

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO BERNARDO DO CAMPO
“ADIB MOISÉS DIB”**

**GABRIEL COSTA DE ALMEIDA
GABRIEL RODRIGUES MATIAS DA SILVA
GUILHERME VIANA NEVES
SIMEONI OLIVEIRA ALMEIDA**

SISTEMA MICROCONTROLADO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA

São Bernardo do Campo - SP
Junho/2024

**GABRIEL COSTA DE ALMEIDA
GABRIEL RODRIGUES MATIAS DA SILVA
GUILHERME VIANA NEVES
SIMEONI OLIVEIRA ALMEIDA**

SISTEMA MICROCONTROLADO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo “Adib Moises Dib” como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo (a) em Automação Industrial.

Orientador: Prof. Me. Sérgio Luiz Volpiano

São Bernardo do Campo - SP
Junho/2024

**GABRIEL COSTA DE ALMEIDA
GABRIEL RODRIGUES MATIAS DA SILVA
GUILHERME VIANA NEVES
SIMEONI OLIVEIRA ALMEIDA**

SISTEMA MICROCONTROLADO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo “Adib Moises Dib” como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo (a) em Automação Industrial.

Orientador: Prof. Me. Sergio Luiz Volpiano

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em:26/06/2024

Banca Examinadora:

Prof. Me. Sérgio Luiz Volpiano, FATEC SBC - Orientador

Prof. Dr. Gervásio das Neves Salvador, FATEC SBC - Avaliador

Professor Especialista, Antônio Hernandes Gonçalves, FATEC SBC - Avaliador

Dedicamos esse trabalho aos nossos pais, irmãos e esposas, e a todos os professores, aqueles que nos ajudaram e aos colegas que de alguma forma também contribuíram.

Agradecemos ao Prof. Mestre Sérgio Luiz Volpiano pela ajuda durante a elaboração deste trabalho.

“Nós só podemos ver um pouco do futuro, mas o suficiente para perceber que há muito a fazer.”

ALAN TURING

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo seguido de desenvolvimento de um sistema microcontrolado para correção de fator de potência, visando a elaboração de um dispositivo em malha fechada que trabalha com análises em tempo real do ângulo de defasagem entre tensão e corrente, processa estes sinais e aciona os respectivos bancos de capacitores necessários para corrigir a relação de potências ativa, aparente e reativa do circuito com base nos dados obtidos previamente. O acionamento deste circuito funciona de forma automatizada, de acordo com as cargas acionadas ou desativadas no sistema. Este processo ocorre com constantes varreduras, de forma que o microcontrolador ESP32 possa colher dados do medidor de grandezas elétricas PZEM016, processá-los e tomar decisões. Os dados adquiridos durante esse processo serão indicados em tempo real por um software supervisorio projetado via Excel em Visual Basics que conta com dashboards e indicações importantes do processo, tais como tensão, corrente, fator de potência atual do circuito e status de fator de corrente baixo ou adequado. No dispositivo haverá uma chave que habilita e desabilita a correção do fator de potência, com a finalidade de apresentar ambas as condições de operação, e as variações das grandezas elétricas envolvidas neste estudo. As cargas, sendo estas dois motores monofásicos de 1/5CV e 1/20CV, serão acionadas por um painel de comandos elétricos.

Palavras-chave: Fator de potência. Correção de fator de potência. Correção de fator de potência microcontrolado. Microcontrolador. ESP32. Capacitores. Banco de capacitores. Potência ativa. Potência aparente. Potência reativa. Supervisorio.

ABSTRACT

The present work aims to present a study followed by the development of a microcontrolled system for power factor correction, aiming at the elaboration of a closed-loop device that works with real-time analysis of the phase angle between voltage and current, processes these signals, and activates the respective capacitor banks necessary to correct the active, apparent, and reactive power relationship of the circuit based on previously obtained data. The activation of this circuit operates in an automated manner, according to the loads activated or deactivated in the system. This process occurs with constant scans, so that the ESP32 microcontroller can collect data from the PZEM016 electrical quantities meter, process them, and make decisions. The data acquired during this process will be indicated in real-time by a supervisory software designed via Excel in Visual Basics, which includes dashboards and important indications of the process, such as voltage, current, current power factor of the circuit, and status of low or adequate current factor. In the device, there will be a switch that enables and disables power factor correction, with the purpose of presenting both operating conditions, and the variations of the electrical quantities involved in this study. The loads, consisting of two single-phase motors of 1/5HP and 1/20HP, will be activated by an electrical control panel.

Key-Words: Power factor. Power factor correction. Micro-controlled power factor correction. Microcontroller. ESP32. Capacitors. Capacitors bank. True power. Apparent power. Reactive power. Supervisory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Triângulo das Potências.....	14
Figura 1.2 – Triângulo das Potências.....	19
Figura 1.3 – Defasagem entre tensão e corrente.....	20
Figura 1.4 – Frequência Fundamental e Harmônicas de 3º e 5º Ordem.....	22
Figura 1.5 – Harmônicas e suas ordens.....	22
Figura 1.6a – Harmônicas Ímpares.....	23
Figura 1.6b – Harmônicas pares.....	24
Figura 1.6c – Harmônicas mistas.....	24
Figura 1.7 – Ordens das Harmônicas.....	25
Figura 1.8 – Filtro Ativo Paralelo.....	26
Figura 1.9 – Filtro Ativo Série.....	27
Figura 1.10 – Filtro Sintonizado.....	28
Figura 1.11 – Filtro Amortecido.....	28
Figura 1.12 – Correção do fator de potência.....	32
Figura 1.13 – Diagrama de instalação do primeiro método.....	33
Figura 1.14 – Diagrama de instalação do segundo método.....	34
Figura 1.15 – Diagrama de instalação do terceiro método.....	34
Figura 1.16 – Diagrama dos típicos de instalação.....	35
Figura 1.17 – partes construtivas de um banco de capacitores.....	37
Figura 1.18 – Banco de Capacitores.....	38
Figura 2.1 – Fluxograma do projeto.....	42
Figura 2.2 – Cronograma de atividades.....	43
Figura 3.1 – Circuito de Testes Do PZEM.....	49
Figura 3.2 – Circuito de Testes.....	50
Figura 3.3 – Layout da Placa eletrônica.....	53
Figura 3.4 – Circuito elétrico da placa.....	53
Figura 3.5 – Layout da Quadro de controle.....	56
Figura 3.6 – Componentes.....	57
Figura 3.7 – Placa eletrônica.....	58
Figura 3.8 – 3D da Placa eletrônica	59

Figura 3.9 – 3D do quadro de controle.....	59
Figura 3.10 – Quadro de controle.....	60
Figura 3.11 – Placa de montagem.....	61
Figura 3.12 – Tela de Login.....	63
Figura 3.13 – Painel de Controle.....	64
Figura 3.14 – Dashboard.....	64

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
1 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA – FATOR DE POTÊNCIA.....	14
1.1 Triângulo das potências.....	14
1.1.1 Potência ativa.....	15
1.1.2 Potência reativa.....	16
1.1.3 Potência aparente.....	17
1.2 Fator de potência.....	18
1.2.1 Legislação.....	20
1.2.2 Tarifação brasileira relativa ao fator de potência.....	20
1.2.3 Distorções harmônicas.....	21
1.2.4 Filtros harmônicos.....	26
1.3 Cargas industriais.....	29
1.3.1 Cargas ativas.....	29
1.3.2 Cargas passivas.....	30
1.3.3 Efeitos das cargas na energia elétrica.....	30
1.3.4 Impacto econômico e de qualidade de energia em função das cargas.....	31
1.4 Correção de fator de potência.....	31
1.4.1 Causas do baixo fator de potência.....	32
1.4.2 Correção individual e correção em grupos.....	33
1.4.3 Correção automática e correção fixa.....	35
1.4.4 Capacitores de derivação.....	36
1.5 Banco de capacitores.....	36
1.5.1 Características construtivas.....	37
1.5.2 Cálculo e dimensionamento do banco de capacitores.....	37
2 METODOLOGIA.....	41
2.1 O que é metodologia.....	41
2.2 O tema-problema com justificativa e descrição do projeto.....	41
2.3 Etapas teóricas e práticas para o desenvolvimento do projeto.....	42
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	47
3.1 Interação do ESP32 com MDGE e supervisor.....	47
3.1.1 Teste de interação do ESP32 com medidor digital de grandezas elétrica... ..	47
3.2 Teste de acionamento do ESP32 comandando bancos de capacitores..	48
3.3 Testes e especificação do sistema monitorado.....	49
3.4 Elaboração do diagrama elétrico do projeto.....	50
3.4.1 Circuito elétrico da placa eletronica.....	50
3.4.2 Diagrama elétrico do quadro de controle.....	54
3.5 Montagem e confecção do projeto.....	56

3.5.1	Desenvolvimento do circuito.....	56
3.5.2	Montagem da placa eletrônica.....	57
3.5.3	Montagem do quadro de controle.....	58
3.6	Elaboração do algoritmo do projeto.....	60
3.6.1	Configuração do ESP32.....	60
3.6.2	Algoritmo do projeto.....	60
3.7	Sistema Supervisório.....	62
3.8	Obstáculos e soluções.....	64
 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		 66
 REFERÊNCIAS		 68

INTRODUÇÃO

A problemática relacionada à qualidade da energia elétrica tem evoluído de maneira progressiva em decorrência da incorporação de dispositivos não lineares ou reativos nas redes de energia. O fenômeno do fator de potência constitui um dos elementos que exercem influência sobre a qualidade da energia elétrica, uma vez que a ineficiência na utilização da energia em uma instalação é originada pela presença de um fator de potência baixo. Manter uma instalação desprovida de um controle adequado do fator de potência pode acarretar no desperdício de energia, riscos de superaquecimento, queda de tensão, aumento das perdas internas de energia na instalação, entre outras implicações de ordem econômica, tais como o aumento das despesas com energia elétrica e a redução da vida útil dos equipamentos, além de prejudicar seu desempenho.

O impacto econômico dessa problemática é tão relevante que a legislação nacional voltada para a qualidade da energia elétrica tem passado por revisões ao longo do tempo, o que tem incentivado indústrias e empresas a dedicarem maior atenção à redução de desperdícios e à utilização eficaz da energia em suas instalações elétricas.

A solução para a melhoria do fator de potência tem progredido de forma contínua, impulsionada pela inovação tecnológica e pela necessidade de enfrentar os novos desafios associados à correção do fator de potência. A automação tem-se revelado como uma abordagem eficaz para o controle dessa variável, sobretudo em instalações que apresentam demandas variáveis de energia reativa, superando, assim, a correção fixa por cargas. A implementação de um sistema automático de correção do fator de potência não apenas reduz os custos, mas também promove uma economia de energia mais sustentável.

O propósito deste projeto consiste na elaboração de uma bancada de testes destinada a efetuar o controle do fator de potência em uma instalação elétrica, fazendo uso de um microcontrolador. A intenção do projeto é que o sistema possua a capacidade de adaptação a diversas cargas conectadas à rede elétrica, a fim de manter o fator de potência em níveis aceitáveis, objetivando uma utilização mais eficiente da energia. A bancada será projetada de maneira intuitiva, visando facilitar

a compreensão do funcionamento do sistema. Almeja-se que este projeto demonstre o comportamento do fator de potência em uma rede elétrica e os benefícios sustentáveis resultantes da sua correção.

O trabalho está organizado em três capítulos:

Capítulo 1 – Fundamentação teórica: Neste capítulo, apresentamos as teorias que sustentam o desenvolvimento do projeto.

Capítulo 2- Metodologia: Aqui, descrevemos os métodos, técnicas e procedimentos utilizados ao longo da pesquisa, que orientam a construção lógica do projeto.

Capítulo 3 – Desenvolvimento do projeto: Neste capítulo, detalhamos o processo passo a passo de desenvolvimento e construção do projeto, ilustrando-o com figuras e relacionando-o às teorias previamente apresentadas.

E finalmente, as Considerações finais: abordamos os objetivos propostos, justificativas, estabelecemos conexões entre as teorias e os resultados obtidos, destacamos as conquistas alcançadas, identificamos pontos fortes e fracos do projeto e oferecemos sugestões para futuros trabalhos.

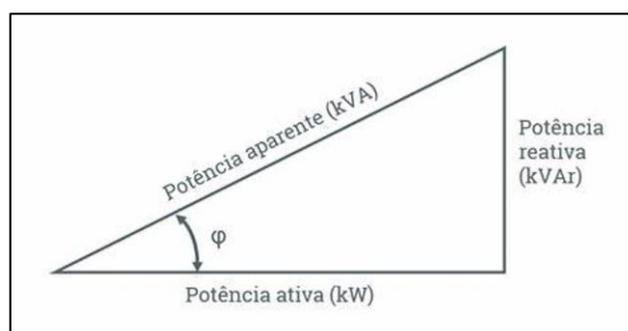
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os conceitos e estudos que dão sustentação ao desenvolvimento do projeto intitulado “Sistema Microcontrolado para Correção de Fator de Potência”.

1.1 Triângulo das potências

Segundo Dualibe (2009), o Triângulo das Potências é uma ferramenta fundamental na análise de sistemas elétricos, proporcionando uma abordagem visual e intuitiva para compreender as relações entre potência ativa, reativa e aparente. A teoria por trás do Triângulo das Potências baseia-se nos conceitos de potência ativa (P) que representa potência elétrica real disponível para realizar trabalho útil, potência reativa (Q) necessária para criar o campo magnético nos indutores ou o campo elétrico nos capacitores. E a potência aparente (S) que exprime a soma vetorial de P e Q , representando a magnitude total da potência em um sistema. A Figura 1.1 ilustra geometricamente como representamos o triângulo das potências.

Figura 1.1 – Triângulo das Potências



Fonte: <https://www.luterled.com.br/fator-de-potencia>, 2023

A utilização do triângulo das Potências para análise de sistemas elétricos promove um melhor dimensionamento nos projetos elétricos de forma mais eficiente e econômica, como por exemplo dimensionamento adequado de equipamentos elétricos, análise de desempenho de redes elétricas e uma das aplicações mais importantes a correção do fator de potência.

1.1.1 Potência ativa

De acordo com Markus (2001), a potência ativa é uma das componentes essenciais do triângulo das potências, simbolizando a quantidade de potência elétrica necessária para executar tarefas úteis em um sistema elétrico, refletindo diretamente no trabalho realizado pelos equipamentos.

Mamede (2007) aponta que um exemplo deste trabalho são circuitos de iluminação com lâmpadas incandescentes que produzem luz e sistemas de aquecimento elétrico que fornecem calor. Para ambas as aplicações notamos que a carga envolvida e constituída por componentes resistivos, portanto a potência absorvida por esses equipamentos e totalmente ativa.

Segundo Markus (2001), a potência ativa é representada pelo símbolo "P" e sua unidade de medida no sistema internacional (SI) é o watt, que é representado pelo símbolo "W". Podemos calcular potência ativa conforme a equação 1.1 abaixo:

$$P = V_{ef} * I_{ef} * \cos \varphi \quad [1.1]$$

Onde:

P é a potência ativa em watts (W);

V_{ef} é a tensão efetiva em volts (V);

I_{ef} é a corrente efetiva em amperes (A);

φ é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente (Graus).

Sendo V_{ef} definido como:

$$V_{ef} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad [1.2]$$

E I_{ef} descrito por:

$$I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad [1.3]$$

Onde:

V_m = Tensão elétrica máxima (V);

I_m = Corrente elétrica máxima (A);

Para sistemas trifásicos calcula-se potência ativa conforme a equação 1.4, esta equação se aplica em ligação estrela e triângulo:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \varphi \quad [1.4]$$

Onde:

V_L é a tensão de linha em volts (V);

I_L é a corrente de linha em amperes (A);

1.1.2 Potência Reativa

Nahvi e Edminister (2005) esclarecem que a potência reativa está presente em instalações e circuitos elétricos que possuem componentes não lineares como capacitores e indutores. Tal potência é um requisito fundamental para esses componentes pois proporciona a troca e o armazenamento da potência reativa com a fonte de alimentação.

Markus (2001) destaca que embora a potência reativa não contribua com trabalho útil para o sistema, ela é essencial para o funcionamento adequado das cargas não lineares. Para cargas indutivas, a parcela reativa da potência influencia no processo de magnetização e desmagnetização dos componentes, ao passo que, nas cargas capacitivas, é utilizada para o carregamento e descarregamento dos componentes capacitivos.

Para Dualibe (2009), instalações e circuitos elétricos com elevado índice de potência reativa tendem a causar problemas na instalação, como a elevação da potência aparente provocado pelo aumento da corrente na linha de alimentação, perdas elétricas internas em forma de calor, queda de tensão da instalação, aquecimento nos condutores elétricos etc. Sendo assim, é necessário que a potência reativa se mantenha em valores adequados para garantir o melhor funcionamento, segurança e confiabilidade do sistema.

