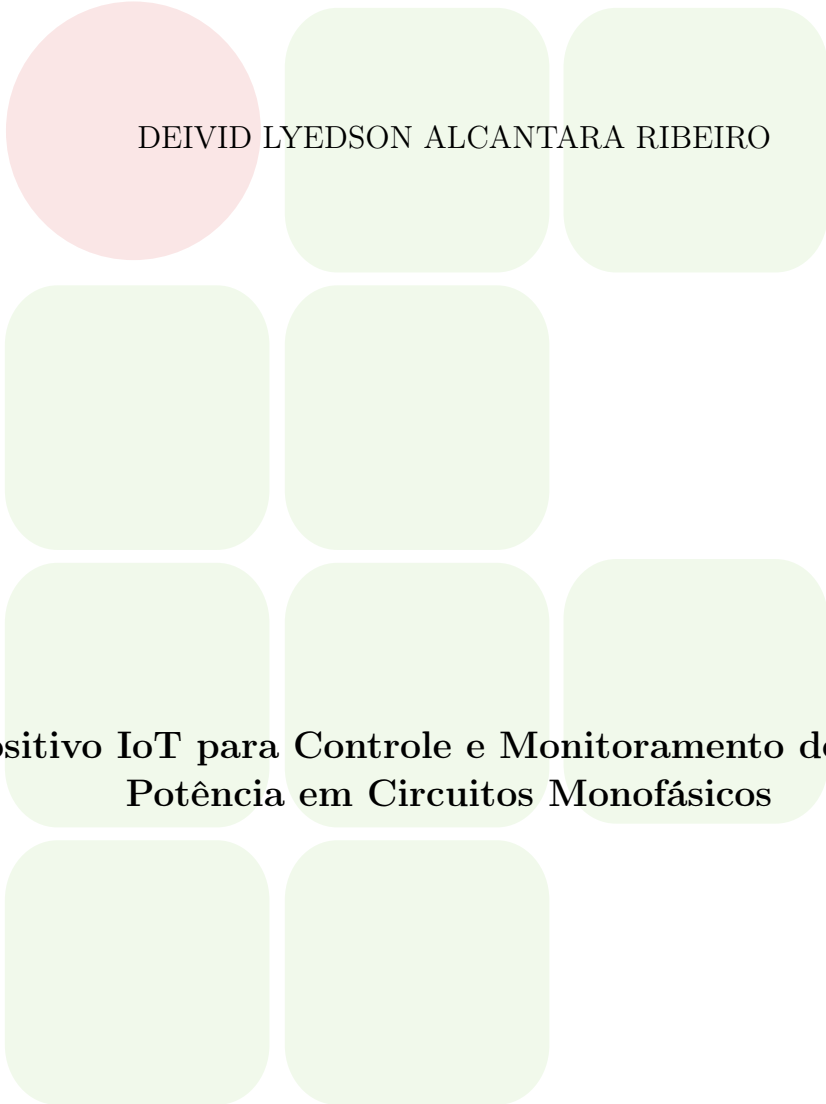


INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



DEIVID LYEDSON ALCANTARA RIBEIRO

**Dispositivo IoT para Controle e Monitoramento de Fator de
Potência em Circuitos Monofásicos**

João Pessoa

2025

DEIVID LYEDSON ALCANTARA RIBEIRO

Dispositivo IoT para Controle e Monitoramento de Fator de Potência em Circuitos Monofásicos

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Thiago de Carvalho Batista

João Pessoa
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

R484d	Ribeiro, Deivid Lyedson Alcantara. Dispositivo IoT para controle e monitoramento de fator de potência em circuitos monofásicos / Deivid Lyedson Alcantara Ribeiro. – 2025. 76 f. : il. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Engenharia Elétrica. Orientador: Thiago de Carvalho Batista. 1. Fator de potência. 2. Compensação reativa. 3. Eficiência energética. 4. IoT. I. Título. CDU 620.91
-------	--



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

FOLHA DE APROVAÇÃO

DEIVID LYEDSON ALCANTARA RIBEIRO

20201610036

“DISPOSITIVO IOT PARA CONTROLE E MONITORAMENTO DE FATOR DE POTÊNCIA EM CIRCUITOS MONOFÁSICOS”

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Trabalho aprovado pela banca examinadora em 29 de agosto de 2025.

BANCA EXAMINADORA:

(assinaturas eletrônicas via SUAP)

Dr. THIAGO DE CARVALHO BATISTA

IFPB (Orientador)

Dr. ALVARO DE MEDEIROS MACIEL

IFPB (Coorientador)

Dr. FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA

IFPB (Examinador)

GILVAN VIEIRA DE ANDRADE JUNIOR

IFPB (Examinador)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Thiago de Carvalho Batista**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/09/2025 12:34:16.
- **Gilvan Vieira de Andrade Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/09/2025 14:08:35.
- **Franklin Martins Pereira Pamplona**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/09/2025 15:01:10.
- **Alvaro de Medeiros Maciel**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/09/2025 16:51:20.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 02/09/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 758823
Verificador: f10d3c6650
Código de Autenticação:



Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, JOÃO PESSOA / PB, CEP 58015-435
<http://ifpb.edu.br> - (83) 3612-1200

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me dar forças e ânimo para seguir firme na engenharia, mesmo diante das adversidades, e por me permitir alcançar esta etapa tão importante na minha vida, a conclusão do curso de Engenharia Elétrica.

Em seguida, gostaria de agradecer à minha família por todo o apoio e suporte, que foram fundamentais para que eu conseguisse focar nos meus estudos e me adaptar melhor às atividades acadêmicas. Além disso, sou grato por todo o incentivo ao longo da minha trajetória, que me motivou a seguir na engenharia.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos que estiveram ao meu lado durante todo o curso. Juntos, compartilhamos tristezas, alegrias, momentos de confraternização, apoio nas atividades e projetos da engenharia, além de apoiarmos uns aos outros para nos mantermos unidos e concluir o curso juntos.

Por fim, gostaria de agradecer ao meu professor orientador, Thiago Batista, que me auxiliou durante o processo de criação e aperfeiçoamento do projeto final, além de ter sido meu orientador de estágio. Sou igualmente grato a todos os professores do IFPB - Campus João Pessoa, pelos ensinamentos transmitidos, que me tornaram um profissional mais qualificado para o mercado de trabalho, proporcionando não apenas conhecimentos técnicos, mas também ensinamentos valiosos para a vida.

RESUMO

Nos sistemas industriais, o controle do fator de potência (FP) é essencial para reduzir perdas, evitar cobranças adicionais por excedente de energia reativa e atender às exigências da ANEEL nº 1000/2021 e da norma NDU-001 da concessionária. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um controlador de FP voltado para cargas monofásicas, capaz de realizar medições de tensão, corrente, potência ativa e FP, além de calcular a compensação reativa necessária para manter o valor dentro dos limites normativos. Para isso, o dispositivo aciona automaticamente combinações de células capacitivas, corrigindo o FP de forma eficiente. O sistema foi projetado com foco na conectividade, integrando diferentes formas de supervisão: interface local por IHM, servidor web embarcado e monitoramento remoto via protocolo MQTT, o que possibilita acompanhamento em tempo real, tanto no ambiente industrial quanto a distância. Os resultados obtidos em bancada demonstraram a confiabilidade do protótipo e validaram sua aplicação prática, destacando o potencial da solução como alternativa alinhada aos conceitos da Indústria 4.0.

Palavras-chave: Controlador de banco de capacitores; fator de potência; compensação reativa; eficiência energética; IoT; MQTT.

ABSTRACT

In industrial systems, power factor (PF) control is essential to reduce losses, avoid additional charges due to excess reactive energy, and comply with ANEEL Resolution No. 1000/2021 and the NDU-001 standard from the utility provider. This work presents the development of a PF controller designed for single-phase loads, capable of measuring voltage, current, active power, and PF, as well as calculating the necessary reactive compensation to keep the PF within regulatory limits. To achieve this, the device automatically switches combinations of capacitive cells to efficiently correct the PF. The system was designed with connectivity in mind, integrating different supervision methods: a local HMI interface, an embedded web server, and remote monitoring via the MQTT protocol. This enables real-time monitoring both on-site and remotely. Bench tests demonstrated the prototype's reliability and validated its practical application, highlighting the potential of this solution as an alternative aligned with Industry 4.0 concepts.

Keywords: Capacitor bank controller; power factor; reactive compensation; energy efficiency; IoT; MQTT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Triângulo de potências.	17
Figura 2 – Fator de potência.	18
Figura 3 – Defasagem da tensão e corrente.	19
Figura 4 – Carga com consumo de potência ativa.	19
Figura 5 – Carga com consumo de potência reativa indutiva.	21
Figura 6 – Fator de potência horário	22
Figura 7 – Correção de FP no triângulo de potências.	23
Figura 8 – Banco de capacitores WEG.	24
Figura 9 – PFW01-M06 e PFW01-M12.	25
Figura 10 – Diagrama unifilar de ligação do ST8200C.	26
Figura 11 – Logotipo da Espressif Systems.	26
Figura 12 – Modelos ESP32 e ESP8266.	27
Figura 13 – Funcionamento do MQTT.	28
Figura 14 – QoS 0.	28
Figura 15 – QoS 1.	29
Figura 16 – QoS 2.	29
Figura 17 – Esquemático de conexão PZEM-004T-100A.	31
Figura 18 – PZEM-004T.	35
Figura 19 – PZKHCT.	35
Figura 20 – Display LCD 16x2.	36
Figura 21 – Disposição dos botões.	36
Figura 22 – Fluxograma do menu 1.	37
Figura 23 – Fluxograma do menu 2.	38
Figura 24 – Fluxograma do menu 3.	39
Figura 25 – Fluxograma do menu 4.	40
Figura 26 – Fluxograma do Cálculo.	41
Figura 27 – Código para retirada do banco de capacitores por meio de cálculo.	41
Figura 28 – Código para cálculo da potência reativa necessária para correção.	42
Figura 29 – Código para escolha da melhor combinação de bancos.	42
Figura 30 – Código para acionamento dos bancos selecionados.	43
Figura 31 – Interface <i>Web</i> criada.	44
Figura 32 – Aplicativo MQTT.	45
Figura 33 – Circuito do relé.	46
Figura 34 – Circuitos dos relés.	47
Figura 35 – Circuito de conexões com a ESP32.	48
Figura 36 – Hi-link HLK-5M05.	48

Figura 37 – Circuito do conversor Buck.	49
Figura 38 – Layout PCI.	49
Figura 39 – Simulação da PCI.	50
Figura 40 – Placa produzida.	50
Figura 41 – Placa Finalizada.	51
Figura 42 – Case 3D.	52
Figura 43 – Case 3D encaixada.	52
Figura 44 – Protótipo pronto.	53
Figura 45 – Protótipo de outros ângulos.	53
Figura 46 – Carga resistiva configurada.	54
Figura 47 – Primeiro estágio da Carga indutiva configurada.	54
Figura 48 – Carga capacitiva configurada.	55
Figura 49 – Medidor Nemo 96HD.	57
Figura 50 – Carga capacitiva configurada.	57
Figura 51 – Diagrama de ligação dos medidores.	58
Figura 52 – Primeira Medição dos parâmetros do medidor 1.	70
Figura 53 – Segunda Medição dos parâmetros do medidor 1.	71
Figura 54 – Primeira Medição dos parâmetros do medidor 2.	72
Figura 55 – Segunda Medição dos parâmetros do medidor 2.	73
Figura 56 – Primeira medição dos parâmetros do dispositivo via <i>WebServer</i>	74
Figura 57 – Primeira medição dos parâmetros do dispositivo via <i>MQTT</i>	75
Figura 58 – Segunda medição dos parâmetros do dispositivo via <i>WebServer</i>	76
Figura 59 – Segunda medição dos parâmetros do dispositivo via <i>MQTT</i>	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de componentes.	51
Tabela 2 – Tabela de valores resistivos.	55
Tabela 3 – Tabela de valores indutivos para 50 Hz e 60 Hz.	56
Tabela 4 – Tabela de valores capacitivos para 50 Hz e 60 Hz.	56
Tabela 5 – Valores medidos na bancada, medidor M1.	59
Tabela 6 – Valores medidos após o controlador, medidor M2.	59
Tabela 7 – Valores medidos no dispositivo.	59
Tabela 8 – Erros percentuais de medição.	60
Tabela 9 – Valores de potência reativa calculada dos bancos.	61
Tabela 10 – Segunda medição na bancada, medidor M1.	62
Tabela 11 – Segunda medição após o controlador, medidor M2.	63
Tabela 12 – Segunda medição no dispositivo.	63
Tabela 13 – Erros percentuais da segunda medição.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FP	<i>Fator de Potência</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
ANEEL	<i>AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
ESP-IDF	<i>Espressif IoT Development Framework</i>
NDU	<i>Norma de Distribuição Unificada</i>
LabSEP	<i>Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência</i>
RMS	<i>Valor Eficaz</i>
PCI	<i>Placa de Circuito Impresso</i>
TP	<i>Transformador de Potencial (Instrumentação)</i>
TC	<i>Transformador de Corrente</i>
IHM	<i>Interface Homem-Máquina</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

P	<i>Potência Ativa</i>
Q	<i>Potência Reativa</i>
S	<i>Potência Aparente</i>
VA	<i>Volt-Ampère</i>
V	<i>Volt</i>
A	<i>Ampère</i>
Hz	<i>Hertz</i>
VA _r	<i>Volt-Ampère reativo</i>
W	<i>Watt</i>
Wh	<i>Watt hora</i>
π	<i>Letra grega minúscula Pi</i>
θ, ψ	<i>Ângulo de defasagem entre tensão e corrente (ângulo do fator de potência), em rad.</i>
μ	<i>Letra grega minúscula Mi</i>

SUMÁRIO

	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivos específicos	15
1.2	Estrutura do trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Cálculo de Correção de Fator de Potência	22
2.2	Banco de capacitores fixos	23
2.3	Banco de capacitores automáticos	24
2.3.1	Controlador de Fator de Potência	25
2.4	ESP32	26
2.5	MQTT	27
2.6	PZEM-004T	29
2.7	Referências Normativas	31
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
4	METODOLOGIA	34
4.1	Medição dos parâmetros elétricos	34
4.2	Interface de Configuração	35
4.3	Correção de FP	40
4.4	Interface Web	43
4.5	Comunicação MQTT	44
4.6	Placa de Circuito Impresso	45
4.6.1	Circuitos da placa	46
4.7	Case 3D	51
5	RESULTADOS	54
5.1	Teste realizado	57
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE A – MEDIÇÕES ANTES DO BANCO DE CA- PACITORES	70

A.1	Medições antes da correção do fator de potência	70
A.2	Medições após a correção do fator de potência	71

APÊNDICE B – MEDIÇÕES APÓS DO BANCO DE CAPACITORES 72

B.1	Medições antes da correção do fator de potência	72
B.2	Medições após a correção do fator de potência	73

APÊNDICE C – MEDIÇÕES DO DISPOSITIVO 74

C.1	Medições antes da correção do fator de potência	74
C.2	Medições após a correção do fator de potência	76

1 Introdução

Com o avanço dos sistemas elétricos de potência, a busca por eficiência energética se tornou uma prioridade no setor industrial. De acordo com o Catálogo Eletrônico (2025), a correção do fator de potência por meio do uso de bancos de capacitores automáticos é uma das estratégias mais adotadas para evitar perdas de energia e reduzir custos operacionais.

Os controladores de fator de potência são equipamentos projetados para monitorar e ajustar automaticamente o fornecimento de potência reativa no sistema elétrico, utilizando bancos de capacitores automáticos. Conforme explica a ABB Brasil (2024), esses controladores chaveiam capacitores conforme a variação das cargas, mantendo o fator de potência dentro dos limites exigidos pela concessionária. Esse controle dinâmico torna o sistema mais eficiente, evitando multas por excesso de reativos indutivos injetados na rede e melhorando a estabilidade da rede elétrica.

Atualmente, os controladores mais utilizados possuem o Modbus/RTU como protocolo de comunicação externa para a troca de dados com servidores ou sistemas supervisórios, como o controlador PFW01 da WEG. Contudo, a comunicação via WiFi para interação direta com a *Web* não é comumente encontrada nos dispositivos mais comuns, sendo necessária a utilização de meios externos, como computadores, *gateways* ou outros dispositivos, para realizar essa tarefa. Pensando nisso, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um dispositivo completo, com supervisão por meio de um *Web Server* local e comunicação com uma plataforma externa via MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um dispositivo que ofereça funcionalidades semelhantes a um controlador de banco de capacitores, com a vantagem de possuir conectividade direta com uma plataforma online via MQTT e disponibilizar as informações localmente, por meio do display LCD e interface *Web*.

1.1.1 Objetivos específicos

- Mensurar e monitorar parâmetros elétricos do sistema;
- Controlar o acionamento das cargas capacitivas;
- Enviar os parâmetros elétricos para plataforma online;

- Desenvolver dispositivo com funções semelhantes aos controladores existentes no mercado;
- Avaliar os resultados obtidos com o protótipo em laboratório;
- Montagem de protótipo final.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em seções, iniciando-se pela fundamentação teórica, na qual são apresentadas as bases bibliográficas que sustentam o desenvolvimento do projeto, incluindo uma revisão de trabalhos semelhantes. Em seguida, a metodologia, que descreve de forma detalhada como o projeto foi desenvolvido, descrevendo os recursos utilizados, as etapas de construção e o funcionamento do protótipo proposto.

Na sequência, são apresentados os resultados, por meio de testes práticos realizados com o protótipo, juntamente com a análise dos dados obtidos. Por fim, a conclusão expõe as considerações finais, destacando os principais aprendizados, limitações e possíveis melhorias para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Equipamentos industriais, tais como transformadores, motores elétricos e fornos indutivos, requerem certa quantidade de potência reativa para seu funcionamento. Para prover essa demanda de energia, podem ser utilizados motores síncronos, capacitores ou geradores, que trabalham de forma individual ou simultânea (FILHO, 2017).

