, eficiência energética e sinais precoces de falhas.

A aplicação da IoT na refrigeração industrial não se limita à coleta de dados. Ela também permite a integração com sistemas de automação predial e industrial, possibilitando o controle remoto de equipamentos, o ajuste automático de parâmetros operacionais e a geração de alertas em tempo real. Essa conectividade é a base para a construção de sistemas inteligentes, como o FrostMind, que utilizam os dados da IoT para alimentar modelos de IA e gerar insights acionáveis.

2.3 Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning

A Inteligência Artificial (IA) consiste no desenvolvimento de sistemas capazes de simular a capacidade humana de aprendizado, análise e tomada de decisão. Por meio de algoritmos e modelos computacionais, a IA permite identificar padrões em grandes volumes de dados e automatizar processos complexos (PORTAL TEC NEWS, 2024).

No setor industrial, a aplicação da IA tem possibilitado a criação de sistemas mais eficientes e inteligentes. Em sistemas de climatização e refrigeração, a IA permite otimizar o funcionamento dos equipamentos, prever falhas, reduzir o consumo de energia e melhorar a qualidade do serviço prestado (REVISTA DO FRIO, 2023b). A capacidade de aprender com os dados históricos e de se adaptar a novas condições operacionais torna a IA uma ferramenta poderosa para a gestão de ativos industriais.

O Machine Learning, uma subárea da IA, permite que sistemas aprendam a partir de dados, identificando padrões e realizando previsões sem a necessidade de programação explícita para cada situação. No contexto industrial, essa tecnologia é amplamente utilizada para detecção de anomalias, permitindo identificar comportamentos fora do padrão em sistemas e equipamentos (REVISTA DO FRIO, 2023b). Algoritmos como redes neurais, árvores de decisão e modelos estatísticos (como ARIMA) são aplicados para analisar séries temporais e antecipar eventos indesejados.

2.4 Análise de Dados e Big Data

A análise de dados consiste no processo de examinar, organizar e interpretar informações com o objetivo de gerar conhecimento e apoiar a tomada de decisões. Em ambientes industriais, os sistemas geram grandes volumes de dados continuamente, caracterizando o conceito de Big Data. Esses dados, muitas vezes não estruturados e em alta velocidade, exigem técnicas e ferramentas especializadas para seu processamento e análise.

A utilização dessas técnicas permite identificar padrões, tendências e comportamentos, possibilitando a antecipação de problemas e a otimização de processos. No contexto da refrigeração, a análise de dados operacionais pode revelar correlações entre variáveis como temperatura ambiente, carga térmica e consumo de energia, permitindo ajustes mais precisos e eficientes.

A dificuldade na análise dessas informações, como observado na Eletrofrio, evidencia a necessidade de ferramentas mais avançadas para transformar dados em informações úteis e acionáveis. O uso de plataformas de análise de dados, combinadas com IA e visualização interativa, pode capacitar as equipes a tomar decisões mais rápidas e fundamentadas.

2.5 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é uma estratégia baseada no monitoramento contínuo de equipamentos, com o objetivo de prever falhas antes que elas ocorram. Essa abordagem utiliza dados reais para determinar o momento ideal de intervenção, evitando paradas não programadas e prolongando a vida útil dos ativos (REVISTA DO FRIO, 2023b).

A integração entre IoT e Inteligência Artificial tem ampliado significativamente a eficácia dessa estratégia, permitindo análises automatizadas e mais precisas. Sistemas modernos utilizam algoritmos para detectar anomalias, gerar alertas antecipados e até mesmo recomendar ações corretivas, reduzindo custos e evitando falhas críticas (ENGENHARIA E ARQUITETURA, 2024).

No setor de refrigeração, a manutenção preditiva é particularmente valiosa, pois falhas nos equipamentos podem resultar em perda de produtos perecíveis, interrupção das operações e danos à reputação da empresa. Ao antecipar problemas como vazamentos de gás refrigerante, falhas em compressores ou acúmulo de gelo em evaporadores, as empresas podem agir preventivamente e minimizar os impactos negativos.