Segundo Edminister (1991) podemos representar a potência reativa pelo símbolo "Q" é sua unidade de medida no sistema internacional (SI) é o Volt Ampère reativo que é representado pelo símbolo "VAr". A potência reativa pode ser determinada como o resultado do produto da tensão eficaz, corrente eficaz e o seno do ângulo entre a tensão e corrente, conforme a equação 1.5:

$$Q = V_{ef} * I_{ef} * \sin \varphi \quad [1.5]$$

Onde:

Q é a potência reativa em volt ampère reativo (VAr);

V_{ef} é a tensão efetiva em volts (V);

I_{ef} é a corrente efetiva em amperes (A);

φ é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente (Graus).

Rider (2010) aponta que a variação do ângulo phi (φ) influencia de forma direta no valor da potência reativa. Para segurança da instalação e evitar a cobrança de multas por excedente reativo é necessário efetuar o controle desse ângulo mantendo dentro dos parâmetros exigidos pela legislação.

1.1.3 Potência Aparente

Conforme Markus (2001), a potência aparente se trata da soma vetorial da potência ativa com a potência reativa, portanto representa a potência total fornecida ao circuito, ao passo que, podemos simbolizar como sendo a hipotenusa do triângulo das potências.

Dualibe (2009) expressa que é necessário ter um controle preciso da capacidade instalada, para evitar problemas dentro de uma instalação elétrica, portanto é imprescindível que os equipamentos estejam bem dimensionados tanto em componentes ativos e reativos, pois isso implica na potência aparente como resultado a partir disso podemos notar parâmetros de qualidade da instalação e da energia fornecida.

Segundo Markus (2001), podemos expressar a potência aparente pelo símbolo (S) em volt-ampère (VA), que é representada pela equação 1.6 e 1.7:

$$S = V * I \quad [1.6]$$

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad [1.7]$$

Para sistemas trifásicos calcula-se potência aparente conforme a equação 1.8, está equação se aplica em ligação estrela e triângulo:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} * V_L * I_L \quad [1.8]$$

Onde:

V_L é a tensão de linha em volts (V);

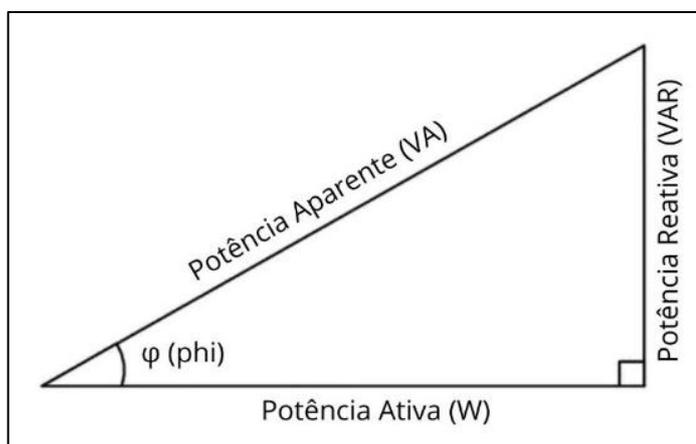
I_L é a corrente de linha em amperes (A).

A potência aparente é uma métrica complexa que vai além da análise convencional de potência em sistemas elétricos. Ela combina elementos de potência real (P), responsável pelo trabalho efetivo realizado, e potência reativa (Q), necessária para estabelecer campos elétricos e magnéticos, contudo é de extrema importância para analisar sistemas e instalações elétricas (RIDER, 2010).

1.2 Fator de potência

O fator de potência pode ser descrito como uma resultante da relação entre as potências ativa, reativa e aparente, diretamente associado ao ângulo ϕ (φ) (RIDER, 2010). Estes, por sua vez, compõem o triângulo das potências, como mostrado na Figura 1.2:

Figura 1.2 – Triângulo das Potências



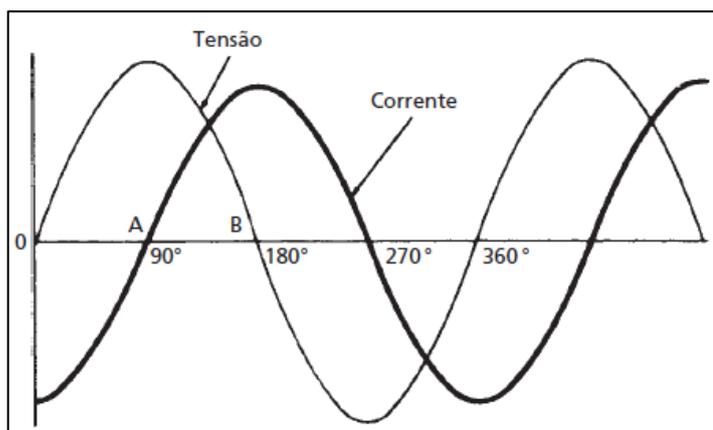
Fonte: Autoria própria, 2023

$$FP = \cos(\varphi) \quad [1.9]$$

A importância do fator de potência se dá pela razão de que este é o principal parâmetro medidor da eficiência energética de uma rede elétrica, seja um simples circuito, ou uma instalação de milhares de metros quadrados, com inúmeros dispositivos elétricos como máquinas, motores e afins. O fator de potência indica quanto da potência aparente de fato está sendo convertido em trabalho (potência ativa), e quanto dessa energia está sendo gasta em perdas energéticas indesejadas (excesso de potência reativa) (RIDER, 2010).

O fator de potência pode ser relacionado diretamente à defasagem entre tensão e corrente. Esta defasagem ocorrerá devidos aos efeitos eletromagnéticos causados por dispositivos indutivos, que resultará em um atraso da corrente em relação à tensão. A Figura 1.3 indica as formas de onda de tensão em corrente nesta situação:

Figura 1.3 - Defasagem entre tensão e corrente



Fonte: <https://hangamma.com.br/glossary/glossary-categories/indutancia-em-circuitos-ca/>, [s.d.]

1.2.1 Legislação

De acordo com o site Citisystems (2017), para se ter controle quanto a essas possíveis perdas energéticas em grande escala, fez-se necessário regulamentar o fator de potência das instalações elétricas em todo o território nacional, e este processo de regulamentação se iniciou com o decreto nº 62.724 de 17 de maio de 1968 e com a nova redação dada pelo decreto nº 75.887 de 20 de junho de 1975, que estabelecia o fator de potência mínimo como 0,85. No decreto nº 479 de 20 de março de 1992, fez-se obrigatório que o fator de potência estivesse o mais próximo possível de 1,00. Este decreto demandou que o Departamento Nacional de Águas e

Energia Elétrica – DNAEE – estipulasse um novo limite mínimo para o fator de potência, que de 0,85 foi aumentado para 0,92. (SILVEIRA, CRISTIANO, 2017).

1.2.2 Tarifação brasileira relativa ao fator de potência

Segundo PROCEL (2011), como padrão, a legislação brasileira estabelece que o fator de potência mínimo seja de 0,92. O fator de potência pode ser indutivo ou capacitivo a depender da hora do dia, durante o dia será indutivo, e a noite passa a ser capacitivo. Caso esteja abaixo de 0,92, o consumidor terá um acréscimo em sua fatura, resultante de uma multa baseada no consumo de potência reativa. O fator de potência anteriormente medido mensalmente, passou a ser medido de hora a hora, promovendo índices mais assertivos quanto à geração de potência reativa desnecessária. Os valores para essa multa são calculados com base na energia ativa (KWh - Quilo Watt Hora) e na energia reativa (KVA_{rh} – Quilo Volt Ampere Reativo Hora), porém essa energia reativa é matematicamente convertida para ativa, que fará com que a unidade de medida final evidenciada na conta de energia seja o KWh. Na conta de energia, o termo que representa este acréscimo é nomeado como “Consumo de Energia Reativa Excedente e Demanda Reativa Excedente”.

De acordo com o artigo 302 da REN 1000/2021, o fator de potência de referência “f_R”, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido o valor de 0,92 para a unidade consumidora do grupo A. As medições ocorrem da seguinte maneira: A energia reativa capacitiva é medida entre 23h30 e 06h30 e a energia reativa indutiva entre 06h30 e 23h30, segundo o art 302 da REN 1000/2021. Quando não é possível se medir a energia reativa capacitiva, a medição da energia reativa indutiva é feita durante as 24 horas do dia.

1.2.3 Distorções harmônicas

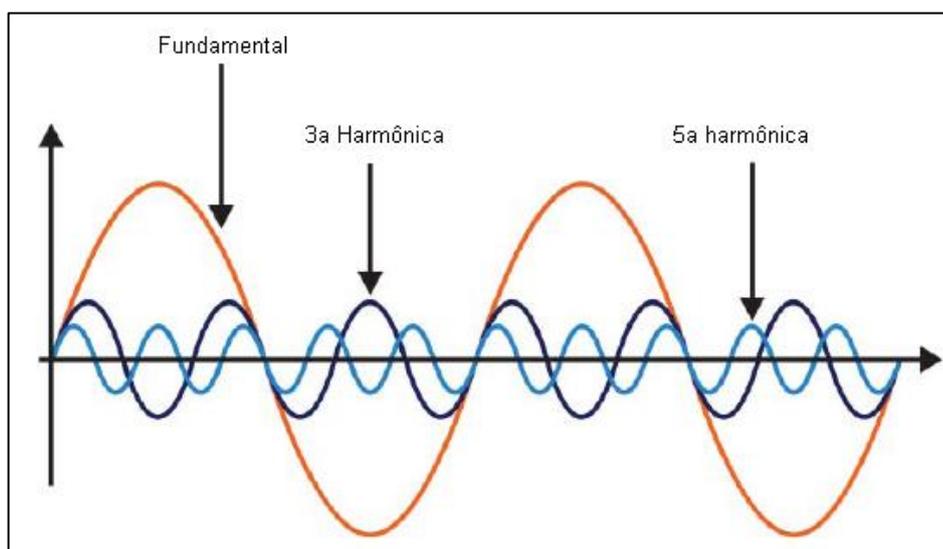
Antes de abordar o tópico sobre distorção harmônica, é importante ressaltar que o projeto desenvolvido foca exclusivamente na correção do fator de potência em cargas passivas sem considerar distorções harmônicas. No entanto, é relevante mencionar que a distorção harmônica tem um impacto significativo no fator de potência, sendo necessária a aplicação de filtros harmônicos para lidar com esses casos específicos.

Segundo Deckmann e Pomilio (2020), distorções são consideradas harmônicas quando estão presentes de forma similar a cada ciclo da frequência

nominal, sendo causadas por cargas não lineares, geradas por equipamentos que possuam uma relação não linear entre tensão e corrente, como motores e transformadores, cujo núcleo ferromagnético está sujeito a saturação. Além destes, também são consideradas cargas não lineares cargas eletrônicas, pois possuem descontinuidade da corrente elétrica devido a chaveamento dos conversores.

De acordo com Pascoal (2020), cargas não lineares geram frequências diferentes da frequência fundamental, no Brasil, 60Hz. Neste contexto, não há uma senóide em frequência perfeita de 60Hz, mas sim uma soma de várias senóides com diferentes frequências, como mostrado na Figura 1.4:

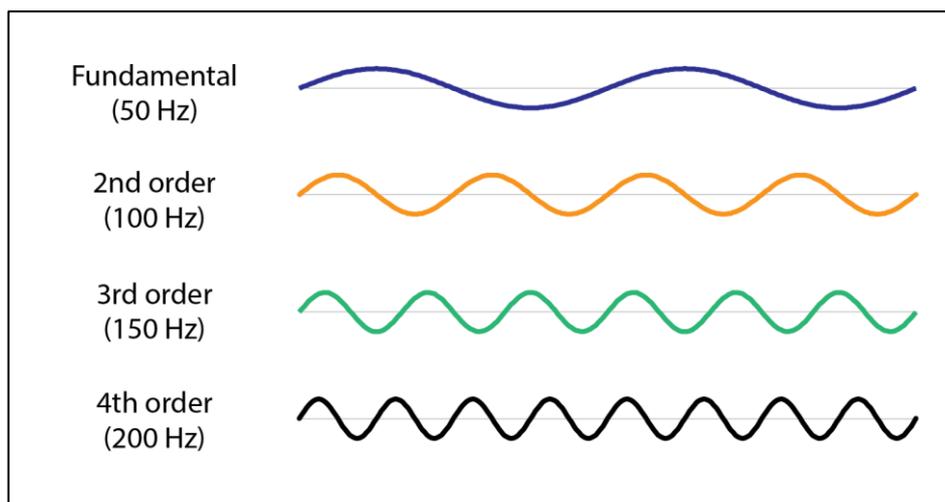
Figura 1.4 - Frequência Fundamental e Harmônicas de 3º e 5º Ordem



Fonte: <https://newtonbraga.com.br/index.php/usando-os-instrumentos/11916-detectando-harmonicas-em-sinais-ac-ins365.html>, [s.d.]

Ainda Pascoal (2020) descreve que harmônicas possuem ordem, sendo estas múltiplas da frequência fundamental. Logo, para uma frequência fundamental de 50Hz, 100Hz seria uma harmônica de 2º ordem, 150Hz 3º ordem, 200Hz 4º ordem, e assim por diante, como ilustrado na Figura 1.5:

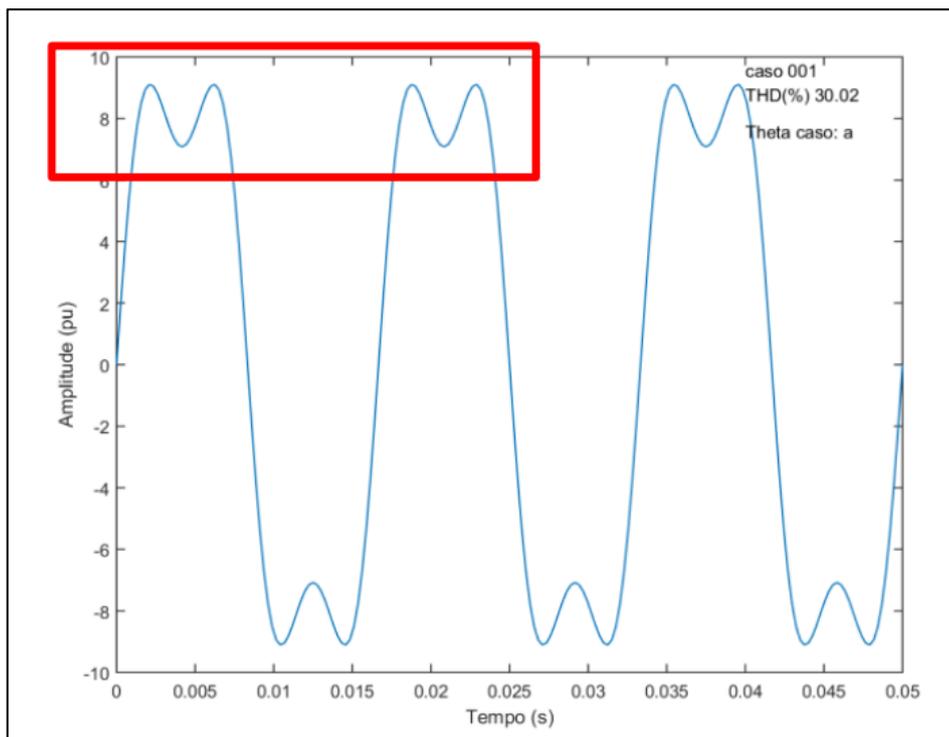
Figura 1.5 - Harmônicas e suas ordens



Fonte: <https://www.hioki.com/br-pt/learning/electricity/thd.html>, [s.d.]