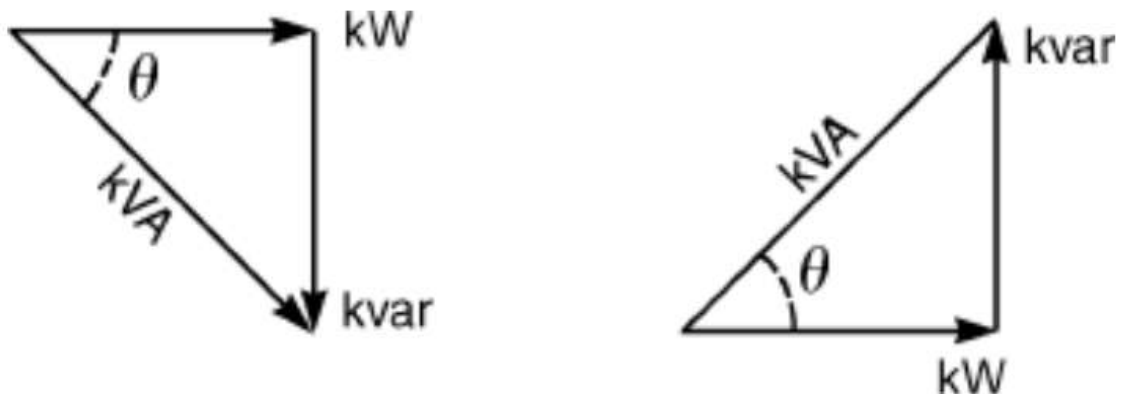
As linhas de transmissão e distribuição da rede de energia elétrica são dotadas de reativos, que podem ser compreendidos em dois tipos: reativo indutivo e capacitivo. No entanto, para evitar que essa energia seja transportada pelas linhas, é necessário instalar fontes de energia reativa próximas às unidades consumidoras, no intuito de reduzir as perdas associadas ao transporte dessa energia e garantir um melhor rendimento do sistema (FILHO, 2017).

Para que seja compreendido o fator de potência, será demonstrado seu modelo matemático, que pode ser compreendido pela razão da parcela de potência ativa da carga pelo seu valor de potência total, de acordo com a expressão (2.1):

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (2.1)$$

A relação da equação (2.1) pode ser melhor entendida quando analisada no triângulo de potências, na Figura 1, onde o F_p será calculado pelo cosseno do ângulo θ gerado pelas duas potências.

Figura 1 – Triângulo de potências.



Fonte: Creder, 2016.

Analisando a Figura 1, observa-se que, quanto menor for a potência reativa em *kvar*, menor será o ângulo θ e, conseqüentemente, maior será o fator de potência, que será o cosseno desse ângulo. A potência reativa capacitiva é representada por valores

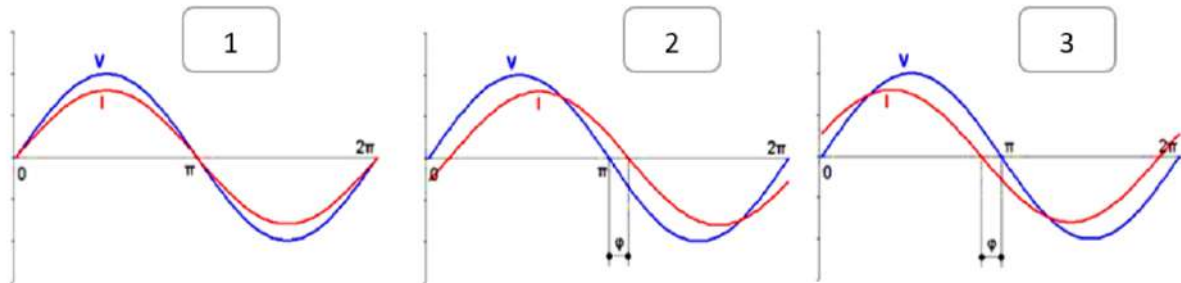
negativos, como o triângulo à esquerda da Figura 1, enquanto a potência reativa indutiva assume valores positivos, como o triângulo à direita da mesma figura. Dessa forma, quando se adiciona potência reativa capacitiva ao sistema, o fator de potência tende a aumentar.

O valor da potência aparente também pode ser deduzido a partir do triângulo de potências, resultando na equação (2.2):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.2)$$

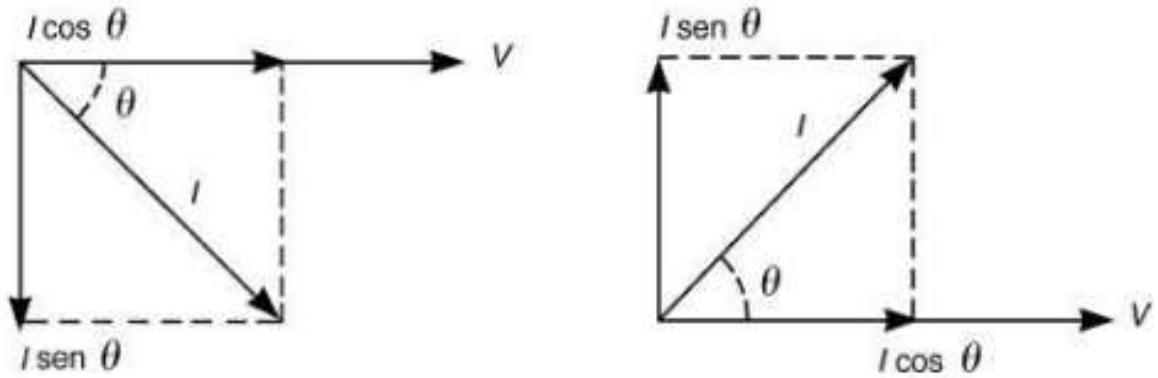
Em termos técnicos, o cosseno do ângulo entre a onda senoidal da tensão e da corrente representa o fator de potência. Quando essa defasagem é causada pelo atraso da corrente em relação à tensão, o fator de potência é indutivo, ou seja, a potência reativa indutiva se sobressai, como mostra a parte 2 da Figura 2. Por outro lado, quando a defasagem ocorre da tensão em relação à corrente, o fator de potência é capacitivo, caracterizando a presença de potência reativa capacitiva, apresentada na parte 3 da Figura 2. O fator de potência é unitário quando as duas ondas senoidais estão em fase, ou seja, quando $\psi = 0$, representando uma carga puramente resistiva, como exemplifica a parte 1 da Figura 2. Essas considerações são válidas para ondas perfeitamente senoidais (FILHO, 2017).

Figura 2 – Fator de potência.



Fonte: Service, 2020.

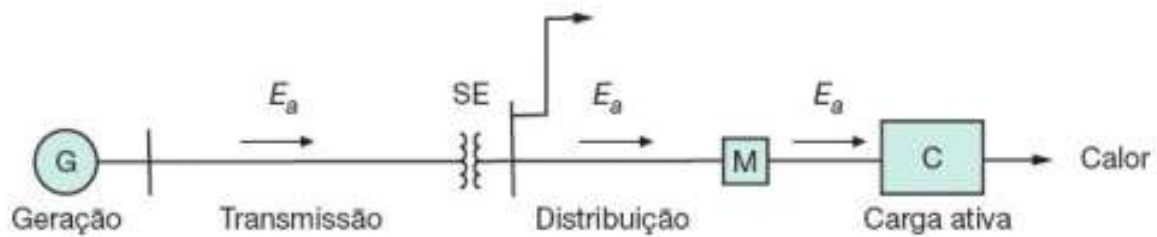
A Figura 3 de (CREDER, 2016) ilustra a defasagem da corrente e da tensão mencionadas no (FILHO, 2017):

Figura 3 – Defasagem da tensão e corrente.

Fonte: Creder, 2016.

 $I \cos \theta$ = Componente ativa; $I \sen \theta$ = Componente reativa.

Em casos onde a carga elétrica é composta unicamente por potência ativa, como em equipamentos resistivos — a exemplo de alguns fornos elétricos e aquecedores — toda a energia fornecida pelo sistema de geração é efetivamente consumida pela carga, como apresentado na Figura 4. Dessa forma, a energia transportada pelas redes de transmissão e distribuição é absorvida pela carga, com exceção das perdas associadas ao transporte, que são inerentes ao sistema elétrico. A energia consumida pela carga é registrada por um medidor de energia elétrica e utilizada como base para o faturamento realizado pela concessionária de energia responsável pela distribuição no local de consumo (ENERGISA, 2024).

Figura 4 – Carga com consumo de potência ativa.

Fonte: Filho, 2017.

A potência ativa consumida por uma carga de corrente alternada em um circuito monofásico é dada pela equação (2.3):

$$P = VI \cos(\psi) \quad (2.3)$$

Onde:

P = Potência ativa, dada em W ;

V = Tensão eficaz, dada em V ;

I = Corrente eficaz, dada em Ampères.

Os circuitos trifásicos são constituídos por três condutores de fase, podendo conter neutro ou não. Portanto, para sistemas onde os condutores são distribuídos para cargas de forma equilibrada, entre fases ou fase-neutro, a potência ativa pode ser calculada pela equação (2.4):

$$P_{atc} = \sqrt{3}V_{ff}I\cos(\psi) \quad (2.4)$$

Onde:

P_{atc} = Potência ativa demandada da carga, dada em W ;

V_{ff} = Tensão entre fases, dada em V .

Para Creder, em circuitos trifásicos a potência reativa pode ser compreendida como:

$$Q = \sqrt{3}VI\sin(\theta) \quad (2.5)$$

Onde:

Q = Potência reativa, dada em *var* ou *kvar*;

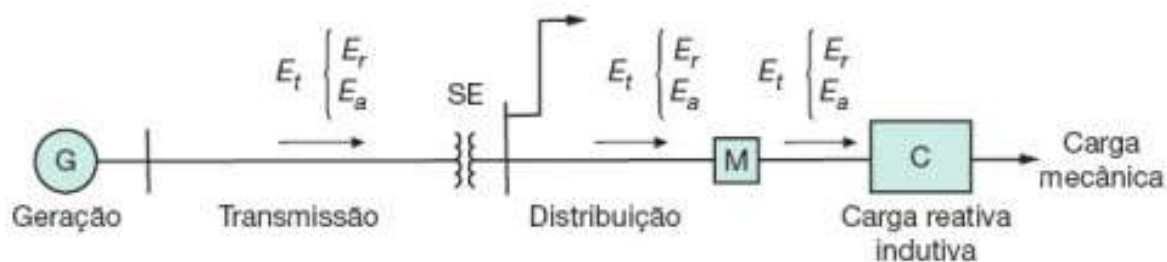
V = Tensão eficaz, dada em V ;

I = Corrente eficaz, dada em Ampères.

Enquanto que nos circuitos monofásicos, a potência reativa pode ser representada como:

$$Q = VI\sin(\theta) \quad (2.6)$$

Para cargas elétricas compostas por equipamentos que utilizam campos magnéticos em seu funcionamento, a potência reativa indutiva se faz mais presente, a exemplo do motor elétrico de indução, ilustrado na Figura 5. Para que o motor entre em operação, esse demanda dois tipos de energia distintas: a energia ativa, que realiza trabalho útil, como movimento ou torque, e a energia reativa, que se faz necessária para estabelecer o campo magnético nos enrolamentos do motor (FILHO, 2017).

Figura 5 – Carga com consumo de potência reativa indutiva.

Fonte: Filho, 2017.

A energia reativa indutiva é essencial para o perfeito funcionamento do motor, não produzindo trabalho mecânico diretamente, mas circulando a energia constantemente entre a fonte e a carga. Tendo em vista que seu fator de potência é indutivo, a carga exige maior capacidade de condução da rede elétrica, ou seja, demandando potência reativa capacitiva, o que pode comprometer o fornecimento de energia do sistema elétrico, já que a elevação da potência reativa implicará no aumento da corrente (FILHO, 2017).

A Resolução Normativa nº 1000/2021, da ANEEL, especificamente na Seção VIII, estabelece as condições de medição e cobrança para o excesso de energia reativa dos consumidores. No sistema energético brasileiro, os consumidores do Grupo A, que incluem as grandes indústrias e comércios que possuem cargas com alta demanda de energia (tensão $\geq 2,3$ kV), devem manter um fator de potência $\geq 0,92$, sob pena de cobrança adicional pela energia reativa excedente. Para os consumidores do Grupo B que não possuem medição do fator de potência, não serão cobradas taxas pelos excedentes de seus reativos, visto que não possuem um fator de potência de referência (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

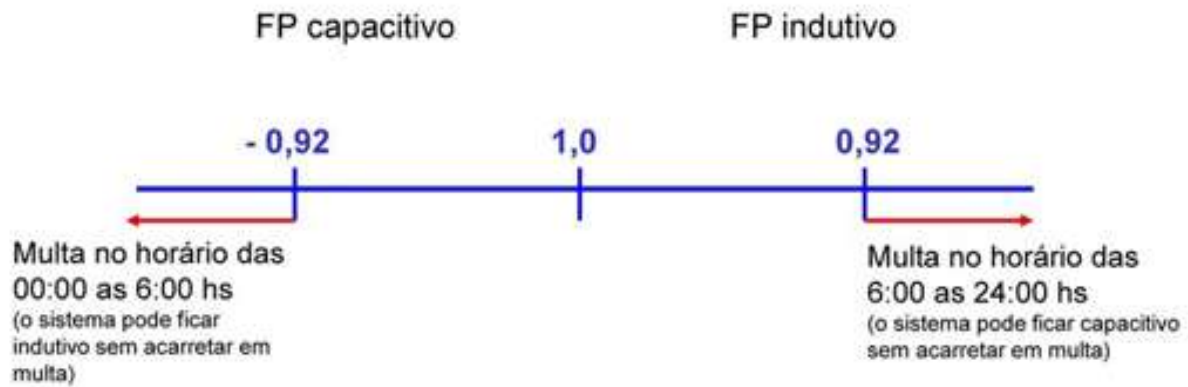
Essa é uma medida tomada com base na importância do controle dos reativos que são injetados ou requeridos da rede de energia. Em um período de 6 horas, que pode ser das 23h30 às 6h30, a depender da concessionária, serão cobradas multas apenas dos consumidores que tiverem um fator de potência abaixo de 0,92 capacitivo. Em contraponto, no restante do dia, serão cobradas taxas dos consumidores que tiverem fator de potência menores que 0,92 indutivo, conforme prevê a norma da ANEEL nº 1000/2021 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).

Em geral, os consumidores utilizam controladores de fator de potência (FP) para adicionar reativos capacitivos às cargas durante o período comercial, no qual o sistema exige um fator de potência maior que 0,92 indutivo. A instalação de capacitores e controladores de bancos de capacitores é uma recomendação prevista na norma NDU 001, da concessionária Energisa, responsável pela distribuição de energia no estado da Paraíba (ENERGISA, 2024).

Esse controle é necessário visto que, durante o período comercial, o sistema elétrico tende a apresentar maior presença de reativos indutivos, em função do início das operações por parte dos consumidores. Dessa forma, os consumidores que não conseguem manter o controle de seus reativos tendem a injetar potência reativa indutiva na rede e demandar reativos capacitivos, o que contribui para o aumento da potência reativa indutiva no sistema elétrico (SERVICE, 2020).

No entanto, durante a noite, quando as atividades comerciais estão suspensas, a rede elétrica tende a apresentar maior predominância de potência reativa capacitiva. Nesse caso, os consumidores que permanecem em operação devem consumir potência reativa indutiva, a fim de compensar o excesso de reativos capacitivos presentes na rede (SERVICE, 2020).

Figura 6 – Fator de potência horário



Fonte: Service, 2020.

2.1 Cálculo de Correção de Fator de Potência

A equação (2.7) pode ser utilizada para determinar a potência reativa que um banco de capacitores é capaz de fornecer ao sistema. Esse valor é importante para parametrizar corretamente os bancos de capacitores no controlador.

$$Q = 2\pi fCV^2 \quad (2.7)$$

Para determinar a potência reativa capacitiva que deve ser inserida no sistema, basta subtrair a potência reativa desejada da potência reativa atual. O resultado dessa subtração fornece um valor aproximado do banco de capacitores necessário para a correção do fator de potência, como demonstrado na expressão (2.8).

$$Q_C = Q_{Atual} - Q_{Desejado} \quad (2.8)$$

A outra maneira analítica possível para este cálculo é mostrada tanto no livro do Creder (2016) quanto no Filho (2017). Consiste na expressão (2.9).

$$Q_C = P[\tan(\theta_{Atual}) - \tan(\theta_{Desejado})] \quad (2.9)$$

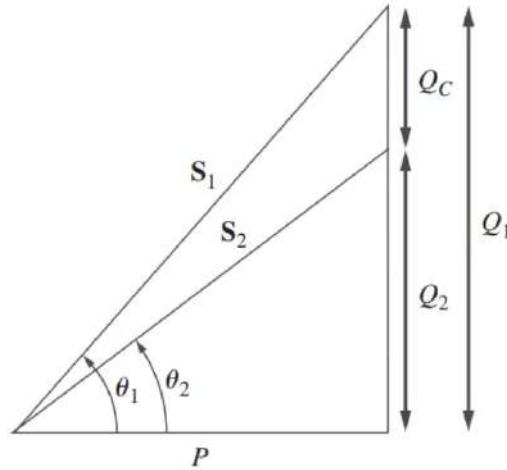
Os ângulos podem ser encontrados com o valor do fator de potência medido e desejado. Assim, entende-se que o ângulo $\theta = \arccos(F_p)$, resultando na equação (2.10).

$$Q_C = P\{\tan[\arccos(F_{pAtual})] - \tan[\arccos(F_{pDesejado})]\} \quad (2.10)$$

Com essas formulações, é possível calcular a potência reativa capacitiva necessária de um banco de capacitores. Para determinar o valor da capacitância total, em μF , pode-se aplicar a equação (2.7), obtendo assim o valor necessário para o banco de capacitores. No entanto, essa capacitância pode ser atingida por meio da combinação de vários capacitores com valores diferentes, de modo a atender ao objetivo esperado para o banco calculado.

Para melhor compreensão, é mostrado na Figura 7 como o triângulo de potências se comporta quando são inseridas cargas capacitivas. Ao adicionar a carga Q_C , a potência reativa é reduzida de Q_1 para Q_2 , diminuindo o ângulo de θ_1 para θ_2 e, conseqüentemente, aumentando o fator de potência.

Figura 7 – Correção de FP no triângulo de potências.



Fonte: Embarcados, 2022.

2.2 Banco de capacitores fixos

Os bancos de capacitores fixos são comumente utilizados em situações onde a carga apresenta pouca variação no consumo de potência reativa ao longo do dia. Nesses casos, o dimensionamento adequado do banco fixo é suficiente para manter o fator de potência dentro dos limites estabelecidos pelas concessionárias, evitando multas e otimizando o

desempenho do sistema elétrico (FILHO, 2017). Conforme estabelece a IEC (2014), capacitores autorregenerativos devem suportar sobrecorrentes de até 30% da corrente nominal, sem degradação significativa.

Para definir o valor do capacitor a ser conectado à carga, utiliza-se a equação (2.10), estimando a potência reativa aproximada necessária para a correção do fator de potência. Esse cálculo é fundamental para assegurar que o sistema opere de maneira eficiente.

É apresentada na Figura 8, um banco de capacitores fixo da WEG.

Figura 8 – Banco de capacitores WEG.