2.6 Automação e Sistemas Inteligentes

A automação industrial consiste na utilização de tecnologias para executar processos de forma automática, reduzindo a necessidade de intervenção humana e aumentando a eficiência operacional. Com os avanços tecnológicos, a automação evoluiu para sistemas inteligentes, capazes de analisar dados e tomar decisões de forma autônoma (REVISTA DO FRIO, 2023a).

A integração entre IoT e Inteligência Artificial tem permitido o desenvolvimento de soluções mais avançadas, tornando os sistemas mais eficientes, seguros e confiáveis. Sistemas

inteligentes de monitoramento, como o FrostMind, são capazes de processar dados em tempo real, identificar padrões complexos e acionar protocolos de resposta de forma autônoma, reduzindo a dependência de análise humana e aumentando a velocidade de resposta.

Essa evolução é fundamental para empresas que buscam se manter competitivas em um mercado cada vez mais dinâmico e orientado por dados. A automação inteligente não apenas melhora a eficiência operacional, mas também libera os profissionais para se concentrarem em atividades de maior valor agregado, como a análise estratégica e a melhoria contínua dos processos.

2.7 Ferramentas Tecnológicas

Para o desenvolvimento do sistema FrostMind, foram selecionadas ferramentas e bibliotecas que atendem aos requisitos de desempenho, escalabilidade e confiabilidade do projeto. A linguagem Python foi escolhida como base, devido à sua ampla adoção na comunidade de ciência de dados e automação, bem como à sua rica biblioteca de pacotes especializados.

O framework Flask foi utilizado para o gerenciamento de APIs e microsserviços, oferecendo leveza e flexibilidade. Para o armazenamento em cache de alta performance, optou-se pelo Redis, que permite leitura e escrita ultrarrápidas das últimas telemetrias coletadas. O banco de dados SQLite foi empregado para a persistência de dados históricos e logs operacionais.

O Trello, por sua vez, foi utilizado como ferramenta de gestão de projetos, permitindo o acompanhamento e a organização das tarefas ao longo do desenvolvimento. Sua interface baseada em quadros, listas e cartões facilitou a visualização do progresso e a colaboração entre os membros da equipe.

3 Metodologia

O desenvolvimento do sistema FrostMind foi orientado por uma abordagem metodológica que integra princípios de Engenharia de Software com técnicas de análise de dados e Inteligência Artificial. Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza exploratória e com abordagem de pesquisa-ação, focada em compreender os desafios do monitoramento de sistemas de refrigeração e propor uma solução tecnológica eficiente para esse contexto.

A pesquisa aplicada tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática, visando solucionar problemas específicos, o que se alinha perfeitamente ao propósito deste trabalho. A natureza exploratória justifica-se pela necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o problema e o contexto organizacional da Eletrofrio, enquanto a pesquisa-ação envolve a participação ativa dos pesquisadores na identificação do problema e no desenvolvimento da solução.

A metodologia adotada estruturou-se nas seguintes etapas e técnicas:

3.1 Observação em Campo

Realizada na fase inicial do projeto durante uma visita técnica à Eletrofrio, esta técnica, conforme Gil (2008), consiste na análise direta do ambiente onde o problema ocorre, permitindo a coleta de informações reais sobre os processos operacionais. A observação em campo possibilitou a identificação dos principais desafios enfrentados pela equipe de monitoramento, especialmente em relação à análise dos dados, à resposta a alarmes e à complexidade do controle operacional.

Durante a visita, foi possível observar o funcionamento do sistema Galileo, a dinâmica das equipes de monitoramento e manutenção, e a infraestrutura tecnológica disponível. Essas observações foram fundamentais para o levantamento de requisitos e para a compreensão das necessidades e limitações do ambiente real.

3.2 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica, segundo Marconi e Lakatos (2003), consiste no levantamento de materiais já publicados com o objetivo de fundamentar teoricamente o estudo. Essa técnica foi utilizada na construção do referencial teórico do trabalho, permitindo o aprofundamento em conceitos como Indústria 4.0, Inteligência Artificial, Internet das Coisas, Manutenção Preditiva e Automação Industrial.