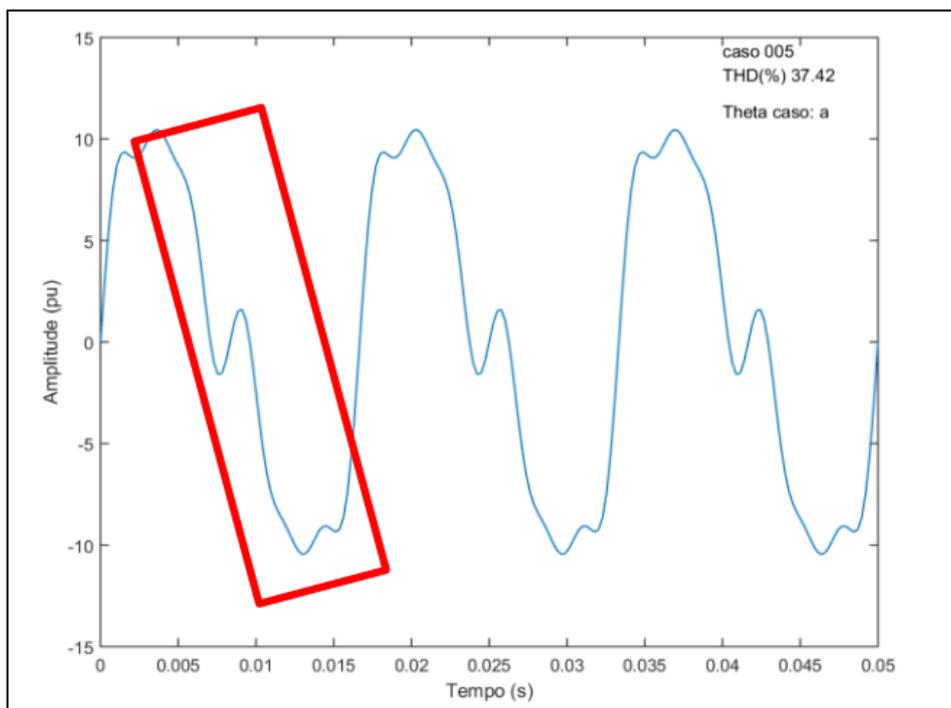
Segundo Mattede [s.d.], distorções harmônicas podem ser pares, quando a frequência fundamental é multiplicada por um número par, ou ímpares, quando multiplicada por um número ímpar. Harmônicas ímpares estão presentes em instalações que trabalham unicamente com corrente alternada, enquanto as pares estão presentes em instalações que trabalhem também com componentes contínuas, gerando assimetrias no sinal. Para situações onde haja simetria de meio semiciclo, existem apenas distorções harmônicas ímpares. Quando existe assimetria de meio semiciclo, há a presença de harmônicas pares e ímpares. Beuter e Oleskovicz [s.d.], descrevem as características visuais destas harmônicas, de forma gráfica, sendo que as componentes ímpares se situam apenas nas porções mais extremas dos semi-ciclos positivo e negativo, as pares nas regiões de transição entre os semi-ciclos positivo e negativo, e as harmônicas mistas, que são basicamente a união de ambas as componentes, como nas Figuras 1.6a, 1.6b e 1.6c, respectivamente.

Figura 1.6a – Harmônicas Ímpares



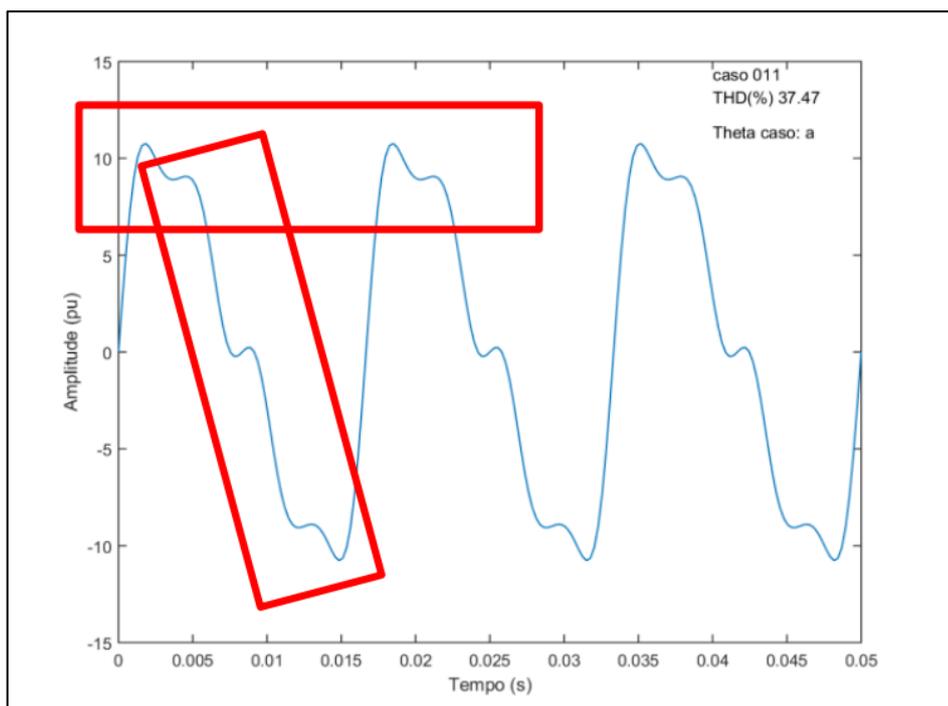
Fonte: Beuter, Carlos; Oleskovicz, Mario. Aula Laboratorial Expositiva: Distorções Harmônicas, [s.d.],
página 11

Figura 1.6b - Harmônicas pares



Fonte: Beuter, Carlos; Oleskovicz, Mario, [s.d.], página 12

Figura 1.6c - Harmônicas mistas

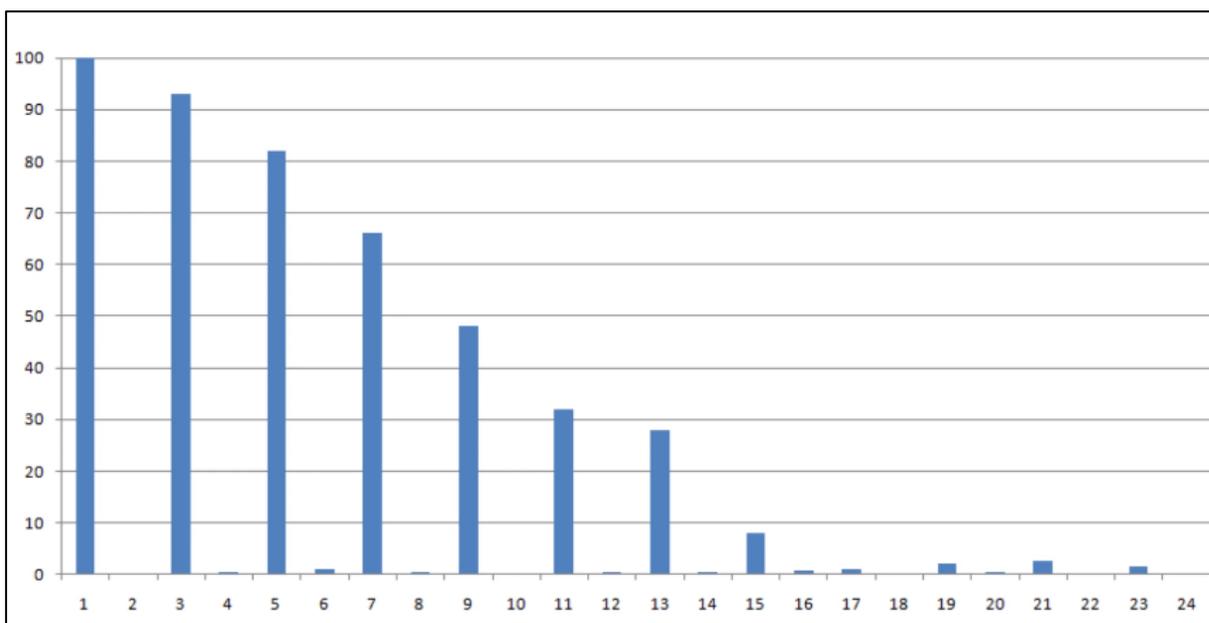


Fonte: Beuter, Carlos; Oleskovicz, Mario, [s.d.], página 13

O site 4Partner (2019) descreve os riscos gerados pelas distorções harmônicas, que podem provocar sobrecargas, curto-circuitos, e interrupções descontroladas da tensão, sobretensões e subtensões, desequilíbrio de tensão e corrente em sistemas trifásicos e alterações nas formas de onda. Pode também acarretar em perdas de dados em dispositivos sensíveis e desenergizar momentaneamente computadores, causando travamentos. Em motores e transformadores as distorções harmônicas podem causar excesso de calor nos condutores por efeito Joule, mau funcionamento e redução de vida útil do equipamento.

Pascoal (2020) descreve que as harmônicas precisam ser corrigidas no mínimo até a 13^o ordem, a partir deste momento as correntes harmônicas passam a diminuir. Boas correções normalmente são aplicadas até a 25^o ordem. A partir da 50^o ordem as distorções harmônicas são desprezadas por terem uma corrente muito baixa. Observe a Figura 1.7:

Figura 1.7 – Ordens das Harmônicas



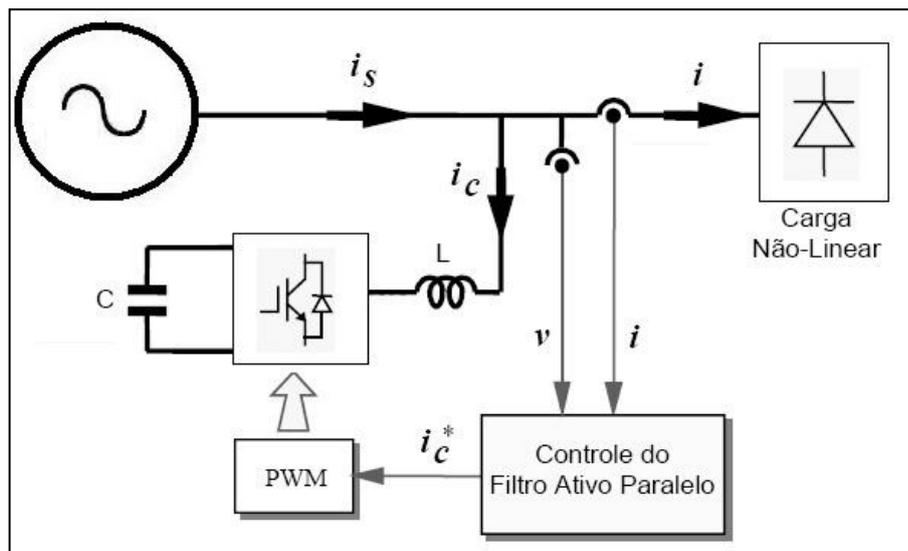
Fonte: Pascoal, 2020

Essas correções são feitas por filtros harmônicos, passivos ou ativos, e quando não corrigidas, é necessário um sobredimensionamento dos condutores, o que pode ter um alto custo.

1.2.4 Filtros Harmônicos

Segundo Pires (2010), filtros harmônicos são dispositivos que tem como função mitigar os sinais harmônicos em um circuito, eles são projetados de tal jeito a permitir a passagem de certas faixas de frequência e bloqueio ou atenuação para outras e podem ser categorizados em ativos e passivos. Filtros ativos conseguem compensar a harmônica da tensão e da corrente através do uso de interruptores eletrônicos para criar correntes que anulem as harmônicas do circuito. Os filtros ativos podem ser serie ou paralelo, o filtro ativo paralelo é representado pelo inversor fonte de tensão e seu controle. Ele funciona como malha de controle e basicamente consegue curto-circuitar as correntes indesejadas, como evidenciado na Figura 1.8:

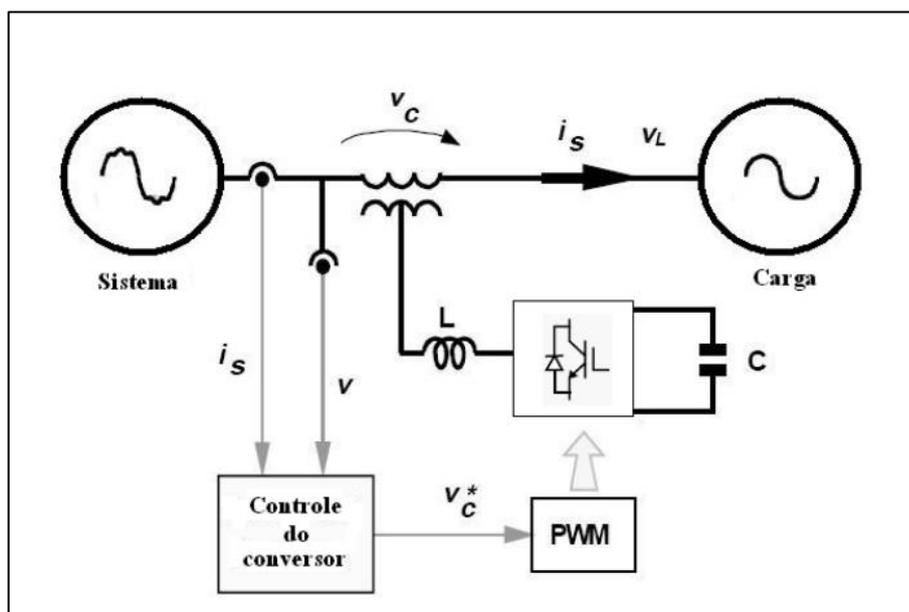
Figura 1.8 – Filtro Ativo Paralelo



Fonte: Morais, 2008, Pag. 157

O filtro ativo serie é instalado entre a fonte e a carga impede que sinais indesejados sejam aplicados a carga, mas não consegue mitigar as harmônicas geradas pela própria carga por estar em serie com ela. Pode-se observar o circuito na Figura 1.9:

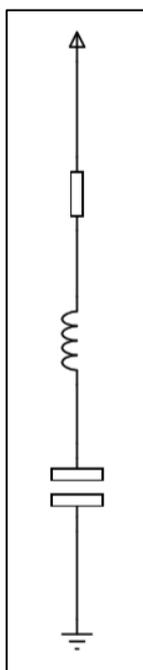
Figura 1.9 – Filtro Ativo Série



Fonte: Morais, 2008, Pag. 157

Já os filtros passivos, segundo Pires (2010), são compostos de um capacitor e um indutor em paralelo funcionando de forma semelhante a uma bobina de bloqueio, sendo uma solução raramente usada devido ao fato de que o filtro ter de aguentar toda a corrente do ponto onde está instalado. A solução mais comum para evitar as harmônicas em partes específicas do sistema são os chamados filtros em derivação que criam um caminho de baixa impedância para passagem das harmônicas desejadas, esse filtro podem ser filtros sintonizados ou filtros amortecidos. Filtros sintonizados são um circuito em série RCL sintonizado em uma frequência de uma harmônica, são amplamente utilizados comercialmente. Abaixo pode-se analisar este circuito na Figura 1.10:

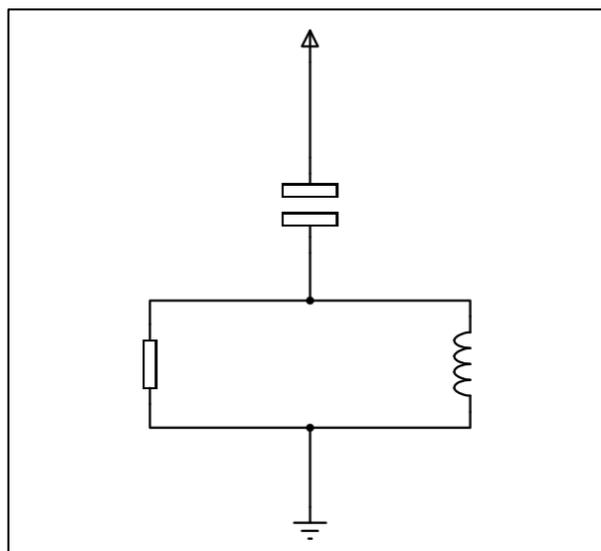
Figura 1.10 – Filtro Sintonizado



Fonte: Autoria própria, 2023

Os filtros amortecidos são formados por um capacitor serie com um RL paralelo, encontram grande utilização em eletrônica e em conversores de potência, podendo atuar como passa-baixa ou passa-alta, dependendo de onde é tomado o sinal de saída. Pode-se observar abaixo este circuito na Figura 1.11:

Figura 1.11 – Filtro Amortecido



Fonte: Autoria própria, 2023

Também é importante ressaltar que atualmente os filtros ativos são a solução ideal para correções harmônicas, fazendo com que filtros passivos se tornem obsoletos pois devem ser feitos sob medida e usados em cargas que não tenham alterações;

1.3 Cargas industriais

No campo da eletrônica e teste de sistemas de potência, as cargas eletrônicas emergem como componentes cruciais, desempenhando um papel fundamental na simulação de condições variáveis e no aprimoramento da eficiência energética. Divididas em duas categorias principais, ativas e passivas, essas cargas oferecem abordagens distintas para responder às demandas dinâmicas dos dispositivos elétricos e sistemas complexos. Estas serão apresentadas conforme a obra de Heerdt (2013) e o site TecnoGERA (2015).

1.3.1 Cargas Ativas

De acordo com Heerdt (2013), cargas eletrônicas ativas são, de forma geral, um equipamento eletrônico que pode agir como uma carga se tratando de amplitude, formato, e defasagem da corrente drenada do equipamento sendo ensaiado. Chama-se de carga ativa pelo fato de que existe um sistema de controle que permite emular as condições desejadas da carga, sendo em regime permanente, ou alterações de amplitude, espectro harmônico ou de defasagem.