Fonte: WEG, 2025.

2.3 Banco de capacitores automáticos

Os bancos de capacitores automáticos estão presentes em sistemas que possuem uma variação significativa da demanda por potência reativa ao longo do dia. Dessa forma, o banco de capacitores atua de forma dinâmica, mantendo o fator de potência dentro dos limites exigidos pela concessionária, evitando as penalizações e assegurando que o sistema tenha maior eficiência (ABB Brasil, 2023).

Em algumas instalações consumidoras, é necessário o fracionamento dos bancos de capacitores atrelado à utilização de um sistema de controle automático. Esse controle modifica a quantidade de capacitores conectados, de acordo com a potência reativa solicitada pela carga. Esse controle evita que o sistema trabalhe com fator de potência capacitivo ($F_p \geq 0,92$ capacitivo), no período da madrugada, em que a carga é reduzida e a rede de alimentação demanda mais potência reativa indutiva (CREDER, 2016).

No livro de Filho (2017), o autor faz considerações importantes sobre o uso de bancos de capacitores automáticos, apresentando recomendações essenciais para garantir um dimensionamento seguro e um bom funcionamento do sistema. Uma delas enfatiza que os valores de potência reativa capacitiva não devem ultrapassar 15 *kvar* em bancos trifásicos de 220 V e 25 *kvar* em bancos trifásicos de 380/440 V. Essas limitações têm

como objetivo reduzir as correntes de surto que ocorrem durante o acionamento das células capacitivas, que podem alcançar valores superiores a 100 vezes a corrente nominal dos capacitores. Portanto, a violação dessa recomendação pode provocar a queima de fusíveis, contadores e demais componentes atrelados ao sistema. Conforme também observado pela WEG em sua documentação técnica, valores acima desses limites exigem atenção especial precisamente pela ocorrência de correntes de inrush elevadas (WEG, 2022).

Para evitar esse problema, o autor recomenda que, ao utilizar potências próximas aos limites citados, o banco seja dividido em duas ou mais células, acionadas de forma separada. Dessa forma, as células capacitivas permanecem dentro dos limites de segurança estabelecidos, aumentando a vida útil dos componentes e conferindo a confiabilidade e segurança do sistema. Esse fracionamento das células capacitivas atende ao limite de potência por degrau recomendado pela (IEC, 2014).

2.3.1 Controlador de Fator de Potência

O controlador automático de fator de potência é um dispositivo que inclui um medidor capaz de detectar a defasagem entre a tensão e a corrente sempre que a tensão passa pelo valor zero, obtendo assim o fator de potência. Com esse dado, o dispositivo determina quais estágios devem ser acionados para atingir o fator de potência desejado e previamente configurado, garantindo o acionamento das células capacitivas com a melhor combinação para a correção do fator de potência (CREDER, 2016).

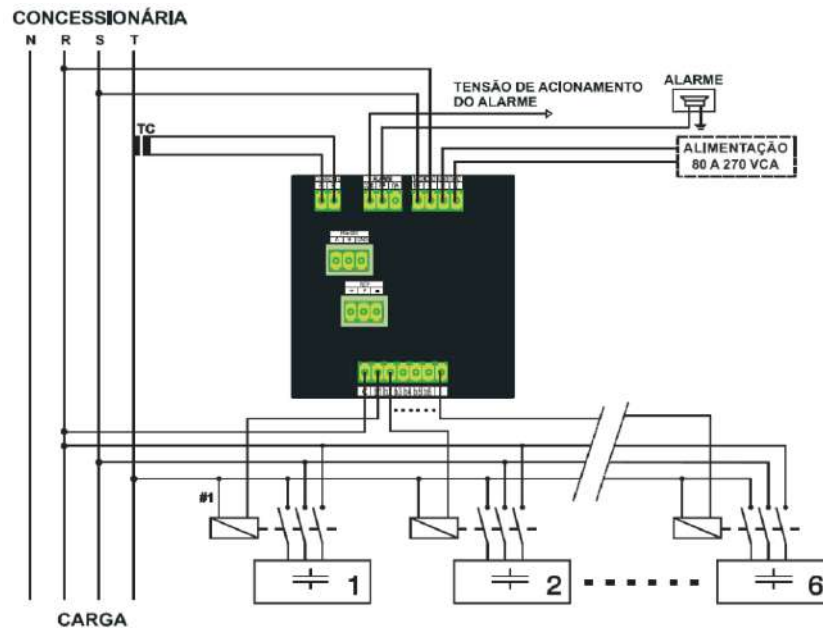
Um exemplo prático desse tipo de equipamento é o controlador PFW01 da WEG, disponível em modelos monofásicos e trifásicos. O modelo monofásico, como o PFW01-M06 e PFW01-M12 apresentados na Figura 9, pode ser aplicado em redes trifásicas equilibradas ou em sistemas puramente monofásicos, sendo uma alternativa simples e eficiente para pequenas instalações (WEG, 2013).

Figura 9 – PFW01-M06 e PFW01-M12.



Fonte: WEG, 2013.

Na Figura 10, é mostrado um diagrama de um controlador de fator de potência ST8200C inserido em um circuito.

Figura 10 – Diagrama unifilar de ligação do ST8200C.

Fonte: Industrial, 2020.

2.4 ESP32

Com o avanço das tecnologias embarcadas, surgiram microcontroladores mais modernos, como o ESP8266 e o ESP32, desenvolvidos pela empresa Espressif Systems. Esses dispositivos representaram um avanço significativo, se comparados a outros microcontroladores, por oferecerem maior capacidade de memória e processamento, além de módulos integrados de comunicação sem fio, como Wi-Fi e Bluetooth. Mesmo com essas melhorias, seu custo permanece competitivo, o que os torna acessíveis para aplicações de pequeno e médio porte.

Os microcontroladores ESP32 e o ESP8266 são mais requisitados para aplicações envolvendo Internet das Coisas (IoT), devido à sua capacidade de conexão à internet e integração com sistema em nuvem, além de oferecer mais confiabilidade e recursos.

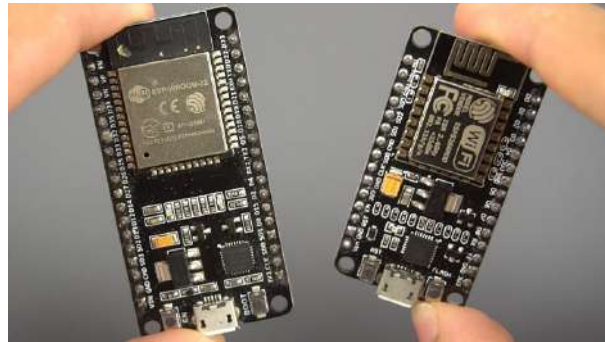
Figura 11 – Logotipo da Espressif Systems.

Fonte: Espressif, 2024.

Entre os dois modelos da Espressif, o ESP32 é considerado uma evolução do ESP8266. Além de possuir Wi-Fi e Bluetooth Low Energy (BLE) embutidos, o ESP32 oferece um número maior de pinos de entrada e saída (GPIOs), mais entradas analógicas, maior capacidade de processamento, além de obter mais memória RAM e flash.

Um dos principais diferenciais é sua arquitetura dual-core, que permite a execução de múltiplas tarefas simultaneamente, otimizando o desempenho em aplicações que exigem paralelismo para uma maior eficiência. Esse recurso está sendo utilizado no projeto em questão, destinando um dos núcleos de processamento para cuidar da parte interativa com o usuário, enquanto o outro núcleo se dedica apenas à obtenção dos dados, processamento e acionamento de cargas.

Figura 12 – Modelos ESP32 e ESP8266.



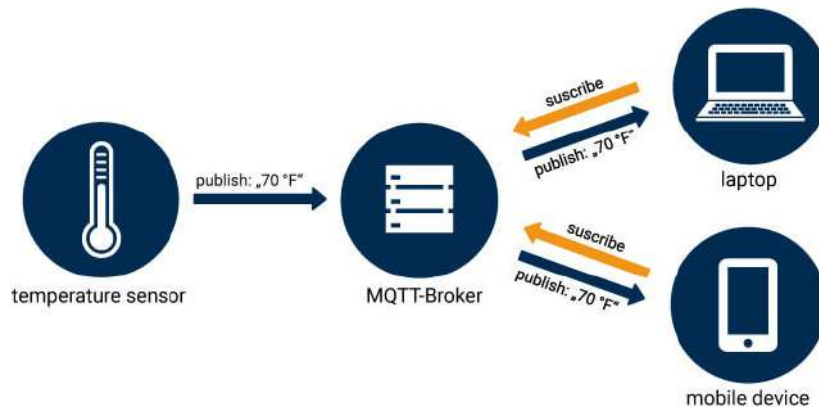
Fonte: Random Nerd Tutorials, 2016.

A programação desses microcontroladores pode ser realizada de maneira semelhante à do Arduino, utilizando o Arduino IDE e incluindo as extensões para as placas da Espressif. No entanto, para projetos que exigem maior controle e acesso a recursos mais avançados, a fabricante disponibiliza o ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework), um ambiente de desenvolvimento mais robusto e voltado para aplicações profissionais.

2.5 MQTT

O MQTT foi criado pela IBM e pela Cirrus Link em 1999, com o objetivo de ser um protocolo de comunicação de baixo consumo de energia e largura de banda. Em 2014, foi oficializado como padrão pela OASIS. Atualmente, o MQTT é amplamente utilizado em projetos de automação e IoT, devido à sua praticidade, baixo consumo e confiabilidade, aplicando o modelo de comunicação publish/subscribe (Energia Automação, 2022).

O funcionamento do MQTT baseia-se na conexão do dispositivo a um servidor, chamado broker, que gerencia todo o tráfego de informações enviadas pelo publish/subscribe. O dispositivo que deseja enviar uma mensagem (publish) publica em um tópico, enquanto outros dispositivos inscritos nesse mesmo tópico recebem a informação. A Figura 13 apresenta uma demonstração de como funciona a troca de dados do dispositivo remetente e o destinatário da informação.

Figura 13 – Funcionamento do MQTT.

Fonte: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), 2023.

O MQTT é baseado na arquitetura TCP, que garante confiabilidade na comunicação. Dessa forma, o protocolo pode operar com três diferentes níveis de qualidade de serviço, o QoS (*Quality of Service*). No nível 0, não há garantia de que a mensagem chegará ao destino, tendo em vista que não possui nenhum método de verificação de entrega. Assim, em caso de desconexão ou falha de sinal, o pacote de informação é perdido (Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), 2023). Esse nível de QoS é exemplificado na Figura 14.

Figura 14 – QoS 0.

Fonte: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), 2023.

Para os níveis de QoS 1 e 2, a verificação da entrega é feita por meio da troca de mensagens entre ambas as partes. No primeiro caso, ao enviar o Publish, o Broker responde ao emissor com uma mensagem de confirmação, o Puback, certificando ao Client que a mensagem foi recebida corretamente. Caso o Puback não seja enviado pelo Broker, o Client reenviará o Publish. Esse caso é ilustrado na Figura 15.

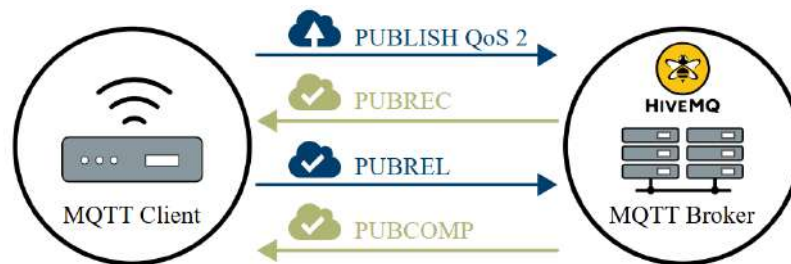
Figura 15 – QoS 1.



Fonte: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), 2023.

No último caso, em que o QoS é 2, a troca de informações se torna mais complexa para garantir que a mensagem chegue corretamente ao destino. Após o *Client* enviar a mensagem ao Broker, ocorrem mais trocas de dados, em um par de mensagens request-response, assegurando a entrega da informação. A Figura 16 ilustra esse processo.

Figura 16 – QoS 2.



Fonte: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), 2023.

2.6 PZEM-004T

O módulo PZEM-004T V3.0 é amplamente utilizado em sistemas de monitoramento de energia elétrica para medições em corrente alternada (CA). Trata-se de um dispositivo capaz de medir grandezas como tensão, corrente, potência ativa, consumo de energia em kWh, fator de potência e frequência, sem a necessidade de display integrado. A leitura dos dados é realizada por meio da interface serial TTL ou RS485, utilizando o protocolo Modbus-RTU para comunicação com microcontroladores, como o ESP32 ou o Arduino.

Este módulo é fornecido em duas versões: PZEM-004T-10A, com shunt interno para medição de correntes de até 10 A, e PZEM-004T-100A, que utiliza transformador de corrente externo para medições de até 100 A. Ambas as versões possuem características que atendem ao uso em projetos residenciais, industriais e acadêmicos (INNOVATORS-GURU, 2019).

Para melhor entendimento, abaixo estão listadas as principais especificações do PZEM-004T:

- Tensão de operação: 80 V a 260 V AC;
- Corrente medida: 0 a 10 A (ou até 100 A com TC externo);
- Potência ativa: até 2,3 kW (versão 10A) ou 23 kW (versão 100A);
- Fator de potência: 0,00 a 1,00, com resolução de 0,01;
- Frequência da rede: 45 a 65 Hz;
- Energia ativa acumulada: até 9999,99 kWh.

A medição do consumo de energia, ou energia ativa acumulada, corresponde à quantidade total de energia consumida ao longo do tempo, sendo calculada a partir da multiplicação da potência ativa instantânea pelo tempo de operação da carga, conforme ilustra a equação (2.11):

$$E = Pt \quad (2.11)$$

onde:

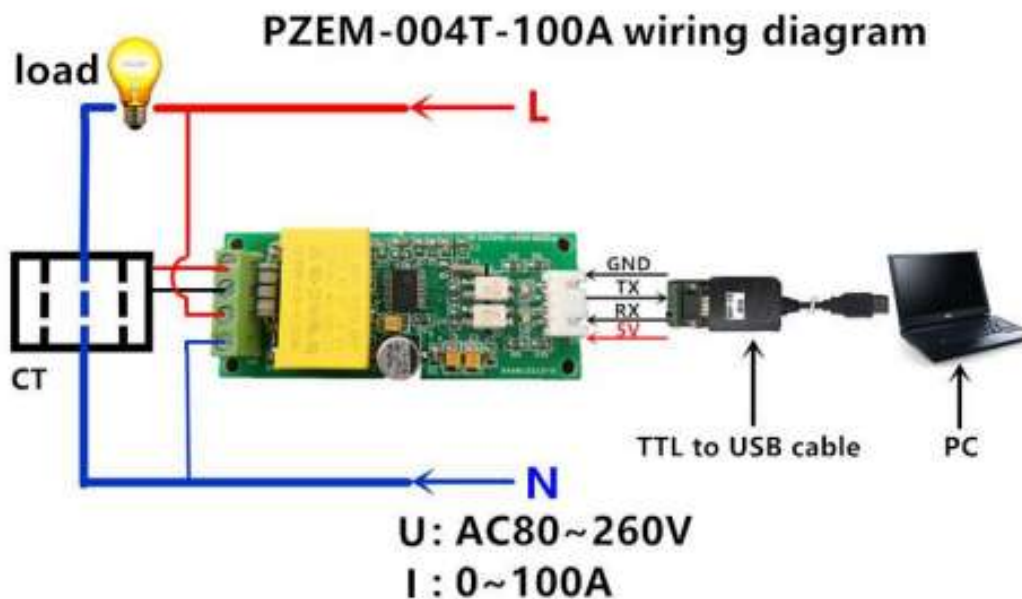
- E representa a energia ativa (kWh),
- P é a potência ativa (kW),
- t é o tempo em horas (h).

A exatidão das medições do módulo é de aproximadamente $\pm 0,5\%$ para tensão, corrente, potência ativa e energia. Para o fator de potência, a exatidão é de aproximadamente $\pm 1\%$. O módulo também permite configurar alarmes de sobrecarga e personalizar o endereço de comunicação Modbus. Para operar corretamente, o dispositivo necessita de alimentação externa de 5V e conexão dos quatro fios da interface TTL (Vcc, GND, RX e TX).

Para a realização deste trabalho, foi utilizado o módulo PZEM-004T-100A, que utiliza um transformador de corrente (TC) bipartido externo para a medição da corrente elétrica. A escolha desse modelo se dá pelo fato de que as correntes envolvidas na aplicação podem ultrapassar 10 A, limite máximo suportado pela versão PZEM-004T-10A, que utiliza shunt interno. Dessa forma, torna-se necessário o uso da versão mais robusta, capaz de suportar correntes mais elevadas, além de oferecer maior praticidade na instalação por meio do TC externo.

As conexões de medição, alimentação e comunicação são fundamentais para o correto funcionamento do circuito de medição e monitoramento. Uma representação esquemática dessas conexões pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Esquemático de conexão PZEM-004T-100A.



Fonte: InnovatorsGuru, 2019.

Devido à sua confiabilidade, custo acessível e facilidade de integração, o PZEM-004T é uma opção viável para projetos de eficiência energética, automação e análise de consumo elétrico em tempo real.

2.7 Referências Normativas

Este projeto foi elaborado em conformidade com:

1. **Normas internacionais** — IEC 60831-1/2 que estabelece padrões para construção, ensaios, regras acerca da segurança e as instruções de instalação e operação dos capacitores (IEC, 2014).
2. **Regulamentação setorial** — Resolução Normativa ANEEL 1000/2021, Seção VIII, que impõe fator de potência mínimo de 0,92 para consumidores do Grupo A (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021).
3. **Padrões da concessionária** — Norma de Distribuição Unificada Energisa NDU-001, que apresenta critérios de compensação reativa e utilização de medidores para aferição do fator de potência, enfatizando que a instalação dos bancos de capacitores deve ser realizada conforme a Norma ABNT NBR IEC 60831-1 (ENERGISA, 2024).

As especificações de capacitores, limites de sobrecorrente e metas de correção de FP citadas ao longo dos Capítulos 2, 4 e 5 foram confrontadas com esses documentos, assegurando que o protótipo atenda aos requisitos técnicos e legais vigentes.

3 Revisão Bibliográfica

Este tópico explora os pontos em comum e divergentes de trabalhos correlatos que têm o mesmo objetivo: desenvolver um dispositivo capaz de controlar o fator de potência por meio de um banco de capacitores. Esses estudos medem tensão e corrente separadamente para determinar a defasagem entre as duas grandezas, calcular o fator de potência e, com o uso de um microcontrolador, acionar células capacitivas que compensam a potência reativa e ajustam o fator de potência.

