FILIPE DE SOUZA OLIVEIRA

GUSTAVO CARVALHO CUSTÓDIO

JHONATAN BARBOSA NATIVIDADE

RICARDO GONÇALVES CACEJA

"SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA: MONITORAMENTO DE CORRENTE NAS RESISTÊNCIAS PARA MANUTENÇÃO PREVENTIVA"

Artigo apresentado à Fatec São Bernardo do Campo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Tecnólogo em Automação Industrial.

Aprovação em 08 de junho de 2026, às 20h30.

Mestre Rodolfo dos Santos de Souza Lovera
Orientador – Fatec SBC

Mestre Marco Antonio Baptista de Sousa
Avaliador – Fatec SBC

Mestre Pedro Adolfo Gallani
Avaliador – Fatec SBC

SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA: MONITORAMENTO DE CORRENTE NAS RESISTÊNCIAS PARA MANUTÊNÇÃO PREVENTIVA

Filipe de Souza Oliveira, Gustavo Carvalho Custodio, Jhonatan Barboza Natividade, Ricardo Gonçalves Caceja, Prof. Me. Rodolfo dos Santos de Souza Lovera
Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo
filipi.oliveira21@fatec.sp.gov.br, gustavo.custodio@fatec.sp.gov.br,
jhonatan.barboza@fatec.sp.gov.br, ricardo.caceja@aluno.cps.sp.gov.br,
rodolfo.lovera@fatec.sp.gov.br

RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um protótipo de sistema para monitoramento e coleta de dados em tempo real de tensão e corrente em máquinas termoformadoras. A integridade dos componentes de aquecimento é crítica para a continuidade da produção (DALCIN, 2021). A solução proposta utiliza o microcontrolador ESP32 (microcontrolador de baixo custo com Wi-Fi e Bluetooth integrados) e o protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport, protocolo leve de comunicação publish/subscribe) para aquisição contínua de parâmetros elétricos, inserindo-se no contexto da Indústria 4.0 e da IIoT (Industrial Internet of Things, ou Internet das Coisas Industrial). O sistema visa proporcionar uma ferramenta proativa para manutenções preventivas, aumentando a confiabilidade operacional através de análise gráfica em tempo real (DALCIN, 2021). A metodologia adotada fundamenta-se na DSR (Design Science Research, metodologia voltada para a criação e avaliação de artefatos tecnológicos) (HEVNER et al., 2004).

Palavras-chave: Indústria 4.0; IIoT; Manutenção Preventiva; Termoformadora; ESP32.

ABSTRACT

This work addresses the development of a prototype system for real-time monitoring and data collection of voltage and current in thermoforming machines. The integrity of

heating components is critical for production continuity (DALCIN, 2021). The proposed solution uses the ESP32 (a low-cost microcontroller with integrated Wi-Fi and Bluetooth) and the MQTT (Message Queuing Telemetry Transport, a lightweight publish/subscribe communication protocol) for continuous acquisition of electrical parameters, within the context of Industry 4.0 and IIoT (Industrial Internet of Things). The system aims to provide a proactive tool for preventive maintenance, increasing operational reliability through real-time graphical analysis (DALCIN, 2021). The adopted methodology is based on DSR (Design Science Research, a methodology focused on the creation and evaluation of technological artifacts) for the development and assessment of the technological artifact (HEVNER et al., 2004).
Keywords: Industry 4.0; IIoT; Preventive maintenance; Thermoforming; Monitoring.

1 Introdução

A eficiência e a continuidade da produção industrial são diretamente impactadas pela confiabilidade dos equipamentos, especialmente em processos como a termoformagem, onde a integridade do aquecimento é crítica. O monitoramento manual limitado e reativo gera perdas térmicas e paradas não planejadas, o que justifica a implementação de sistemas microcontrolados para a aquisição remota de tensão e corrente no contexto da Indústria 4.0 e IIoT (Industrial Internet of Things, ou Internet das Coisas Industrial) (DALCIN, 2021).

O uso do protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport, protocolo leve de comunicação publish/subscribe), aliado a interfaces gráficas para análise temporal, permite a identificação precoce de falhas e processos de desgaste (DALCIN, 2021).

Este projeto apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo capaz de automatizar a coleta de parâmetros elétricos em duas zonas de aquecimento de uma termoformadora. Diferente do monitoramento manual convencional realizado com multímetros, a solução proposta utiliza o microcontrolador ESP32 (microcontrolador de baixo custo com Wi-Fi e Bluetooth integrados) e o protocolo MQTT para fornecer uma análise temporal contínua. O sistema foi validado através de simulações de perda de eficiência e interrupção de alimentação, enviando alertas automáticos via Telegram para possibilitar ações preventivas mais ágeis e assertivas pelas equipes de manutenção, garantindo a conformidade com a NR-10 (Norma Regulamentadora nº 10, que trata da segurança em instalações e serviços em eletricidade) e a continuidade do processo produtivo.

2 Fundamentação teórica

Esta seção apresenta os principais conceitos e pesquisas que sustentam o desenvolvimento do protótipo, fornecendo o embasamento técnico sobre Indústria 4.0, manutenção preditiva e tecnologias de aquisição de dados.

2.1 Indústria 4.0 e Internet das Coisas Industrial (IIoT)

A Indústria 4.0 caracteriza-se pela integração de tecnologias digitais e sistemas ciberfísicos (Cyber-Physical Systems, integração entre componentes físicos e digitais que permitem monitoramento, controle e interação em tempo real) para promover a convergência entre o mundo físico e digital (SILVA, 2024). Esse ambiente permite que as máquinas possuam capacidade de autoajuste e autogestão (CNI, 2017). O termo foi introduzido oficialmente na Alemanha em 2011 para descrever a interconexão de dispositivos e pessoas em tempo real (SCHWAB, 2016).

Segundo Kusma e Chiroli (2021), esse modelo baseia-se em nove pilares tecnológicos, incluindo IoT (Internet of Things, ou Internet das Coisas), big data (conjunto massivo de dados estruturados e não estruturados, analisados para gerar insights e apoiar decisões) e computação em nuvem (KAGERMANN et al., 2013). A aquisição contínua de dados elétricos é essencial para estratégias de manutenção preditiva e otimização de desempenho (DALCIN, 2021).

A IIoT (Industrial Internet of Things, ou Internet das Coisas Industrial) consiste na utilização de sensores e microcontroladores para coletar e transmitir dados em tempo real, permitindo prever falhas (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). De acordo com Xu et al. (2018), a IIoT é peça-chave na digitalização do chão de fábrica, conectando dispositivos físicos a sistemas supervisórios e plataformas em nuvem. A conectividade permite a comunicação máquina-a-máquina (M2M, Machine-to-Machine), fundamental para a Smart Factory (Fábrica Inteligente, conceito da Indústria 4.0 que integra sistemas ciberfísicos, IoT e automação para permitir produção autônoma e otimizada) (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

2.2 Manutenção Industrial e Curva P-F

A manutenção industrial tem como objetivo garantir a confiabilidade dos ativos, prolongar sua vida útil e reduzir paradas não programadas (OTANI; MACHADO, 2007). Entre as principais estratégias, destacam-se a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva.

A manutenção corretiva ocorre após a falha já ter se manifestado, sendo aplicada para restaurar o funcionamento do equipamento. Embora seja necessária em alguns casos, essa abordagem geralmente resulta em custos elevados e maior tempo de indisponibilidade, já que a intervenção só acontece após a parada do ativo (SANTOS NETO et al., 2018).

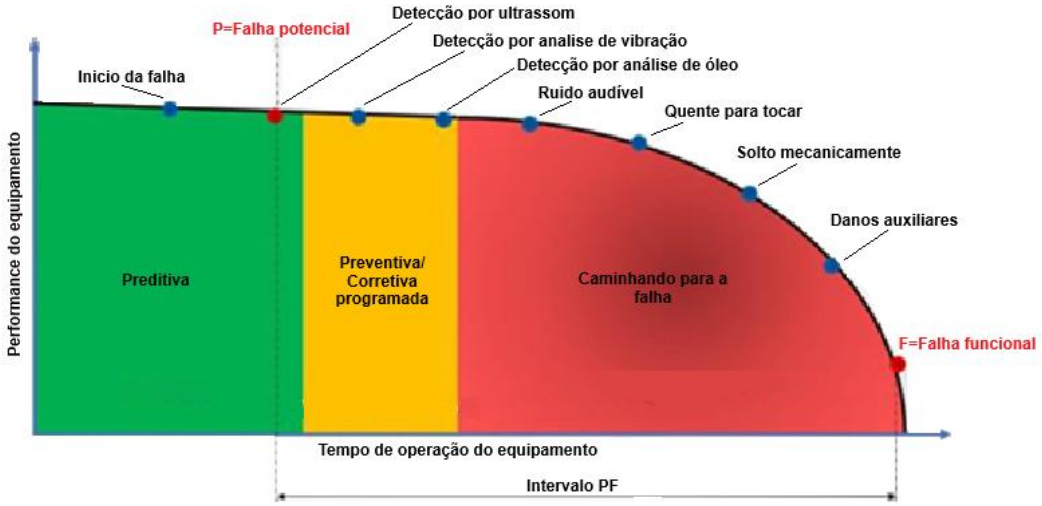
A manutenção preventiva é tradicionalmente associada ao conceito de MTBF (Mean Time Between Failures, ou Tempo Médio Entre Falhas), que representa o intervalo médio esperado entre falhas de um equipamento. Com base nesse indicador, são definidos planos de manutenção em períodos regulares, de forma a reduzir a probabilidade de falhas inesperadas e aumentar a disponibilidade dos ativos.

Já a manutenção preditiva baseia-se no monitoramento contínuo da condição real do ativo, utilizando sensores e sistemas de aquisição de dados para identificar tendências de falha antes que elas ocorram. Essa abordagem permite planejar intervenções de forma mais assertiva, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade operacional (BALDISSARELLI; FABRO, 2019; SANTOS NETO et al., 2018).

A Curva P-F (Potencial-Funcional, modelo que ilustra a evolução de uma falha entre o ponto potencial e o ponto funcional) (Figura 1) é utilizada para representar o intervalo entre o momento em que uma falha pode ser detectada e o momento em que o ativo deixa de funcionar. Técnicas como análise de vibração e termografia (processo de medição da radiação infravermelha emitida por um corpo para avaliar sua temperatura superficial) são exemplos de ferramentas aplicadas na manutenção preditiva (PIRES; OKADA, 2020).

Neste trabalho, embora sejam utilizados sensores e protocolos de comunicação típicos da preditiva, o objetivo é caracterizar a solução como preventiva, pois os dados coletados serão utilizados para apoiar o planejamento das manutenções em intervalos definidos com base no MTBF, aumentando a confiabilidade e reduzindo paradas não programadas.

Figura 1: Curva P-F



Fonte: Adaptado de (Baldissarelli, Luciano e Fabro, Elton, 2019)

2.3 Sistemas de Aquisição de Dados (DAQ), Sensores e Microcontrolador

Um Sistema de Aquisição de Dados ou “Data Acquisition System” (DAQ) converte fenômenos físicos em dados digitais processáveis (XU et al., 2018). Com o avanço da microeletrônica, microcontroladores tornaram-se fundamentais para a gerência de informações em tempo real e comunicação industrial (NEVES et al., 2007).

A aquisição de dados é centralizada no microcontrolador ESP32 (Figura 2), que recebe e processa os sinais dos sensores de corrente e tensão.

