

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
ÁREA DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

JULIANO ANTHONI RENNER

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS MONOFÁSICAS
UTILIZANDO MICROCONTROLADOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM – RS
2024**

JULIANO ANTHONI RENNER

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS MONOFÁSICAS
UTILIZANDO MICROCONTROLADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.

Orientador: Prof. Adílson Luís Stankiewicz

**ERECHIM – RS
2024**

JULIANO ANTHONI RENNER

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS MONOFÁSICAS
UTILIZANDO MICROCONTROLADOR**

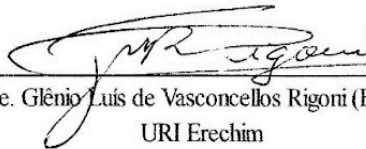
**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Erechim, 04 de dezembro de 2024.

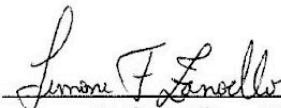
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Adilson Luis Stankiewicz (Orientador)
URI Erechim



Prof. Me. Glênio Luis de Vasconcellos Rigori (Examinador)
URI Erechim



Prof.ª Dr. Simone Zanocello (Examinadora)
URI Erechim

*Education is the most powerful weapon
which you can use to change the world.*

(Nelson Mandela)

RESUMO

Neste trabalho, foi desenvolvido e testado um sistema para correção do fator de potência, composto por três blocos principais. Inicialmente, foi projetado um circuito para medição e processamento dos sinais de corrente e tensão da rede elétrica, utilizando detectores de passagem por zero para identificar a defasagem entre os sinais. O segundo bloco foi responsável pelo controle dos dados adquiridos, utilizando um microcontrolador programado para calcular o fator de potência com base nas leituras de corrente e tensão. Esse microcontrolador também determinava, conforme a necessidade, o acionamento de capacitores de correção na rede. O terceiro bloco foi dedicado ao acionamento, onde um relé era responsável por conectar os capacitores à rede quando o fator de potência permanecia abaixo de 0,92 por determinado período. Todo o processo foi simulado e posteriormente implementado em um protótipo funcional. Os testes demonstraram a eficácia do sistema, com os detectores de passagem por zero operando de forma confiável e o sensor de corrente apresentando medições aceitáveis quando comparado a um amperímetro. A programação realizada mostrou-se eficiente, corrigindo o fator de potência. Apesar de pequenas divergências entre os resultados do protótipo e das simulações, devido às variações da rede, o sistema como um todo funcionou conforme esperado, contribuindo para a melhoria da eficiência energética do sistema.

Palavras-chave: Fator de Potência. Microcontrolador. Capacitor.

ABSTRACT

In this work, a system for power factor correction was developed and tested, consisting of three main blocks. Initially, a circuit was designed to measure and process the current and voltage signals from the electrical grid, using zero-crossing detectors to identify the phase shift between the signals. The second block was responsible for controlling the acquired data, using a microcontroller programmed to calculate the power factor based on the current and voltage readings. This microcontroller also determined, as needed, the activation of correction capacitors in the grid. The third block was dedicated to activation, where a relay was responsible for connecting the capacitors to the system when the power factor remained below 0.92 for a certain period. The entire process was simulated and later implemented in a functional prototype. The tests demonstrated the effectiveness of the system, with the zero-crossing detectors operating reliably and the current sensor presenting acceptable measurements when compared to an ammeter. The programming performed proved to be efficient, correcting the power factor automatically. Despite small discrepancies between the prototype and simulation results, the system as a whole worked as expected, contributing to improving the system's energy efficiency.