Ao pesquisar o tema deste trabalho, foram identificados estudos semelhantes. Um deles é o TCC do aluno Pohren (2019) de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), no qual foi desenvolvido um controlador de fator de potência voltado à Indústria 4.0. Nesse estudo, o autor optou pelo microcontrolador ESP32, aproveitando o Wi-Fi integrado no modo AP (Access Point) para hospedar um servidor próprio e exibir as medições realizadas pelo dispositivo, além de informar quais bancos estão sendo acionados e a opção de escolha do modo de operação dos bancos de capacitores, automático ou manual.

O protótipo de Pohren (2019) utiliza um TP (Transformador de Potencial) e um TC (Transformador de Corrente) para medir a defasagem entre esses sinais e calcular o fator de potência da rede. O cálculo da defasagem é feito a partir do intervalo de tempo entre as passagens por zero da tensão e da corrente, sendo possível determinar a tensão eficaz (V_{rms}), a corrente eficaz (I_{rms}), a potência ativa e o fator de potência. O acionamento dos bancos de capacitores é feito por meio de um módulo de quatro relés, que fecham os contatos e conectam os bancos de capacitores.

No estudo de Silva (2017), adota-se a mesma metodologia de medições do trabalho anterior, utilizando TP e TC para calcular o fator de potência. A principal diferença é o uso de um microcontrolador Arduino Mega para coordenar o sistema, exibindo o monitoramento dos parâmetros em um display LCD 128×64. Os valores de potência reativa dos bancos de capacitores são enviados pelo Monitor Serial, enquanto o display exibe as leituras em tempo real. O acionamento das células capacitivas é realizado por um módulo de relé de quatro canais, assim como no estudo anterior.

Nos dois trabalhos supracitados, Pohren (2019) e Silva (2017), a medição de corrente é feita por um TC bipartido SCT-013. Os circuitos utilizam apenas um divisor resistivo, formado por resistores de mesmo valor, para criar um *offset* e evitar que chegue tensão negativa na porta analógica do microcontrolador. Este circuito pode ser validado por Ezequiel Demetras (2017), que mostra o passo a passo de como utilizar o sensor SCT-013 para realizar medições de correntes juntamente com um Arduino Uno.

Outro estudo de Pinheiro e Lordello (2017) também utiliza TC e TP para estipular o fator de potência. Entretanto, o método de medição adotado diverge dos trabalhos anteriores. Na etapa de tensão, um diodo 1N4007, resistores e um optoacoplador 4N25 são aplicados para capturar apenas o semiciclo positivo. Desse modo, quando o sistema detecta um pulso, inicia a contagem até a próxima detecção. O optoacoplador garante isolamento elétrico entre o circuito de medição e o microcontrolador, prevenindo danos em caso de surtos de tensão no TP. Para medir a corrente, utiliza-se um TC 50 A/5 A atrelado a um detector de curva de corrente, baseado no CI LM358, um amplificador operacional, o que torna o circuito um pouco mais complexo do que os dos estudos anteriores.

No protótipo apresentado no trabalho de Pinheiro e Lordello (2017), utiliza-se um display LCD 16×2 para monitoramento e, diferentemente dos demais trabalhos citados, empregam-se dois relés de estado sólido SSR-25DA, mais robustos e capazes de suportar correntes de até 25 A, permitindo o acionamento direto das células capacitivas. Contudo, para garantir maior segurança, profissionalismo, qualidade e vida útil do circuito, recomenda-se o uso de contatores com as devidas proteções, evitando acidentes e o desgaste precoce dos bancos de capacitores.

4 Metodologia

A metodologia adotada no dispositivo criado foi dividida em quatro etapas principais. Inicialmente, realizou-se a aquisição dos dados elétricos provenientes das cargas conectadas ao sistema. Em seguida, os dados foram processados, tratados e organizados, com o intuito de garantir a integridade e a consistência das informações. Posteriormente, os dados foram transmitidos por meio de dois canais de comunicação: interface Web e MQTT. Por fim, foi desenvolvido um algoritmo para o cálculo da correção do fator de potência, utilizado como base para a seleção e acionamento dos bancos de capacitores configurados em cada saída do sistema.

Foi utilizada uma ESP32 como microcontrolador principal do sistema, tendo em vista sua alta capacidade de processamento, a presença de Wi-Fi e Bluetooth integrados, além de contar com dois núcleos de processamento - uma característica relevante para o projeto, pois possibilita a execução de tarefas distintas e independentes. Com base nisso, um dos núcleos foi destinado para gerenciar a interface, realizando o controle das informações configuráveis e a exibição dos dados ao usuário. O segundo núcleo, por sua vez, ficou responsável pela captação dos dados do medidor PZEM-004T, pelo cálculo da potência reativa a ser corrigida e pelo envio das informações aos canais de comunicação via MQTT e *WebServer* local.

Essa separação de tarefas é fundamental, uma vez que a aquisição dos dados e os cálculos são realizados continuamente, exigindo que não haja interferências causadas por atrasos ou pelo processamento de outras atividades, garantindo que o tempo e o desempenho sejam dedicados exclusivamente à medição e ao tratamento dos dados.

As seções a seguir descrevem cada etapa do desenvolvimento, abordando desde a forma de mensurar os parâmetros elétricos até o funcionamento proposto do sistema, a estruturação e a descrição do código desenvolvido.

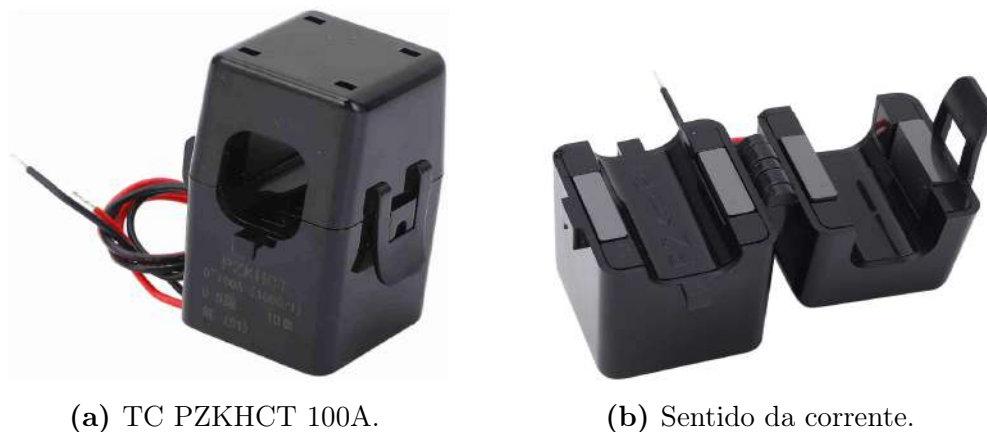
4.1 Medição dos parâmetros elétricos

Existem diversas formas de se medir parâmetros elétricos. Uma das mais comuns consiste na utilização de sensores de tensão e corrente que, quando associados a circuitos eletrônicos e processados via software, possibilitam a obtenção de grandezas derivadas, como potência ativa, reativa e aparente, além do fator de potência. O PZEM-004T é um sensor que integra essas medições em um único módulo, exigindo apenas a conexão dos condutores para leitura de tensão e a passagem do fio de carga por seu TC (Transformador de Corrente) para a medição da corrente elétrica.

Figura 18 – PZEM-004T.

Fonte: ALIEXPRESS, 2025.

O TC fornecido com o PZEM-004T é o modelo bipartido PZKHCT (0–100 A), classe 0,5, com relação 1000:1. Dessa forma, para 100 A no primário, o secundário fornece 0,1 A. Considerando a resistência de carga de 10 Ω , obtém-se aproximadamente 1 V nos terminais quando o TC opera na corrente nominal. Nas Figuras 19 (a) e 19 (b), são apresentadas ilustrações do TC utilizado no protótipo, onde na segunda figura o sensor está aberto, destacando as marcações que simbolizam o sentido da corrente e a maneira correta que o condutor deve ser posicionado para medição adequada da corrente.

Figura 19 – PZKHCT.**(a) TC PZKHCT 100A.****(b) Sentido da corrente.**

Fonte: Amazon, 2025.

4.2 Interface de Configuração

Foi pensado em utilizar 4 botões e um display LCD 16x2 para representar a interface de interação com o cliente. Os botões têm funcionalidades bem específicas: dois deles servem para transitar pelos menus de configuração e aumentar ou diminuir valores. Um dos dois botões restantes serve para selecionar opções e confirmar alterações, enquanto o

outro botão funciona como "ESC", para cancelar opções ou retornar ao menu principal. O display LCD 16x2, apresentado na Figura 20, foi utilizado para proporcionar melhor interação visual com o usuário.

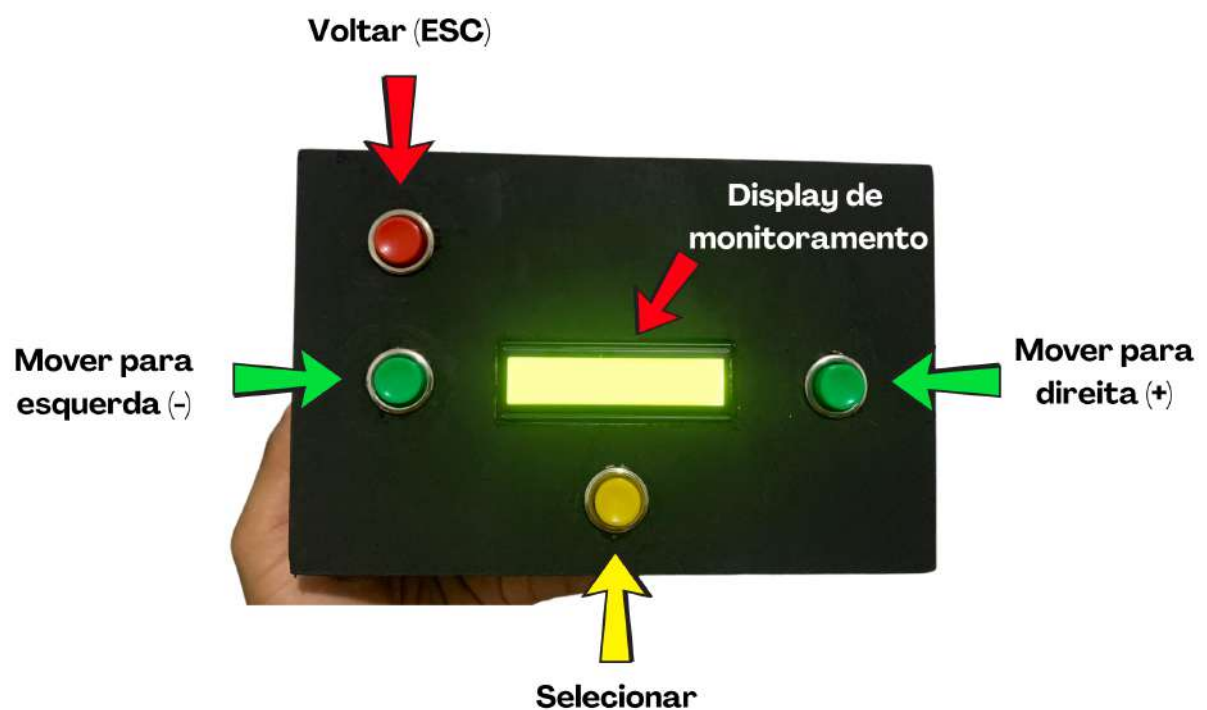
Figura 20 – Display LCD 16x2.



Fonte: Livre, 2025.

A Figura 21 ilustra a disposição dos botões na primeira versão do protótipo, com as indicações da funcionalidade de cada botão:

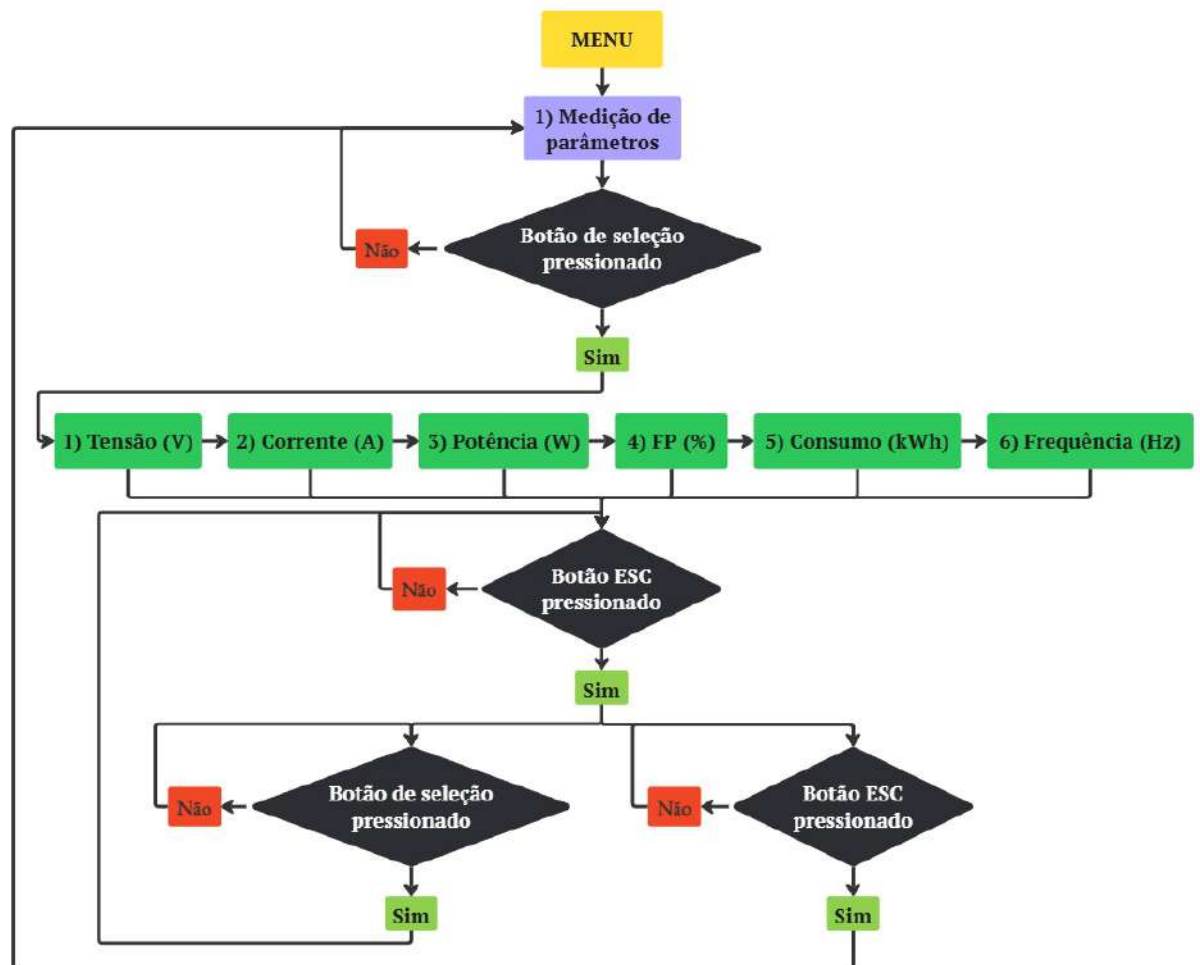
Figura 21 – Disposição dos botões.



Fonte: Autoria própria.

Foi criado um menu de configurações, onde podem ser selecionadas algumas funções necessárias para o monitoramento e funcionamento do dispositivo. A primeira opção do menu exibe as medições captadas pelo PZEM-004T, permitindo que o usuário acompanhe em tempo real as grandezas medidas. A lógica envolvida nesse processo pode ser melhor compreendida se esboçada em um fluxograma, conforme a Figura 22:

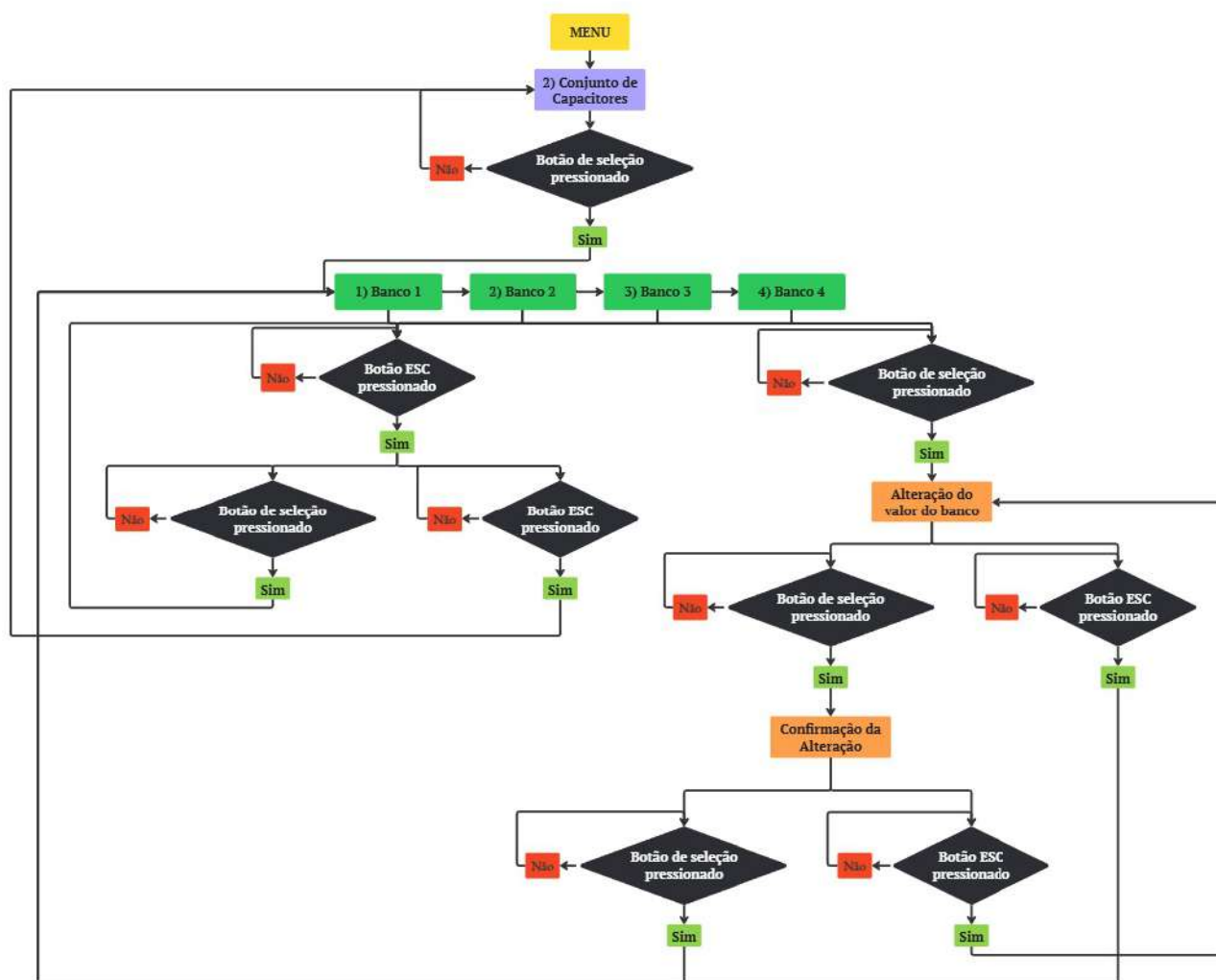
Figura 22 – Fluxograma do menu 1.