O microcontrolador ESP32 foi selecionado para este projeto por integrar Wi-Fi (Wireless Fidelity, tecnologia de rede sem fio de alta velocidade) e Bluetooth (padrão de comunicação sem fio de curto alcance) em um único chip SoC (System on Chip, circuito integrado que reúne múltiplos componentes de processamento em um único

dispositivo), oferecendo alto processamento a baixo custo (HERCOG et al., 2023).

Figura 2: Microcontrolador ESP32

Fonte: Usinainfo (2026)

A medição da corrente elétrica é realizada pelo sensor de corrente ACS712 (Figura 3), baseado no efeito Hall (USINAINFO, 2026).

Figura 3: Sensor de corrente ACS712

Fonte: Usinainfo (2026)

A escolha do sensor ACS712 na versão de 5A justifica-se pela corrente nominal da carga monitorada (1,59A). Em comparação aos modelos de 20A ou 30A, a versão de 5A oferece uma sensibilidade superior, de 185 mV/A, o que amplia a resolução da leitura pelo ESP32. Essa maior precisão é fundamental para a detecção precoce de pequenas variações na corrente elétrica, permitindo identificar alterações no comportamento da resistência elétrica e contribuindo para ações de manutenção preventiva. Além disso, os dados obtidos poderão futuramente subsidiar estratégias de manutenção preditiva baseadas na análise da Curva P-F.

A medição da tensão de alimentação da resistência é realizada pelo sensor de tensão ZMPT101B (Figura 4), que oferece isolamento elétrico robusto via transformador integrado (USINAINFO, 2026).

Figura 4: Sensor de tensão Zmpt101b

Fonte: Usinainfo (2026)

A escolha do sensor ZMPT101B justifica-se pela necessidade de monitorar, com alta precisão e segurança, a tensão alternada nominal de 220V que alimenta as resistências. Por se tratar de um transformador de potencial com isolamento galvânico, este sensor protege o ESP32 de picos de tensão e ruídos da rede industrial, garantindo que o sinal enviado ao microcontrolador seja uma representação fiel e segura da forma de onda da rede.

2.4 Protocolo de Comunicação MQTT

Arquiteturas modernas de IIoT buscam a convergência entre a Tecnologia da Informação (TI) e a Tecnologia da Automação (TA) (CAMARGO, 2025).

O protocolo MQTT é ideal para dispositivos com recursos limitados devido à sua leveza e ao modelo *publish/subscribe*. Comparado aos protocolos CoAP (Constrained Application Protocol, protocolo projetado para comunicação em dispositivos com restrições de energia e processamento) ou HTTP (Hypertext Transfer Protocol, protocolo padrão de comunicação na web), o MQTT destaca-se pelo alto desacoplamento e pela eficiência em redes de baixa largura de banda (SOUSA, 2018; DALCIN, 2021).

Os dados processados são encapsulados e transmitidos via protocolo MQTT para o broker (servidor central responsável por receber as mensagens dos publishers

e distribuí-las aos subscribers), permitindo que o sistema supervisório realize a visualização e o armazenamento das variáveis em tempo real.

Para garantir a resposta rápida a falhas, utilizam-se alertas automatizados via Telegram, permitindo que a equipe de manutenção receba notificações em tempo real no smartphone (MENEGAZZI, 2021; MORAIS, 2023).

A figura 5 ilustra o fluxo de comunicação entre os componentes do modelo publish/subscribe. O Publisher envia os dados ao Broker MQTT, que atua como servidor intermediário responsável por receber e distribuir as mensagens aos Subscribers conectados. Essa arquitetura garante eficiência e escalabilidade em redes de baixa largura de banda, sendo amplamente utilizada em aplicações de IIoT e Indústria 4.0.

Figura 5: Fluxo de comunicação do modelo publish/subscriber MQTT

Fonte: Autoria Própria (2026)

2.5 Sistema de Supervisão e Controle

Para a consolidação da Indústria 4.0, a transformação de dados brutos em informações inteligíveis é fundamental. Nesse contexto, utilizam-se os sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), que permitem o monitoramento remoto, a visualização de variáveis em tempo real e o armazenamento de históricos para análises futuras.

Segundo SOUZA (2018), a utilização desses sistemas integrados a protocolos como o MQTT é ideal para a área industrial, pois garante um monitoramento eficiente e de baixo consumo de recursos, facilitando a interação com objetos inteligentes e a prevenção de falhas.

No desenvolvimento deste protótipo, optou-se pela utilização do aplicativo IoT MQTT Panel como interface supervisória. Trata-se de um aplicativo móvel gratuito, disponível para Android e iOS (iPhone Operating System), que permite criar painéis

personalizados para monitoramento e controle de dispositivos conectados via protocolo MQTT.

Essa escolha se justifica pela compatibilidade com arquiteturas IIoT e protocolos de comunicação como MQTT, permitindo a integração eficiente entre o microcontrolador ESP32, o broker MQTT e a interface de visualização. Além disso, o uso do IoT MQTT Panel possibilitou a validação rápida do protótipo, garantindo o acompanhamento das variáveis de processo e a geração de alertas sem a necessidade de desenvolver uma plataforma supervisória dedicada, mantendo a aderência ao contexto da Indústria 4.0.

3 Metodologia

3.1 Abordagem Metodológica

A metodologia empregada neste trabalho é a DSR (Design Science Research, metodologia voltada para a criação e avaliação de artefatos tecnológicos), aplicada para resolver um problema prático complexo. O artefato desenvolvido é o Sistema de Coleta Automática de Dados e Monitoramento Preventivo em Máquina Termoformadora, cuja finalidade é otimizar a gestão da manutenção e a segurança operacional em um ambiente industrial simulado.

3.2 Etapas da DSR

3.2.1 Identificação e Motivação do Problema

O ponto de partida foi a observação da ineficiência e dos riscos associados à coleta manual de dados elétricos em painéis energizados de máquinas termoformadoras. A motivação reside na necessidade de propor uma solução alinhada à Indústria 4.0 que utilize o monitoramento em tempo real para aumentar a assertividade das ações de manutenção e reduzir a exposição do operador ao risco elétrico, em conformidade com a NR-10 (Norma Regulamentadora nº 10, que trata da segurança em instalações e serviços em eletricidade).

3.2.2 Definição dos Objetivos do Artefato

O sistema foi concebido para alcançar três objetivos fundamentais:

- Monitorar e processar variáveis de corrente e tensão em tempo real com isolamento galvânico, utilizando sensores ACS712 (sensor de corrente elétrica) e ZMPT101B (sensor de tensão elétrica);

- Classificar o estado de operação das resistências, identificando o intervalo entre a falha potencial e a falha funcional, conforme a Curva P-F (modelo que representa o intervalo entre falha potencial e falha funcional);

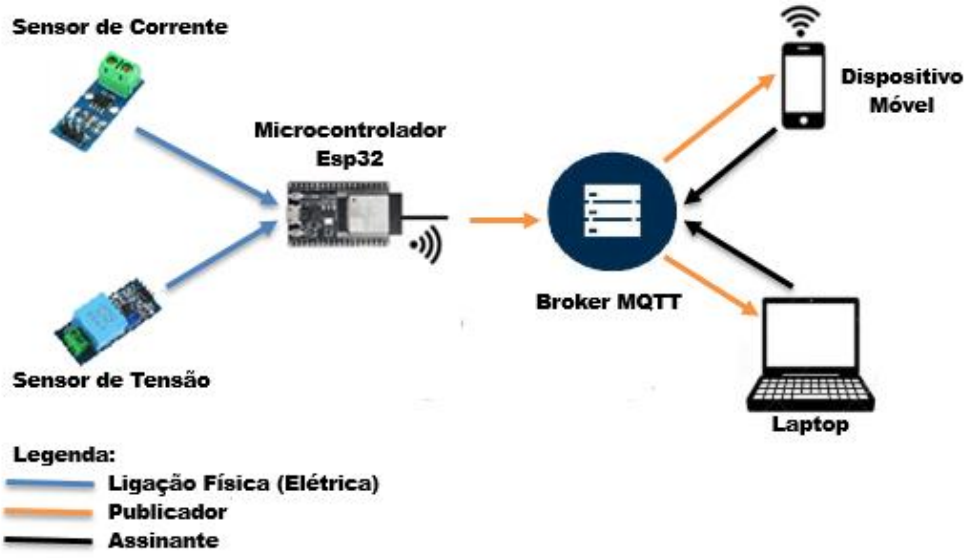
- Gerar alertas remotos imediatos via Telegram e interface supervisória, permitindo o diagnóstico de falhas como “Perda de Eficiência” ou “Interrupção de Carga”.

3.2.3 Design e Desenvolvimento do Artefato

O design do artefato baseou-se em uma arquitetura de sistemas de IIoT (Industrial Internet of Things, ou Internet das Coisas Industrial). A coleta de dados é realizada pelo microcontrolador ESP32 (System on Chip com Wi-Fi e Bluetooth integrados), integrado aos sensores ACS712 (sensor de corrente elétrica) e ZMPT101B (sensor de tensão elétrica). O dispositivo opera como um nó de Edge Computing (processamento local), realizando o cálculo de valores RMS (Root Mean Square, ou valor eficaz da corrente/tensão) e a verificação de limites nominais antes da transmissão. A comunicação industrial foi estabelecida via protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport, protocolo leve de comunicação baseado no modelo publish/subscribe), utilizando o broker HiveMQ (plataforma de mensagens baseada em MQTT, desenvolvida pela empresa HiveMQ GmbH, que permite a intermediação segura e escalável dos dados entre publishers e subscribers) para a intermediação dos dados com o sistema supervisório. Nesse contexto, a interface homem-máquina (IHM) foi implementada por meio do aplicativo IoT MQTT Panel, que permite a visualização em tempo real das variáveis monitoradas e a geração de alertas remotos.

O fluxo de comunicação do sistema, ilustrado na Figura 6, segue a arquitetura publish/subscribe do protocolo MQTT. Os sensores ACS712 e ZMPT101B estão fisicamente conectados ao microcontrolador ESP32, que atua como publisher, responsável por coletar e transmitir os dados elétricos. Essas mensagens são enviadas ao broker HiveMQ, que desempenha o papel de servidor intermediário, recebendo e distribuindo as informações conforme os tópicos definidos. O aplicativo IoT MQTT Panel, instalado em dispositivos móveis, atua como subscriber, consumindo os dados disponibilizados pelo broker. Essa estrutura garante escalabilidade, confiabilidade e a possibilidade de múltiplos assinantes acompanharem simultaneamente as variáveis de processo, viabilizando tanto a visualização em tempo real quanto o disparo de alertas remotos.

Figura 6: Arquitetura do protótipo de monitoramento via MQTT



Fonte: Autoria Própria (2026)

3.2.4 Demonstração e Avaliação

A demonstração do protótipo foi realizada em uma bancada de testes, onde foram introduzidas falhas controladas para verificar a resposta do sistema. Inicialmente, utilizou-se um dimmer (dispositivo eletrônico que permite variar a tensão aplicada a uma carga elétrica de forma controlada), simulando condições de degradação e alterações operacionais do sistema. Essa variação permitiu observar como o sistema reagia diante de mudanças graduais no comportamento elétrico, representando cenários de perda de eficiência. Em seguida, foi simulada uma falha de alimentação por meio do acionamento de um botão, que enviava um comando ao microcontrolador ESP32. Esse, por sua vez, acionava um módulo relé responsável por desenergizar a contatora que alimentava a zona correspondente, reproduzindo uma interrupção abrupta de carga.