Heerdt (2013) conclui que as cargas ativas podem ter diversas aplicações, como ensaios e testes em diversos equipamentos como: fontes de tensão, fontes de corrente, inversores, transformadores e geradores, entre muitos outros. Esses equipamentos podem ser testados nas diferentes fases de suas vidas úteis, tais como:

- Ensaios na fase de protótipo para testes que possam medir grandezas diversas como perdas elétricas, elevação de temperatura, ruído, e até na análise de possíveis falhas na operação;
- Ensaios de envelhecimento acelerado para encontrar os maiores pontos de falha com o tempo;
- Ensaios durante a fabricação para controle de qualidade identificação de defeitos prematuros.

1.3.2 Cargas Passivas

Segundo o site Tecnogera (2015), cargas resistivas são cargas que consomem a energia elétrica e a transformam em trabalho e geração de calor em equipamentos como lâmpadas incandescentes, fornos e aquecedores de ambiente. Cargas indutivas são caracterizadas por produzir uma limitação e atraso de 90° da corrente em relação à tensão, e estão localizadas em diversos dispositivos que são construídos com enrolamentos, conseqüentemente apresentam indutância, como motores, transformadores, compressores e geradores. Cargas capacitivas produzem uma limitação e um atraso de 90° da tensão em relação à corrente. Funciona armazenando e devolvendo a energia utilizando o campo elétrico, podemos encontrar em bancos de capacitores e lâmpadas fluorescentes.

1.3.3 Efeitos das Cargas na Energia Elétrica

Segundo o site Tecnogera (2015), a presença de cargas reativas na rede elétrica, tanto capacitivas quanto indutivas, desencadeia efeitos que afetam significativamente seu desempenho e por isso irá abordar os seus efeitos em relação a rede elétrica que são:

A carga resistiva em uma rede elétrica provoca dissipação de energia na forma de calor devido à resistência dos dispositivos. Isso pode resultar em perdas de eficiência na transmissão de energia e aumento nos custos operacionais. Além disso, cargas resistivas podem causar quedas de tensão, afetando o desempenho

de outros dispositivos conectados à mesma rede. É importante dimensionar e gerenciar adequadamente as cargas resistivas para otimizar a eficiência e a estabilidade da rede elétrica.

Cargas capacitivas em uma rede elétrica tendem a armazenar energia durante parte do ciclo de tensão e liberá-la em outra parte. Isso pode resultar em melhorias no fator de potência, reduzindo as perdas de energia durante a transmissão e distribuição. No entanto, cargas capacitivas excessivas podem levar a problemas, como aumento de correntes harmônicas e ressonância, afetando a estabilidade da rede. O gerenciamento adequado das cargas capacitivas é crucial para manter um equilíbrio na qualidade da energia e evitar impactos adversos no sistema elétrico.

A carga indutiva em uma rede elétrica pode causar defasagem entre a corrente e a tensão, levando a um fator de potência reduzido. Isso resulta em uma maior demanda de energia reativa, podendo aumentar as perdas na transmissão de energia e requerer equipamentos adicionais para correção do fator de potência. Além disso, cargas indutivas podem causar picos de corrente, afetando a estabilidade e a eficiência do sistema elétrico. Medidas como o uso de capacitores para compensação reativa podem ser adotadas para mitigar esses efeitos.

1.3.4 Impacto Econômico e de Qualidade da Energia em Função das Cargas

Como descrito por Rider (2010), a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, determina que o fator de potência deve ser mantido o mais próximo possível da unidade; porém permite um valor mínimo de 0,92, indutivo ou capacitivo, correspondente a um certo valor de energia reativa consumida. Trazendo assim um padrão para as empresas de alto consumo de energia para trazer um sistema de rede mais seguro e econômico havendo, assim a minimização de acidentes ou manutenções de equipamentos e altas faturas com relação ao fator de potência muito baixo.

Quando o fator de potência não está em conformidade com os padrões exigidos, ocorre a geração de energia reativa não aproveitada. Esta situação acarreta complicações significativas para as distribuidoras de energia, uma vez que os condutores utilizados em sua infraestrutura sofrem aquecimento devido ao efeito Joule. Tal fenômeno resulta não apenas no desperdício de energia, mas também na eficiência da distribuição para os consumidores. Em síntese, a conformidade com os

parâmetros de qualidade da energia desempenha um papel crucial na prevenção de entaves na distribuição.

1.4 Correção de fator de potência

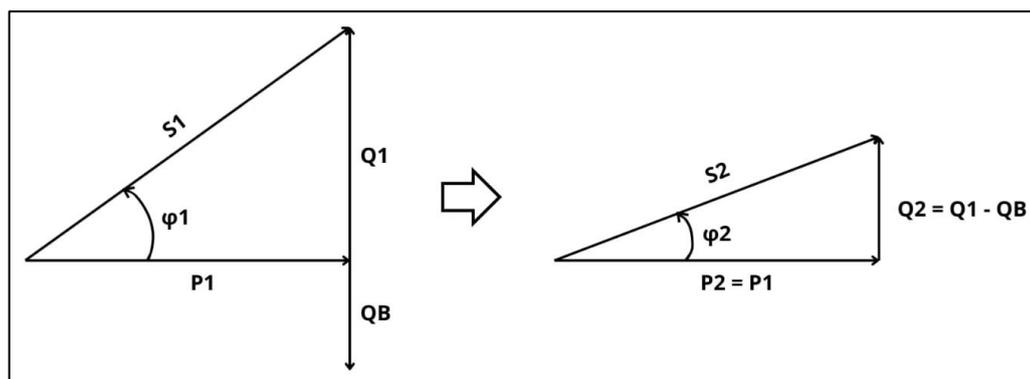
É fundamental para as empresas corrigir o fator de potência dentro de suas instalações de acordo com a legislação, que estabelece uma multa em cima do fator de potência abaixo do exigido pela ANEEL. Consequentemente, também se obtém os benefícios adicionais em termos de redução de perdas e de melhoria do perfil de tensão da rede elétrica.

De acordo com Mamede (2010), para realizar a correção do fator de potência se utilizam implantações de equipamentos de baixo valor e fácil manutenção como banco de capacitores ou motores síncronos que por si só tem um elevado rendimento e atuam como compensador síncrono para corrigir o fator de potência da rede. A correção do fator de potência deve ser feita analisando os aspectos da carga da instalação. Se ela for composta 80% ou mais por cargas lineares é possível corrigir o fator de potência utilizando o valor dessa carga. Caso na carga da instalação estiverem presentes cargas não lineares com valor acima de 20% do total da carga conectada, deve-se considerar os efeitos dos componentes harmônicos na correção do fator de potência.

O fator de potência deve se manter igual ou superior a 0,92 e igual ou inferior a 1,00 após a instalação dos equipamentos de correção (MAMEDE, 2010).

Na Figura 1.12 pode-se observar matematicamente o efeito da correção do fator de potência, sendo o ângulo θ_1 o fator de potência anterior à correção, e θ_2 o novo fator de potência, com a correção aplicada.

Figura 1.12 – Correção do fator de potência



Fonte: Autoria própria, 2024

1.4.1 Causas de baixo fator de potência

De acordo com Cotrim (2003) os causadores de baixa potência são:

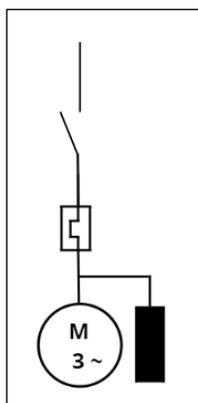
- Motores de indução operando em vazio ou sobrecarregado;
- Transformadores operando em vazio ou com pequenas cargas;
- Lâmpadas de descarga;
- Grande quantidade de motores de pequena potência;
- Tensão acima da nominal.

Após a correção do fator de potência é necessária uma análise técnica e financeira com base nos dados obtidos. Após análise desses dados, pode-se obter um diagnóstico para possíveis soluções e melhorias.

1.4.2 Correção individual e correção em grupos

Segundo Duailibe (2009) para efetuar a correção individual podemos instalar capacitores em paralelo com cargas que apresentam um baixo fator de potência, como motores de indução que são muito utilizados em aplicações industriais. É possível efetuar a instalação dos capacitores por meio de três abordagens distintas. A primeira delas consiste em conectar o banco de capacitores após a chave de acionamento e o relé de sobrecarga. Nessa situação, ocorre a ativação e desativação simultânea do banco, sincronizada com o funcionamento do motor. Este método revela-se mais viável em instalações recentemente estabelecidas, permitindo um novo dimensionamento do relé de sobrecarga para compensar a redução da corrente ocasionada pela inclusão do banco. Na Figura 1.13 é possível visualizar o diagrama de instalação do banco:

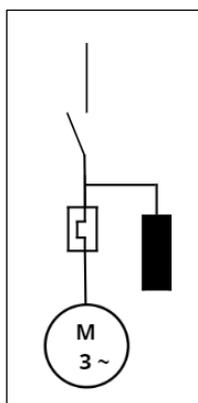
Figura 1.13 – Diagrama de instalação do primeiro método



Fonte: Autoria própria, 2023

Duailibe (2009) apresenta que no segundo método, introduzimos o banco de capacitores após a chave de acionamento do motor, entretanto, antes do relé de sobrecarga, como mostra a Figura 1.14. Este modelo é recomendado em instalações já existentes, nas quais o relé de sobrecarga foi previamente dimensionado.

Figura 1.14 – Diagrama de instalação do segundo método

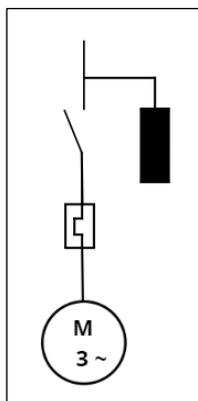


FONTE: Autoria própria, 2023

Duailibe (2009) também descreve o terceiro método, onde posicionamos o banco de capacitores antes da chave de acionamento. Como resultado, o banco permanece ativo mesmo quando o motor está desacionado. Todavia, é necessário incorporar ao comando do motor a funcionalidade de acionamento e desacionamento do contator do banco. Este contator deve ser criteriosamente dimensionado, considerando sua capacidade de lidar com ciclos de comutação elevados, correntes de carga variáveis e a sua resistência ao desgaste, visando a

otimização da compensação reativa. A figura 1.15 faz referência a esse tipo de instalação:

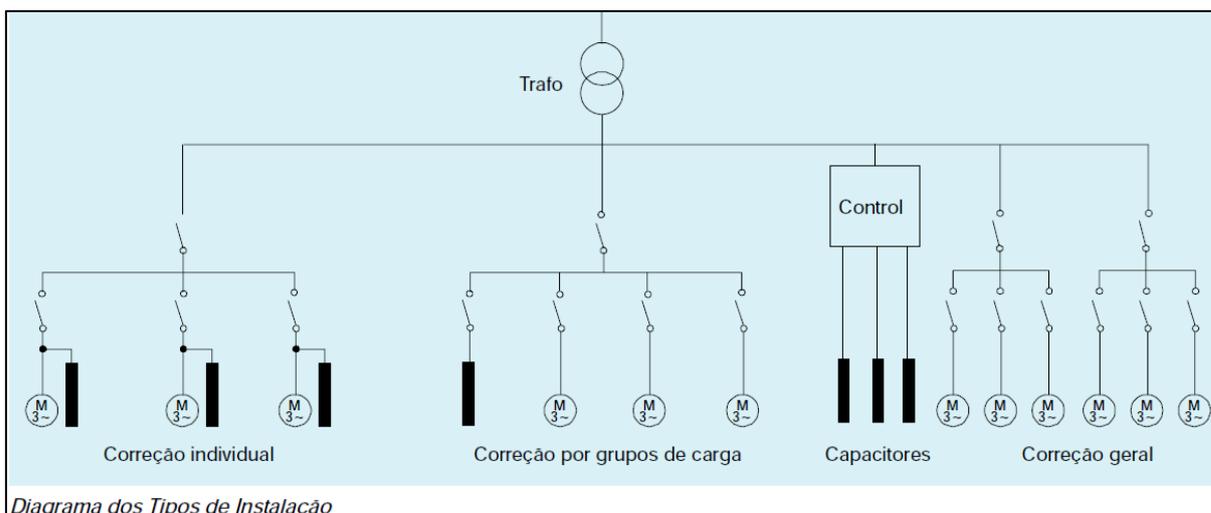
Figura 1.15 – Diagrama de instalação do terceiro método



FONTE: Autoria própria, 2023

Duailibe (2009) aponta que para realizar a correção em grupo podemos realizar a mesma instalação na entrada da energia de alta tensão onde corrigimos o fator de potência visto pela concessionária, Este método não é recomendável devido à interconexão direta dos bancos, uma vez que o seccionamento é economicamente oneroso. Nesse contexto, ao desativar a carga instalada, a empresa encontra-se suscetível a penalidades decorrentes da inversão do triângulo de potência, resultando na presença de uma rede capacitiva. Caso, nesta situação, o ângulo de carga exceda o limite estabelecido, a empresa estará sujeita a sanções financeiras mesmo com a fábrica desativada. Outras maneiras de efetuar a correção é fazer a instalação dos capacitores no quadro de distribuição que possui agrupamento de cargas. Aplicar o banco na bobina secundária do transformador na baixa tensão também é um método muito utilizado em instalações com uma grande quantidade de cargas indutivas com potências variadas e padrões de uso não uniformes, diante deste contexto é frequentemente adotado um sistema de controle automático para controlar os bancos de capacitores.

Figura 1.16 - Diagrama dos típicos de instalação



Fonte: <https://maquinaseletricas.blogspot.com/2016/03/manutencao-industrial-aula-10-correcao.html>, 2023

A Figura 1.16 mostra o diagrama dos típicos de instalação que podemos realizar em uma instalação elétrica. Para escolher a melhor maneira de instalar os bancos de capacitores deve levar em consideração o contexto atual da instalação e o melhor custo-benefício.

1.4.3 Correção automática e correção fixa:

A correção automática do fator de potência mediante o emprego de bancos de capacitores é uma medida adotada em instalações cuja carga reativa experimenta variações em função do horário de operação. Nesses contextos, a opção por sistemas de monitoramento e acionamento automáticos de bancos de capacitores revela-se uma abordagem eficaz. Essa prática visa otimizar dinamicamente o fator de potência, ajustando-o em conformidade com as flutuações nas demandas reativas da instalação. No âmbito do controle do sistema, é prática corrente a implementação de um controlador lógico programável ou de um sistema microcontrolado. Estes dispositivos desempenham a função de comandar o acionamento dos capacitores em conformidade com a medição do fator de potência monitorado. Este controle tem por objetivo a manutenção do fator de potência dentro de parâmetros precisos, visando à redução do consumo de energia reativa por parte da distribuidora (MAMEDE, 2007).

Já na correção fixa é analisada a instalação e seu fator de potência em relação ao que será utilizado, após essa análise é instalado um banco de

capacitores individual para cada equipamento. Também é possível analisar os dados que foram obtidos, é implementar um banco fixo de capacitores com o valor total calculado na instalação (MAMEDE, 2007).

1.4.4 Capacitores de Derivação

Segundo Mamede (2007) o capacitor de derivação são capacitores ligados em paralelo em relação ao circuito ou carga do sistema. Sua função tem como objetivo suprir energia reativa indutiva para os equipamentos para evitar a alteração do valor de fator de potência com a energia reativa já acumulado evitando assim o uso da energia da distribuidora para obter uma vantagem econômica reduzindo o consumo utilizado pela distribuidora. Sempre que possível deve-se instalar os capacitores o mais próximo da carga, mas nem sempre é viável devido a aspectos físicos e financeiros. Independente da instalação, a potência especificada do capacitor não deve implicar num fator de potência menor que 0,92, indutivo ou capacitivo.

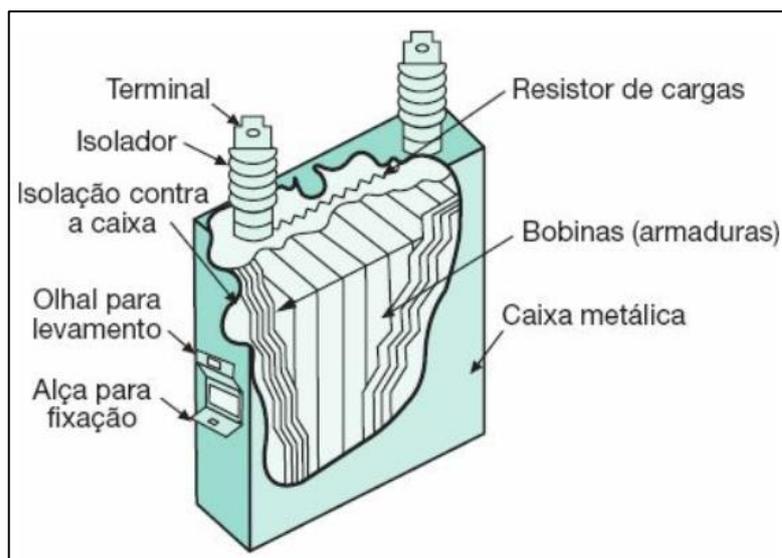
1.5 Bancos de Capacitores

Kikuchi e Reis (2015) esclarecem que os bancos de capacitores são dispositivos especializados na correção do fator de potência, fundamentados em um agrupamento de capacitores elétricos. Estes, por sua vez, são componentes elétricos que armazenam energia em um campo elétrico, acumulando cargas elétricas opostas em seus eletrodos.