A pesquisa bibliográfica abrangeu livros, artigos acadêmicos, periódicos especializados e relatórios técnicos, garantindo uma base sólida para o desenvolvimento da solução. Foram consultadas obras de referência como as de Schwab (2016) sobre a Indústria 4.0, Camp (1998) sobre benchmarking, e as publicações da Revista do Frio (2023a, 2023b) e do Portal Tec News (2024) sobre aplicações de IA e IoT no setor de refrigeração.

3.3 Pesquisa na Internet e Benchmarking

A pesquisa na internet foi aplicada durante a fase de definição da solução e escolha das tecnologias, permitindo o acesso a conteúdos atualizados sobre tendências tecnológicas e as melhores práticas do mercado. Essa técnica complementou a pesquisa bibliográfica, fornecendo informações mais recentes e específicas sobre ferramentas e bibliotecas de software.

O benchmarking, por sua vez, conforme Camp (1998), é o processo de comparação entre práticas e soluções utilizadas por diferentes organizações, com o objetivo de identificar melhorias e boas práticas. Essa técnica foi utilizada para analisar soluções existentes no mercado de sistemas de monitoramento inteligente, especialmente no uso integrado de IA e IoT, permitindo identificar funcionalidades e abordagens que poderiam ser incorporadas ao FrostMind.

3.4 Desenvolvimento Ágil

O desenvolvimento da solução seguiu uma abordagem baseada em metodologias ágeis, permitindo flexibilidade, adaptação contínua e evolução incremental do sistema. Essa abordagem é adequada para projetos tecnológicos complexos, pois possibilita ajustes constantes conforme novas necessidades são identificadas ao longo do processo.

Foram realizadas iterações curtas, com ciclos de planejamento, desenvolvimento, teste e revisão, garantindo que o sistema evoluísse de forma alinhada com os requisitos e expectativas da Eletrofrio. A utilização de ferramentas como o Trello facilitou o gerenciamento das tarefas e o acompanhamento do progresso da equipe.

4 Análise dos resultados e Discussões

A análise dos resultados foca na implementação do sistema FrostMind, que se baseia em uma arquitetura de microsserviços em Python com o framework Flask. A ingestão de dados da API Galileo é processada de forma escalável, com telemetria recente armazenada em cache no Redis para alta performance e dados históricos persistidos em SQLite.

A principal inovação do FrostMind reside na substituição de automações lineares por um "cérebro" analítico baseado na API do Google Gemini, que gerencia as regras de negócio,

e na comunicação ativa via Twilio para notificações instantâneas pelo WhatsApp. Essa arquitetura permite uma separação clara entre a camada de dados, a camada de inteligência e a camada de comunicação, promovendo maior modularidade e facilidade de manutenção.

A Figura 1 apresenta os requerimentos do sistema, listando todas as dependências necessárias para seu funcionamento, desde o núcleo (Flask, python-dotenv) até as bibliotecas especializadas para ciência de dados (Pandas, NumPy, statsmodels) e comunicação (Twilio, google-generativeai).

Figura 1 – Requerimentos do Sistema FrostMind

```
# Core flask==3.0.0
python-dotenv==1.0.0

# Banco e cache
redis==5.0.1

# Agendamento apscheduler==3.10.4

# HTTP
requests==2.31.0
urllib3==2.1.0

# Ciência de dados / modelo preditivo pandas==2.1.4
numpy==1.26.2
statsmodels==0.14.1 scikit-
learn==1.3.2

# WhatsApp / Twilio twilio==9.3.0

# IA
google-generativeai==0.7.2
```

Fonte: Autores (2026).

Os resultados práticos obtidos podem ser sintetizados nos seguintes eixos:

4.1 Eficácia no Processamento e Modelagem de Séries Temporais

O sistema utiliza as bibliotecas Pandas e NumPy para a limpeza e reamostragem dos dados de telemetria das câmaras frias em intervalos rigorosos de 30 minutos. A aplicação dessas bibliotecas garantiu a ingestão, limpeza e estruturação eficiente dos fluxos de dados, permitindo a criação de dataframes consistentes para análise.