Keywords: Power Factor. Microcontroller. Capacitor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Triângulo de potência.	15
Figura 2 - Composição de um capacitor	17
Figura 3 - Capacitor WEG utilizado em banco de capacitores.	18
Figura 4 - Efeito da adição do banco de capacitores.	19
Figura 5 - Correção individual.	21
Figura 6 - Compensação por grupo de cargas.	22
Figura 7 - Correção geral.	22
Figura 8 - Diagrama fasorial de uma carga indutiva.	24
Figura 9 - Relé de acionamento eletromecânico.	24
Figura 10 - Arduino Mega 2560 Rev3.	26
Figura 11 - Diagrama de blocos do projeto.	27
Figura 12 - Esquema sensor ACS712-30A.	29
Figura 13 - Fonte de tensão.	29
Figura 14- Ponte retificadora de onda completa.	30
Figura 15 - Comparador LM358.	31
Figura 16 - Detector de passagem por zero da corrente	32
Figura 17 - Circuito de detecção de passagem por zero da tensão.	32
Figura 18 - Esquemático Optoacoplador 4n36	33
Figura 19 - Arduino utilizado como circuito de controle no software Proteus.	34
Figura 20 - Fluxograma de programação.	35
Figura 21 - Motor monofásico WEG 3/4cv.	36
Figura 22 - Kit capacitivo ETZ0055 Anzo.	38
Figura 23 - Módulo Relé SRD-05VDC-SL-C.	39
Figura 24 - Circuito de acionamento.	40
Figura 25 - Display LCD 16x02 I2C.	41
Figura 26 - Esquema completo realizado no software Proteus.	42
Figura 27 - Onda da corrente obtida juntamente com o detector de passagem por zero.	43
Figura 28 - Valor de corrente lido pelo sensor.	44
Figura 29 - Corrente medida por um amperímetro.	44
Figura 30 - Gráfico de tensão antes da ponte retificadora.	45
Figura 31 - Gráfico de tensão após a ponte retificadora.	46
Figura 32 - Comparação dos detectores de passagem por zero.	46
Figura 33 - Comparação do atraso dos detectores com o motor acionado.	47
Figura 34 - Valores de corrente e FP sem o capacitor de correção.	47
Figura 35 - Simulação dos detectores após acionamento do capacitor.	48
Figura 36 - Comparação no osciloscópio após acionamento do capacitor.	48
Figura 37 - Valores do display após o acionamento do capacitor.	49
Figura 38 - Ondas da tensão e corrente em fase.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada
CI	Circuito Integrado
C	Capacitância
CODI	Comitê de Distribuição de Energia Elétrica
cv	cavalo vapor
DC	Corrente Contínua
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
FP	Fator de potência
f	Frequência
ICSP	<i>In Circuit Serial Programmer</i>
kW	quiloWatt
kVA	quilovolt-ampère
kVAr	quilovolt-ampère reativo
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MHz	Megahertz
mV	milivolt
mV/A	milivolt/Ampere
P	Potência Ativa
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
Q	Potência reativa
Qc	Potência reativa compensada
S	Potência aparente
Triac	Triodo de corrente alternada
UARTs	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
uF	microfarad
VAC	Tensão em corrente alternada
VAr	Volt-Ampere reativo
Vin	Tensão de entrada
VRMS	Tensão em valor eficaz
Vout	Tensão de saída
VDC	Tensão em corrente contínua

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Potência	13
2.1.1 Potência Ativa	13
2.1.2 Potência Reativa	14
2.1.3 Potência Aparente	14
2.2 Fator de Potência	15
2.2.1 Causas e consequências do baixo fator de potência	16
2.2.2 Benefícios da correção	16
2.2.3 Como calcular o fator de potência	17
2.3 Capacitores	17
2.3.1 Banco de capacitores	18
2.3.1.1 Cálculo do banco de capacitores	19
2.4 Métodos de correção do fator de potência	20
2.4.1 Correção individual	20
2.4.2 Correção por grupo de cargas	21
2.4.3 Correção geral	22
2.5 Tipos de cargas	23
2.5.1 Cargas Resistivas	23
2.5.2 Cargas Capacitivas	23
2.6 Relés Eletromecânicos	24
2.7 Microcontroladores	25
2.7.1 Arduino	25
2.8 Trabalhos Similares	26
3 METODOLOGIA	27
3.1 Transformador de tensão	28
3.2 Sensor de corrente	28
3.3 Fonte de tensão	29
3.4 Retificação do sinal	30
3.5 Detectores de passagem por zero	30
3.5.2 Detector de passagem por zero da tensão	32
3.6 Circuito principal	33
3.6.1 Fluxograma de programação	34
3.7 Circuito de acionamento do capacitor de correção	36
3.7.1 Cargas utilizadas	36

3.7.2 Cálculo do banco de capacitores	36
3.7.3 Relés para acionamento do capacitor de correção	39
3.8 Display LCD	40
3.9 Diagrama geral do circuito	41
4 RESULTADOS	43
4.1 Medições de corrente	43
4.2 Medições de tensão	45
4.3 Comparação dos detectores de passagem por zero	46
5 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52
APÊNDICE A - Programação	55
APÊNDICE B - Circuito Completo	57