1.5.1 Características construtivas

De acordo com Mamede (2007) a estrutura física dos bancos de capacitores é constituída pelo invólucro externo, responsável por proteger as partes internas e disponibilizar os terminais de ligação do banco. Internamente, encontramos a armadura, parte condutora dos capacitores, o dielétrico responsável pela isolação, o líquido de impregnação que auxilia no gerenciamento térmico e na promoção do isolamento elétrico e o resistor de descarga, que contribui para a segurança do equipamento no processo de descarregamento do capacitor. A Figura 1.17 ilustra as partes construtivas de um banco de capacitores.

Figura 1.17 – partes construtivas de um banco de capacitores



Fonte: <https://docplayer.com.br/82695143-4-1-introducao-geradores-motores-sincronos-capacitores.html>, [s.d.]

1.5.2 Cálculo e dimensionamento do banco de capacitores

De acordo com Duailibe (2009), a função de um capacitor é suprir potência reativa (kVAr) ao sistema ao qual for instalado, de tal forma que esta energia reativa gerada pelo capacitor pode ser utilizada na magnetização de motores, transformadores, e reatores ao invés de se esvair pelo circuito de alimentação das cargas. Corrigir a potência reativa significa nada mais do que diminuir o excedente reativo, e conseqüentemente aproximar o valor do fator de potência à 1. As vantagens dessa correção, ainda segundo Duailibe (2009), são: Vantagens financeiras, liberação da capacidade das fontes supridoras permitindo a ligação de novas cargas sem acréscimo de potência aparente (kVA) nos circuitos alimentadores, e redução de quedas de tensão.

Figura 1.18 – Banco de Capacitores



Fonte: <https://omsengenharia.com.br/blog/banco-de-capacitores/>, 2022

De acordo com Duailibe (2009), podemos exemplificar numericamente o cálculo e dimensionamento de um capacitor para correção do fator de potência de uma instalação da seguinte maneira. Se a potência ativa de uma determinada instalação 75kW, com um fator de potência de 0,82, que corrigido, deve ser elevado para 0,92. Qual a potência reativa (kVAr) necessária para alcançar este valor? Para tal, utilizaremos das seguintes expressões:

$$S = \frac{P}{FP} \quad [1.10]$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad [1.11]$$

Onde:

S: Potência Aparente (kVA);

P: Potência Ativa (kW);

Q: Potência Reativa (kVAr).

A priori, precisamos calcular a componente reativa Q (kVAr), do circuito a ser corrigido, neste caso, com o FP = 0,82.

$$S1 = \frac{75KW}{0,82} = \mathbf{91,46\ kVA}$$

$$Q1 = \sqrt{91,46^2 - 75^2} = \mathbf{52,35\ kVAr}$$

Em seguida, utilizaremos as mesmas fórmulas 1.8 e 1.9 para calcular a componente reativa de um circuito imaginário com FP = 0,92, ou seja, ideal.

$$S2 = \frac{75KW}{0,92} = \mathbf{81,52\ kVA}$$

$$Q2 = \sqrt{81,52^2 - 75^2} = \mathbf{31,95\ kVAr}$$

Para calcularmos a potência reativa do capacitor a ser utilizado, devemos calcular a diferença entre ambas as potências reativas (Q1 e Q2) encontradas. Para isso, podemos utilizar a fórmula 1.12, ou ainda a fórmula 1.13.

$$Q_{cap} = Q1 - Q2$$

[1.12]

Onde:

Qcap: Potência reativa do capacitor (kVAr);

Q1: Potência reativa do circuito sem correção (kVAr);

Q2: Potência reativa do circuito ideal (kVAr);

$$Q_{cap} = P \times (\tan(\varphi1) - \tan(\varphi2))$$

[1.13]

Onde:

Qcap: Potência reativa do capacitor (kVAr);

P: Potência Ativa (kW);

φ1: Defasagem do circuito a ser corrigido;

φ2: Defasagem ideal, com ângulo a 23°.

Seguindo a fórmula 1.10 teremos:

$$Q_{cap} = 52,35 - 31,95 = \mathbf{20,37kVAr}$$

Seguindo a fórmula 1.11 teremos:

$$Q_{cap} = 75 \times (\tan(34,91) - \tan(23))$$
$$Q_{cap} = 75 \times 0,2733 = \mathbf{20,50kVAr}$$

Por fim, segundo Duailibe (2009), para dimensionarmos a capacitância do capacitor indicado para a correção de fator de potência da instalação, utilizaremos a fórmula 1.14.

$$C = \frac{1000 \times Q_{cap}}{2\pi \times F \times V^2}$$

[1.14]

Onde:

C: Capacitância do capacitor ideal para correção (uF);

Qcap: Potência reativa do capacitor (KVAR);

F: Frequência da rede (Hz);

V: Tensão da instalação (Volts);

2 METODOLOGIA

Neste capítulo é demonstrado o percurso para o desenvolvimento e construção do projeto nomeado sistema microcontrolado para correção de fator de potência. Sendo este projeto realizado pelos alunos nas dependências da FATEC São Bernardo do Campo e nas residências de cada componente do grupo.

A redenção deste trabalho de TCC se baseia no Manual de Normalização de Projeto de Conclusão de Curso FATEC ADIB MOISÉS DIB - SBC(2023) que utiliza como estrutura normas a ABNT que define um padrão para esta monografia.

2.1 O que é metodologia

De acordo com Bastos e Keller (1991) toda atividade, seja ela teórica ou prática, requer a aplicação de procedimentos adequados – o que a palavra “método” expressa. Isso também se aplica ao estudo e ao aproveitamento das atividades acadêmicas. Para obter bons resultados nessas áreas, é fundamental seguir um caminho bem definido, caracterizado pela organização, disciplina e dedicação direcionada. Esses elementos não apenas facilitam a realização das atividades, mas também garantem um rendimento mais eficiente e produtivo.

2.2 O tema-problema com justificativa e descrição do projeto

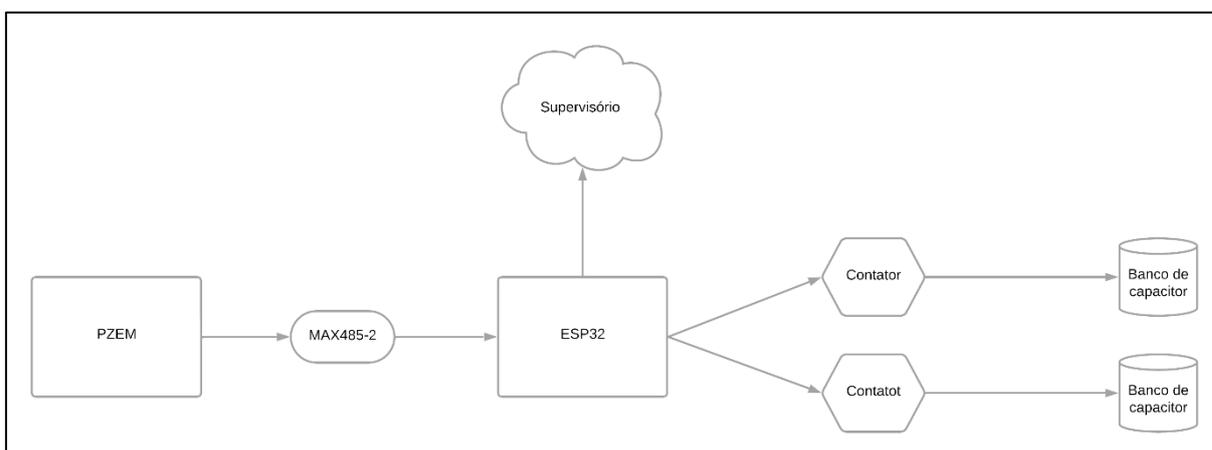
O fator de potência baixo em redes elétricas é um problema relevante em sistemas elétricos modernos devido à sua relação direta com a eficiência energética e operacional dos equipamentos elétricos, especialmente em ambientes com demanda variável ao longo do tempo, como horários de pico ou instalações industriais, onde a falta de correção adequada do fator de potência pode resultar em perdas significativas de energia, custos adicionais e até mesmo instabilidade no sistema elétrico, motivando assim a necessidade de desenvolver e implementar um sistema inteligente de correção do fator de potência capaz de monitorar continuamente a demanda elétrica e ajustar automaticamente a compensação de potência reativa.

Ao implementar essa solução, as empresas e concessionárias de energia poderão melhorar a eficiência energética, reduzir custos operacionais, evitar penalidades tarifárias e aumentar a confiabilidade do fornecimento de energia

elétrica para seus clientes. Além disso, contribuirão para a redução do impacto ambiental ao minimizar as perdas de energia e otimizar o uso dos recursos disponíveis.

A solução consiste em um quadro microcontrolado conectado à rede elétrica que se comunica com um supervisório via serial fazendo o chaveamento dos bancos de acordo com a necessidade da rede. O processamento dessa solução estaria centrado em um microprocessador ESP32, escolhido pela sua alta capacidade de processamento e robustez, sendo capaz de adquirir os dados da rede, interpretá-los e chavear os bancos de acordo com a necessidade.

Figura 2.1 – Fluxograma do projeto



Fonte: Autoria própria, 2024

2.3 Etapas teóricas e práticas para o desenvolvimento do projeto

Após delimitar o tema-problema, justificativa e descrição do projeto, parte-se para as seguintes etapas:

Primeira etapa: A reunião dos membros do grupo foi realizada com o propósito de escolher o tema do projeto e decidir o orientador. Após o convite, o orientador conduziu uma breve exposição sobre o tema e os desafios associados ao projeto, dispondo-se a oferecer orientação ao grupo durante o desenvolvimento do tema escolhido.

Segunda etapa: A reunião entre o grupo e o orientador foi destinada a discutir questões relacionadas aos métodos de pesquisa, potenciais referências e uma visão geral do tema principal do projeto. O orientador se comprometeu a esclarecer dúvidas e estabeleceu um compromisso de revisar o progresso da pesquisa uma vez por semana.

Terceira etapa: levantamento dos objetivos, justificativas e descrição do projeto além da elaboração do cronograma de atividades a serem desenvolvidas, conforme ilustrado na Figura 2.2;

Figura 2.2 – Cronograma de atividades

SIGLA	COR	DESCRIÇÃO	INÍCIO	TERMINO
INC		APRESENTAÇÃO DA DICCIPLINA	17/08/2023	24/08/2023
ETX		ESTRUTURA TEXTUAL	24/08/2023	31/08/2023
INT		INTRODUÇÃO	07/09/2023	14/09/2023
CP1		CAPITULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14/09/2023	21/09/2023
CP2		CAPITULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21/09/2023	28/09/2023
CP3		CAPITULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28/09/2023	12/10/2023
CP4		CAPITULO 4 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12/10/2023	26/10/2023
CP5		CAPITULO 5 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	02/11/2023	16/11/2023
APR		APRESENTAÇÃO	23/11/2023	30/11/2023
CEE		CORREÇÕES E ENTREGA	14/09/2023	07/12/2023

SEMANAS	INC	EXT	INT	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	APR	CEE
3ª Sem - AGO										
4ª Sem - AGO										
5ª Sem - AGO										
1ª Sem - SET										
2ª Sem - SET										
3ª Sem - SET										
4ª Sem - SET										
1ª Sem - OUT										
2ª Sem - OUT										
3ª Sem - OUT										
4ª Sem - OUT										
5ª Sem - OUT										
1ª Sem - NOV										
2ª Sem - NOV										
3ª Sem - NOV										
4ª Sem - NOV										
1ª Sem - DEZ										

Fonte: Autoria própria, 2023

Quarta etapa: O levantamento bibliográfico foi realizado na biblioteca da FATEC S.B Campo, em sites especializados e manuais de empresas. Após a leitura cuidadosa e revisão desses materiais, foram selecionadas as teorias que melhor se adequam ao desenvolvimento do projeto. Em seguida, o Capítulo 1 - Fundamentação Teórica e Referências foram elaboradas.

Quinta etapa: Levantamento dos materiais e componentes necessários para a construção do projeto, com pesquisa em sites e lojas especializadas para identificar a melhor viabilidade de preço. Os materiais foram adquiridos de acordo com a tabela abaixo, que detalha os itens e seus respectivos custos.

Tabela de materiais utilizados para a confecção do projeto

ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM	QTDE	R\$ UNITÁRIO	R\$ TOTAL
1	Aparelho medidor de fator de potência	1	R\$ 64,41	R\$ 64,41
2	Microcontrolador esp32	1	R\$ 73,40	R\$ 73,40
3	Relé 24vdc - 2030h	4	R\$ 10,00	R\$ 40,00
4	Transistor tip120	4	R\$ 3,00	R\$ 12,00
5	Resistor 1k8 ohms	10	R\$ 0,20	R\$ 2,00
6	Diodo 1n4007	10	R\$ 0,50	R\$ 5,00
7	Fonte 24vdc 2a	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
8	Conversor rs485/usb serial	1	R\$ 30,90	R\$ 30,90
9	Conversor ttl / rs485	1	R\$ 23,80	R\$ 23,80
10	Borne tomada	1	R\$ 3,00	R\$ 3,00
11	Capacitor polipropileno 5uf x 250v 50/60hz plástico faston	1	R\$ 11,00	R\$ 11,00
12	Capacitor polipropileno 30uf x 250vac 50/60hz plástico faston	1	R\$ 14,00	R\$ 14,00
13	Placa ilhada de prototipagem 10cm x 15cm	1	R\$ 17,00	R\$ 17,00
14	Borne kre 2 vias verde	15	R\$ 1,40	R\$ 21,00
15	Terminal faston fêmea para bateria 12v 7a sem isolamento	10	R\$ 0,70	R\$ 7,00
16	Quadro elétrico 400x300x200	1	R\$ 190,00	R\$ 190,00
17	Plugue de tomada três pinos 20a	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
18	Cabo usb macho e fêmea (para painel) - 30cm	1	R\$ 15,00	R\$ 15,00
19	Adaptador usb fêmea para dip	2	R\$ 4,73	R\$ 9,46
20	Cabo usb macho macho	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
21	Parafusos e porcas	15	R\$ 0,20	R\$ 3,00
22	Sinaleiro led 24vdc - verde - para furo de 22mm	2	R\$ 6,64	R\$ 13,28
23	Sinaleiro led 220vac - vermelho - para furo de 22mm	1	R\$ 6,64	R\$ 6,64
24	Sinaleiro led 24vdc - azul - para furo de 22mm	2	R\$ 6,64	R\$ 13,28
25	Sinaleiro led 24vdc com buzzer - vermelho - para furo de 22mm	1	R\$ 20,89	R\$ 20,89
26	Chave seletora de duas posições	1	R\$ 13,61	R\$ 13,61

ITEM	DESCRIÇÃO DO ITEM	QTDE	R\$ UNITÁRIO	R\$ TOTAL
	- para furo de 22mm			
27	Canaleta 20x20mm cinza - 2 metros	1	R\$ 17,14	R\$ 17,14
28	Prensa cabo pg11	2	R\$ 1,89	R\$ 3,78
29	Borne sak 2,5mm ² bege	15	R\$ 2,54	R\$ 38,10
30	Tampa para borne sak 2,5mm ²	4	R\$ 1,13	R\$ 4,52
31	Jumper 10 polos para borne sak 2,5mm ²	2	R\$ 10,55	R\$ 21,10
32	Disjuntor bifasico 4a 3ka	1	R\$ 21,15	R\$ 21,15
33	Disjuntor bifasico 2a 3ka	1	R\$ 24,20	R\$ 24,20
34	Disjuntor Bifasico 6A 3Ka	1	R\$ 20,19	R\$ 20,19
35	Contator modular 25a bobina 220vca 2na - série 13	2	R\$ 78,45	R\$ 156,90
36	Fita hellerman preta 2,5x100mm	1	R\$ 8,07	R\$ 8,07
37	Espiral tubo preto diâmetro 4mm (1/8")	1	R\$ 10,98	R\$ 10,98
38	Terminal tubular simples para cabo 2,5mm	100	R\$ 0,098	R\$ 9,82
39	Trilho dim perfurado 35 x 7,5 x 1000mm	1	R\$ 12,76	R\$ 12,76
40	Terminal tubular simples para cabo 0,5mm	100	R\$ 0,04	R\$ 4,22
41	Barra de pinos femea 15x1	2	R\$ 2,80	R\$ 5,60
42	Cabo pp flexivel 3 x 2,5mm 300v/500v (metro)	5	R\$ 8,42	R\$ 42,10
43	Anilha transparente para cabo 0,5mm até 4mm	115	R\$ 0,28	R\$ 32,20
44	Tag de identificação das anilhas 15x4	127	R\$ 0,25	R\$ 31,75
45	Estanho	1	R\$ 12,00	R\$ 12,00
VALOR GLOBAL DO INVESTIMENTO				R\$ 1.146,25

Fonte: Autoria própria, 2023

Sexta etapa: Estabelecer a configuração e programação da comunicação entre o microcontrolador (ESP32) e o medidor digital de grandezas elétricas (PZEM-016).