Fonte: Autoria própria.

O segundo item é um dos mais importantes, no qual o usuário configura o valor de cada banco de capacitores a ser utilizado, definindo seu valor em *kvar*, para que o sistema consiga selecionar cada banco de acordo com sua capacidade de correção da potência reativa capacitiva. Isso confere ao sistema a capacidade de selecionar a melhor combinação de capacitores para corrigir o Fator de Potência. O fluxograma referente ao processo do segundo menu está ilustrado na Figura 23:

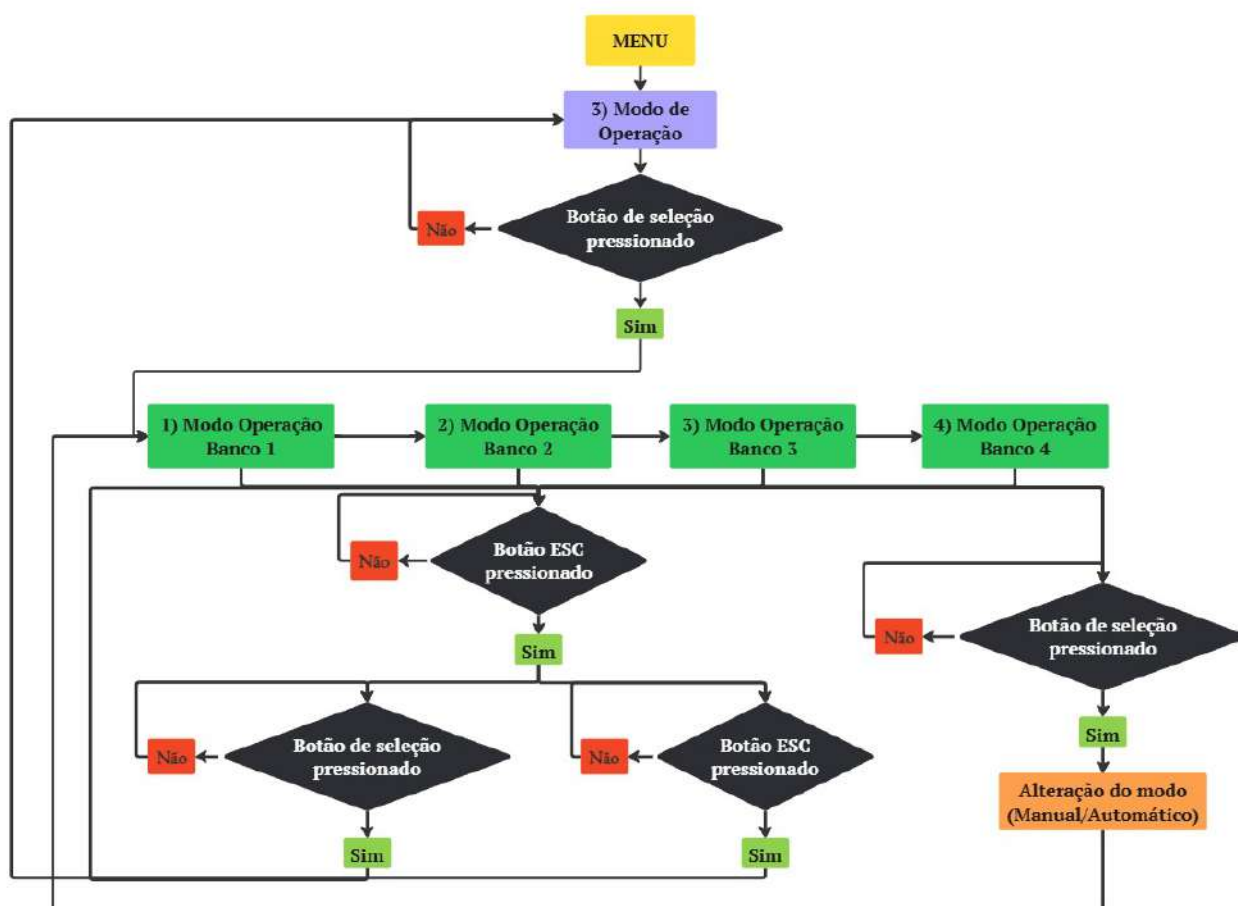
Figura 23 – Fluxograma do menu 2.



Fonte: Autoria própria.

A terceira opção do menu corresponde ao controle do modo de operação, que possibilita o acionamento manual dos bancos, tornando o ajuste de FP independente e permitindo o monitoramento dos bancos já acionados. O fluxograma do terceiro menu está exemplificado na Figura 24:

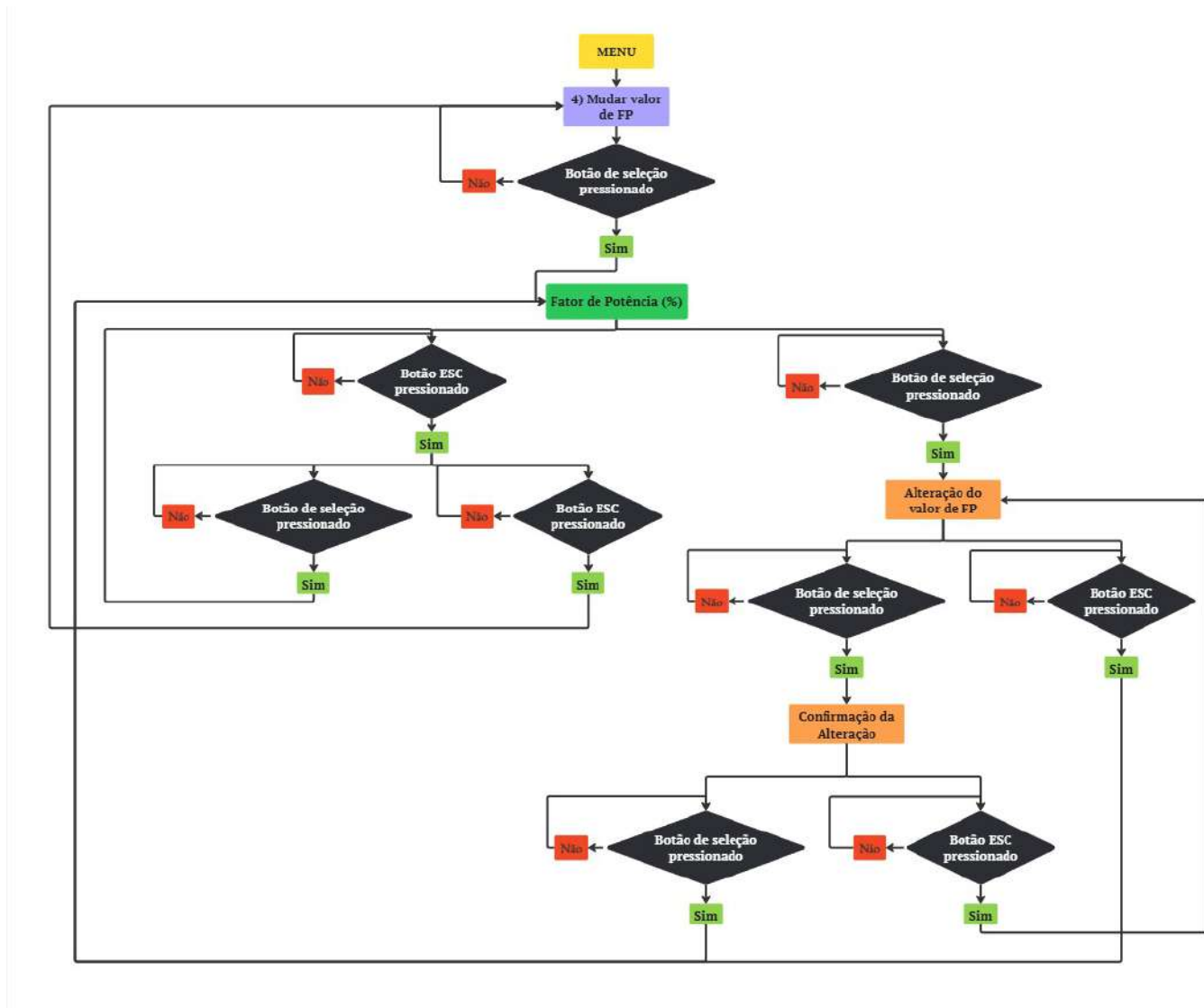
Figura 24 – Fluxograma do menu 3.



Fonte: Autoria própria.

No quarto e último item da lista de menus, temos o ajuste do FP, onde o usuário poderá escolher o valor a ser corrigido em porcentagem, sendo que, por padrão, esse valor deve ser maior ou igual a 0,92 (ou 92%). O fluxograma do quarto menu mostra como funciona a lógica utilizada no código, como apresenta a Figura 25:

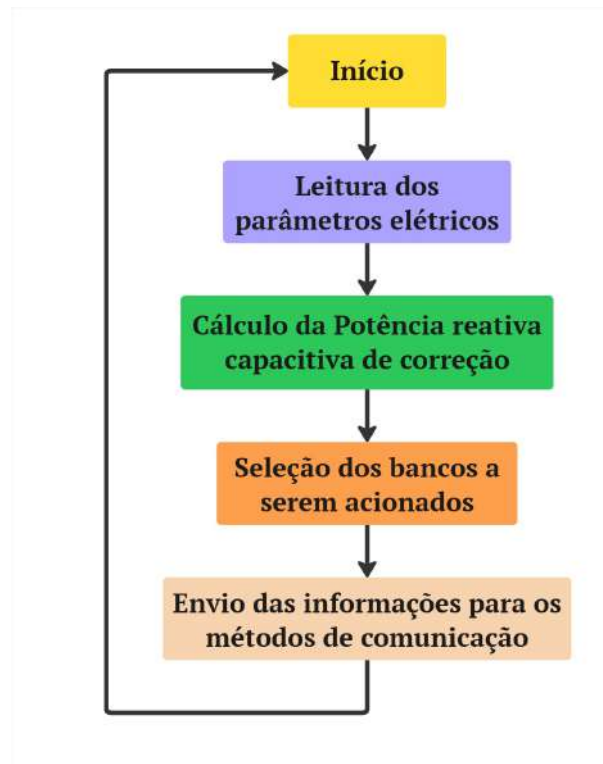
Figura 25 – Fluxograma do menu 4.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Correção de FP

A correção do fator de potência depende de um cálculo realizado para definir o valor de potência reativa capacitiva a ser corrigida, considerando o fator de potência medido, o fator de potência almejado e o valor de potência ativa do sistema. Com essas grandezas definidas, pode-se calcular qual a potência reativa necessária para atingir o fator de potência desejado. O resultado desse cálculo é utilizado para definir quais bancos de capacitores serão ativados para atingir o valor mais próximo da potência reativa calculada. Sempre é considerado um conjunto de capacitores que, somados, corrijam um valor igual ou próximo do fator de potência desejado. Após esse processo, é enviado um *payload*, no formato JSON, para os meios de comunicação utilizados. Todo o processo está exemplificado no fluxograma da Figura 26:

Figura 26 – Fluxograma do Cálculo.

Fonte: Autoria própria.

Para a realização do cálculo, primeiramente é feita uma análise para identificar quais bancos de capacitores estão acionados. Caso haja algum banco em operação, é feita a soma do valor da potência reativa medida ao valor da contribuição dos bancos de capacitores acionados, tomando como base a equação (2.8). Em seguida, realiza-se o cálculo do fator de potência real da carga, com base na potência reativa real calculada anteriormente. No entanto, caso não tenha nenhum banco de capacitores acionado o valor de fator de potência será o valor medido pelo PZEM-004T. O trecho de código responsável por essa parte do processo é visto na Figura 27.

Figura 27 – Código para retirada do banco de capacitores por meio de cálculo.

```

float retira_banco(){
    float FP_sim = 0; //Fator de potência simulado (real)
    float PR_acionado = 0; //Potência reativa acionada

    for (int x=0; x < 4; x++){
        if(estado_rele[x]){
            PR_acionado += pot_cap[x];
        }
    }
    float PR_T = potenciaReativa + PR_acionado; //Potencia reativa total
    FP_sim = potencia/(sqrt(pow(potencia, 2) + pow(PR_T, 2)));
    return FP_sim;
}
  
```

Fonte: Autoria própria.

Após a descoberta do valor real do fator de potência, realiza-se o cálculo da potência

reativa necessária para a correção do fator de potência, utilizando a equação (2.10), como apresentado na Figura 28

Figura 28 – Código para cálculo da potência reativa necessária para correção.

```
float calc_cap() {
    float QCap = 0;
    float fp_atual = retira_banco();
    QCap = potencia * (tan(acos(fp_atual)) - tan(acos(valorFP / 100)));
    Serial.println("*****");
    Serial.println("VALOR A SER CORRIGIDO: " + String(QCap) + " kVar");
    Serial.println("*****");
    return QCap;
}
```

Fonte: Autoria própria.

Após a realização dos cálculos, inicia-se o processo de varredura dos valores dos bancos de capacitores para determinar a melhor combinação que atenda à correção do fator de potência calculada. A função responsável por verificar qual é a melhor combinação dos bancos para essa correção é mostrada na Figura 29:

Figura 29 – Código para escolha da melhor combinação de bancos.

```
bool melhorCombinacao(float alvo) {
    float melhorSoma = 0;
    static float somaAnt = 0;
    int melhorMascara = 0;

    for (int mascara = 1; mascara < (1 << NUM_ESTAGIOS); mascara++) { //Verifica qual a melhor combinação de bancos...
    }

    Serial.print("Melhor combinacao encontrada: ");
    Serial.print(melhorSoma);
    Serial.println(" kVar");

    if(somaAnt != melhorSoma){ //Caso a nova combinação seja melhor que a anterior
        // Marca quais estágios foram escolhidos
        Serial.println("Mlehor mascara: " + String(melhorMascara));
        if(melhorMascara != 0){
            for (int i = 0; i < NUM_ESTAGIOS; i++) {
                if(melhorMascara & (1 << i)){...
                }
                else{
                    estado_rele[i] = 1;
                }
            }
            somaAnt = melhorSoma;
            return true;
        }
        else
            return false;
    }
}
```

Fonte: Autoria própria.

Por fim, os bancos selecionados são acionados, com base na combinação realizada na função mostrada na Figura 29. A Figura 30 ilustra a função que aciona os bancos de capacitores escolhidos.

Figura 30 – Código para acionamento dos bancos selecionados.

```
void ativarEstagios() {
    Serial.println("Estagios a ativar:");
    for (int i = 0; i < NUM_ESTAGIOS; i++) {
        if (!estado_rele[i]) {
            Serial.print("Ativar estagio ");
            Serial.print(i + 1);
            Serial.print(": ");
            Serial.print(pot_cap[i]);
            Serial.println(" kVar");
            RELAY_Write(i, HIGH);
        }
        else{
            RELAY_Write(i, LOW);
        }
    }
}
```

Fonte: Autoria própria.

4.4 Interface Web

A interface Web é amplamente utilizada em projetos de automação e IoT, principalmente quando associada ao modo AP (*Access Point*) do microcontrolador, que oferece acesso local por meio de uma rede própria e hospeda um *Web Server* no seu endereço IP. Dessa forma, é possível acessar informações e interagir com o dispositivo diretamente pela interface.

Para este trabalho, foi criada uma interface que apresenta medições realizadas pelo medidor PZEM-004T, além de outras grandezas elétricas calculadas a partir desses valores. Foi integrada a funcionalidade de mostrar o estado dos relés, se estão acionados ou desacionados. Nesse primeiro momento, a interface tem apenas a função de exibir as informações de medição do dispositivo, sem possibilidade de configuração de parâmetros por ela.

A interface foi desenvolvida em HTML, incluindo CSS para melhorar o estilo visual da página e alguns elementos em JavaScript para permitir a interação com o dispositivo. Os dados são atualizados automaticamente a cada 1 segundo. Contudo, no canto superior direito há um botão que permite a atualização instantânea. A Figura 31 apresenta a interface final, exibindo as medições realizadas pelo PZEM-004T e os estados dos relés.

Figura 31 – Interface Web criada.



(a) Parte superior.



(b) Parte inferior.

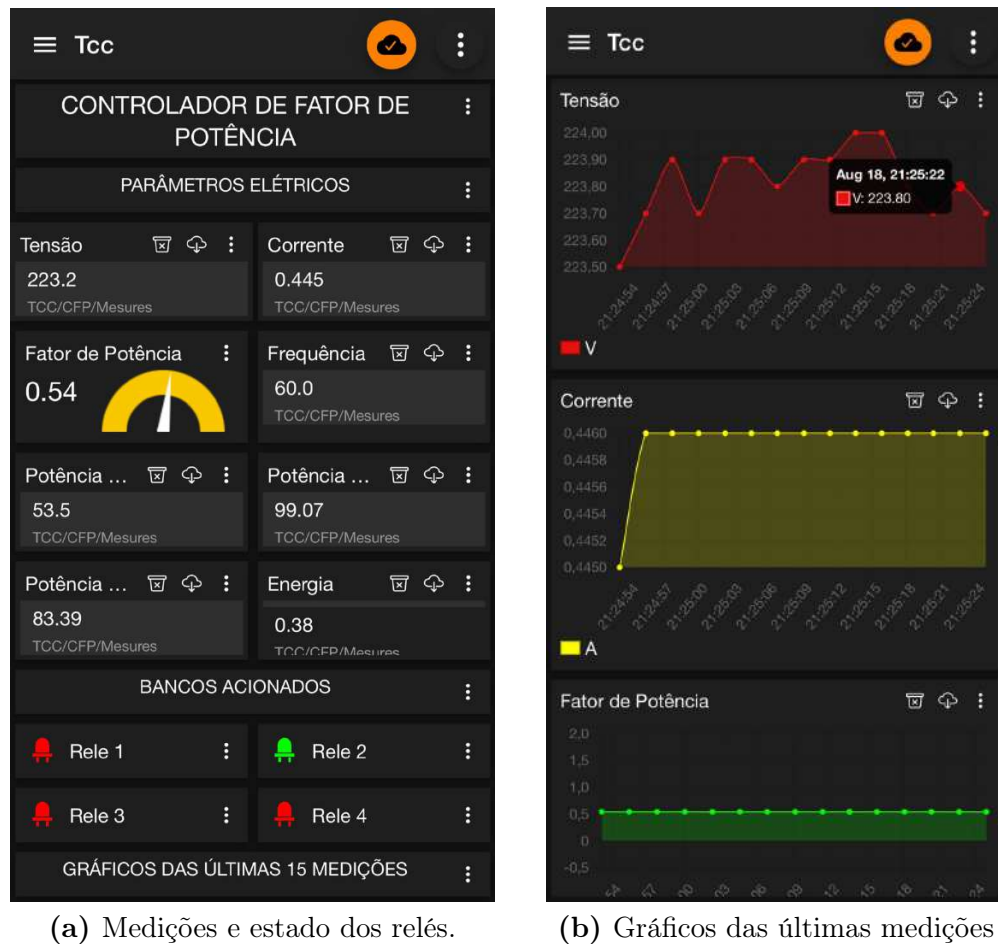
Fonte: Autoria própria.