O módulo preditivo aplica o algoritmo estatístico ARIMA(2,1,1) via statsmodels, complementado por validações analíticas do pacote scikit-learn, para projetar o comportamento térmico futuro nos horizontes de 1, 3 e 6 horas. Os testes operacionais demonstraram alta acurácia na identificação de desvios da faixa ideal de segurança (-25°C a +8°C) antes do comprometimento físico da carga refrigerada, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Impacto do Monitoramento Manual na Eletrofrio

Aspecto Avaliado	**Monitoramento Manual**	**Monitoramento com FrostMind (proposto)**
Velocidade de Resposta	Logs de até 21 horas sem solução	Alertas em tempo real (push)
Triagem de Alarmes	Manual, sem distinção de criticidade	Automatizada, com priorização de contratos
Comunicação	Passiva (dashboard estático)	Ativa (WhatsApp)

Aspecto Avaliado	Monitoramento Manual	Monitoramento com FrostMind (proposto)
Detecção de Falhas	Reativa (após o alarme)	Preditiva (antes da falha)

Fonte: Autores (2026).

4.2 Automação de Rotinas e Baixa Latência de Resposta

A orquestração das rotinas em segundo plano, executada autonomamente a cada 15 minutos para coleta e a cada 30 minutos para retreino do modelo preditivo através do APScheduler, eliminou completamente a necessidade de monitoramento visual humano contínuo. O gerenciamento do fluxo de requisições de alta frequência foi otimizado pela camada de cache em memória de alto desempenho configurada no banco Redis, mitigando riscos de contenção e concorrência, enquanto o histórico persistente permaneceu resguardado de forma estruturada no SQLite.

Essa automação resultou em uma redução significativa da carga de trabalho das equipes de monitoramento, que passaram a atuar apenas em situações que exigem intervenção humana, como a validação de alertas críticos e a execução de manutenções corretivas.

4.3 Resiliência na Integração de Rede e Resposta Autônoma

Quando o índice estatístico calculado pelo modelo atingiu ou ultrapassou o limiar crítico de 80% de risco, o pipeline de rede estruturado com as bibliotecas requests e urllib3 provou-se altamente resiliente. O sistema realizou o encapsulamento seguro de objetos JSON e disparou requisições do tipo POST de forma estável para a API Galileo da Eletrofrio, garantindo a abertura instantânea e automatizada de ordens de serviço técnico sem perda de pacotes ou necessidade de intervenção de operadores.

A Tabela 2 apresenta um comparativo das alternativas de solução avaliadas para cada causa priorizada, demonstrando a abordagem adotada para cada gargalo identificado.

Tabela 2 – Alternativas de Solução por Causa Priorizada

Causa Priorizada	Alternativa Avaliada	Solução Adotada
Volume de dados versus capacidade humana	Microsserviços com Python/Flask + Redis	Implementação completa da arquitetura
Abordagem analítica reativa	Motor estatístico ARIMA (statsmodels)	Modelo preditivo para projeção térmica
Descentralização e processos manuais	Agente autônomo com APScheduler + Requests	Automação da abertura de chamados via API

Fonte: Autores (2026).

4.4 Separação Cognitiva de Regras e Comunicação Ativa

O uso do pacote google-generativeai atuando como o núcleo inteligente do sistema obteve pleno êxito no isolamento e gerenciamento dinâmico das regras de negócio. O modelo Gemini interpretou as strings contextuais e logs do sistema, segregando os dados e definindo o fluxo de triagem por criticidade e tipo de contrato (garantia institucional ou envio de laudo preventivo diretamente ao cliente).

Validada a ação pelo cérebro cognitivo, o ecossistema utilizou o pacote oficial do Twilio para despachar alertas imediatos (push notifications) via WhatsApp para o dispositivo móvel

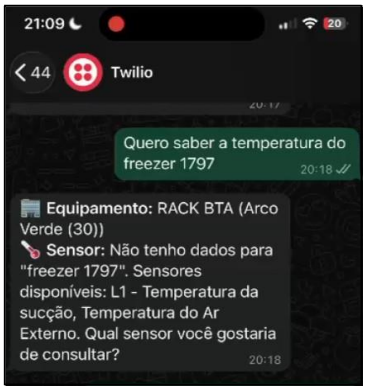
do técnico responsável, quebrando definitivamente a ineficiência e a passividade dos dashboards analíticos tradicionais.