Sétima etapa: A execução do procedimento de teste de especificações nos motores empregados como carga no âmbito do projeto.

Oitava etapa: A elaboração do dimensionamento dos componentes elétricos e o desenvolvimento do diagrama elétrico do projeto.

Nona etapa: Construção e montagem do quadro de controle do sistema de correção do fator de potência.

Décima etapa: Configuração e desenvolvimento do algoritmo de controle do ESP32.

Décima primeira etapa: Configuração e desenvolvimento do sistema supervisor.

Décima segunda etapa: Obstáculos de soluções. Concluído o desenvolvimento do projeto fazem-se as Considerações finais, Resumo e Abstract.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este capítulo aborda detalhadamente o desenvolvimento do projeto, desde os testes iniciais e protótipos feitos em software até a montagem definitiva, tanto da placa de circuito quando do quadro em si, além do processo de especificação de componentes e os detalhamentos dos obstáculos vividos durante a execução do trabalho.

3.1. Interação do ESP32 com MDGE e supervisor

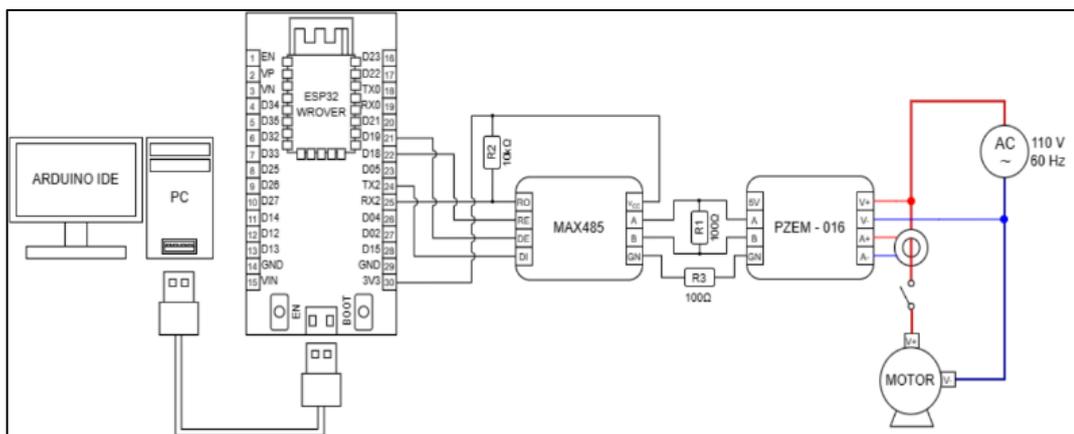
3.1.1 Teste de interação do ESP32 com medidor digital de grandezas elétricas.

O medidor digital de grandezas elétricas PZEM é um ponto chave do projeto tendo a função que um multimetido teria em uma aplicação industrial, tendo isto em vista é essencial que ele se comunique com o resto do circuito. O medidor se comunica via protocolo Modbus 485, que foi o protocolo escolhido para o projeto, durante a etapa inicial de testes foram feitas todas as configurações necessárias descritas no *datasheet* do dispositivo, estas sendo:

- Protocolo: Modbus RTU (Slave);
- Meio Físico: RS-484
- Baud Rate: 9600
- Data bit: 8
- Stop bit: 1
- Bit parity: None

Os testes foram feitos inicialmente usando o software proprietário do medidor para estudar sua capacidade de atender nossas necessidades, após isso foi montado o circuito para testes com o próprio ESP32 como pode ser visto na imagem 3.1:

Figura 3.1 – Circuito de Testes Do PZEM



Fonte: Autoria própria, 2024

Neste circuito o medidor digital de grandezas elétricas age como escravo na rede enquanto o ESP32 age como mestre para aquisitar as informações coletadas pelo medidor.

3.2 Teste de acionamento do ESP32 comandando bancos de capacitores

Esses testes visavam verificar a viabilidade do circuito para acionamento dos bancos de capacitores, usando um transistor Darlington para acionar o relé que por sua vez aciona os contatores dos bancos, para dimensionar o resistor de base do transistor foi usada a seguinte formula:

$$R_B = \frac{(V_{esp} - V_{Be})}{I_B} \quad [3.1]$$

$$R_B = \frac{(3,3V - 1,4V)}{0,22mA} = 8836,36\Omega \quad [3.2]$$

Devido a não existirem resistores de 8636,36 Ohm comumente disponíveis foi usado o valor comercial mais próximo de 10K Ohm, foi feita a montagem do circuito que funcionava de modo que, ao acionar um botão permitia a passagem de corrente para a base do transistor, com isso o transistor fica saturado energizando a bobina do relé que por sua vez aciona a carga, vide a imagem do circuito descrito:

3.4 Elaboração do diagrama elétrico do projeto

No desenvolvimento do projeto a elaboração do diagrama elétrico desempenha um papel crucial na concepção e orientação técnica para realizar simulação, testes e realizar a interligação física corretamente. Neste capítulo, abordaremos detalhadamente o processo de elaboração do diagrama elétrico, dividindo-o em duas seções principais: o desenvolvimento do circuito da placa eletrônica e o diagrama elétrico do quadro elétrico de controle.

Através deste capítulo, buscamos fornecer uma compreensão abrangente do processo de elaboração do diagrama elétrico para o projeto "Sistema Microcontrolado para Correção do Fator de Potência", destacando o desenvolvimento do circuito da placa eletrônica e o diagrama elétrico do quadro elétrico de controle. Como aspectos fundamentais no desenvolvimento e implementação de sistemas elétricos.

3.4.1 Circuito da placa eletrônica

Nesta seção, explora-se o processo de desenvolvimento do circuito na placa eletrônica. Este circuito será responsável por monitorar o fator de potência da carga elétrica através dos sinais enviados pelo medidor digital de grandezas elétricas, calcular a quantidade necessária de capacitores para correção e controlar o acionamento dos bancos de capacitores de acordo com as variações de carga e realizar as sinalizações necessárias de acordo com o processo de controle.

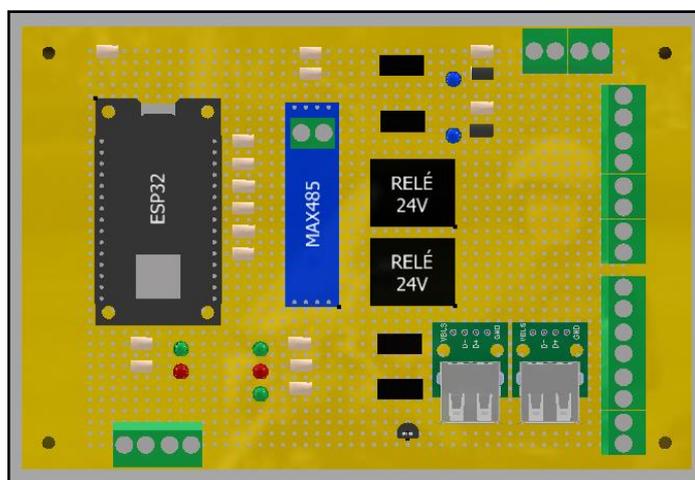
A placa universal selecionada para este projeto foi uma placa de fenolite para prototipagem e fabricação de circuitos eletrônicos. Feitas de papel impregnado com resina fenólica que são robustas e isolantes. Consideramos uma com espessura de 1 mm e dimensão 100 mm x 150 mm. Nossa placa possui ilhas de cobre em apenas um lado, com espessura de 1 oz em acabamento liso. Possuem boas propriedades dielétricas, garantindo isolamento elétrico adequado, e operam em uma ampla faixa de temperatura de -40°C a 130°C.

Nesta placa serão interligados os seguintes componentes:

- **Microcontrolador ESP32:** Realizará o processamento dos dados e controle do sistema.
- **Conversor MAX485:** Conversor de meio físico para comunicação RS485 com o medidor digital de grandezas elétricas.
- **Adaptadores USB:** Módulo que disponibiliza acesso físico de comunicação UART do ESP32.
- **Transistores:** Aplicado para acionamento dos relés e controle dos dispositivos externos.
- **Relés:** Realiza o acionamento dos contatores dos bancos de capacitores.
- **Resistores:** Para ajuste de corrente e divisores de tensão.
- **LEDs:** Indicação e visualização do status do sistema via placa de controle.
- **Bornes KRE:** para interligação com os dispositivos externos à placa.

As conexões entre os componentes foram estabelecidas utilizando trilhas condutoras na placa universal. A disposição dos componentes foi planejada para garantir uma integração eficiente e minimizar interferências entre os elementos do circuito. Os bornes foram posicionados estrategicamente para facilitar a conexão com o medidor digital de grandezas elétricas, dispositivos externos e a alimentação da placa conforme a figura 3.3.

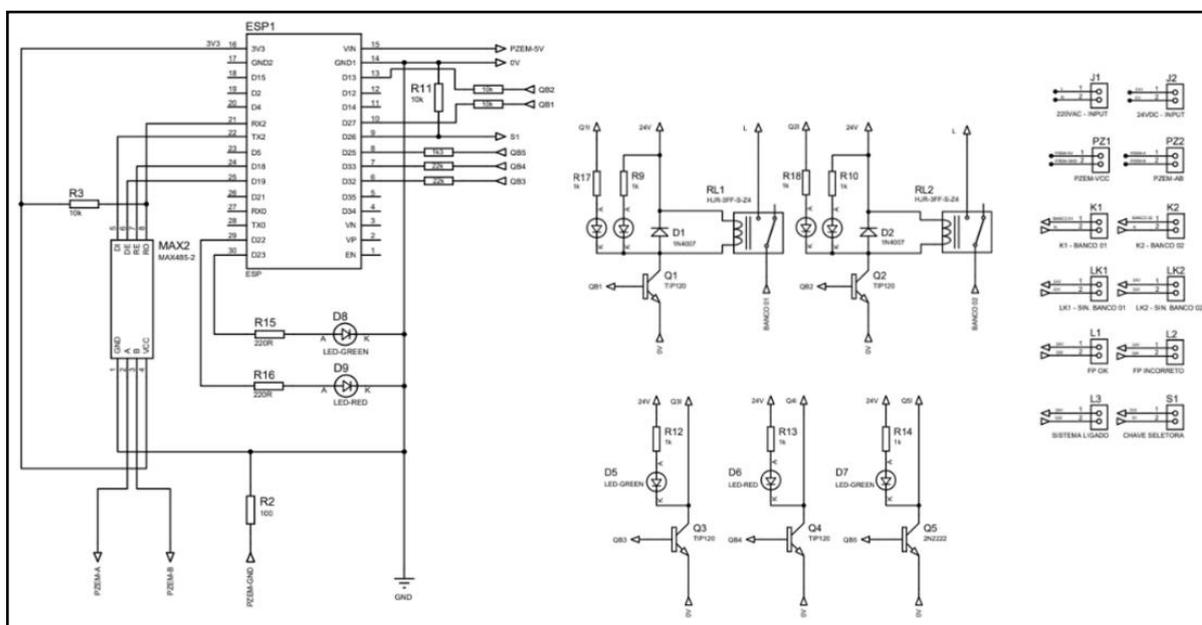
Figura 3.3 – Layout da Placa eletrônica



Fonte: autoria própria, 2024.

O Layout da placa eletrônica mostrada na Figura 3.3, representa o circuito elétrico elaborado para o projeto como ilustra a Figura 3.4:

Figura 3.4 – Circuito elétrico da placa



Fonte: autoria própria, 2024.

Os relés RL1 e RL2 foram projetados para uma tensão de bobina de 24 volts e função de fechamento de contatos em 220 volts, visto que os contatos dos relés acionam bobinas com 220 volts. Para proteger o circuito da corrente de autoindução gerada pelo indutor, o diodo DX foi dimensionado e instalado em paralelo com a bobina do relé.

Utilizamos o transistor TIP120 para realizar a interface entre a baixa tensão de 24VDC e o fechamento dos contatos, por meio da emissão de pulsos do ESP32 na base do transistor.

Os resistores da base do transistor foram dimensionados com base nas especificações do próprio transistor, analisadas no datasheet para essa aplicação específica no projeto. Para ajustar os valores de ganho do transistor, utilizamos a fórmula a seguir e dimensionamos os resistores adequadamente, considerando as características do transistor.

$$R_b = \frac{(V_{GPIO} - V_{BE})}{I_b}$$

[3.3]

$$I_b = \frac{I_c}{HFE} \quad [3.4]$$

Onde:

Rb: Resistor de base do transistor (Ω);

VGPIO: Tensão GPIO do ESP32 (V);

VBE: Tensão entre base e emissor (V);

HFE: Ganho do Transistor

I_c : Corrente de coletor(A);

I_b : Corrente de base (A).

3.4.2 Diagrama elétrico do quadro de controle

Nesta seção, abordaremos o processo de desenvolvimento do quadro elétrico de controle, que terá a função de integrar todos os componentes relacionados ao sistema, incluindo a placa eletrônica, os capacitores e todos os dispositivos de proteção, comando, sinalização e potência. O quadro será instalado entre a rede de alimentação e o sistema que será monitorado e controlado em relação ao fator de potência.

O quadro de controle selecionado para este projeto foi um quadro com características de caixa de montagem de sobrepor. O equipamento foi fabricado em aço carbono com tratamento anticorrosivo. Possui uma placa de montagem removível para facilitar o acesso ao seu interior. Além disso, contam com ponto de aterramento na caixa e porta, perfil autoadesivo em EVA para vedação e grau de proteção IP-54. Consideramos a caixa com altura de 400 mm, largura de 300 mm e profundidade de 200 mm.

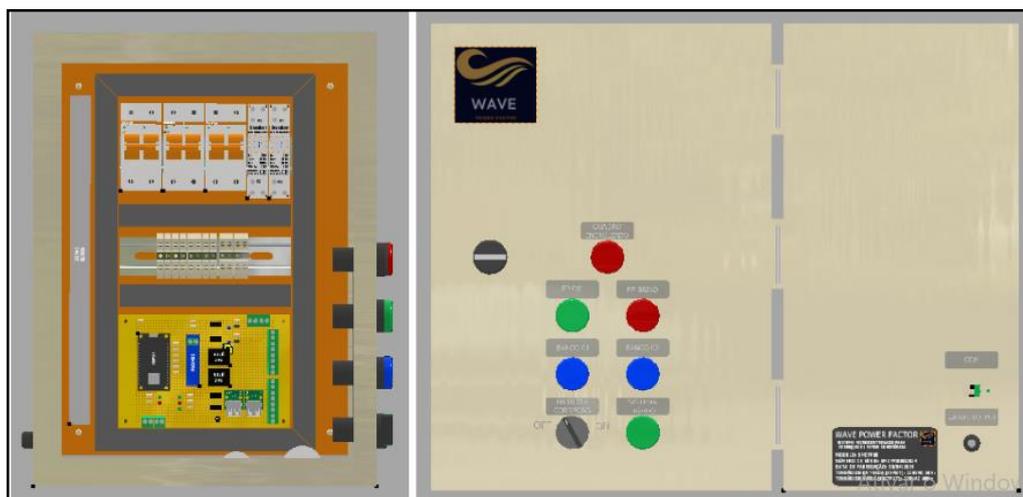
Neste quadro serão embarcados os seguintes componentes:

- **Placa eletrônica de controle:** Responsável pelo Controle completo do projeto.

- **Medidor digital de grandezas elétricas:** Periférico responsável pelas medições elétricas dos equipamentos a serem monitorados.
- **Capacitores Permanentes:** Equipamento que tem como função, corrigir o fator de potência ao ser incluído na rede durante o processo de controle.
- **Contatores:** Dispositivo de comando responsável pelo acionamento dos Capacitores na rede elétrica.
- **Fonte de alimentação:** Dispositivo que fornece alimentação 24 Volts para a placa de controle.
- **Bornes SAK:** Responsável pela distribuição da alimentação 220 Volt para os elementos internos no quadro.
- **Disjuntores:** Elementos com foco na proteção geral dos componentes embarcados no quadro.
- **Chave seletora e sinalizadores:** Periféricos instalados na porta do quadro com objetivo de facilitar a operação e visualização do status do sistema.