A avaliação concentrou-se na utilidade da interface de monitoramento implementada no aplicativo IoT MQTT Panel e na confiabilidade da redundância de alertas gerados pelo sistema. Foram analisados aspectos como a latência de resposta, a precisão dos valores coletados e a consistência na emissão de notificações remotas. Os resultados obtidos comprovaram a eficácia da solução, demonstrando que o protótipo é capaz de identificar alterações operacionais relevantes e fornecer suporte à manutenção preventiva em ambiente industrial simulado.

4 Desenvolvimento do projeto

Esta seção detalha a construção do artefato tecnológico, integrando hardware (componentes físicos), software (programação e lógica de controle) e protocolos de comunicação para a solução do problema proposto.

4.1 Arquitetura de Hardware, Proteção e Conectividade

O sistema foi projetado para o monitoramento de duas zonas de aquecimento independentes, utilizando resistências de estufa de 350 W / 220 V AC (Figura 7).

Figura 7: Resistência utilizada

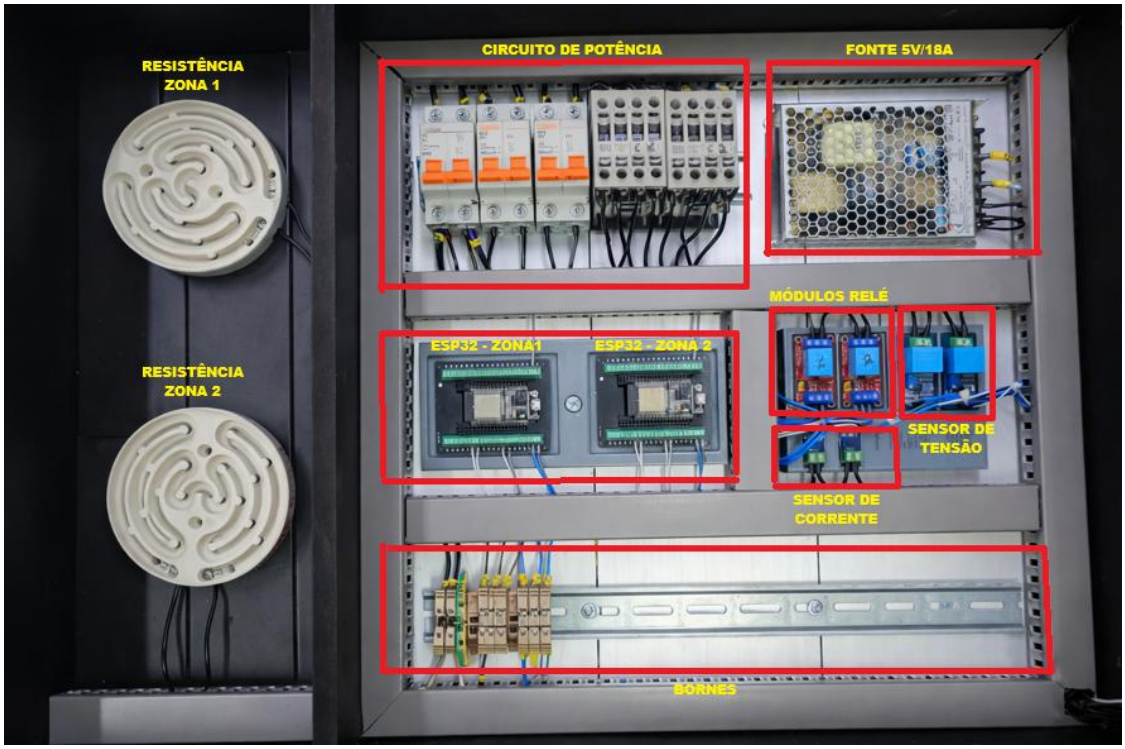
Fonte: Mercado Livre (2026)

A estrutura de hardware foi dividida em Circuito de Potência e Circuito de Controle para garantir a seletividade e a segurança operacional, conforme as diretrizes da NR-10 (Norma Regulamentadora nº 10, que estabelece requisitos para a proteção de trabalhadores em instalações e serviços em eletricidade):

- Circuito de Potência: O circuito de potência é responsável pela alimentação e chaveamento das resistências de aquecimento. A alimentação geral é protegida por um disjuntor bipolar de 6 A / 220 V AC, garantindo a segurança elétrica do sistema. Cada zona de aquecimento é energizada por meio de uma contatora de potência, acionada pelo módulo relé. Essa configuração assegura o seccionamento físico das cargas e atende às diretrizes da NR-10 (Norma Regulamentadora nº 10, que estabelece requisitos para a proteção de trabalhadores em instalações e serviços em eletricidade).

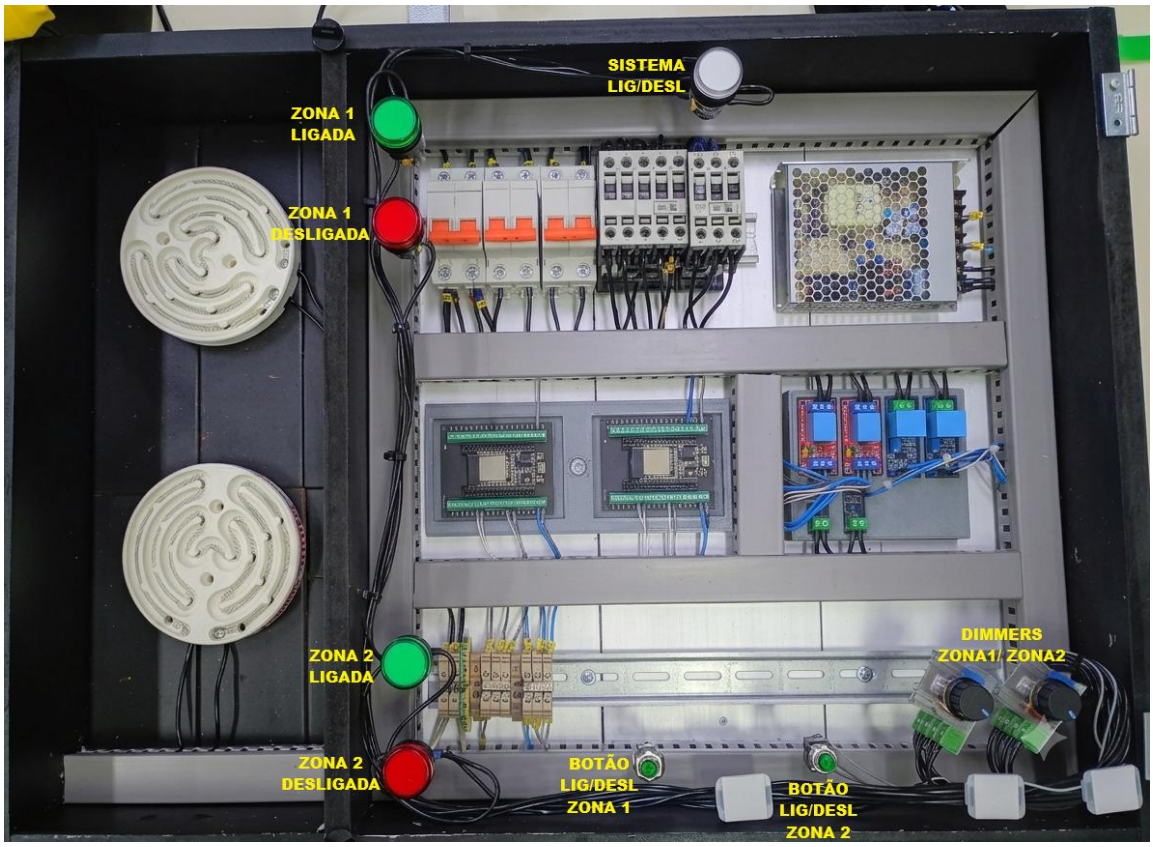
- Circuito de Controle: O circuito de controle é responsável pelo gerenciamento lógico e pela comunicação entre os dispositivos. O acionamento de cada zona ocorre individualmente por meio de uma botoeira de comando, que envia um sinal digital ao ESP32 (System on Chip com Wi-Fi e Bluetooth integrados). Após o processamento lógico, o microcontrolador aciona o módulo relé, que por sua vez energiza a bobina da contatora de potência. Essa arquitetura garante isolamento entre os circuitos de controle e potência, proporcionando maior segurança e confiabilidade operacional.

Figura 8: Protótipo do Sistema interno do painel montado



Fonte: Autoria Própria (2026)

Figura 9: Painel com Botões, Sinalizadores e Dimmers



Fonte: Autoria Própria (2026)

4.2 Lógica de programação e tratamento de sinais

O firmware do sistema foi desenvolvido em ambiente IDE Arduino, utilizando a linguagem C++. A lógica de programação foca na precisão da amostragem, empregando algoritmos de integração para o cálculo do valor RMS (Root Mean Square) das grandezas de corrente e tensão. Esse processamento é estruturado para capturar 2000 amostras por ciclo de leitura, garantindo que as medições reflitam fielmente o comportamento das resistências na rede elétrica de 60 Hz.

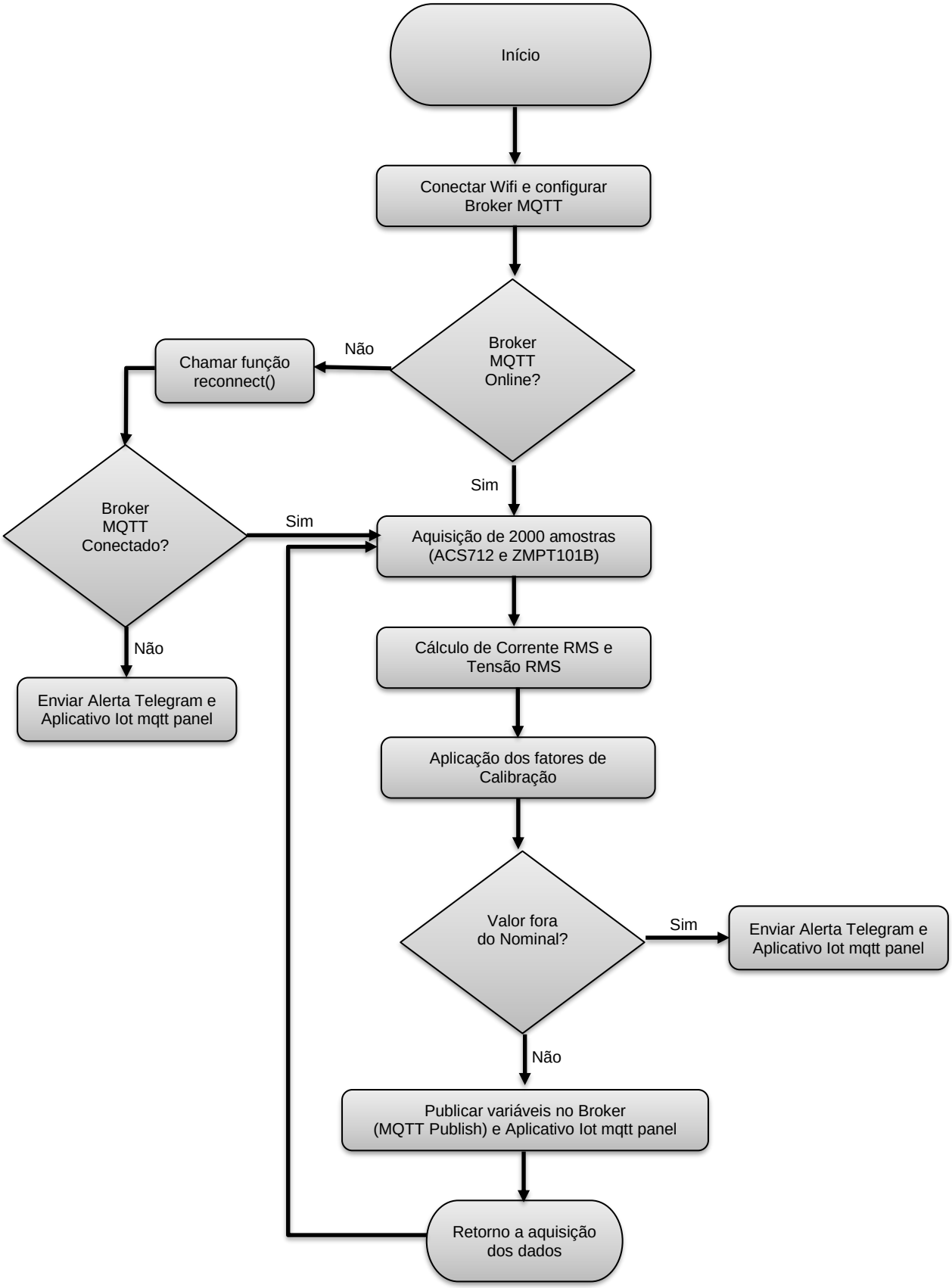
O ESP32 atua como um nó sensor inteligente (Edge Computing), realizando o processamento local para evitar a sobrecarga da rede com dados brutos. Como demonstrado na Figura 10, o algoritmo executa uma rotina de verificação de conectividade antes de cada envio, garantindo a robustez do sistema frente a possíveis instabilidades de rede.