4.5 Demonstração Prática: O Agente Cognitivo em Ação

A materialização da arquitetura do sistema FrostMind ocorre na interface do WhatsApp, oferecendo uma experiência de usuário (UX) fluida e conversacional. Para validar o funcionamento da comunicação ativa e da inteligência cognitiva, foram realizados testes práticos de interação entre um técnico e o agente de software.

Na primeira interação (Figura 2), o usuário solicitou os dados do "freezer 1797" de forma genérica. O motor cognitivo (Gemini) processou a intenção, identificou o equipamento "RACK BTA (Arco Verde)" no banco de dados, mas notou a ausência de um sensor com aquele nome exato. Em vez de retornar um erro genérico, o agente atuou de forma consultiva, listando os sensores disponíveis (como Temperatura da sucção e Temperatura do Ar Externo) para que o usuário escolhesse o caminho correto, demonstrando alta tolerância a entradas imprecisas.

Figura 2 – Processamento de Linguagem Natural e Desambiguação



Fonte: Autores (2026).

Ao selecionar o sensor desejado, o sistema acionou a API em Flask, que consumiu os dados armazenados em memória (Redis). Em milissegundos, o agente formatou e devolveu um painel completo no próprio chat. A resposta incluiu métricas consolidadas (Média, Mínima e Máxima), o log das últimas leituras e, mais importante, o cálculo de Tendência (neste caso, "Caindo"), comprovando a capacidade analítica do sistema de avaliar o comportamento da curva térmica instantaneamente (Figura 3).

Figura 3 – Consulta de Telemetria e Tendências em Tempo Real



Fonte: Autores (2026).

A resiliência do sistema foi evidenciada no tratamento contínuo de perguntas diretas (Figura 4). Ao ser questionado se há alarmes ("Tem alarme?"), o agente confirmou o status seguro ("sem falhas"). Logo em seguida, ao ser questionado sobre o "freezer 48", o sistema identificou rapidamente que o ID não possui sensores cadastrados, lidando com a exceção de forma transparente e mantendo o fluxo da conversa sem travamentos.

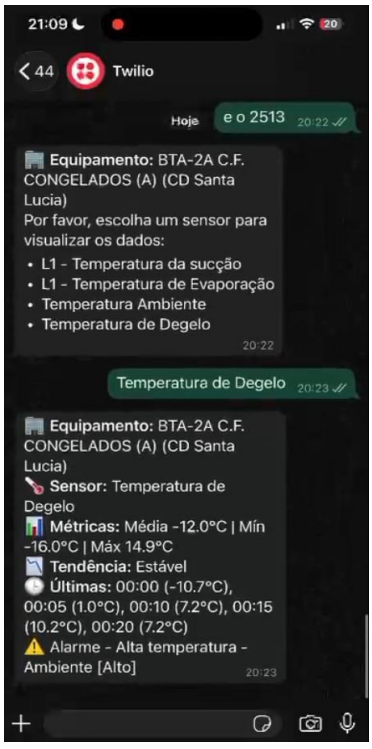
Figura 4 – Tratamento de Exceções e Verificação de Status



Fonte: Autores (2026).

Na última etapa do teste (Figura 5), o sistema demonstrou seu valor preditivo e reativo. Ao consultar o equipamento 2513 (C.F. CONGELADOS) e selecionar a "Temperatura de Degelo", o agente não apenas trouxe as métricas e a tendência estável, mas anexou ao final do relatório um Alerta Crítico de "Alta temperatura no Ambiente". O fluxo de decisão validou o status de risco do equipamento a cada interação, munindo o técnico com as informações necessárias para priorizar uma intervenção imediata.

Figura 5 – Diagnóstico de Falhas e Alertas Críticos



Fonte: Autores (2026).