4.5 Comunicação MQTT

Pensando em uma maneira mais eficiente de visualizar os dados obtidos nas medições, foi utilizado o método de comunicação MQTT, transmitindo via *Wi-Fi* as informações para um Broker que pode ser acessado por um dispositivo de qualquer lugar, possibilitando o monitoramento à distância.

Foi utilizado um aplicativo para MQTT, em que é possível configurar os tópicos, *layout* da página e ícones interativos para as informações recebidas. O aplicativo está disponível na *Apple Store* como: IoT MQTT Panel. A Figura 32 ilustra como ficou o layout da página que receberá e exibirá as informações das medições, estado das saídas dos relés - permitindo identificar quais bancos estão acionados - e três gráficos com as últimas quinze medições da tensão, corrente e fator de potência.

Figura 32 – Aplicativo MQTT.



Fonte: Autoria própria.

4.6 Placa de Circuito Impresso

Pensando na melhor forma de conectar os componentes, foi produzida uma Placa de Circuito Impresso (PCI), que além de manter o circuito mais compacto e organizado em um único local, garante uma melhor conectividade entre os componentes por meio das trilhas de cobre. A placa foi desenvolvida no software KiCad, onde foram planejadas as conexões dos componentes definidos no esquemático e desenhado o layout do circuito. Durante esse processo, foram analisadas a melhor disposição dos componentes, a espessura das trilhas — de acordo com a corrente que circulará por elas — entre outros fatores técnicos. Esses procedimentos foram realizados no intuito de garantir a integridade do sistema e obter o melhor desempenho possível em seu funcionamento.

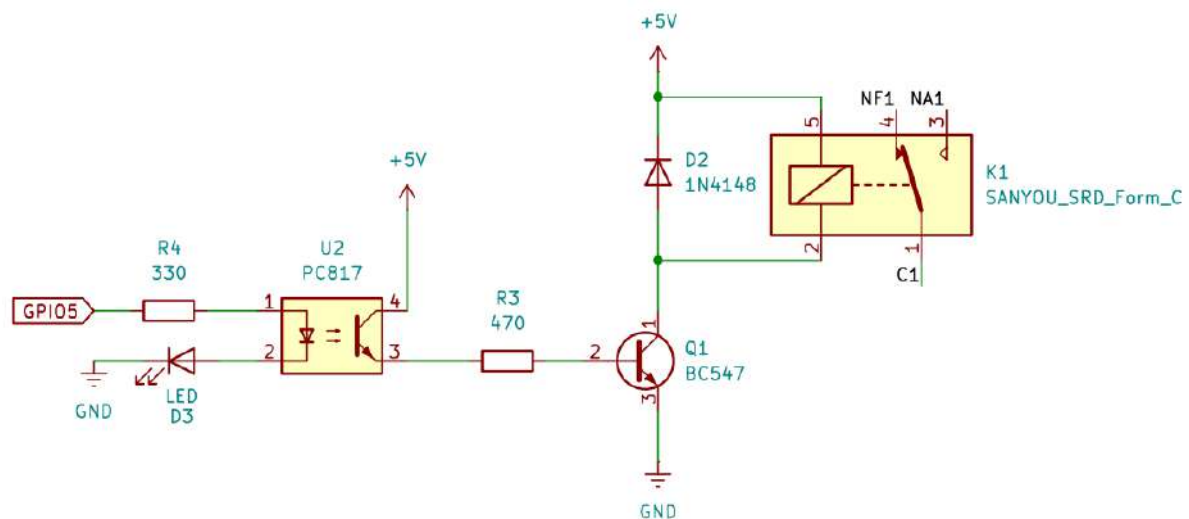
Uma das otimizações realizadas foi a integração dos relés diretamente na placa, eliminando a necessidade de um módulo externo para o acionamento das células capacitivas. Foram utilizados componentes equivalentes para o controle dos relés, mantendo a segurança e o isolamento dos circuitos por meio de optoacopladores. A concentração de todos os elementos em uma única placa reduz falhas causadas por fios e jumpers, que po-

dem provocar mau contato e comprometer o funcionamento do sistema. Os componentes que não estiverem fixados na placa serão conectados por fios soldados, garantindo uma ligação mais estável e confiável. Os componentes que serão conectados externamente à placa são: os botões, o display LCD 16x2 e o módulo PZEM-004T.

4.6.1 Circuitos da placa

Para acionar os relés, que habilitam a inserção dos bancos de capacitores ao sistema, utilizou-se um circuito composto por um optoacoplador, garantindo o isolamento elétrico entre o relé e a ESP32; um LED para indicar quando o relé está acionado; um diodo para evitar curto-circuitos na bobina do relé; um transistor para o chaveamento da alimentação; e dois resistores. A Figura 33 apresenta o esquemático do circuito, criado no software do KiCAD, para melhor compreensão. O circuito é o mesmo para os demais relés, sendo conectados os terminais Comum, Normalmente Aberto e Normalmente Fechado aos terminais de um borne.

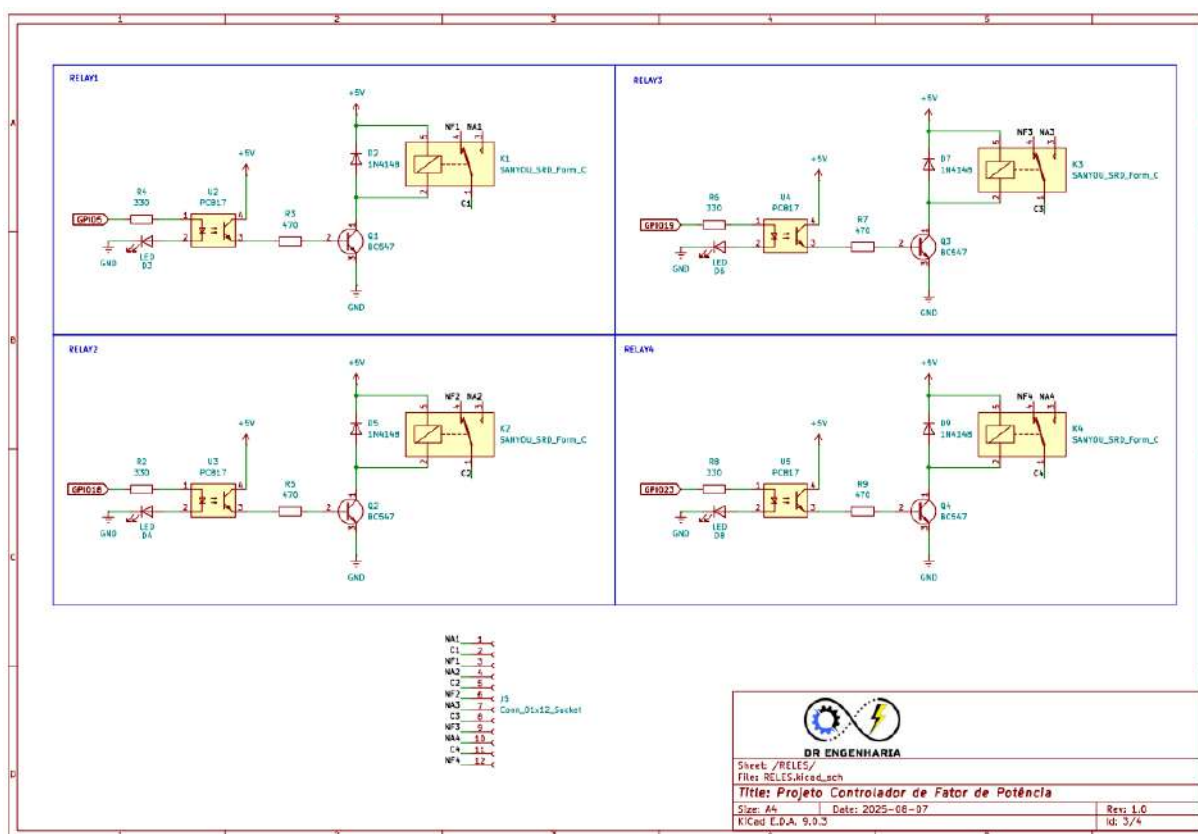
Figura 33 – Circuito do relé.



Fonte: Elaborado no KiCAD.

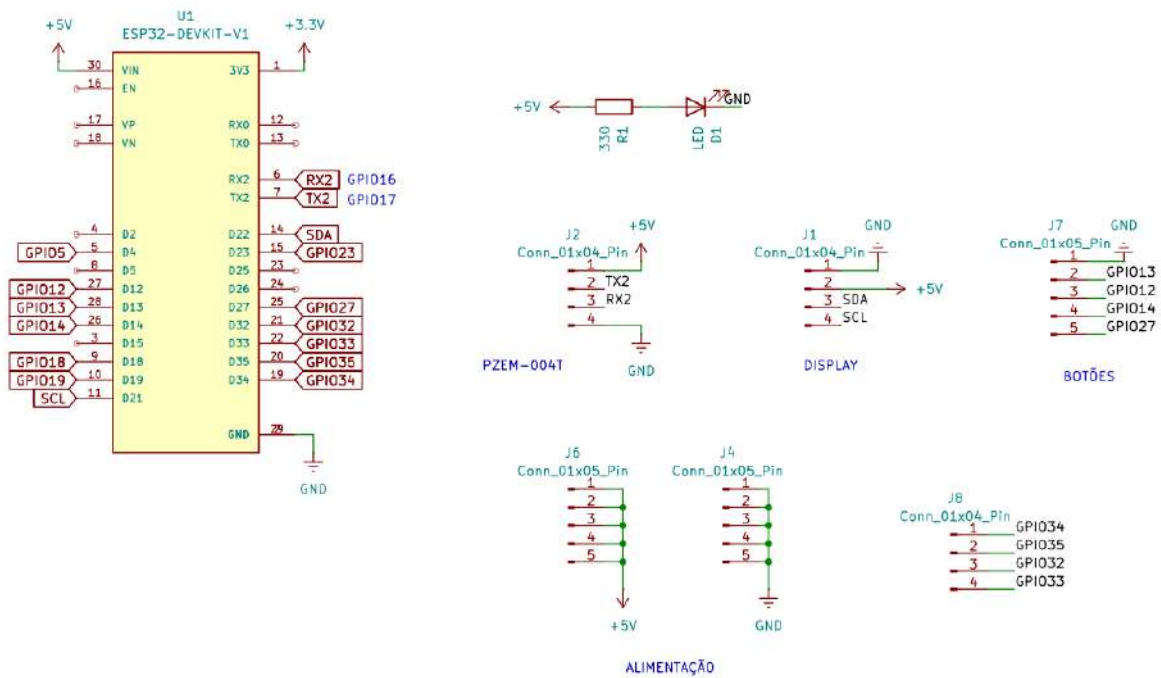
O circuito é o mesmo para os demais relés, sendo conectados os terminais Comum, Normalmente Aberto e Normalmente Fechado aos terminais de um borne, como mostra a Figura 34.

Figura 34 – Circuitos dos relés.



Fonte: Elaborado no KiCAD.

O esquemático das conexões da ESP32, com as pinagens de cada componente, como o PZEM-004T e o display LCD 16x2, é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Circuito de conexões com a ESP32.

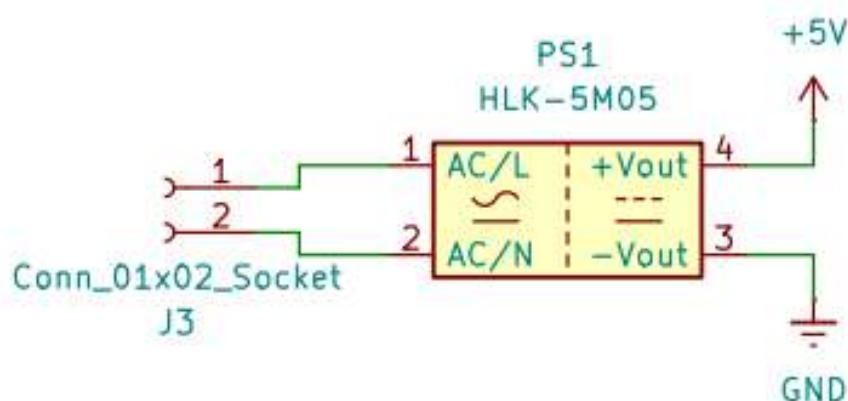
Fonte: Elaborado no KiCAD.

O circuito conta com um conversor Buck AC-DC, alimentado diretamente pela rede elétrica de 220 V em corrente alternada, que realiza a conversão para uma saída de 5 V em corrente contínua, utilizada para alimentar todo o sistema. O modelo utilizado foi o Hi-Link HLK-5M05, que fornece uma saída de 5 V com potência de 5 W, ou seja, capaz de entregar até 1 A de corrente ao circuito.

Figura 36 – Hi-link HLK-5M05.

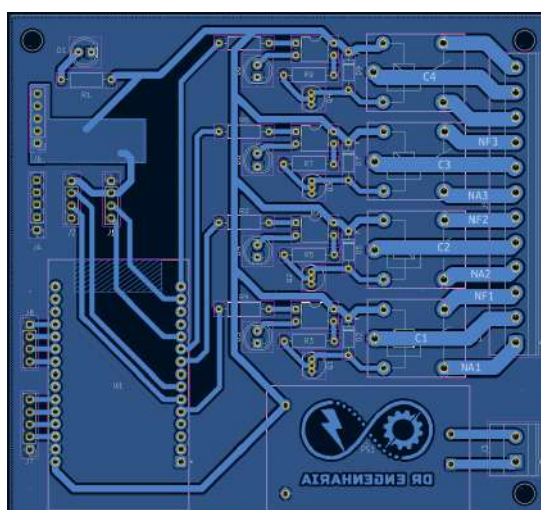
Fonte: USINAINFO, 2025.

O circuito esquemático do conversor Buck é mais simples, pois compreende apenas as conexões com um borne de duas vias e a ligação com a alimentação, como mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Circuito do conversor Buck.

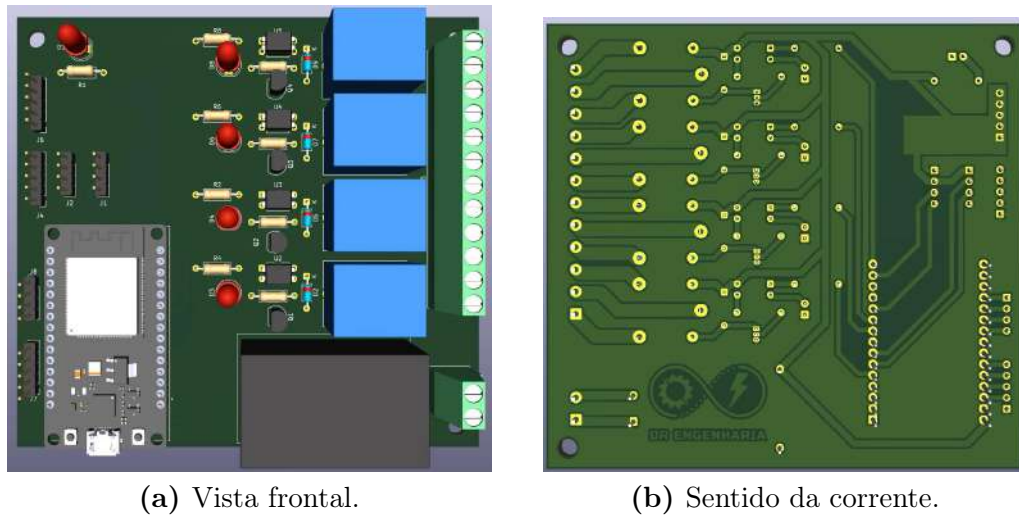
Fonte: Elaborado no KiCAD.

Na Figura 38 está o layout da placa depois de finalizadas todas as conexões, posicionamento e observações para a produção.

Figura 38 – Layout PCI.

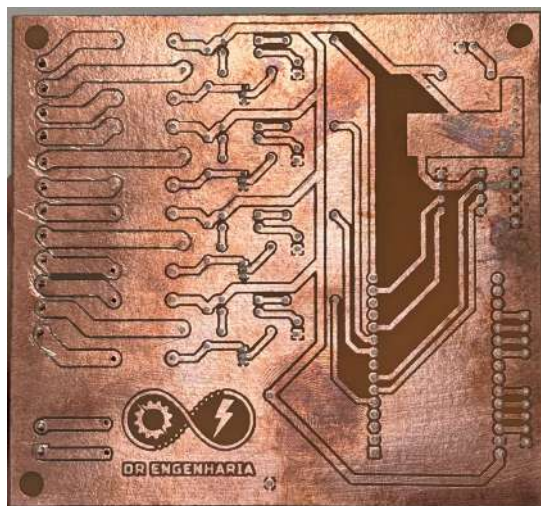
Fonte: Elaborado no KiCAD.

O modelo 3D de uma PCI é importante para que o usuário tenha uma prévia de como a placa ficará após a produção. Portanto, foi realizada uma simulação para representar como ficará o resultado final. A Figura 39, elaborada no KiCAD, apresenta essa simulação.

Figura 39 – Simulação da PCI.