As conexões entre os componentes foram estabelecidas utilizando cabos com terminais de conexão adequados para cada secção transversal, dispostos em canaletas ventiladas para percurso interno. A disposição dos componentes foi planejada para garantir um melhor aproveitamento do espaço disponibilizado pelo quadro conforme a figura 3.5

Figura 3.5 – Layout da Quadro de controle



Fonte: autoria própria, 2024

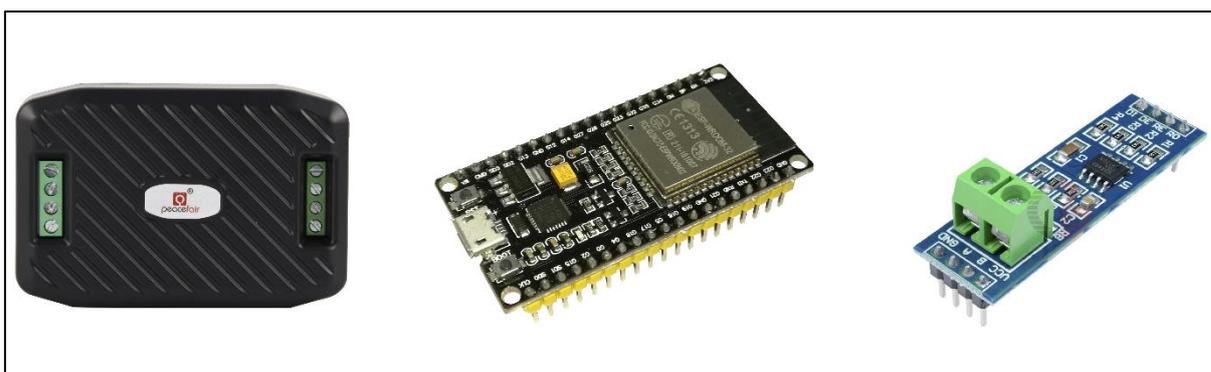
O esquema elétrico do quadro de controle foi elaborado de acordo com as normas e padrões elétricos aplicáveis. Ele inclui todas as conexões elétricas entre os componentes, bem como os dispositivos de proteção e segurança necessários. O diagrama de conexões foi meticulosamente planejado para garantir uma instalação segura e confiável do sistema.

3.5. Montagem e confecção do projeto.

3.5.1 Desenvolvimento do circuito

O circuito foi desenvolvido no software ISIS Proteus 7, e sua primeira seção compõe a comunicação RS485 entre o microcontrolador (ESP32) e o medidor de grandezas elétricas PZEM016, intermediada pelo conversor MAX485.

Figura 3.6 – Componentes



Fonte: <https://esphome.io/components/sensor/pzemdc.html>

Através dessa comunicação o microcontrolador é capaz de obter as leituras do medidor de grandezas elétricas e realizar os acionamentos conforme o programado. Estes acionamentos são respectivamente: LEDs para status de comunicação modbus, em caso de sucesso ou falha do envio de pacotes, sinaleiros do painel e principalmente o chaveamento dos bancos de capacitores para a correção do fator de potência.

O chaveamento dos bancos se dá da seguinte forma: a porta GPIO respectiva do ESP32 quando em estado “ALTO” enviará um sinal para a base do transistor que entrará na região de saturação e passará a conduzir. As cargas chaveadas pelo transistor serão um relé com bobina 24Vdc em paralelo com um diodo 1N4007 para proteção contra o fenômeno da tensão de retorno, que se trata de uma alta tensão inversa que pode danificar o componente. Também em paralelo se aciona um LED de indicação na placa referente ao acionamento do banco em questão. Este LED está em série com um resistor para limitação da corrente. O coletor do transistor é conectado a um ponto de tensão de alimentação 24VDC. O mesmo conceito se aplica a ambos os bancos.

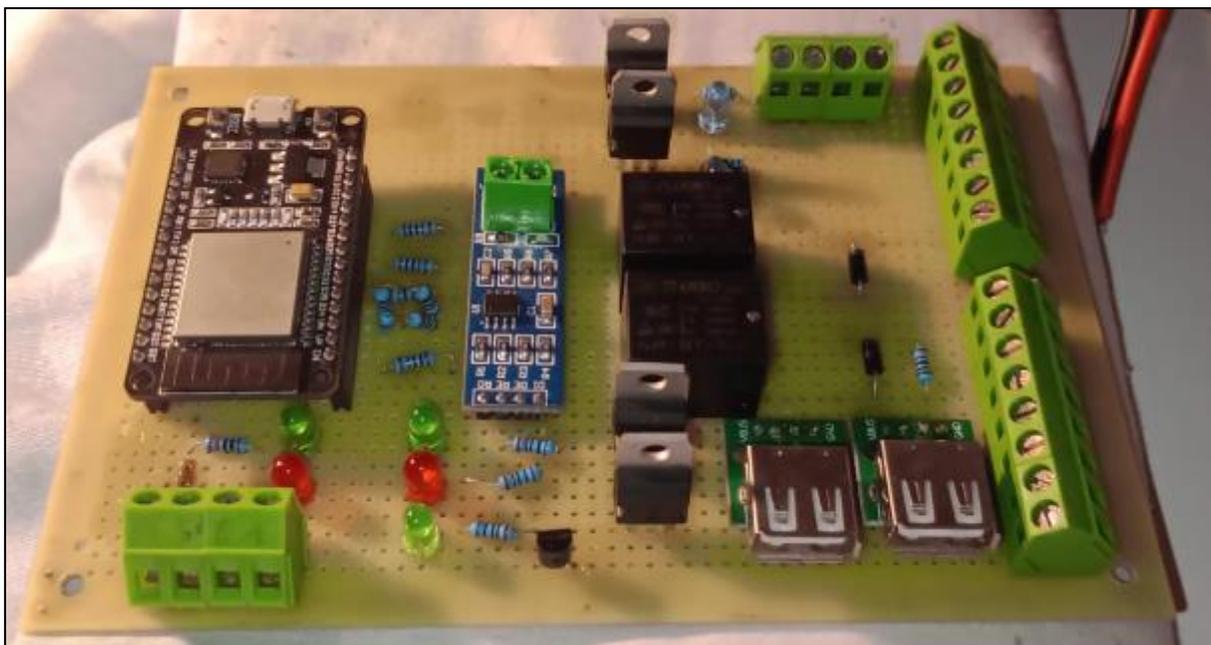
O transistor aciona o relé de bobina 24Vdc que por sua vez possui o seu “COMUM” conectado ao 220Vac. Uma vez acionado, o relé chaveará um contator de potência responsável por acionar o banco de capacitor respectivo. Neste circuito, a mesma lógica de acionamento via transistor será empregada para ativar os sinaleiros 24VDC do quadro através de um sinal porta GPIO do ESP32.

3.5.2 Montagem da placa eletrônica

O design da placa de circuito integrado foi feito usando o software Proteus (ARES), tendo em vista os equipamentos que não existem na biblioteca do programa, como o MAX485 e o ESP32, criamos nossos próprios *packets* para a execução do projeto.

A placa contém dois LEDs que indicam o status da comunicação Modbus, o vermelho indicando erro e o verde indicando que a comunicação está operante, dois transistores TIP120, responsáveis pelo chaveamento dos bancos e os LEDs que indicam o acionamento dos respectivos bancos de capacitores. Abaixo pode ser vista uma imagem da placa e seus componentes:

Figura 3.7 – Placa eletrônica



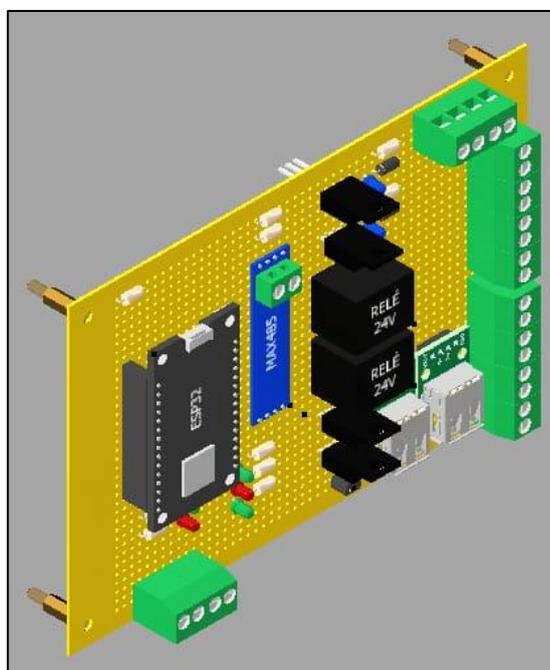
Fonte: Autoria própria, 2024

A placa também contém bornes para alimentação 24Vdc, para receber sinais do medidor de grandezas elétricas e para o acionamento dos sinaleiros da porta do quadro.

3.5.3 Montagem do quadro de controle

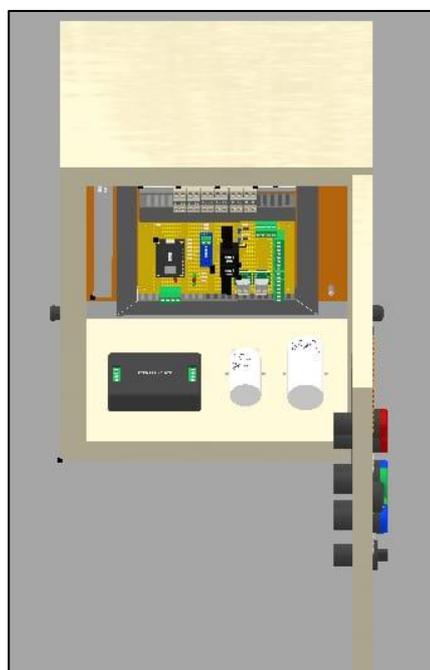
O projeto foi desenvolvido para ser comportado dentro de um quadro de dimensões de 400X300X200mm e o layout foi projetado num modelo 3D feito usando o software Autodesk Inventor. As dimensões dos componentes foram levantadas com uso dos devidos datasheets e com isso em mãos foram desenhados todos os componentes em tamanho real dentro do software.

Figura 3.8 – 3D da Placa eletrônica



Fonte: Autoria própria, 2024

Figura 3.9 – 3D do quadro de controle



Fonte: Autoria própria, 2024

Após isso iniciou-se a montagem do quadro, seguindo tudo que foi feito anteriormente em 3D, as furações para comportar os sinaleiros foram feitas usando uma serra-copo de 22mm de diâmetro e as marcações das labels foram feitas em uma máquina de gravação e corte a laser por fibra óptica de 50W, e os rasgos para outros componentes foram feitos usando uma micro-retifica.

Depois disso veio o momento de fixar o trilho DIN e as canaletas à placa do quadro, as canaletas tendo sido fixadas com fita dupla face, apesar do mais adequado ser o uso de rebite, e os trilhos usando parafuso e porca M3, e então foram colocados os componentes que vão nos trilhos, os contatores, disjuntores e bornes SAK que vão distribuir a alimentação para o restante do quadro. O quadro pode ser visto na imagem 3.6 mostrada a seguir:

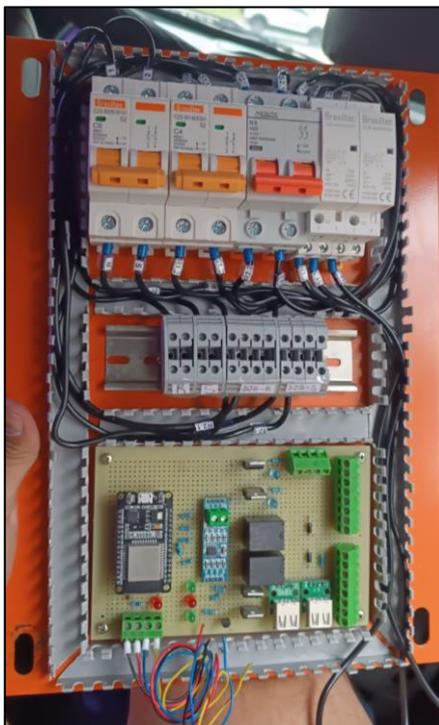
Figura 3.10 – Quadro de controle



Fonte: Autoria própria, 2024

Por último veio a etapa de fazer todas as conexões internas do quadro, todos os cabos receberam anilhas para identificação e tiveram terminais instalados em suas extremidades, como pode ser visto na imagem 3.11:

Figura 3.11 – Placa de montagem



Fonte: Autoria própria, 2024

3.6. Elaboração do algoritmo do projeto.

Este capítulo visa explicar e mostrar o funcionamento do algoritmo criado para o funcionamento do projeto, suas características e funções.

3.6.1. Configuração do ESP32

A configuração do ESP32 consistiu na definição de entradas e saídas, e no download e instalação das bibliotecas do ESP32 para o funcionamento dele na IDE Arduino que foi usada para a elaboração do algoritmo.

3.6.2. Algoritmo do projeto

O código apresentado implementa um sistema de monitoramento e correção de fator de potência utilizando a plataforma Arduino e a biblioteca ModbusMaster. Este sistema é projetado para operar em um microcontrolador ESP32 e utiliza o módulo PZEM-016 para medir parâmetros elétricos, bem como o transceptor MAX485 para facilitar a comunicação Modbus. A correção do fator de potência é um aspecto crucial na otimização da eficiência energética e na redução de custos operacionais em sistemas elétricos industriais.

Inicialmente, o código inclui a biblioteca ModbusMaster para permitir a comunicação Modbus entre o ESP32 e o PZEM-016. O hardware serial é configurado nos pinos RXD2 (16) e TXD2 (17) do ESP32, enquanto os pinos 19 e 18 são designados para controlar o transceptor MAX485. Além disso, são definidos vários pinos de entrada e saída para interação com LEDs, transistores e sinalizadores, que indicam o estado do sistema e a correção do fator de potência.

Na função setup, a comunicação serial é inicializada com uma taxa de baud de 9600, utilizando o canal serial SERIAL_8N1. A biblioteca Modbus é então configurada para começar a comunicação com o PZEM-016, utilizando o endereço escravo definido. Os pinos são configurados como entradas ou saídas, conforme necessário, e o transceptor MAX485 é inicialmente configurado para o modo de recepção.

O loop principal do código realiza uma varredura no endereço dos dispositivos escravos, configurando o endereço do escravo e lendo os registradores de entrada do PZEM-016 para obter os parâmetros elétricos, como tensão, corrente,

potência, energia, frequência e fator de potência. Esses valores são então processados e exibidos na porta serial para monitoramento.

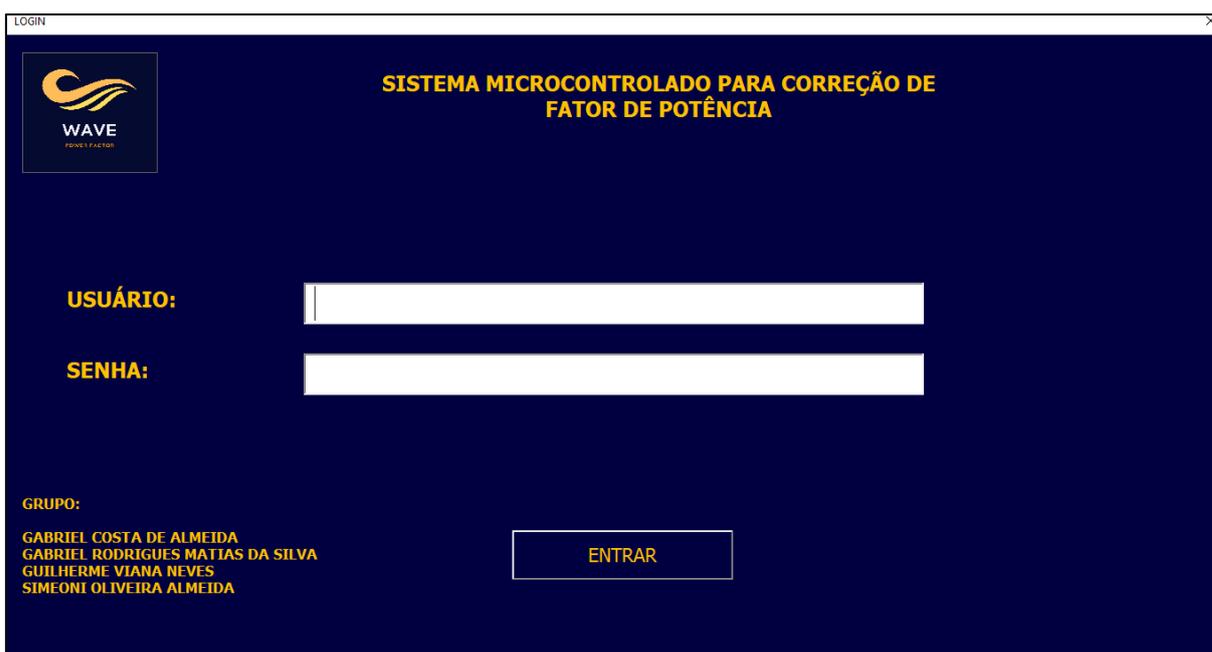
Com base nos valores medidos, o sistema ativa ou desativa correções automáticas do fator de potência. Se o fator de potência estiver abaixo de um determinado valor (0.92), o código ativa diferentes bancos de correção (QB1 e QB2) conforme necessário, utilizando LEDs para indicar o estado da correção. Caso contrário, os bancos de correção são desativados.