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido cada vez mais evidente o impacto das cargas não lineares e reativas nas redes elétricas, resultando em um desafio crescente para a qualidade da energia elétrica, especialmente em ambientes industriais e comerciais. Um dos principais indicadores dessa problemática é o fator de potência, cujo baixo valor não apenas indica um uso ineficiente da energia, mas também acarreta uma série de consequências negativas. Entre elas, destacam-se o aumento das perdas internas, a queda de tensão nas instalações, a redução da vida útil de equipamentos e o aumento nos custos operacionais devido ao consumo excessivo de energia reativa.

Neste contexto, é essencial implementar soluções que não apenas corrijam o fator de potência, mas também otimizem o uso da energia de maneira sustentável. Tecnologias avançadas, como sistemas automatizados de correção, têm mostrado eficiência ao ajustar dinamicamente o fator de potência de acordo com as variações na demanda. Isso não só resulta em economia financeira, mas também em maior estabilidade e eficiência operacional das instalações elétricas.

Segundo Weg (2018) a correção do fator de potência, principalmente através da instalação de capacitores, tem recebido grande atenção das áreas de projeto, manutenção e finanças de empresas que buscam otimizar o consumo de energia de seus equipamentos elétricos. Com o objetivo de melhorar o aproveitamento da energia elétrica gerada no país, o antigo DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), hoje denominado ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), estabeleceu, por meio do decreto mais recente Nº 1000 de 7 de dezembro de 2021, que o fator de potência mínimo deve ser de 0,92.

Portanto, este trabalho visa a correção do fator de potência utilizando de três blocos principais para a obtenção dos resultados desejáveis. O primeiro se trata do bloco de medição do valor de corrente e retificação do sinal da rede. Juntamente com esse processo será utilizado um detector de passagem por zero tanto para tensão quanto para corrente, para assim conseguir medir a defasagem entre elas. O segundo bloco trata-se do controle desses dados adquiridos, ou seja, haverá um microcontrolador que irá receber as leituras e valores das cargas que serão injetadas à rede, para assim, através da programação calcular o fator de potência.

Esse processo inclui-se também no terceiro bloco o qual se trata do acionamento, portanto, caso o microcontrolador verificar que a adição dos capacitores em paralelo com a carga é necessária, ele irá acionar um relé que irá injetar esses capacitores na rede. Esse acionamento irá ocorrer apenas se o valor do fator de potência permanecer por um tempo abaixo de 0,92.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar a correção automática do fator de potência de cargas monofásicas conectadas à rede utilizando capacitores e um microcontrolador.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar o algoritmo de programação para acionar os capacitores quando necessário;
- Medir e mostrar os valores de corrente e fator de potência em um display;
- Criar um circuito de detecção de passagem por zero para corrente e tensão;
- Fazer com que o valor corrigido do fator de potência seja próximo de 1;
- Desenvolver um projeto prático para comprovar os métodos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para o entendimento do trabalho como um todo é necessário esclarecer alguns conceitos e métodos presentes neste tópico, como os tipos de potência elétrica, fator de potência, suas causas, os benefícios e métodos de correção.

2.1 Potência

A potência pode ser definida como um dos principais valores em sistemas de energia elétrica, eletrônicos e de comunicação, pois envolvem a transmissão de energia. Todo equipamento elétrico, como ventilador, motor, lâmpada, TV, tem uma potência nominal, indicando qual a potência consumida pelo equipamento.(ALEXANDER; SADIKU, 2013).

De acordo com Pinto (2013) a potência (P) é o produto da tensão (V) com a intensidade da corrente elétrica (I) que percorre o circuito em que se está calculando, assim temos a equação 1 :

$$P = V * I \quad (1)$$

Onde:

P é medida em watts, V é dada em volts (V), e I é dada em ampères (A). (PINTO, 2013).

2.1.1 Potência Ativa

De acordo com Franchi (2014), a potência ativa refere-se à conversão da energia elétrica diretamente em outras formas úteis de energia, como mecânica ou térmica, sem a necessidade de etapas intermediárias de transformação.

Exemplos de potência ativa:

- Chuveiros
- Resistores

Em corrente alternada é dada pelas equações 2 e 3.