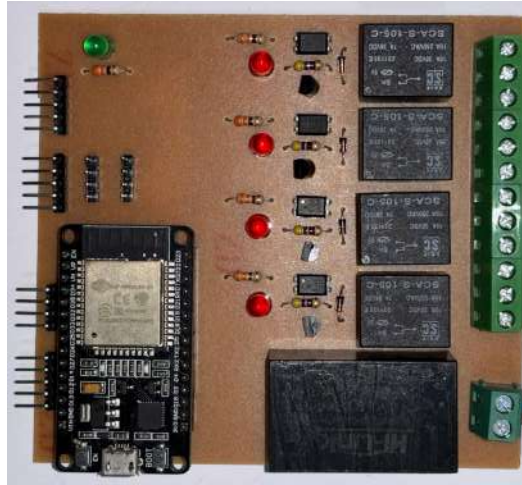
Fonte: Elaborado no KiCAD.

Após a validação de todo o circuito e do layout da placa, foi possível produzir a placa para a soldagem dos componentes e a realização dos testes de funcionamento. A produção foi feita por meio do processo de termotransferência do desenho para uma placa de fenolite virgem. Em seguida, realizou-se a corrosão com percloroeto de ferro, restando apenas o desenho projetado na placa, conforme ilustrado na Figura 40. O último passo consiste na perfuração dos locais necessários para o encaixe dos componentes eletrônicos.

Figura 40 – Placa produzida.

Fonte: Autoria própria.

O passo seguinte foi a soldagem dos componentes, resultando na placa finalizada, ainda sem conexão com os componentes externos, como mostrado na Figura 41.

Figura 41 – Placa Finalizada.

Fonte: Autoria própria.

A lista de componentes utilizados para a produção do dispositivo está elencada na Tabela 1.

Tabela 1 – Lista de componentes.

Componentes	Quantidade	Valor unitário	Valor total
ESP32-DEVKIT	1	R\$ 65,00	R\$ 65,00
Display LCD 16x2	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
PZEM-004T	1	R\$ 109,31	R\$ 109,31
Botões	4	R\$ 5,00	R\$ 20,00
LED	5	R\$ 1,00	R\$ 5,00
Diodo (1N4148)	4	R\$ 0,20	R\$ 0,80
Pinheader Macho 01x40	1	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Borne Phoenix 01x02	1	R\$ 2,30	R\$ 2,30
Borne Phoenix 01x03	4	R\$ 3,00	R\$ 12,00
Pinheader Fêmea 01x40	1	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Relés 5V	4	R\$ 5,00	R\$ 20,00
HLK-5M05	1	R\$ 52,00	R\$ 52,00
BC547	4	R\$ 0,30	R\$ 1,20
Resistor 330 Ω	5	R\$ 0,15	R\$ 0,75
Resistor 470 Ω	4	R\$ 0,15	R\$ 0,60
PC817	4	R\$ 1,00	R\$ 4,00
Total			R\$ 337,96

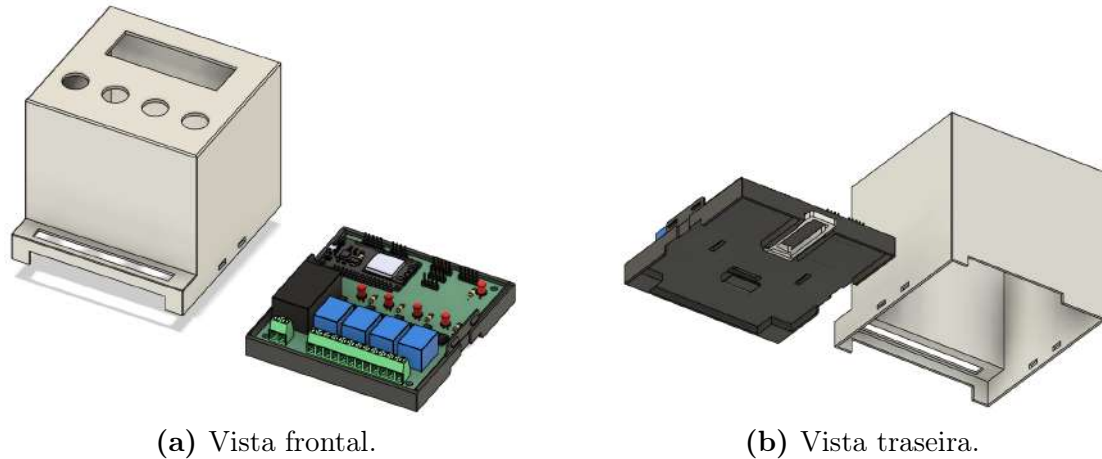
Fonte: Autoria própria.

4.7 Case 3D

Para evitar que o circuito fique exposto e garantir a segurança tanto dele quanto do usuário, foi produzida uma case 3D que abarca todo o dispositivo, permitindo a fixação em trilho DIN caso seja necessário, como mostrado na Figura 42 (b). A modelagem foi feita no *software* Fusion 360, da Autodesk, que possibilita criar modelos tridimensionais complexos

e exportá-los em formatos ideais para fatiamento e impressão. O arquivo *step* do modelo 3D da placa foi importado para validar as medidas da case. O *software* utilizado para o fatiamento foi o UltiMaker Cura, amplamente utilizado para gerar o arquivo necessário para a impressora 3D.

Figura 42 – Case 3D.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 43 exibe a simulação da case fechada, já com as duas partes encaixadas, mostrando como ficará o conjunto após a impressão.

Figura 43 – Case 3D encaixada.



Fonte: Autoria própria.

Após as etapas de modelagem e fatiamento, a peça foi impressa em uma impressora 3D. Com a peça pronta, todos os componentes externos foram acoplados à placa,

resultando no conjunto mostrado na Figura 44, que apresenta o protótipo finalizado com as indicações de funcionalidade de cada botão.

Figura 44 – Protótipo pronto.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 45 mostra o protótipo de outros ângulos, inclusive a parte traseira em que está localizada a estrutura responsável pela fixação em um trilho DIN.

Figura 45 – Protótipo de outros ângulos.



(a) Vista frontal.



(b) Vista traseira.

Fonte: Autoria própria.

5 Resultados

Para a realização dos testes do protótipo, foi criado um cenário hipotético para simular cargas reativas indutivas. O objetivo foi utilizar o dispositivo desenvolvido para medir os parâmetros elétricos e acionar bancos de capacitores de acordo com a demanda de reativos do sistema. O primeiro teste foi realizado na bancada da *DE LORENZO*, no Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência (LabSEP). Essa bancada conta com equipamentos capazes de simular cargas resistivas, capacitivas e indutivas, além de medir todos os parâmetros elétricos do sistema. Também oferece outras funcionalidades que permitem simular, em laboratório, situações reais de sistemas elétricos, fornecendo todo o suporte necessário para estudos acadêmicos e validação teórica.

Figura 46 – Carga resistiva configurada.



Fonte: Autoria própria.

Em um sistema elétrico de potência trifásico, foram adicionadas as cargas resistivas do equipamento de bancada no nível 1, que compõem $1050 \, \Omega$ em cada fase, ou seja, obtendo uma potência ativa de $46 \, W$ por fase. O equipamento configurado é ilustrado na Figura 46, enquanto a tabela referente ao valor desse estágio é mostrada na Figura 47.

Figura 47 – Primeiro estágio da Carga indutiva configurada.



Fonte: Autoria própria.

A carga capacitiva não foi utilizada, conforme mostrado na Figura 48, tendo em vista que os bancos de capacitores, juntamente com o dispositivo desenvolvido para o controle de reativos do sistema, serão responsáveis por essa função. O dispositivo irá selecionar, de acordo com a necessidade de correção do fator de potência, a opção mais adequada de banco de capacitores.

Figura 48 – Carga capacitiva configurada.



Fonte: Autoria própria.

Os valores de cada estágio das cargas estão especificados no manual da bancada. A Tabela 2 apresenta os valores de resistência correspondentes de cada estágio, bem como a potência mínima por fase, em Watts (W). A potência máxima fornecida pela carga é de 1200 W , podendo ser utilizada em configuração monofásica ou trifásica (LORENZO, 2013).

Tabela 2 – Tabela de valores resistivos.

Posição	Resistência (Ω)	Potência máxima por fase (W)
1	1050	46
2	750	65
3	435	110
4	300	160
5	213	230
6	150	330
7	123	400

Fonte: Adaptado de LORENZO, 2013.

No caso das cargas indutivas, é apresentado na Tabela 3 os valores de indutância dos estágios, em Henrys (H), juntamente com os respectivos valores de potência reativa indutiva, em Volt-Ampère reativo (var) para 50 Hz e 60 Hz . Para conexões trifásicas ou monofásicas em 50 Hz , a potência reativa indutiva máxima fornecida pela carga é de 890 var (LORENZO, 2013).

Tabela 3 – Tabela de valores indutivos para 50 Hz e 60 Hz.

Posição	Indutância (H)	Potência a 50 Hz (var)	Potência a 60 Hz (var)
1	4,46	34	28,78
2	3,19	48	40,25
3	1,84	83	69,77
4	1,27	121	101,09
5	0,90	171	142,65
6	0,64	242	200,60
7	0,52	297	246,89

Fonte: Adaptado de LORENZO, 2013.

Por fim, os valores dos estágios da carga capacitiva, assim como a potência reativa gerada em cada um deles em 50 Hz e 60 Hz, são mostrados na Tabela 4. Quando conectada em trifásico, a carga capacitiva pode fornecer até 890 *var*, a 50 Hz. Já na conexão monofásica, a potência reativa máxima é de 825 *var* (LORENZO, 2013).

Tabela 4 – Tabela de valores capacitivos para 50 Hz e 60 Hz.

Posição	Capacitância (μF)	Potência a 50 Hz (VAr)	Potência a 60 Hz (VAr)
1	2	30	36,49
2	3	45	54,74
3	5	76	91,23
4	7	121	127,73
5	10	152	182,46
6	13	197	237,20
7	18	275	328,44

Fonte: Adaptado de LORENZO, 2013.

Foi utilizado um medidor Nemo 96HD, da IME, para validar as medições feitas pelo medidor PZEM-004T, que está acoplado ao dispositivo desenvolvido. O medidor Nemo faz parte da bancada *DE LORENZO* e tem como função monitorar os parâmetros elétricos do sistema. A Figura 49 mostra um modelo semelhante ao utilizado nos testes.

Figura 49 – Medidor Nemo 96HD.

Fonte: BTicino, 2024.

5.1 Teste realizado

A bancada possui quatro bancos de capacitores, dados os valores em μF , sendo acionados três capacitores por banco, sendo um para cada fase, como expõe a Figura 50. Os valores dos bancos são: $3 \times 2 \mu F$, $3 \times 4 \mu F$, $3 \times 8 \mu F$ e $3 \times 16 \mu F$.

Figura 50 – Carga capacitiva configurada.

Fonte: Autoria própria.

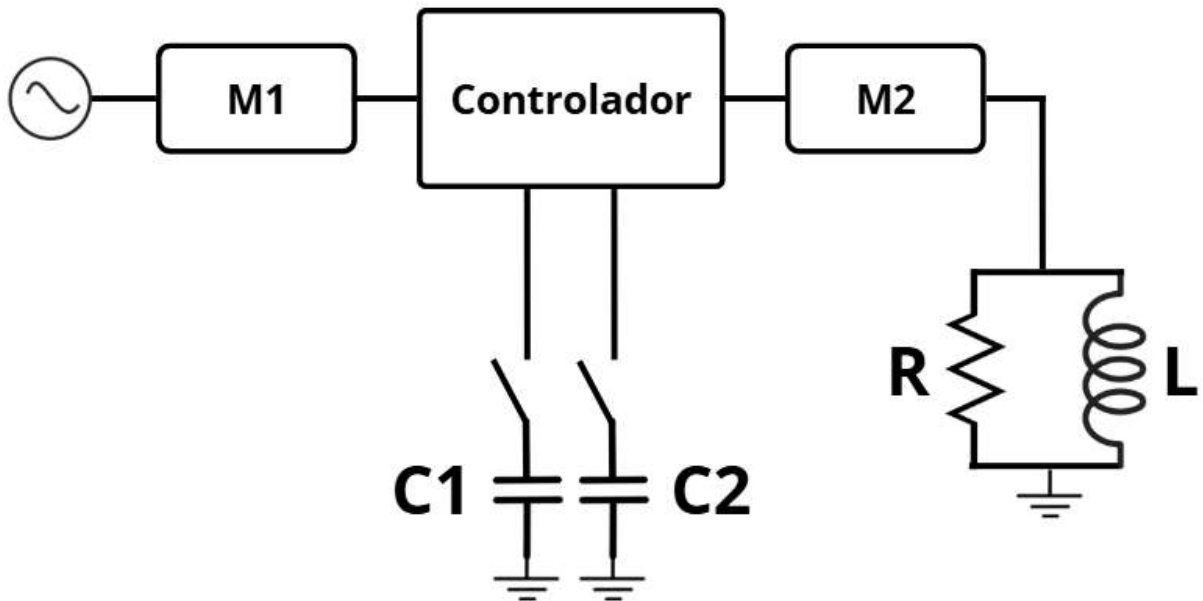
Inicialmente, o dispositivo foi instalado no sistema, conectando a fase 3 do circuito

trifásico e o neutro nas entradas de tensão do PZEM-004T. Para a medição de corrente, o transformador de corrente (TC) bipartido foi acoplado à fase 3, completando as configurações físicas necessárias para a realização das medições. Para o acionamento dos bancos de capacitores, a fase 3 foi conectada à entrada comum do primeiro relé de saída do dispositivo. Dessa forma, ao acionar a primeira saída, o dispositivo envia tensão ao primeiro banco de capacitores, ativando a carga capacitiva e compensando o fator de potência, se necessário. O mesmo processo foi adotado para o segundo banco de capacitores, com configuração de $3 \times 4\mu F$, possibilitando ao sistema mais combinações entre os bancos.

No primeiro caso, foi acionado o primeiro estágio do módulo de resistência, conforme ilustrado na Figura 46, e o terceiro estágio do módulo de cargas indutivas, como mostrado na Figura 47. Foram utilizados dois medidores Nemo 96HD — um antes e outro depois dos bancos de capacitores — verificando, respectivamente, os valores dos parâmetros elétricos corrigidos e reais do lado da carga, com ênfase no fator de potência. Com isso, o circuito estava pronto para o primeiro teste.

Na Figura 51 está ilustrado o diagrama de ligação dos medidores na bancada.

Figura 51 – Diagrama de ligação dos medidores.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 5 estão os dados elétricos medidos pelo medidor Nemo 96HD da bancada para o primeiro caso. Todas as figuras referentes às medições da bancada estão no Apêndice A.1.

Tabela 5 – Valores medidos na bancada, medidor M1.

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	223,9
Corrente (A)	0,414
F_p	0,574
Potência Ativa (kW)	0,053
Potência Reativa ($kvar$)	0,076
Potência Aparente (kVA)	0,092

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros elétricos medidos pelo segundo medidor Nemo 96HD, após o dispositivo controlador, estão na Tabela 6. Todas as figuras referentes às medições da bancada estão no Apêndice B.1.

Tabela 6 – Valores medidos após o controlador, medidor M2.

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	223,4
Corrente (A)	0,444
F_p	0,526
Potência Ativa (kW)	0,052
Potência Reativa ($kvar$)	0,084
Potência Aparente (kVA)	0,099

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 7 estão os valores medidos pelo dispositivo criado, medições derivadas do PZEM-004T. As figuras estão expostas no Apêndice C.1.

Tabela 7 – Valores medidos no dispositivo.

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	223,2
Corrente (A)	0,445
F_p	0,540
Potência Ativa (kW)	0,053
Potência Reativa ($kvar$)	0,083
Potência Aparente (kVA)	0,099

Fonte: Autoria própria.

Verificou-se que, devido a alguma configuração interna do medidor 1 da bancada, ao posicionar o dispositivo para realizar medições após esse medidor, os valores de corrente divergem em relação aos valores registrados pelo segundo medidor, antes do acionamento dos bancos. Essa divergência afeta significativamente os valores que são calculados com base na corrente.

Antes de prosseguir para os próximos passos, será calculado o erro percentual entre as medições realizadas pelo segundo medidor Nemo 96HD e as obtidas pelo dispositivo.

As medições do segundo medidor serão utilizadas como referência, visto que representam diretamente os valores das cargas aplicadas ao circuito. Nesse momento, o dispositivo está mensurando os mesmos valores, já que ainda não há células capacitivas acopladas. Para o cálculo, será utilizada a expressão apresentada em (5.1):

$$Er(\%) = \left| \frac{V_{Nemo} - V_{Disp}}{V_{Nemo}} \right| 100 \quad (5.1)$$

Onde:

V_{Nemo} = Valores medidos pelo medidor Nemo 96HD;

V_{Disp} = Valores medidos pelo dispositivo.

Calculando o erro percentual para todos os valores das Tabelas 5 e 6, teremos a Tabela 8.

Tabela 8 – Erros percentuais de medição.

Parâmetro	Valor
Tensão	0,089%
Corrente	0,225%
F_p	2,662%
Potência Ativa	1,923%
Potência Reativa	1,190%
Potência Aparente	0%

Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 8, observa-se que o PZEM-004T registrou valores muito próximos aos medidos pelo Nemo 96HD, validando sua boa exatidão para esse tipo de medição.

Para a próxima etapa, é necessário calcular os valores de potência reativa capacitiva fornecida pelos bancos de capacitores, obtendo resultados aproximados na unidade de *kvar*. Para isso, pode-se utilizar a equação (2.7). De acordo com o manual da bancada (LORENZO, 2013), o cálculo deve ser realizado considerando uma frequência de 50 Hz, visto que o banco de capacitores desenvolvido para a bancada foi dimensionado para operar nessa frequência, que é a nominal de trabalho na Itália, onde está localizada a fábrica da *DE LORENZO*. Substituindo os valores da Tabela 7 na equação (2.7), tem-se o valor de potência reativa capacitiva do primeiro banco utilizado:

$$Q_C = 2\pi fCV^2 \implies \quad (5.2)$$

$$Q_C = 2\pi 50(2 \times 10^{-6})223,2^2 \implies \quad (5.3)$$

$$Q_C = 31,30 \text{ var} \quad (5.4)$$

Para o segundo banco de capacitores, tem-se:

$$Q_C = 2\pi 50(4 \times 10^{-6})223,2^2 \Rightarrow \quad (5.5)$$

$$Q_C = 62,60 \text{ var} \quad (5.6)$$

Para melhor esclarecimento, os valores de capacitância e potência dos bancos de capacitores estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de potência reativa calculada dos bancos.

	Capacitância (μF)	Potência (var)
Banco 1	2	31,30
Banco 2	4	62,60

Fonte: Autoria própria.