Em conclusão, este sistema demonstra uma integração eficiente de hardware e software para monitorar e corrigir o fator de potência em tempo real, utilizando a comunicação Modbus e o microcontrolador ESP32. A implementação de correções automáticas baseadas em medições em tempo real melhora significativamente a eficiência energética e reduz os custos operacionais em sistemas industriais, tornando este código uma solução prática e eficaz para a gestão de energia elétrica.

3.7 Sistema Supervisório

O sistema supervisório empregado foi desenvolvido utilizando o software Microsoft Excel e suas funcionalidades de programação via linguagem Visual Basics, nos permitindo a criação de telas de login, controle e dashboard das medições feitas, com foco na tensão, corrente e fator de potência. Diferente do loop aplicado na rotina do ESP32, que faz medições cíclicas, nosso sistema supervisório colhe e registra medições apenas quando solicitado, simulando a medição de hora em hora efetuada pela concessionária. Os dados registrados são armazenados na planilha, formando assim um banco de dados para análises futuras e levantando gráficos para melhor visualização e entendimento do conceito de fator de potência. Abaixo pode-se conferir as telas criadas para esta aplicação:

Figura 3.12 – Tela de Login



The screenshot shows a login window titled 'LOGIN'. The background is dark blue. In the top left corner, there is a logo for 'WAVE' with the tagline 'POWER FACTOR'. The main title of the system is 'SISTEMA MICROCONTROLADO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA'. Below the title, there are two input fields: 'USUÁRIO:' and 'SENHA:'. At the bottom left, there is a list of names under the heading 'GRUPO:'. At the bottom center, there is a button labeled 'ENTRAR'.

WAVE
POWER FACTOR

SISTEMA MICROCONTROLADO PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA

USUÁRIO:

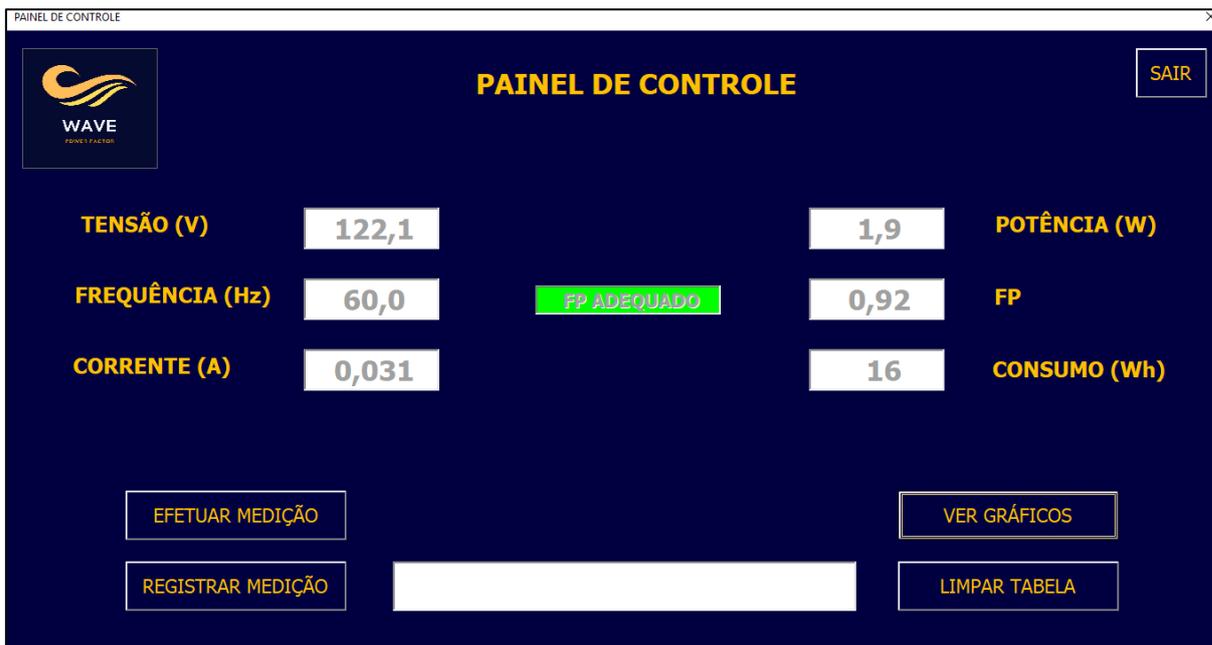
SENHA:

GRUPO:
GABRIEL COSTA DE ALMEIDA
GABRIEL RODRIGUES MATTAS DA SILVA
GUILHERME VIANA NEVES
SIMEONI OLIVEIRA ALMEIDA

ENTRAR

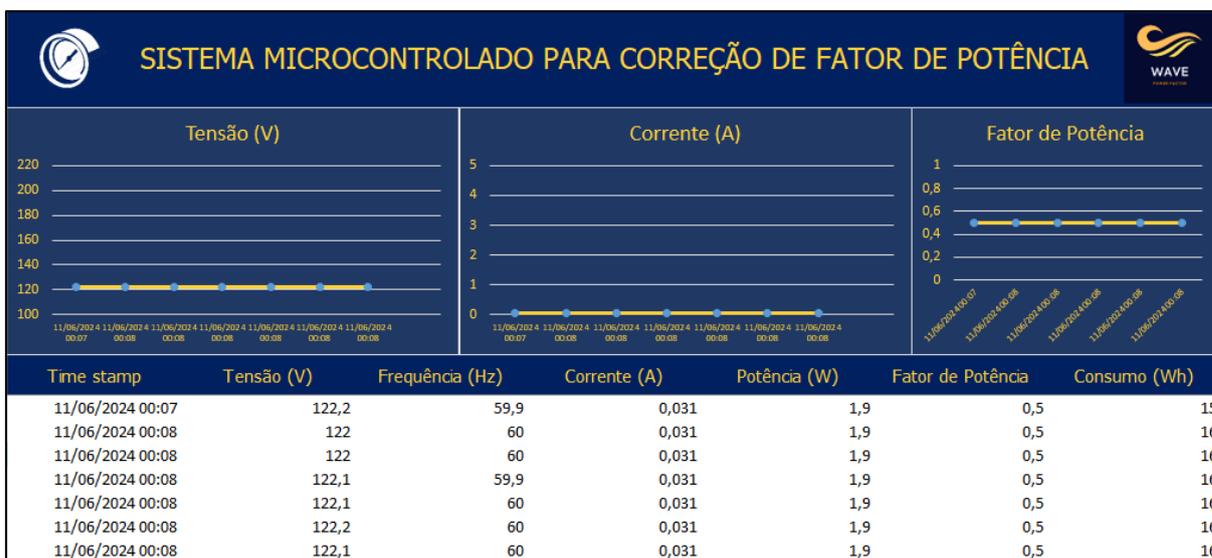
Fonte: Autoria própria, 2024

Figura 3.13 – Painel de Controle



Fonte: Autoria própria, 2024

Figura 3.14 – Dashboard



Fonte: Autoria própria, 2024

3.8 Obstáculos e soluções

Durante a montagem e confecção do projeto, enfrentamos diversos obstáculos que foram resolvidos através de estudos, troca de experiências entre os integrantes do grupo e questionamentos com o nosso orientador. A seguir, detalhamos os principais obstáculos encontrados e as soluções implementadas:

Obstáculo 1: Seleção do Microcontrolador para Medição do Fator de Potência

Descrição: Para iniciar o nosso projeto, nosso orientador requisitou a busca por um microcontrolador ou dispositivo capaz de medir o fator de potência e transmitir esses valores.

Solução: Encontramos o dispositivo de medições de grandezas elétricas PZEM-016, que além de realizar as medições, possui um software que demonstra os valores visualmente.

Obstáculo 2: Funcionamento Inadequado do PZEM-016

Descrição: Durante os testes iniciais, percebemos que o PZEM-016 não estava funcionando corretamente.

Solução: Identificamos que um fusível de proteção adicionado ao circuito com o dispositivo estava danificado. Após a substituição do fusível, o dispositivo voltou a funcionar normalmente.

Obstáculo 3: Superaquecimento do Transistor

Descrição: Nos testes de funcionamento, ao acionar uma carga de 220V através de transistores e relés, observamos um aumento na temperatura do transistor.

Solução: Após revisar o circuito, identificamos uma ligação incorreta entre o relé e o transistor, onde o relé estava conectado ao emissor. Corrigimos a ligação para o coletor, o que eliminou o superaquecimento do transistor e garantiu o funcionamento seguro e adequado do sistema elétrico.

Obstáculo 4: Comunicação entre o Medidor de Grandezas Elétricas e a Placa Microcontrolada e alimentação do ESP32.

Descrição: Precisávamos estabelecer a comunicação entre o medidor de grandezas elétricas e a placa microcontrolada, e ao mesmo tempo transferir dados via serial para o computador, porém, o ESP32 não pode ser alimentado externamente e via USB ao mesmo tempo.

Solução: Utilizamos dois módulos USB para garantir a alimentação adequada da placa microcontrolada, estabelecendo assim a comunicação desejada.

Obstáculo 5: Problemas com os LEDs

Descrição: Durante os testes, observamos que os LEDs apresentavam um comportamento instável (estado de tristate).

Solução: Ao analisar o circuito, encontramos pequenos pedaços de fio de cobre nos resistores. Após a remoção desses fragmentos, o circuito funcionou adequadamente.

Obstáculo 6: Tensão Incorreta no Borne

Descrição: Nos testes finais, verificamos que a tensão no borne era de 5V em vez de 24V.

Solução: Identificamos que a corrente nos terminais base dos transistores dos sinaleiros estava muito baixa. Reduzimos o valor dos resistores de 20k ohms para 10k ohms, permitindo que a tensão de 24V fosse corretamente aplicada no borne.

Esses desafios e suas respectivas soluções contribuíram para o aprendizado e o desenvolvimento das habilidades técnicas da equipe, além de garantir o sucesso na execução do projeto.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto intitulado Sistema Microcontrolado para Correção do Fator de Potência foi desenvolvido com sucesso, alcançando seu objetivo de criar um sistema que monitora e corrige o fator de potência de maneira automatizada. A motivação para esse projeto reside na busca por maior eficiência energética, garantir a segurança da instalação, aumentar o desempenho dos equipamentos e reduzir custos relacionados a multas por excedente reativo.

Durante o desenvolvimento do projeto, o Microcontrolador ESP32 desempenhou um papel central, juntamente com outros componentes como o medidor digital de grandezas elétricas, capacitores e os componentes elétricos de proteção e comando do quadro de controle. A utilização desses componentes permitiu a criação de um sistema eficiente para monitorar e corrigir o fator de potência.

A pesquisa e o conhecimento adquiridos durante a execução do projeto foram fundamentais para seu sucesso. Em particular, o entendimento sobre comunicação modbus, programação e configuração do ESP32, dimensionamento de uma instalação elétrica juntamente com os conhecimentos sobre o comportamento do fator de potência foram cruciais para o desenvolvimento do sistema.

A metodologia científica guiou o planejamento e execução do projeto, permitindo uma abordagem organizada e eficaz para alcançar os objetivos propostos. A introdução de um sistema microcontrolado para correção do fator de potência representa uma abordagem interessante para otimizar o uso de energia elétrica em diversos contextos, contribuindo para uma maior eficiência energética e redução de custos.

Apesar dos desafios encontrados ao longo do projeto, estes foram superados com sucesso, graças ao embasamento teórico e à colaboração entre os membros da equipe. O projeto oferece oportunidades futuras para aprimoramentos, como a implementação de um Controlador Lógico Programável (CLP) e o desenvolvimento de novos algoritmos para otimização do fator de potência em diferentes cenários.

As vantagens incluem a facilidade de uso e compreensão do sistema, um custo acessível para pequenas empresas e empreendimentos, manutenção simples e a possibilidade de realizar operações automaticamente com o simples apertar de

botões. Os membros do grupo adquiriram uma visão mais ampla sobre a aplicação da automação em comparação ao que foi visto durante o curso.

Como desvantagens, destacam-se a dificuldade em visualizar os valores das grandezas elétricas do sistema e a necessidade de redimensionar os capacitores e os componentes de proteção e comando. Isso ocorre devido ao método de correção utilizado e aos limites físicos do equipamento.

Tendo em vista todo o desenvolvimento, o projeto foi concluído com êxito, proporcionando novos conhecimentos e contribuindo para a comunidade científica a possibilidade de estudo de caso. A implementação de um sistema microcontrolado para correção do fator de potência representa um avanço significativo na automação e otimização de processos relacionados ao uso de energia elétrica.

Propõem como ações de melhorias futuras a implementação de um Controlador Lógico Programável (CLP) e o desenvolvimento de novos algoritmos para otimização do fator de potência em diferentes cenários e a aplicação de um sistema supervisório assim como Machine Learning e conceitos de Big Data.

REFERÊNCIAS

BALADI, Carolina. **O que é distorção harmônica, quais seus riscos e como evitá-la**. 4partner, 2019. Disponível em: <<https://blog.4partner.com.br/distorcao-harmonica-seus-riscos-como-evita/>>. Acesso em: 4 de novembro de 2023.

BASTOS, Cleverson Keller Vicente, **Introdução á metodologia científica**, 19 Ed: Rio de janeiro: Vozes Ltda, 1991.

DECKMANN, Sigman; POMILIO, José. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. 2020. 00 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação – Universidade Estadual. Campinas, 2020.

DUALIBE, Paulo. **Eficiência dos sistemas elétricos industriais com aplicação de capacitores: Capacitores: Instalação e Correção do Fator de Potência**. In: SEMANA DE ENGENHARIA, 11, 2009. Trabalho apresentado ao 6º Seminário Fluminense de engenharia, fluminense, 2009. Não publicado.

EDMINISTER, Joseph A. **Circuitos Elétricos: Resumo da teoria 350 problemas resolvidos 493 problemas propostos**. 2 Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1991.

FATEC - SBC – Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo. **MANUAL DE NORMALIZAÇÃO DE TCC – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**, 7 Ed: São Bernardo do Campo, 2023

HEERDT, J. **Carga eletrônica ativa trifásica**. Tese (Doutorado em engenharia elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, p. 2. 2013.

KIKUCHI, George; REIS, Júlio; **Banco de capacitores para correção de fator de potência em indústria**. 2015. 20p. Trabalho de conclusão de curso graduação em engenharia, arquitetura e urbanismo – Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos, 2015.

MAMEDE, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 7 Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MARKUS, Otávio. **Circuitos Elétricos: Corrente Contínua e Corrente Alternada**. 1 Ed. São Paulo: Érica, 2001.

METROPOLE DIGITAL. **Tensões e correntes alternadas**. Metrópole Digital, [s.d]. Disponível em: < <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/2/20/12/1>>. Acesso em: 1 de novembro de 2023.

MATTEDE, Henrique. **Harmônicas em sistemas elétricos: Guia completo**. Mundo da Elétrica, [s.d.]. Disponível em: < <https://www.mundodaeletrica.com/harmonicas-em-sistemas-eletricos-guia-completo/>>. Acesso em: 4 novembro de 2023.

NAHVI, Mahmood; EDMINISTER, Joseph A. 4 ed. **Teoria e problemas de circuitos elétricos**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

O que é uma carga resistiva, indutiva e capacitiva? Tecnogera, 2015. Disponível em: <<https://blog.tecnogera.com.br/blog/o-que-e-uma-carga-resistiva-indutiva-e-capacitiva#:~:text=As%20cargas%20capacitivas%2C%20utilizadas%20em,possui%20fator%20de%20pot%C3%Aancia%20zero>>. Acesso em: 1 de novembro de 2023.

PASCOAL, Adriano. **Distorção Harmônica**. YouTube, 8 de outubro de 2020. Disponível em:<https://www.youtube.com/watch?v=cCT1DMDvh_4>.

PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EPP. **Manual de tarifação da energia elétrica**. 2011.

RIDER, Thiago. **Controlador para correção do fator de potência com microcontrolador**. 2010. 00 p. Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia da Computação – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS. Brasília, 2010.

SILVEIRA, Cristiano. **Fator de potência: Legislação na distribuição e correções**. Citisystems, 2017. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/fator-de-potencia-legislacao-distribuicao-correcoes/>>. Acesso em: 4 novembro de 2023.