Para a infraestrutura de comunicação, utilizou-se o broker HiveMQ (plataforma de mensagens baseada em MQTT). A escolha por esta configuração visa garantir:

• Escalabilidade e monitoramento distribuído: Permite que os dados sejam acompanhados de diferentes pontos da planta industrial ou remotamente;

• Gestão de alertas: facilita a integração direta com o bot (programa automatizado) de mensagens do Telegram, permitindo notificações instantâneas caso as variáveis ultrapassem os limites nominais configurados.

Figura 10: Fluxograma do Sistema



Fonte: Autoria Própria (2026)

4.3 Configuração da rede e Broker MQTT

A infraestrutura de comunicação foi projetada para operar com o broker HiveMQ, baseado no protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), garantindo a conectividade entre os dispositivos e o tráfego eficiente de dados. Essa arquitetura permite o monitoramento das informações do sistema com baixa latência e elevada confiabilidade. O ESP32 conecta-se via Wi-Fi ao roteador da rede industrial, utilizando o protocolo DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) com identificação por ID único (identificador único), assegurando estabilidade e integridade na troca de informações.

Como intermediário da comunicação, o HiveMQ é responsável por receber as publicações do microcontrolador e distribuí-las aos assinantes (subscribers). A configuração foi estruturada por meio de tópicos hierárquicos e modulares, facilitando a organização e permitindo que a mesma lógica de firmware (programa gravado na memória do dispositivo, responsável pelo controle do hardware) seja replicada para diferentes áreas da máquina sem a necessidade de reestruturação do código-base.

O mapeamento dos tópicos para as zonas de resistência segue o padrão:

- termoz1/corrente: Publicação dos dados de corrente da resistência na Zona 1;
- termoz1/tensao: Publicação dos dados de tensão da resistência na Zona 1;
- termoz2/corrente: Reservado para o monitoramento de corrente na Zona 2;
- termoz2/tensao: Reservado para o monitoramento de tensão na Zona 2.

O protocolo MQTT foi selecionado devido à sua arquitetura leve, caracterizada pelo baixo consumo de largura de banda e pela reduzida demanda de recursos computacionais, aspectos fundamentais para aplicações embarcadas utilizando o microcontrolador ESP32. Essa abordagem permite a execução simultânea dos cálculos RMS e da comunicação de dados sem comprometer o desempenho do sistema.

Na camada de supervisão e visualização, utilizou-se o aplicativo IoT MQTT Panel, configurado como cliente MQTT para monitoramento das variáveis de processo em tempo real. A solução permite a criação de interfaces gráficas personalizadas para visualização das variáveis elétricas monitoradas, facilitando o acompanhamento

operacional do sistema por dispositivos móveis.

Além disso, o sistema integra notificações automáticas via Telegram para condições críticas de operação, proporcionando maior rastreabilidade, agilidade na tomada de decisão e visibilidade operacional.

4.4 Interface supervisória e sistema de alerta

A interface supervisória foi implementada por meio do aplicativo IoT (Internet of Things) MQTT Panel, configurado como cliente MQTT. Essa solução permite que os dados publicados pelo ESP32 no broker HiveMQ sejam recebidos e exibidos em tempo real em dispositivos móveis. As imagens apresentadas demonstram a construção de painéis gráficos personalizados, nos quais cada variável elétrica monitorada (corrente e tensão) é representada por indicadores visuais, como medidores analógicos, gráficos de tendência e campos numéricos.

Essa configuração possibilita ao operador acompanhar de forma intuitiva o comportamento das resistências da máquina, verificando instantaneamente se os valores estão dentro dos limites nominais. Além disso, a interface permite a organização modular por zonas de resistência, garantindo que cada área da planta seja supervisionada de forma independente, mas dentro da mesma lógica de firmware.

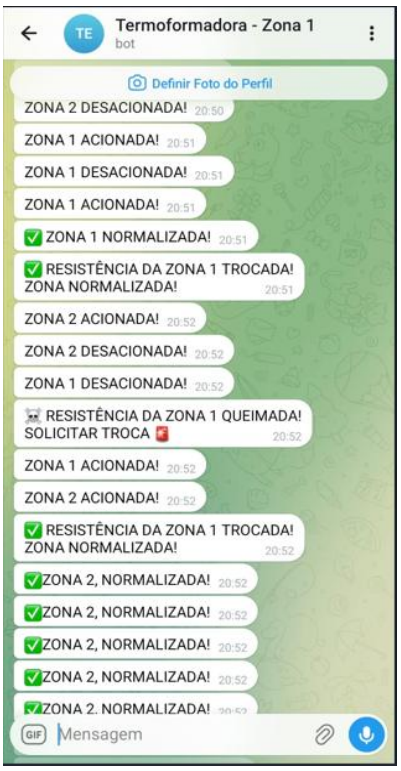
O sistema de alerta foi integrado diretamente ao bot do Telegram. Sempre que uma variável ultrapassa o limite configurado, o firmware (software embarcado no microcontrolador) envia uma notificação automática ao broker, que é repassada ao bot. O operador recebe, então, uma mensagem instantânea em seu dispositivo móvel, indicando a zona afetada e o tipo de anomalia (corrente ou tensão fora do nominal). Esse mecanismo garante agilidade na tomada de decisão, pois o responsável pela operação é informado imediatamente, mesmo fora do ambiente industrial.

- Indicadores de Corrente, Tensão, Gráficos de Variáveis e Alertas no Telegram:

Figura 11: Indicadores de Corrente e Tensão

Figura 12: Interface de Gráficos

Figura 13: Alertas via Telegram



Fonte: Autoria Própria (2026)

5 Testes e resultados

A etapa de testes teve como objetivo validar a eficácia do sistema no monitoramento contínuo das grandezas elétricas, substituindo a necessidade de medições manuais realizadas com multímetros em painéis elétricos energizados. Para isso, foram realizados testes controlados em duas zonas de aquecimento da bancada experimental.

5.1 Simulação de falhas e tempo de resposta

Para validação da detecção de anomalias, ambas as zonas de aquecimento foram submetidas aos mesmos procedimentos de teste:

- **Variação de corrente elétrica**: Utilizou-se um dimmer para realizar a variação gradual da corrente nas resistências elétricas, simulando condições de degradação e alteração operacional do sistema. O monitoramento permitiu registrar a redução da corrente elétrica em relação aos valores nominais, demonstrando a capacidade do sistema em identificar comportamentos anormais associados ao desgaste dos componentes, dentro do conceito de manutenção preditiva.

- **Interrupção da alimentação elétrica**: Simulou-se uma falha crítica por meio do desligamento do disjuntor responsável pela alimentação da respectiva zona de aquecimento. Com a interrupção da alimentação elétrica, o sistema identificou imediatamente a ausência de corrente elétrica e realizou o disparo automático de alertas via Telegram e interface supervisória.

5.2 Análise da efetividade do sistema

Os resultados obtidos demonstram que a automatização da coleta e supervisão das variáveis elétricas reduz significativamente a necessidade de intervenções manuais em painéis elétricos, contribuindo para maior segurança operacional e conformidade com os princípios da NR-10.

Além disso, o monitoramento contínuo das variáveis elétricas possibilita a identificação antecipada de anomalias e falhas operacionais, permitindo ações preventivas antes da ocorrência de paradas não planejadas. O sistema apresentou

respostas rápidas e confiáveis durante os testes, evidenciando a viabilidade da aplicação de conceitos de Computação de Borda e comunicação MQTT em sistemas industriais de monitoramento.

6 Considerações finais

O presente trabalho atingiu o objetivo de desenvolver e validar um protótipo funcional para o monitoramento de grandezas elétricas em máquinas termoformadoras. A integração entre o microcontrolador ESP32, sensores de corrente e tensão, protocolo MQTT e plataforma supervisória permitiu transformar um processo de inspeção manual e intermitente em um sistema automatizado de monitoramento contínuo e em tempo real.

A metodologia aplicada possibilitou validar o comportamento do sistema em diferentes condições operacionais, incluindo variações de corrente elétrica e falhas de alimentação simuladas na bancada experimental. Os testes demonstraram que o sistema foi capaz de detectar anomalias, registrar variáveis elétricas e gerar alertas automáticos de forma eficiente, contribuindo para redução do tempo de resposta em situações críticas e aumento da segurança operacional.

Adicionalmente, a utilização de conceitos de Edge Computing no processamento local das variáveis permitiu maior rapidez na análise das condições monitoradas, reduzindo a dependência de processamento externo e aumentando a confiabilidade da solução proposta.

Como limitação do projeto, observa-se que a precisão das medições pode sofrer influência de fatores como ruídos elétricos, harmônicos presentes na rede industrial e necessidade de calibração fina dos sensores utilizados.

O sistema desenvolvido enquadra-se no conceito de manutenção preventiva, pois o planejamento do monitoramento contínuo das grandezas elétricas permite antecipar intervenções de forma programada e assertiva. Ao substituir inspeções manuais intermitentes por medições automatizadas em tempo real, garante-se maior precisão na identificação de desvios e maior segurança operacional, evitando tanto intervenções desnecessárias quanto falhas críticas. Além disso, o registro contínuo e o armazenamento das variáveis monitoradas demonstram potencial para evolução em direção à manutenção preditiva, especialmente com o uso de análises históricas, inteligência artificial e algoritmos de aprendizado de máquina capazes de prever falhas e estimar a vida útil dos componentes.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de uma interface supervisória industrial mais robusta, utilizando plataformas SCADA, como o Elipse E3. Essa implementação permitiria ampliar as funcionalidades de supervisão do sistema, incorporando recursos como armazenamento histórico de dados, gerenciamento avançado de alarmes, geração de relatórios e visualização centralizada das variáveis de processo em tempo real.