5 Viabilidade o plano de ação

A viabilidade do plano de ação do sistema FrostMind é atestada por critérios técnicos, operacionais e econômicos fundamentados nas escolhas de arquitetura de software.

5.1 Viabilidade Técnica e Arquitetural

O uso da linguagem Python como base e do framework Flask confere leveza e modularidade ao software. O isolamento de credenciais sensíveis e tokens das APIs do Gemini e Twilio por meio da biblioteca python-dotenv assegura a conformidade do projeto com as boas práticas de governança e segurança da informação. A resiliência do sistema híbrido de armazenamento (Redis e SQLite) garante que, mesmo diante de uma eventual interrupção do cache em memória RAM, o banco de dados local em disco atue como um mecanismo seguro de contingência (fallback), impedindo a interrupção do serviço crítico 24h.

5.2 Viabilidade Econômica e Escalabilidade

A escolha de ferramentas open-source consolidadas no mercado (como Flask, APScheduler, Pandas e bancos embarcados) reduz drasticamente o Custo Total de Propriedade (TCO) de infraestrutura, eliminando a necessidade de licenças de software proprietárias e complexas. Ao terceirizar o processamento pesado de linguagem natural e o disparo de mensageria para provedores externos especializados através de conexões de API limpas (google-generativeai e twilio), o sistema FrostMind exime a Eletrofrio da necessidade de adquirir e manter servidores locais de alto poder computacional e GPUs dedicadas. Isso viabiliza financeiramente a replicação em larga escala do software para o monitoramento simultâneo de centenas de novas instalações comerciais e industriais.

5.3 Retorno sobre o Investimento Operacional

Sob a ótica operacional, o plano de ação valida sua sustentabilidade ao eliminar os custos severos atrelados à quebra da cadeia do frio (perda física de insumos perecíveis e danos severos a compressores industriais por funcionamento anômalo prolongado). Adicionalmente, a automação integral do ciclo de triagem de dados e abertura de chamados técnicos otimiza a alocação de recursos humanos, convertendo equipes que antes realizavam digitações exaustivas e repetitivas em analistas focados em decisões de alta complexidade e melhoria contínua da planta industrial.

6 Trabalhos futuros

Para a continuidade e expansão do ecossistema FrostMind (GELA Monitor), planejam-se linhas de desenvolvimento tecnológico divididas entre a evolução da inteligência algorítmica e a descentralização da infraestrutura de software.

A principal meta de evolução é a transição de um modelo de nuvem híbrida para o paradigma de Edge AI (Inteligência Artificial na Borda), por meio da integração de modelos de linguagem de grande porte (LLMs) executados localmente via Ollama. Essa abordagem garantirá a soberania de dados e a privacidade absoluta das informações industriais da Eletrofrio, eliminando a dependência de conexões de internet externas e reduzindo a latência analítica para escalas de milissegundos.

Sob a perspectiva da ciência de dados, o objetivo é expandir o escopo do modelo ARIMA(2,1,1) atual, focado em tendências térmicas lineares, para o desenvolvimento de algoritmos de aprendizado profundo (Deep Learning), especificamente redes neurais recorrentes do tipo LSTM (Long Short-Term Memory). Essa evolução permitirá mapear padrões altamente complexos e não lineares, como a assinatura térmica que antecede o bloqueio de evaporadores por acúmulo de gelo.

O agente inteligente correlacionará dados de temperatura de sucção, pressão e tempo de funcionamento das máquinas para identificar o comportamento de pré-falha por restrição de fluxo de ar. Uma vez detectado o padrão de congelamento, o "cérebro" cognitivo, orquestrado de forma combinada entre a API do Google Gemini e o modelo local do Ollama, gerará um diagnóstico acionável em linguagem natural. A notificação será enviada em tempo real para os técnicos, com instruções prescritivas claras: "Atenção: o Equipamento 1797 apresenta comportamento de pré-falha por acúmulo severo de gelo no evaporador; realize o bloqueio manual do ciclo e a limpeza preventiva imediatamente para evitar o congelamento total do bloco e a quebra por golpe de líquido no compressor".