Conhecidos os valores de potência reativa fornecidos por cada banco, é possível calcular o impacto que cada um deles causaria no sistema, ou seja, o quanto do fator de potência seria possível corrigir ao adicioná-los ao circuito. Para o fator de potência atual de 0,54, vamos calcular quanto de potência reativa capacitiva é necessária para atingir o valor de $F_p = 0,92$, utilizando a equação (2.10) e considerando os valores mostrados na Tabela 7:

$$Q_C = 0,053\{\tan[\arccos(0,540)] - \tan[\arccos(0,920)]\} \Rightarrow \quad (5.7)$$

$$Q_C = 0,06003 \text{ kvar} = 60,03 \text{ var} \quad (5.8)$$

Ao analisar a potência reativa capacitiva necessária para atingir um fator de potência de 0,92, observa-se que o banco de capacitores mais adequado para ser acionado é o segundo, que adiciona aproximadamente 62,60 *var* de potência reativa capacitiva ao sistema.

Para determinar qual será o novo valor do fator de potência após a adição do primeiro banco de capacitores, é necessário, primeiramente, calcular a potência reativa que o sistema terá após o acionamento do banco. Para isso, utiliza-se a equação (2.8), considerando que $Q_{Desejado}$ representa o valor de potência reativa que o sistema passará a ter após a compensação. Adotando o valor de Q_{Atual} como sendo a potência reativa obtida

na Tabela 7 pelo dispositivo, e o valor de Q_C como o resultado da equação (5.4), que se trata da potência reativa do segundo banco de capacitores, tem-se:

$$Q_{Desejado} = Q_{Atual} - Q_C \implies \quad (5.9)$$

$$Q_{Desejado} = 83,00 - 62,60 \implies \quad (5.10)$$

$$Q_{Desejado} = 20,40 \text{ var} \quad (5.11)$$

A próxima etapa é calcular o valor da potência aparente, utilizando a equação (2.2), portanto:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \implies \quad (5.12)$$

$$S = \sqrt{53,00^2 + 20,40^2} \implies \quad (5.13)$$

$$S = 56,79 \text{ VA} \quad (5.14)$$

Com o valor da potência aparente calculada na equação (5.14), pode-se determinar o valor de F_p que o sistema irá assumir após a correção. Utilizando a equação (2.1), temos:

$$F_p = \frac{53,00}{56,79} \implies \quad (5.15)$$

$$F_p = 0,93 \quad (5.16)$$

Realizados os devidos cálculos, após a correção do fator de potência com a inserção do banco 2 de capacitores, foi realizada a captura dos dados coletados dos dois medidores da bancada e do protótipo. Nas Tabelas 10, 11 e 12 estão os valores das medições realizadas. As figuras das medições da Tabela 10 estão apresentadas no Apêndice A.2.

Tabela 10 – Segunda medição na bancada, medidor M1.

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	224,7
Corrente (A)	0,292
F_p	0,996
Potência Ativa (kW)	0,055
Potência Reativa (kvar)	0,007
Potência Aparente (kVA)	0,055

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 11 estão os valores medidos pelo segundo medidor Nemo 96HD, após o banco de capacitores, capturando os valores reais das cargas. Todas as figuras referentes às medições da bancada estão no Apêndice B.2.

Tabela 11 – Segunda medição após o controlador, medidor M2.

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	223,9
Corrente (A)	0,446
F_p	0,527
Potência Ativa (kW)	0,052
Potência Reativa ($kvar$)	0,085
Potência Aparente (kVA)	0,099

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 12 estão os valores medidos pelo dispositivo após a correção do fator de potência, ao inserir o segundo banco de capacitores. As figuras das medições podem ser vistas no Apêndice C.2.

Tabela 12 – Segunda medição no dispositivo.

Parâmetro	Valor
Tensão (V)	223,9
Corrente (A)	0,257
F_p	0,950
Potência Ativa (kW)	0,055
Potência Reativa ($kvar$)	0,018
Potência Aparente (kVA)	0,058

Fonte: Autoria própria.

Pela análise da Tabela 12, observa-se que o método analítico apresentou boa convergência com a prática, já que o valor de F_p medido pelo dispositivo foi bem próximo do calculado. Nota-se também que os valores obtidos pelo segundo medidor, na Tabela 11, permaneceram próximos das medições anteriores, visto que ele registra diretamente os valores na carga, sem sofrer variação após a conexão do banco de capacitores.

Após a correção do fator de potência e, conseqüentemente, a inserção do banco de capacitor ao circuito, é possível calcular o erro percentual para as medições do primeiro medidor Nemo 96HD em relação ao dispositivo. Utilizando a equação (5.1) para calcular os erros de medições, tem-se os resultados da Tabela 13:

Tabela 13 – Erros percentuais da segunda medição.

Parâmetro	Valor
Tensão	0,356%
Corrente	11,986%
F_p	4,618%
Potência Ativa	0%
Potência Reativa	157,143%
Potência Aparente	5,450%

Fonte: Autoria própria.

Após a realização do teste, verificou-se que o dispositivo atende à demanda de correção do fator de potência, mantendo-o dentro dos limites estabelecidos pelas normas responsáveis. Além disso, os dados obtidos podem ser analisados remotamente por meio do MQTT, possibilitando o monitoramento a distância.

6 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um dispositivo capaz de realizar medições de parâmetros elétricos de cargas e analisar os dados obtidos, observando o fator de potência para avaliar a necessidade de inserção de bancos de capacitores conectados às saídas de contato seco do equipamento, no intuito de corrigir o fator de potência dentro dos limites estabelecidos pelas normas ANEEL 1000/2021 e NDU-001. O dispositivo foi projetado para operar de forma semelhante a equipamentos já existentes no mercado, monitorando as cargas conectadas e corrigindo o fator de potência, quando necessário, para mantê-lo próximo dos padrões exigidos. Além disso, foram introduzidas funcionalidades adicionais para otimizar o monitoramento, como o uso de um *WebServer* local e o acompanhamento remoto por meio do protocolo MQTT.

Os resultados experimentais obtidos foram satisfatórios e atenderam ao objetivo proposto, elevando o FP de 0,54 para 0,95 e reduzindo a potência reativa de 0,084 para 0,018 *kvar* segundo o dispositivo, com validação por comparação ao Nemo 96HD, que mensurou uma redução de 0,076 para 0,007 *kvar*. O *hardware* desenvolvido para o protótipo funcionou corretamente, garantindo a comunicação com os periféricos acoplados, além de realizar medições e tomar decisões relacionadas ao acionamento das cargas capacitivas, mantendo o FP dentro dos limites das normas aplicáveis.

Uma das limitações encontradas no projeto está no medidor PZEM-004T, que fornece apenas valores absolutos. Desse modo, não é possível diferenciar se o fator de potência é indutivo ou capacitivo, tendo em vista que o equipamento indica somente o valor absoluto. Por outro lado, para medições de tensão, corrente e potência ativa, o dispositivo mostrou-se bastante útil e confiável, apresentando resultados próximos aos obtidos com o Nemo 96HD. Além disso, devido às suas medições confiáveis, o PZEM-004T é adequado para medições de consumo energético. Contudo, em relação ao fator de potência, há limitação de não distinguir entre componentes indutivos e capacitivos.

Para trabalhos futuros, inicialmente, pretende-se embarcar todos os periféricos em uma única placa, assim como já foi feito com os relés, sem a necessidade de utilizar módulos externos. Em relação às medições elétricas, será adotado outro método para o cálculo do fator de potência, capaz de identificar valores negativos, o que resolve a limitação encontrada no PZEM-004T.

Outra evolução prevista é a implementação de comunicação RS485, com suporte ao protocolo Modbus TCP/IP, amplamente utilizado em aplicações industriais. Além disso, serão feitas melhorias nas comunicações já existentes. No MQTT, poderá ser utilizada uma plataforma online ou um aplicativo próprio, permitindo a apresentação das informações

em tempo real com maior interatividade. Entre as possíveis funcionalidades estão: seleção do modo de operação dos bancos de capacitores, ajuste de seus valores, acesso ao histórico das medições para análises mais detalhadas, entre outras.

Quanto à interface *Web* local, propõe-se incluir configurações semelhantes às do MQTT, para os bancos de capacitores, bem como opções de modificação da rede *Wi-Fi*, parâmetros do MQTT (como tópicos e broker), além de outras funções. Dessa forma, o dispositivo poderá se tornar totalmente configurável e adaptável às necessidades de cada cliente.

REFERÊNCIAS

ABB Brasil. *Tudo que você precisa saber sobre correção de fator de potência*. 2023. Disponível em: <https://loja.br.abb.com/blog/post/correcao-de-fator-de-potencia?srsltid=AfmBOorS4UrQeR9UWeU2_P0ll_puZnAsGZA68dDlmV0KHGnHyhbwCSGg>. Acesso em: 23 de Agosto de 2025.

ABB Brasil. *Controlador de Fator de Potência: o que é e para que serve?* 2024. Disponível em: <<https://loja.br.abb.com/blog/post/controlador-de-fator-de-potencia-o-que-e-para-que-serve>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Regulamento, *Resolução Normativa nº 1000/2021*. 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Acesso em: 08 jun. 2025.

ALIEXPRESS. *PZEM004T Nova Versão AC 80-260V 100A Porta TTL Modbus-RTU Voltímetro Monitor de Energia Elétrica Volt Amp Kwh Energia com Split CT*. 2025. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/32707315880.html>>. Acesso em: 09 de Agosto de 2025.

Amazon. *PZKHCT Split Base Current Transformer Coil Sensor 100A Amp Energy Meter*. 2025. Disponível em: <<https://www.amazon.com/PZKHCT-Current-Transformer-Sensor-Energy/dp/B0DPHWRM4P>>. Acesso em: 09 de Agosto de 2025.

BTICINO. *Nemo 96HD - Multifuncional com contagem de energia ativa (cl.0.5) / reativa (cl.2)*. BTicino Spa, 2024. Disponível em: <<https://catalogue.bticino.com/product/solution-for-measurement-and-supervision-ime/nemo-multifunction-meters/flush-mounting-multifunction-meters/nemo-96hd/IMS-MF96001-EN>>. Acesso em: 03 de Julho de 2025.

Catálogo Eletrônico. *Bancos de Capacitores Automáticos: Vantagens e Aplicações*. 2025. Disponível em: <<https://www.catalogoeletronico.com.br/blog/categorias/artigos/bancos-de-capacitores-autom-aacute-ticos-vantagens-e-aplica-ccedil-otilde-es>>. Acesso em: 23 de Agosto de 2025.

CREDER, H. *Instalações Elétricas*. 16. ed. [S.l.]: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016.

Embarcados. *Correção do fator de potência*. 2022. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/correcao-do-fator-de-potencia/>>. Acesso em: 23 de Agosto de 2025.

Energia Automação. *Protocolo MQTT: o que é, como funciona e suas vantagens*. 2022. Disponível em: <<https://energiaautomacao.com.br/artigo/protocolo-mqtt-o-que-e-como-funciona-e-suas-vantagens>>. Acesso em: 15 de Agosto de 2025.

ENERGISA. *Norma de Distribuição Unificada NDU – 001*. 2024. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/sites/energisa/files/media/documents/2025-02/NDU%20001%20-%20Fornecimento%20de%20energia%20el%C3%A9trica%20em%20tens%C3>>

A3o%20secund%C3%A1ria%20a%20edifica%C3%A7%C3%B5es%20individuais%20ou%20agrupadas%20em%20at%C3%A9%20tr%C3%AAs%20unidades%20consumidoras.pdf>. Acesso em: 09 de Junho de 2025.

ESPRESSIF. *Espressif*. Espressif Systems, 2024. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>>. Acesso em: 08 de Junho de 2025.

Ezequiel Demetras. *SCT-013 – Sensor de Corrente Alternada com Arduino*. 2017. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/sct-013-sensor-de-corrente-alternada/>>. Acesso em: 19 de Agosto de 2025.

FILHO, J. M. *Instalações Elétricas Industriais*. 9. ed. [S.l.]: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2017.

IEC. Norma, *Shunt Power Capacitors of the Self-Healing Type for A.C. Systems Having a Rated Voltage up to and Including 1 kV – Part 1: General*. 2014. IEC 60831-1. Genebra.

INDUSTRIAL, A. A. *Controle de fator de potência – O que é e como funciona*. 2020. Disponível em: <<https://alfacomp.net/2022/07/30/control-de-fator-de-potencia/>>. Acesso em: 18 de Julho de 2025.

INNOVATORS GURU. *PZEM-004T V3.0 User Manual*. 2019. Disponível em: <<https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf>>. Acesso em: 08 de Junho de 2025.

LIVRE, M. *Display Lcd 16x2 com Adaptador I2C Backlight Verde*. 2025. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/display-lcd-16x2-com-adaptador-i2c-backlight-azul?srsId=AfmBOooUSdewKjx4qRo0u38zW_3Yaze_KVlxRjKHOU_DYDfGQUyCozAO>. Acesso em: 25 de Julho de 2025.

LORENZO, D. *REDE INTELIGENTE SMART GRID*. 2013.

PINHEIRO, A. L. da S.; LORDELLO, I. M. Controlador de fator de potência utilizando arduino. *Projectus*, v. 2, n. 4, p. 172–191, 2017.

POHREN, G. F. Controlador de fator de potência aplicado à indústria 4.0. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2019.

RANDOM NERD TUTORIALS. *Introdução à placa de desenvolvimento ESP32*. RandomNerdTutorials.com, 2016. Disponível em: <<https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/>>. Acesso em: 08 de Junho de 2025.

SERVICE, E. *Correção de Fator de Potência*. 2020. Disponível em: <<https://electricsservice.com.br/correcao-de-fator-de-potencia/>>. Acesso em: 09 de Junho de 2025.

SILVA, V. L. d. *CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO ARDUINO*. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, 2017.

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); Grupo de Teleinformática e Automação (GTA). *Trabalho Redes I 2023.1 — MQTT (Grupo 01)*. 2023. Material didático da disciplina EEL878. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2023-1/trabalhos/Grupo01/>>.

USINAINFO. *Mini Fonte Hi-Link 5VDC 1A 5W HLK-5M05 100-240VAC*. 2025. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/mini-fonte-pci/mini-fonte-hi-link-5vdc-1a-5w-hlk-5m05-100-240vac-8066.html?srsltid=AfmBOorvQJk3QJZAU1imkvZE2IpNiao6KTMJA2nH01KY7GjiB8sm_xnP>. Acesso em: 25 de Julho de 2025.

WEG. *Controlador Automático do Fator de Potência*. 2013. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h07/hc1/WEG-pfw01-manual-controlador-automatico-50025514-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 17 de Julho de 2025.

WEG. *Correção do Fator de Potência — Linha de Produtos*. 2022. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hda/ha0/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-pt.pdf>>.

WEG. *Banco de Capacitores Trifásicos com Proteção BCWP*. 2025. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Control-Industrial/Controls/Capacitores-e-Corre%C3%A7%C3%A3o-do-Fator-de-Pot%C3%Aancia/Capacitores-para-Corre%C3%A7%C3%A3o-do-Fator-de-Pot%C3%Aancia/Banco-de-Capacitores-Trif%C3%A1sicos-com-Prote%C3%A7%C3%A3o-BCWP/Banco-de-Capacitores-Trif%C3%A1sicos-com-Prote%C3%A7%C3%A3o-BCWP/p/MKT_WDC_BRAZIL_THREE-PHASE_CAPACITOR_BANK_WITH_PROTECTION_BCWP>. Acesso em: 25 de Julho de 2025.

APÊNDICE A – Medições antes do banco de capacitores

A.1 Medições antes da correção do fator de potência

Figura 52 – Primeira Medição dos parâmetros do medidor 1.



(a) Tensão.



(b) Corrente.



(c) Fator de potência.



(d) Potência Ativa.



(e) Potência aparente.



(f) Potência reativa.

Fonte: Autoria própria.

A.2 Medições após a correção do fator de potência

Figura 53 – Segunda Medição dos parâmetros do medidor 1.



(a) Tensão.



(b) Corrente.



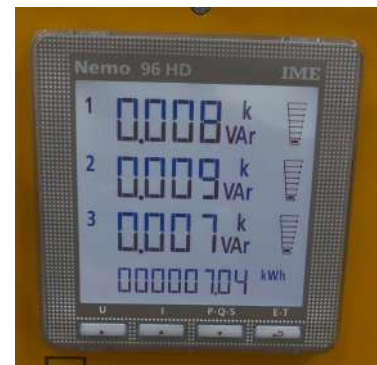
(c) Fator de potência.



(d) Potência Ativa.



(e) Potência aparente.



(f) Potência reativa.

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – Medições após do banco de capacitores

B.1 Medições antes da correção do fator de potência

Figura 54 – Primeira Medição dos parâmetros do medidor 2.



(a) Tensão.



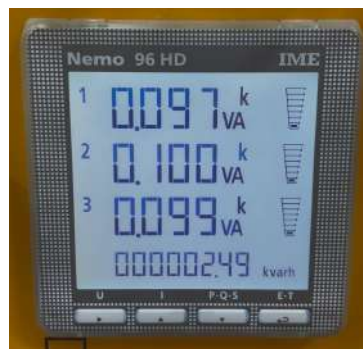
(b) Corrente.



(c) Fator de potência.



(d) Potência Ativa.



(e) Potência aparente.



(f) Potência reativa.

Fonte: Autoria própria.

B.2 Medições após a correção do fator de potência

Figura 55 – Segunda Medição dos parâmetros do medidor 2.

(a) Tensão.



(b) Corrente.



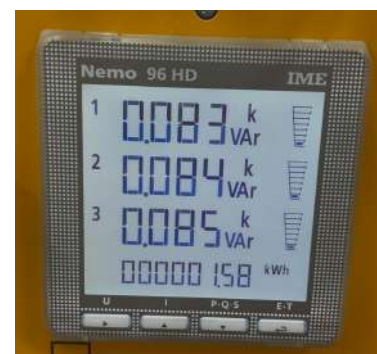
(c) Fator de potência.



(d) Potência Ativa.



(e) Potência aparente.



(f) Potência reativa.

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – Medições do dispositivo

C.1 Medições antes da correção do fator de potência

Figura 56 – Primeira medição dos parâmetros do dispositivo via *WebServer*



Fonte: Autoria própria.

Figura 57 – Primeira medição dos parâmetros do dispositivo via MQTT

Fonte: Autoria própria.

C.2 Medições após a correção do fator de potência

Figura 58 – Segunda medição dos parâmetros do dispositivo via *WebServer*

Fonte: Autoria própria.

Figura 59 – Segunda medição dos parâmetros do dispositivo via *MQTT*

Fonte: Autoria própria.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850

Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)

CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto:	Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por:	Deivid Ribeiro
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Deivid Lyedson Alcantara Ribeiro, ALUNO (20201610036) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 04/09/2025 15:13:18.

Este documento foi armazenado no SUAP em 04/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1597758
Código de Autenticação: 1b3db9fe71