Além disso, a utilização de uma plataforma supervisória industrial contribuiria para aumentar a escalabilidade, confiabilidade e aplicabilidade do sistema em ambientes industriais de maior complexidade.

Referências

BALDISSARELLI, Luciano; FABRO, Elton. **Manutenção preditiva na indústria 4.0**. Scientia cum Industria, v. 7, n. 2, p. 12–22, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332598729_Manutencao_Preditiva_na_industria_40.
Acesso em: 3 set. 2025.

CAMARGO, Guilherme Rezende Pereira. **Interoperabilidade entre controladores industriais, sistema de monitoramento web e armazenamento de dados**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia — ou o curso correspondente; ver no PDF) – Instituto Federal de Goiás, 2025. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/2234/1/tcc_Guilherme%20Rezende%20Pereira%20Camargo.pdf
Acesso em: 21 nov. 2025.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Oportunidades para a Indústria 4.0: nova versão. Brasília: CNI, 2017**. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/d9/ff/d9ff9d99-1a51-43ff-bc2a-b2187e90c35a/oportunidades_para_a_industria_40_2603_nova_versao.pdf.
Acesso em: 02 out. 2025.

DALCIN, Gerson. **Sistema para aquisição de dados de máquinas termoformadoras utilizando o protocolo SNMP**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica) – Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, 2021. Disponível em: https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/9666/TCC%20Gerson%20Dalcin.pdf?sequence=1&isAllowed=y
Acesso em: 02 out. 2025.

HERCOG, Darko; LERHER, Tone; TRUNTIČ, Mitja; TEŽAK, Oto. **Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices**. Sensors, Basel, v. 23, n. 15, p. 6739, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s23156739.
Acesso em: 20 nov. 2025.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B.
Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: HICSS - HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 49., 2016, Koloa, HI, EUA. Anais [...]. Koloa: IEEE, 2016.
Disponível em: https://
www.researchgate.net/publication/307864150_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review.
Acesso em: 08 out. 2025.

HEVNER et al., 2004 - **Design Science in Information Systems Research (MIS Quarterly)**
Disponível em:
www.researchgate.net/publication/201168946_Design_Science_in_Information_Systems_Research
Acesso em: 22 out. 2025.

KAGERMANN, Prof. Dr. Henning. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**: final report of the industrie 4.0 Working Group. Frankfurt: Acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013. Disponível em: https:// en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/
Acesso em: 23 out. 2025.

KUSMA, V. V.; CHIROLI, D. M. G.
A Indústria 4.0: uma revisão sobre os impactos e as modificações na dinâmica de trabalho do modelo atual. Principia, João Pessoa, v. 5, n. 3, p. 81-96, 2021. Disponível em:
https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/3496/1527.
Acesso em: 23 out. 2025.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A.
A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems. 2015.
Disponível em: http://alvarestech.com/temp/Industria4.0/2019/ArquiteturaCPS.pdf.
Acesso em: 18 out. 2025.

MENEGAZZI, Pedro Henrique. **Monitoramento de aplicações em tempo real utilizando o Telegram** [recurso eletrônico]. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Tecnologias Digitais). Orientadora: Elisa Boff. Disponível em:
https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/10697/TCC%20Pedro%20Henrique%20Menegazzi.pdf?sequence=1
Acesso em: 21 nov. 2025.

MORAIS, Vinícius. **IoT passo a passo: PoS-Ap** [recurso eletrônico]. Belo Horizonte: UFMG, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação). Disponível em:
https://mover.fundep.ufmg.br/wp-content/uploads/2023/08/TCC_ViniciusMorais_IOT_PassoAPasso_PosAp-1.pdf
Acesso em: 21 nov. 2025.

NEVES, Cleonor; DUARTE, Leonardo; VIANA, Nairon; LUCENA JR, Vicente Ferreira de. **Os dez maiores desafios da automação industrial: as perspectivas para o futuro.** In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação, 2007.
Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Vicente-Lucena-Jr/publication/324452815_OS_DEZ_MAIORES_DESAFIOS_DA_AUTOMACAO_INDUSTRIAL_AS_PERSPECTIVAS_PARA_O_FUTURO/links/5ace3247aca2723a3341c31b/OS-DEZ-MAIORES-DESAFIOS-DA-AUTOMACAO-INDUSTRIAL-AS-PERSPECTIVAS-PARA-O-FUTURO.pdf.
Acesso em: 20 nov. 2025.

Norma Regulamentadora nº 10 — **Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Brasília: MTE, [s.d.]. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-10.pdf
Acesso em: 10 set. 2025.

OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial**. Revista Gestão Industrial, [S.l.], v. 4, n. 2, p. xx-xx, 2007. Disponível em: https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/16/13.
Acesso em: 20 nov. 2025.

PIRES, Caique Aparecido; OKADA, Roberto Hirochi. **MANUTENÇÃO PREDITIVA: estratégia de produção e redução de custos**. Taquaritinga, SP: Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga (FATEC), 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343412673_MANUTENCAO_PREDITIVA_estrategia_de_producao_e_reducao_de_custos.
Acesso em: 20 nov. 2025.

SANTOS NETO, Manoel Ferreira; LEITE, Denisson Santana; NASCIMENTO, Willem Vieira. **Revisão bibliográfica da manutenção preditiva e seus conceitos de tecnologia atrelados a Indústria 4.0.** 2018. Trabalho apresentado no Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe (10. ed., 2018, São Cristóvão, SE), Anais [...]. Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.
Disponível em:
https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/10428/2/RevisaoBibliograficaManutencao.pdf
Acesso em: 12 out. 2025.

SILVA, Mikaelly Andrade da. ***Indústria 4.0: uma análise bibliométrica*.** 2024. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras, 2024.
Disponível em: https//:
repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/32763/1/Mikaelly%20Andrade%20da%20Silva.pdf
Acesso em: 12 out. 2025.

SOUSA, Daniel Silva de. **Estudo da aplicação de um sistema IoT baseado no protocolo de comunicação MQTT à área da robótica industrial** [recurso eletrônico]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24847/3/EstudoAplicacaoSistema.pdf
Acesso em: 12 out. 2025.

SCHWAB, K.
The Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum, 2016.
Acesso em: 12 out. 2025.

USINAINFO. **Sensor de corrente ACS712 5A AC/DC com efeito Hall**. [s.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-corrente/sensor-de-corrente-acs712-5a-ac-dc-com-efeito-hall-5701.html.
Acesso em: 10 out. 2025.

USINAINFO**. Sensor de tensão AC 0–250 V ZMPT101B**. [s.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-tensao/sensor-de-tensao-ac-0-250v-zmpt101b-voltimetro-para-arduino-5658.html
Acesso em: 10 out. 2025.

XU, H.; YU, W.; GRIFFITH, D.; GOLMIE, N.
A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective. IEEE Access, v. 6, p. 2244–2260, 2018.
Disponível em: https:// www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/4557/2227
Acesso em: 12 out. 2025.

Apêndice A – Código fonte do Firmware (Esp32)

Este apêndice apresenta o código-fonte integral desenvolvido em ambiente IDE Arduino, utilizando linguagem C++, para o microcontrolador ESP32. O algoritmo é responsável pela leitura analógica dos sensores de corrente ACS712 e de tensão ZMPT101B, realizando o processamento matemático necessário para a obtenção dos valores RMS das grandezas elétricas monitoradas.

O firmware gerencia a conexão com a rede Wi-Fi e a publicação das variáveis por meio do protocolo MQTT em um broker de mensagens, permitindo a integração dos dados em tempo real com a plataforma supervisória e o envio de notificações automáticas via bot de alertas do Telegram.

Nota: O código apresentado refere-se à Zona 1 de monitoramento. Para a implementação da Zona 2, a lógica de programação permanece equivalente, sendo necessárias apenas alterações na configuração dos pinos de entrada e saída e nos tópicos de publicação MQTT.

```
#include <Arduino.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <UniversalTelegramBot.h>
#include <ArduinoJson.h>
#include <time.h>


// ===== CONFIGURAÇÕES DE REDE WIFI P/ MQTT =====
const char* ssid = "moto e13";
const char* password = "opendoor";

// COLOQUE O IP DO SEU COMPUTADOR/SERVIDOR ONDE ESTÁ
const char* mqtt_server = "broker.hivemq.com";
const int mqtt_port = 1883;

// Se tiver senha, coloque aqui. Se não, deixe vazio ""
const char* mqtt_user = "";
const char* mqtt_pass = "";