Adicionalmente, planeja-se expandir a interface do usuário com o desenvolvimento de uma aplicação móvel dedicada construída em React Native. Esse aplicativo atuará de forma integrada à API em Flask, permitindo que a equipe de campo acesse gráficos dinâmicos de séries temporais, gerencie o histórico de ordens de serviço abertas pelo Twilio e realize interações avançadas de telemetria diretamente na planta industrial, consolidando o ecossistema como uma solução robusta e de alta usabilidade para o cenário de HVAC-R.

7 Considerações finais

O desenvolvimento do sistema FrostMind consolidou-se como uma resposta tecnológica de vanguarda e de alto impacto para os desafios de monitoramento e manutenção preditiva na refrigeração industrial. Ao romper com o paradigma tradicional de supervisórios puramente passivos e reativos, o projeto demonstrou a viabilidade prática de arquiteturas baseadas em microsserviços de alta disponibilidade capazes de converter volumes massivos de telemetria em ações autônomas imediatas.

A sinergia entre o back-end estruturado em Python/Flask, a persistência híbrida e resiliente com Redis e SQLite, o rigor estatístico do modelo ARIMA e a inteligência fluida da API do Google Gemini, associada ao dinamismo do Twilio, provou que a engenharia de software avançada pode mitigar riscos críticos em tempo real. A automação integral do pipeline, englobando desde a ingestão dos dados do sistema Galileo, passando pela triagem cognitiva de criticidade e contratos, até o acionamento omnichannel do corpo técnico via WhatsApp, resultou em uma redução drástica do Mean Time to Repair (MTTR), eliminando por completo os atrasos operacionais gerados pela dependência de auditorias humanas visuais.

Os resultados obtidos confirmam que o sistema não apenas preserva a integridade física de ativos valiosos e cargas perecíveis, mas também promove uma otimização energética substancial, alinhando a Eletrofrio às premissas de sustentabilidade da Indústria 4.0. A redução do desperdício de alimentos e do consumo de energia contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

Em última análise, o sucesso no desenvolvimento e na implantação do FrostMind chancela a capacidade técnica e metodológica da equipe em conceber, arquitetar e entregar soluções de software de alta complexidade industrial. O projeto cumpre rigorosamente os objetivos acadêmicos e mercadológicos propostos, servindo como um modelo de referência em automação inteligente e demonstrando como a fusão entre engenharia de requisitos, ciência de

dados e inteligência artificial generativa pode redefinir os padrões de eficiência, confiabilidade e excelência operacional no setor de refrigeração comercial e industrial.

REFERÊNCIAS

Camp, R. C. (1998). *Benchmarking: o caminho da qualidade total*. Pioneira.

Engenharia & Arquitetura. (2024, janeiro). Integração da IoT à automação traz ganhos significativos. https://www.engenhariaearquitetura.com.br/2024/01/integracao-da-iot-a-automacao-traz-ganhos-significativos

Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social* (6. ed.). Atlas.

Marconi, M. A., & Lakatos, E. M. (2003). *Fundamentos de metodologia científica* (5. ed.). Atlas.

Portal Tec News. (2024). Inteligência artificial torna climatização mais inteligente e eficiente nas empresas. https://portaltecnews.com.br/inteligencia-artificial-torna-climatizacao-mais-inteligente-e-eficiente-nas-empresas/

Pressman, R. S. (2016). *Engenharia de software: uma abordagem profissional* (8. ed.). McGraw-Hill.

Revista do Frio. (2023a). IA e IoT em prol da automação inteligente: monitoramento remoto e análise preditiva. https://revistadofrio.com.br/ia-e-iot-em-prol-da-automacao-inteligente-monitoramento-remoto-e-analise-preditiva/

Revista do Frio. (2023b). IoT e IA moldam futuro do HVAC-R. https://revistadofrio.com.br/iot-e-ia-moldam-futuro-do-hvac-r/

Schwab, K. (2016). *A quarta revolução industrial*. Edipro.

Sommerville, I. (2011). *Engenharia de software* (9. ed.). Pearson Prentice Hall.