```

```
23  WiFiClient termotccz1;
24  PubSubClient client(termotccz1);
25
26  // ===== TELEGRAM =====
27  #define BOT_TOKEN "8634631296:AAGdVHS_yl8IUBuGEbHY2IqIm7FFskiOGgg"
28  #define CHAT_ID "1179966202"
29
30
31   WiFiClientSecure secured_client;
32  UniversalTelegramBot bot(BOT_TOKEN, secured_client);
33
34
35  // ===== VARIÁVEIS DOS SENSORES =====
36  int pino_sensor = 36;
37  int pino_tensao = 39;
38  int pino_rele = 25;
39  int pino_botao = 26;
40
41  int ZERO_SENSOR = 0;
42  int ZERO_TENSAO = 0;
44  const int NUM_AMOSTRAS_ZERO = 5000;
45  const int NUM_AMOSTRAS_RMS = 2000;
46
47  const float SENSIBILIDADE = 0.185;
48  const float VREF = 3.3;
49  const int ADC_RESOLUCAO = 4095;
50
51  float FATOR_CALIBRACAO = 2.45; //REGULA CORRENTE
52  float FATOR_FINAL = 1.90;
53  float FATOR_TENSAO = 460; //REGULA A TENSÃO
54
55  // ===== CONTROLE DE ALERTAS =====
56  float limite_corrente = 0.70;
57  bool flag = false;
58  bool flag2 = false;
59  // ===== RELÉ =====
60  bool estado_rele = true;
61  bool ultimo_estado_botao = HIGH;
64  // ===== TIMERS =====
65  unsigned long lastPublish = 0;
66
67
68  // ===== FUNÇÕES DE CONEXÃO =====
69
70  void setup_wifi() {
71    delay(10);
72    Serial.println();
73    Serial.print("Conectando em ");
74    Serial.println(ssid);
75
76    WiFi.begin(ssid, password);
77
78    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
79      delay(300);
80      Serial.print(".");
81    }
82
83    Serial.println("\nWiFi conectado");
84    Serial.print("IP do ESP32: ");
85    Serial.println(WiFi.localIP());
86  }
```

```
92    void reconnect() {
93      while (!client.connected()) {
94        Serial.print("Tentando conexão MQTT");
95
96        // Gera um ID único para o ESP32
97        String clientId = "ESP32_Energia_";
98        clientId += String(random(0xffff), HEX);
99
100       // Tenta conectar (com ou sem usuário)
101       if (client.connect(clientId.c_str(), mqtt_user, mqtt_pass)) {
102         Serial.println("conectado com sucesso!");
103       } else {
104         Serial.print("falhou, rc=");
105         Serial.print(client.state());
106         Serial.println(" tentando novamente em 5 segundos");
107         delay(5000);
108       }
109
110     }
111   }
112
```

```
113   void setup() {
114     Serial.begin(115200);  // Velocidade padrão ESP32
115
116     setup_wifi();
117
118     client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
119
120     pinMode(pino_rele, OUTPUT);
121     digitalWrite(pino_rele, HIGH);
122
123     pinMode(pino_botao, INPUT_PULLUP);
124
125
126     pinMode(pino_sensor, INPUT);
127     pinMode(pino_tensao, INPUT);
128
129     analogSetAttenuation(ADC_11db);  // Importante para ler até 3.3V no ESP32
130
131     Serial.println("Auto-Zero sensores...");
132     long soma_corrente = 0;
133     long soma_tensao = 0;
```

```
135     for (int i = 0; i < NUM_AMOSTRAS_ZERO; i++) {
136       soma_corrente += analogRead(pino_sensor);
137       soma_tensao += analogRead(pino_tensao);
138       delayMicroseconds(50);
139     }
140
141     ZERO_SENSOR = soma_corrente / NUM_AMOSTRAS_ZERO;
142     ZERO_TENSAO = soma_tensao / NUM_AMOSTRAS_ZERO;
143
144    // CERTIFICADO TELEGRAM
145     secured_client.setCACert(TELEGRAM_CERTIFICATE_ROOT);
146
147     // SINCRONIZA HORARIO
148     configTime(0, 0, "pool.ntp.org");
149
150     Serial.print("Aguardando sincronizacao NTP");
151
152     time_t now = time(nullptr);
153
154     while (now < 24 * 3600)
155     {
156       Serial.print(".");
157       delay(100);
```

```
159        now = time(nullptr);
160      }
161
162      Serial.println();
163      Serial.println("Horario sincronizado!");
164
165      // MENSAGEM INICIAL
166      bot.sendMessage(CHAT_ID, "ZONA 1 iniciou o trabalho!", "");
167    }
168
169
170    void loop() {
171      if (!client.connected()) {
172        reconnect();
173      }
174      client.loop();
175
176    //// ==================
177    //Botão pulso
178    //// ================
179     bool leitura_botao = digitalRead(pino_botao);
```

```
181      if (leitura_botao == LOW && ultimo_estado_botao == HIGH) {
182
183        estado_rele = !estado_rele;
184
185        digitalWrite(pino_rele, estado_rele);
186
187        if (estado_rele) {
188
189          Serial.println("ZONA 1, ACIONADA!");
190
191         bot.sendMessage(CHAT_ID, "ZONA 1 ACIONADA!", "");
192
193        } else {
194
195          Serial.println("ZONA 1, DESACIONADA!");
196
197          bot.sendMessage(CHAT_ID, "ZONA 1 DESACIONADA!", "");
198        }
199
200        delay(200);
201      }
```

```
203      ultimo_estado_botao = leitura_botao;
204
205
206
207      // EXECUTA A CADA 500ms (sem travar)
208      if (millis() - lastPublish >= 500)
209    {
210
211        lastPublish = millis();
212
213
214      double soma_corrente = 0;
215      double soma_tensao = 0;
216
217      for (int i = 0; i < NUM_AMOSTRAS_RMS; i++) {
218
219        // ===== CORRENTE =====
220        int leitura_i = analogRead(pino_sensor);
221        int leitura_i_centrada = leitura_i - ZERO_SENSOR;
222
223        float tensao_i = leitura_i_centrada * (VREF / ADC_RESOLUCAO);
224        float corrente = tensao_i / SENSIBILIDADE;
```

```
226         soma_corrente += corrente * corrente;
227
228         // ===== TENSAO =====
229         int leitura_v = analogRead(pino_tensao);
230         int leitura_v_centrada = leitura_v - ZERO_TENSAO;
231
232         float tensao_v = leitura_v_centrada * (VREF / ADC_RESOLUCAO);
233
234         soma_tensao += tensao_v * tensao_v;
235
236         delayMicroseconds(200);
237       }
238
239       // ===== RMS =====
240       float corrente_eficaz = sqrt(soma_corrente / NUM_AMOSTRAS_RMS);
241       float tensao_eficaz_bruta = sqrt(soma_tensao / NUM_AMOSTRAS_RMS);
242
243       // ===== Calibração corrente =====
244       float corrente_MEDIA = corrente_eficaz * FATOR_CALIBRACAO;
245       float corrente_corrigida = corrente_MEDIA - FATOR_FINAL;
246       float corrente_rms = (corrente_corrigida < 0.05) ? 0 : corrente_corrigida;
```

```
248       // ===== Calibração tensão =====
249       float tensao_rms = (tensao_eficaz_bruta * FATOR_TENSAO) - 15;  // ajuste fino
250       if (tensao_rms < 0) tensao_rms = 0;
251
252
253       // ===== Saída =====
254       Serial.print("Corrente: ");
255       Serial.print(corrente_rms);
256       Serial.print(" A  |  ");
257
258       Serial.print("Tensao: ");
259       Serial.print(tensao_rms);
260       Serial.print(" V");
261
262       Serial.println();
263
264       // --- ENVIO MQTT ---
265       char msg_i[10];
266       char msg_v[10];
267
268       dtostrf(corrente_rms, 4, 2, msg_i);
269       dtostrf(tensao_rms, 4, 1, msg_v);
```

```
271       client.publish("termoz11/corrente", msg_i);
272       client.publish("termoz1/tensao", msg_v);
273
274      // ===== MONITOR SERIAL =====
275     Serial.printf("Corrente: %.2f A | Tensao: %.2f V\n",
276                   corrente_rms,
277                   tensao_rms);
278
279     // ====================================================
280     // ALERTA DE CORRENTE BAIXA
281     // ====================================================
282
283     if (corrente_rms < limite_corrente &&
284         corrente_rms > 0.05 &&
285         !flag)
286     {
287         flag = true;
288
289         bot.sendMessage(
290             CHAT_ID,
291             "⚠️ ATENÇÃO!\nCORRENTE MUITO BAIXA NA ZONA 1!\nPOSSÍVEL DEFEITO!",
292             ""
293         );
```

```
295         String msg = "Corrente medida: ";
296         msg += String(corrente_rms, 2);
297         msg += " A";
298
299         bot.sendMessage(CHAT_ID, msg, "");
300     }
301
302     // ====================================================
303     // RESET ALERTA CORRENTE
304     // ====================================================
305
306     if (corrente_rms > (limite_corrente + 0.20) &&
307         flag)
308     {
309         flag = false;
310
311         bot.sendMessage(
312             CHAT_ID,
313             "✅ ZONA 1 NORMALIZADA!",
314             ""
315         );
316     }
317
318     // ====================================================
319     // RESISTÊNCIA QUEIMADA
320     // ====================================================
321
322     // RELÉ LIGADO = LOW
323     if (corrente_rms < 0.20 &&
324         digitalRead(pino_rele) == LOW &&
325         !flag2)
326     {
327         flag2 = true;
328
329         bot.sendMessage(
330             CHAT_ID,
331             "☠️ RESISTÊNCIA DA ZONA 1 QUEIMADA!\nSOLICITAR TROCA 🚨",
332             ""
333         );
334
335         Serial.println("RESISTENCIA QUEIMADA!");
336     }
338     // ====================================================
339     // RESET RESISTÊNCIA
340     // ====================================================
341
342     if (corrente_rms > 0.50 &&
343         flag2)
344     {
345         flag2 = false;
346
347         bot.sendMessage(
348             CHAT_ID,
349             "✅ RESISTÊNCIA DA ZONA 1 TROCADA!\nZONA NORMALIZADA!",
350             ""
351         );
352
353         Serial.println("RESISTENCIA NORMALIZADA!");
354      }
355      }
356     }
```

Apêndice B – Diagrama Elétrico de Montagem

Fatec São Bernardo do Campo Adib Moises Dib

Centro Paula Souza

Fabricante	GRUPO DE TCC - AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL
Endereço do fabricante	AV Perreira barreto, 400 - Vila Baeta Neves, SBC - SP, 09751-000
Email	
Autor	Integrantes do grupo
Cliente	Fatec SBC
Endereço do cliente	AV Perreira barreto, 400 - Vila Baeta Neves, SBC - SP, 09751-000
Nome do projeto	SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA
Descrição do projeto	Aquisição de dados de corrente e tensão
Número do projeto	PA01_2026
Designação	Termoformadora 1
Data de criação	12/02/2026

DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO
	14/02/2026	Grupo TCC		00

CLIENTE : FATEC SBC

QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA

Folha : 1

De : 11

Página	Título	Autor
1/11	Capa	Grupo TCC
2/11	Sumário	GRUPO TCC
3/11	Legenda Cabos	Grupo TCC
4/11	Alimentação Painel	Grupo TCC
5/11	Distribuição VCC	Grupo TCC
6/11	Medição Corrente/Tensão	Grupo TCC
7/11	ESP32 A-B	Grupo TCC
8/11	Interface ESP / Relé-Contatora	Grupo TCC
9/11	Régua de bornes	Grupo TCC
10/11	Layout Interno	Grupo TCC
11/11	Lista de Materiais	Grupo TCC

SIMBOLOGIA	DESCRIÇÃO
————————	Cabo singelo

	14/02/2026	Grupo TCC		00
DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO

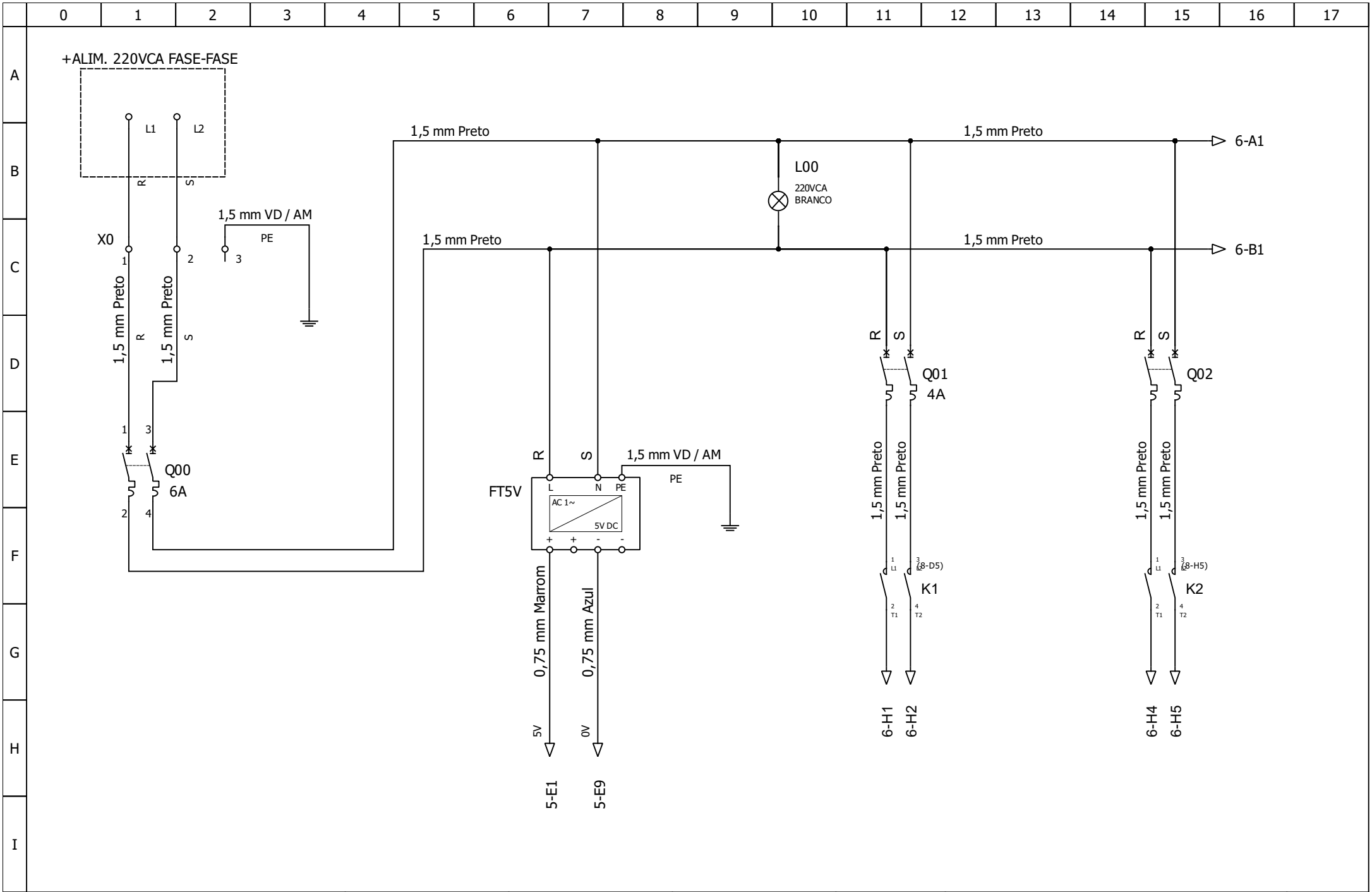
CLIENTE : FATEC SBC

QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA

Fatec São Bernardo do Campo Adib Moisés Dib

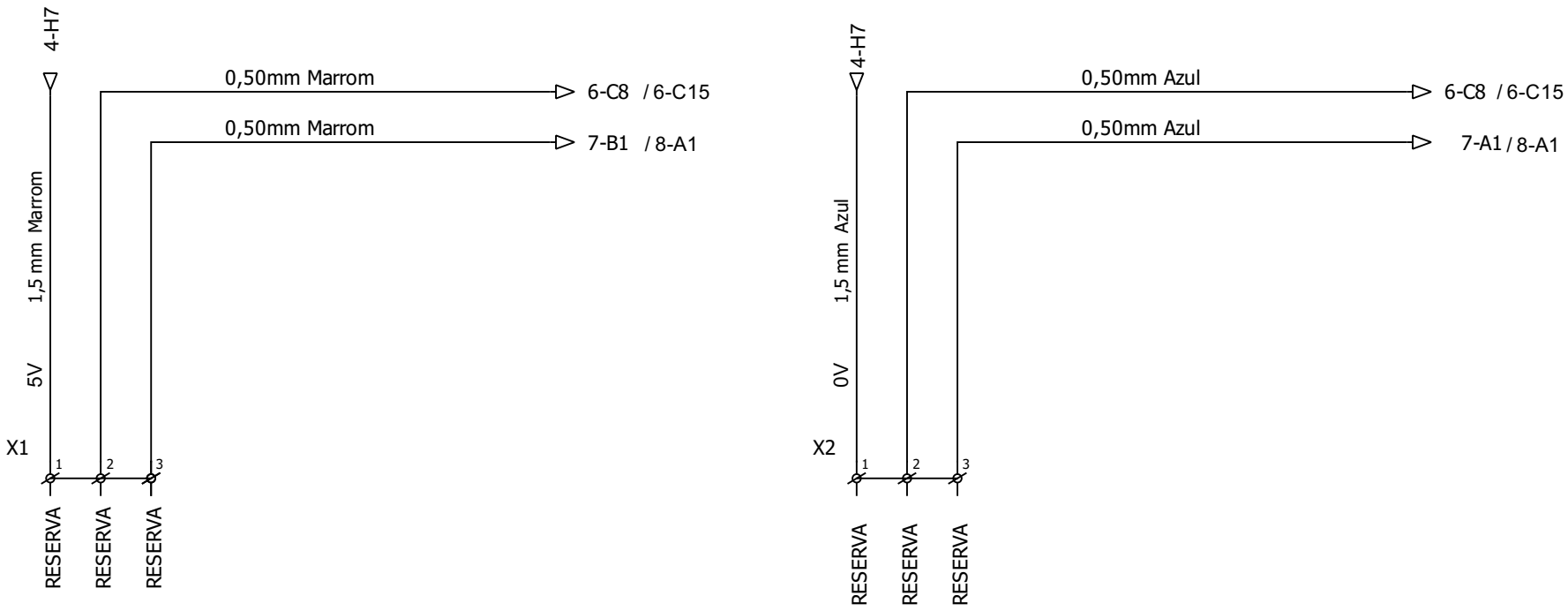
Folha : 3

De : 11



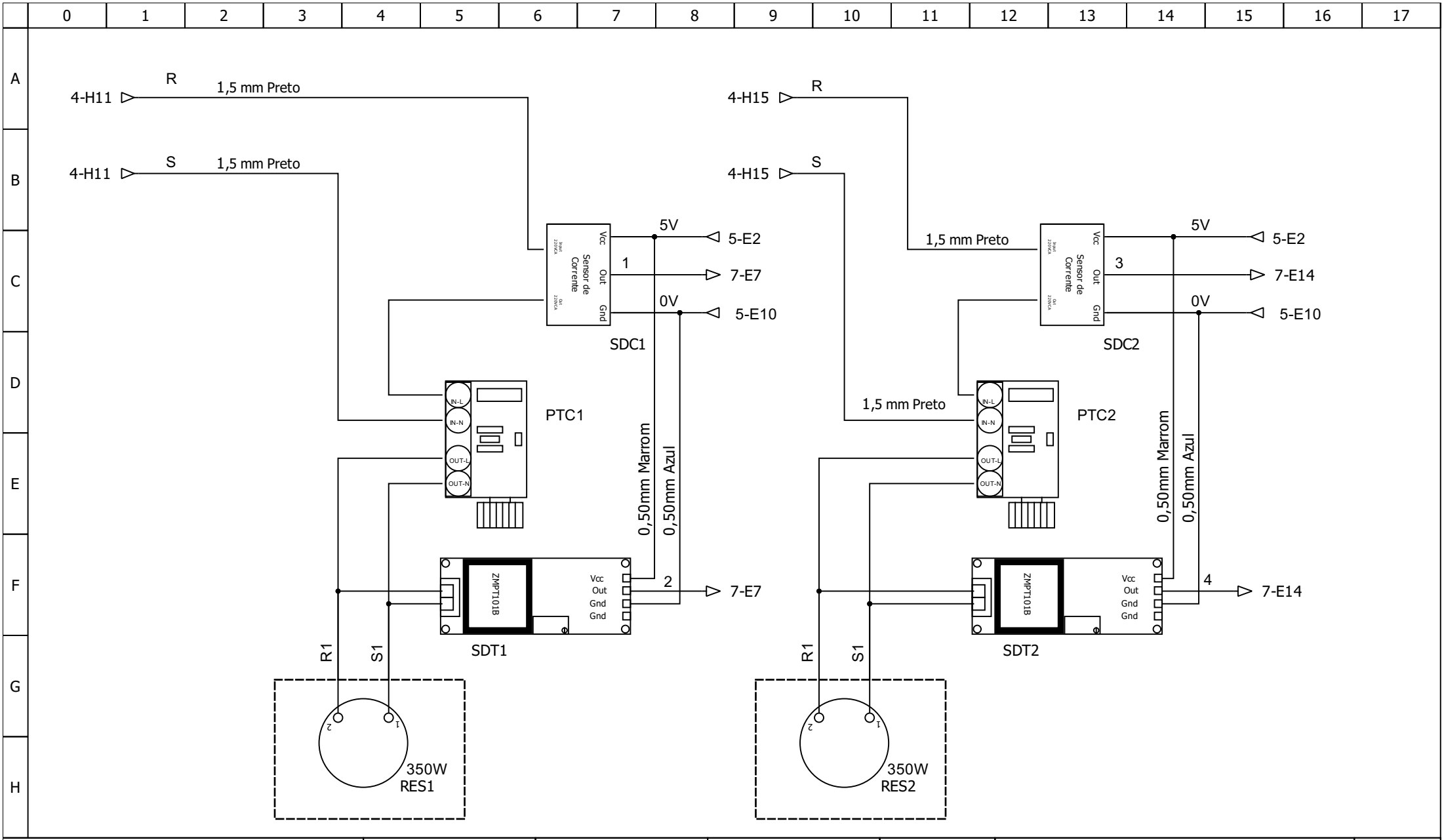
					CLIENTE : FATEC SBC
					QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA
	14/02/2026	Grupo TCC		00	Folha : 4
DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO	De : 11

Fatec São Bernardo do Campo Adib Moisés Dib

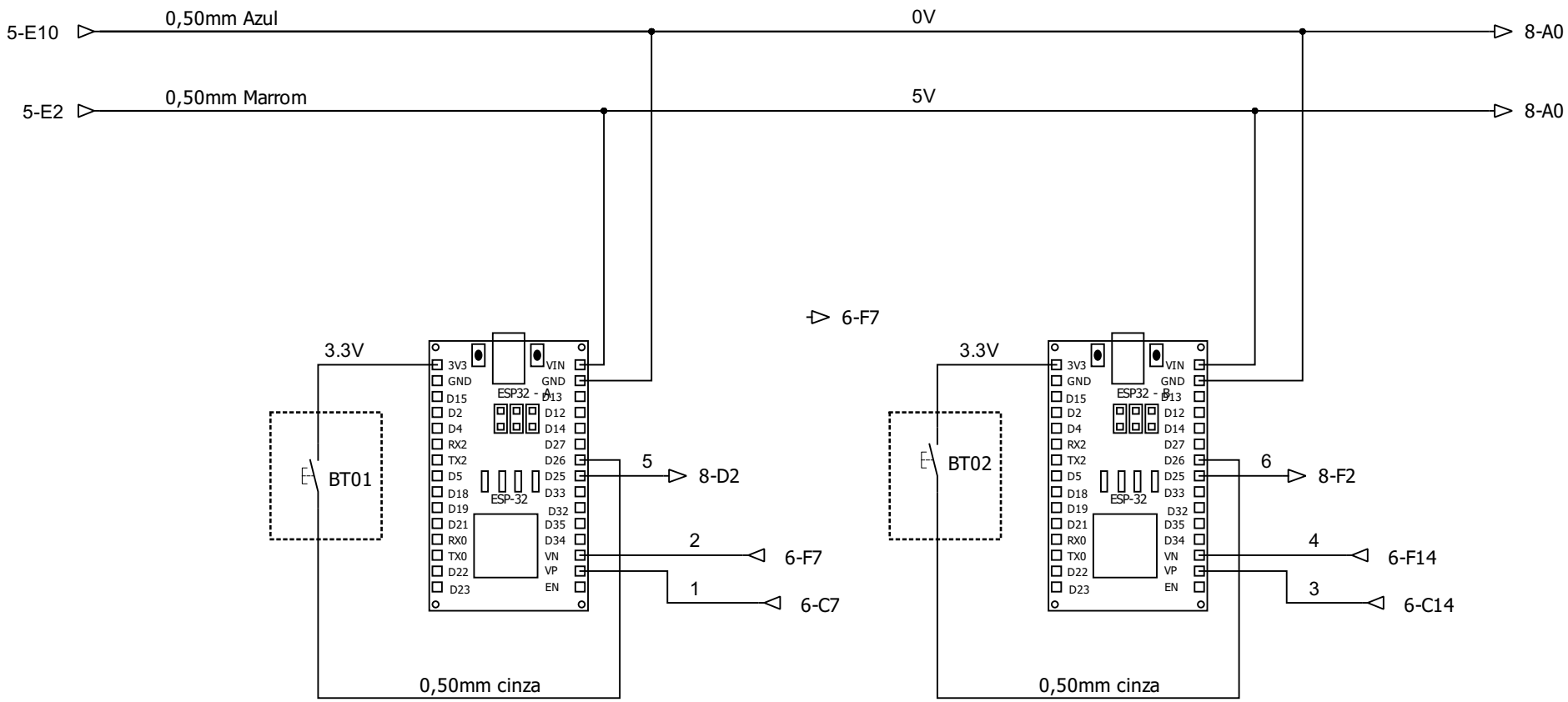


					CLIENTE : FATEC SBC
					QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA
	14/02/2026	Grupo TCC		00	Folha : 5
DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO	De : 11

Fatec São Bernardo do Campo Adib Moisés Dib

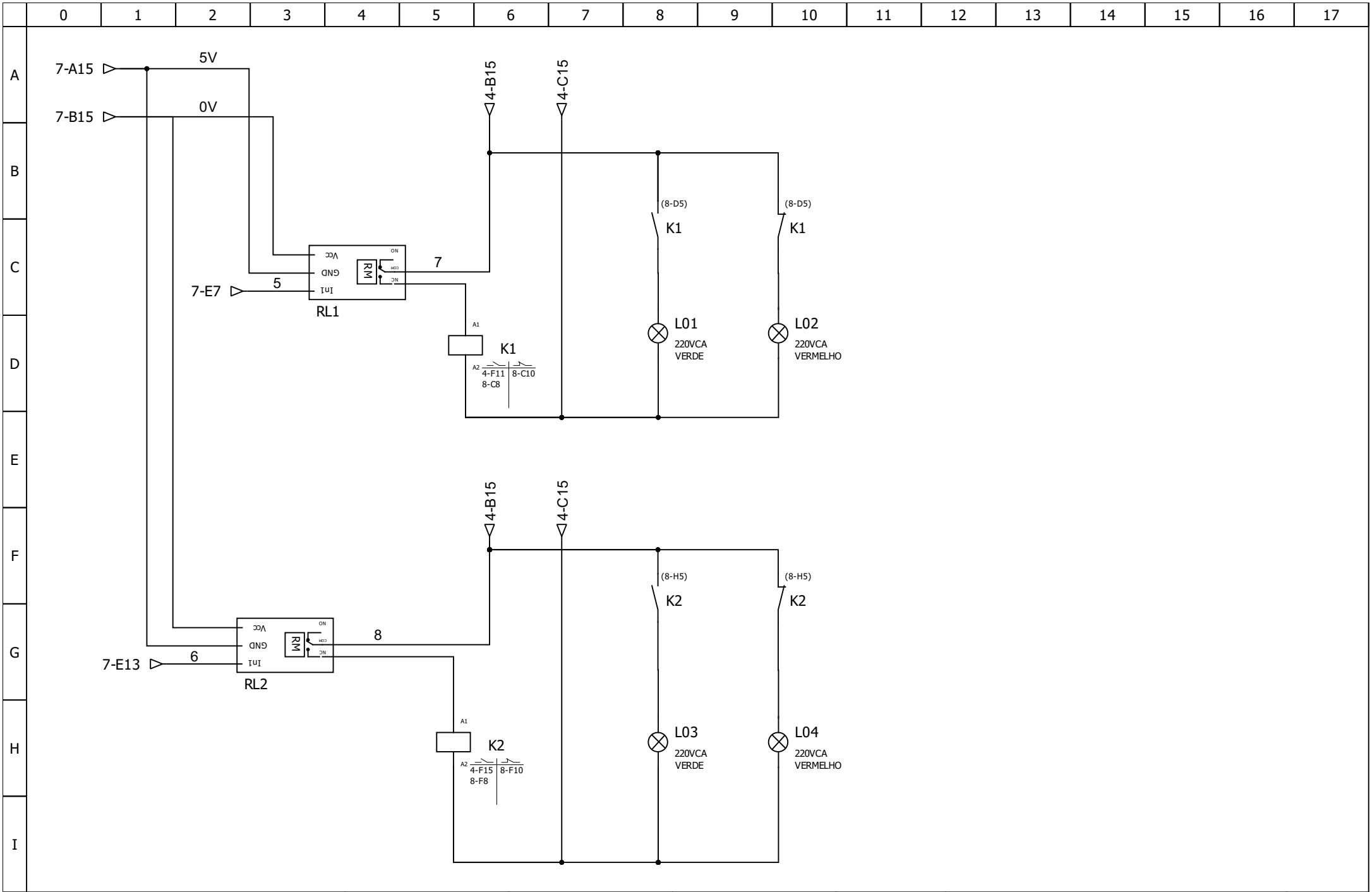


					CLIENTE : FATEC SBC	Fatec São Bernardo do Campo Adib Moisés Dib
					QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA	
	14/02/2024	Grupo TCC		00		Folha : 6
DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO		De : 11



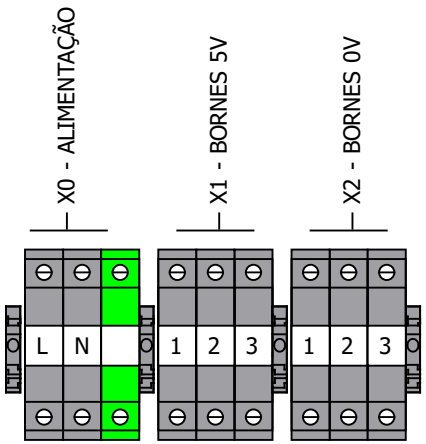
					CLIENTE : FATEC SBC
					QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA
	14/02/2026	Grupo TCC		00	Folha : 7
DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO	De : 11

Fatec São Bernardo do Campo Adib Moisés Dib



					CLIENTE : FATEC SBC
					QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA
	15/02/2026	Grupo TCC		00	Folha : 8
DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO	De : 11

Fatec São Bernardo do Campo Adib Moisés Dib

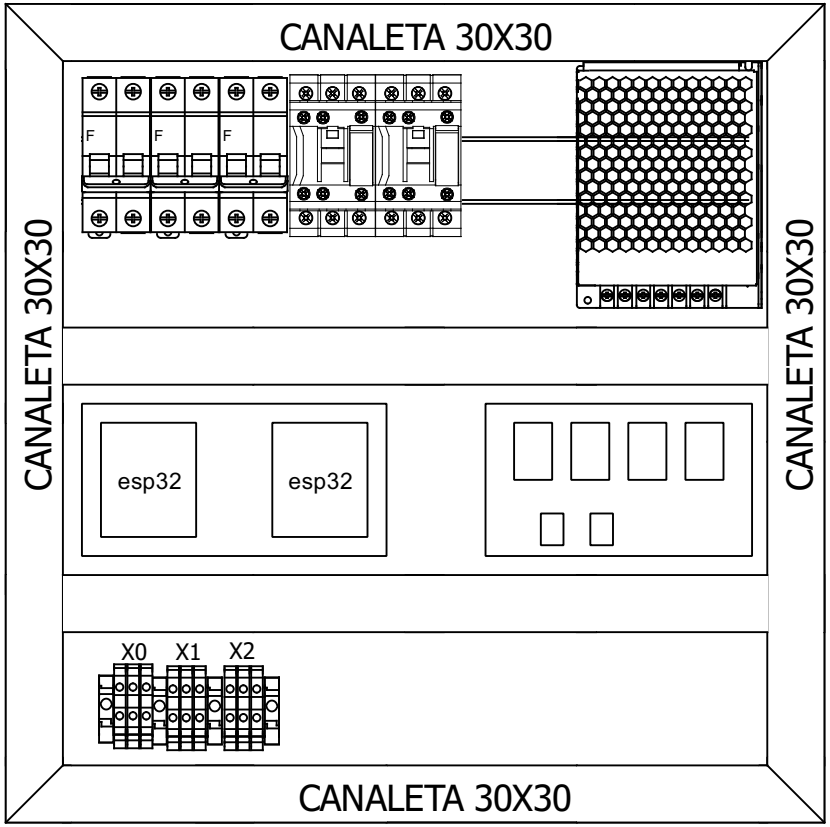


					CLIENTE : FATEC SBC
					QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA
	14/02/2026	Grupo TCC		00	
DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO	

Fatec São Bernardo do Campo Adib Moisés Dib

Folha : 9

De : 11



					CLIENTE : FATEC SBC	Fatec São Bernardo do Campo Adib Moisés Dib
					QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA	
	17/11/2023	Grupo TCC		00		Folha : 10
DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO		De : 11

TAG	Descrição	Fabricant	Fournisseur	Quantité
BT01	Botão de Pulso verde			
BT02	Botão de Pulso verde			
ESP32 - A	Esp32 Placa de Desenvolvimento Esp32 30pin	DAUZ		
ESP32 - B	Esp32 Placa de Desenvolvimento Esp32 30pin	DAUZ		
FT5V	Fonte chaveada de 100w 5V - LRS-100-5	Metaltex		
K1	Contator Auxiliar 3NA+1NF 190 A 220 VCA			
K2	Contator Auxiliar 3NA+1NF 190 A 220 VCA			
L00	Sinalizador Ø22mm plástico, LED, branco, 220VCA	Steck		
L01	Sinalizador Ø22mm plástico, LED, Verde, 220VCA	Schneider		
L02	Sinalizador Ø22mm plástico, LED, Vermelho, 220VCA	Schneider		
L03	Sinalizador Ø22mm plástico, LED, Verde, 220VCA	Schneider		
L04	Sinalizador Ø22mm plástico, LED, Vermelho, 220VCA	Schneider		
PTC1	Potenciômetro regulador de tensão AC			
PTC2	Potenciômetro regulador de tensão AC			
Q00	Disjuntor Bipolar 6A Curva C			
Q01	Disjuntor Bipolar 4A Curva C			
Q02	Disjuntor Bipolar 4A Curva C			
RES1	Resistência cerámica 350w 220v preço			
RES2	Resistência cerámica 350w 220v preço			
RL1	Relé 5V NC NA	Arduino		
RL2	Relé 5V NC NA	Arduino		
SDC1	Sensor de Corrente ACS712 5A AC / DC com Efeito Hall			
SDC2	Sensor de Corrente ACS712 5A AC / DC com Efeito Hall			
SDT1	Sensor de Tensão AC 0-250V Zmpt101b / Voltímetro	Arduino		
SDT2	Sensor de Tensão AC 0-250V Zmpt101b / Voltímetro	Arduino		
X0				

DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	VERIFICADO	REVISÃO
	14/02/2024	Grupo TCC		00

CLIENTE : FATEC SBC

QUADRO : SISTEMA DE COLETA DE DADOS EM MÁQUINA TERMOFORMADORA

Fatec São Bernardo do Campo Adib Moisés Dib

Folha : 11

De : 11