Circuito monofásico:

$$P = V * I * \cos(\varphi) \quad (2)$$

Circuito trifásico:

$$P = 1,73 * V * I * \cos(\varphi) \quad (3)$$

Medida em watts, a potência ativa é justamente o valor demonstrado nas faturas de eletricidade, o qual medido durante uma hora aparece como kWh e é cobrado pelas concessionárias. Também é considerada como a potência “real”. (PINTO, 2013).

2.1.2 Potência Reativa

A potência reativa é a energia intermediária necessária para qualquer equipamento, como, por exemplo, motores, transformadores, reatores, capacitores, entre outros. Ela é trocada entre o gerador e a carga, não sendo consumida efetivamente. Os consumidores de corrente reativa são transformadores, reatores, motores de indução, motores síncronos subexcitados. Também são fornecedores de corrente reativa: capacitores e motores síncronos superexcitados, sendo o capacitor o elemento mais utilizado para esta finalidade. (FRANCHI, 2014, p.86).

A potência reativa tem como unidade VAR(volt-ampère reativo) em corrente alternada e é representada pelas equações 4 e 5:

Circuito monofásico:

$$Q = V * I * \sen(\phi) \quad (4)$$

Circuito trifásico:

$$Q = 1,73 * V * I * \sen(\phi) \quad (5)$$

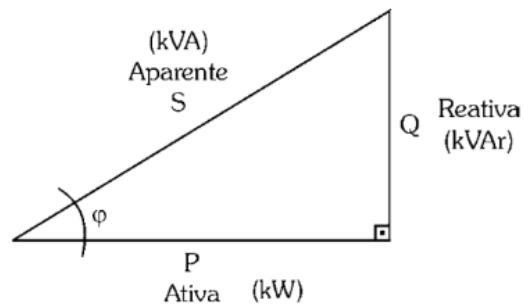
2.1.3 Potência Aparente

Segundo Creder (2021) a potência aparente se trata basicamente da soma vetorial da potência ativa com a potência reativa, onde sua relação é dada através do triângulo ou diagrama de potências. Nele relacionamos a potência ativa, reativa, aparente, e o ângulo que representa o fator de potência. Portanto, utilizando como base o Teorema de Pitágoras temos a seguinte equação:

$$H^2 = Co^2 + Ca^2 \quad (6)$$

Com isso relacionamos os ângulos desse triângulo retângulo com as relações de seno, cosseno e tangente, assim formando o chamado triângulo de potências, mostrado na Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Triângulo de potência.



Fonte: Adaptado de Franchi (2014).

Sendo assim a potência aparente pode ser visualizada geometricamente como a soma da potência ativa com a potência reativa, conforme a equação 7:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (7)$$

2.2 Fator de Potência

Segundo Pinto (2013), a interação entre a onda de corrente elétrica e a de tensão é fundamental para determinar a quantidade de energia transmitida. Em sistemas de corrente alternada, essas ondas podem estar alinhadas ou desfasadas. Quanto maior for a defasagem entre elas, menor será a energia efetivamente transmitida, fenômeno caracterizado pelo fator de potência.

O fator de potência (FP) é definido como o cosseno do ângulo de defasagem (ϕ) entre a tensão e a corrente de uma carga, sendo representado por $\cos(\phi)$. Essa grandeza adimensional possui valores que variam de 0 a 1 ($0 \leq FP \leq 1$) e indica a eficiência da conversão de potência aparente (S) em potência ativa (P). Quanto menor o FP, maior será a circulação de energia reativa (Q) entre a fonte e a carga, sem gerar trabalho útil. Por esse motivo, a ANEEL exige que instalações industriais e comerciais mantenham o FP dentro de padrões mínimos, sob pena de aplicação de sobretaxas caso esteja abaixo do valor de 0,92. (SEIXAS; PINTO; MATSUBARA, 2018).

2.2.1 Causas e consequências do baixo fator de potência

Conforme Pinto (2013), diversas causas podem levar ao baixo fator de potência, especialmente em instalações industriais, como:

- Reatores de lâmpadas fluorescentes;
- Motores de indução operando a vazio ou sobrecarregados;
- Transformadores operando com pequenas cargas ou a vazio;
- Fornos a arco ou de indução magnética.

Um baixo fator de potência pode impactar negativamente a empresa e sua instalação como um todo, gerando consequências como:

- Aumento da tarifa de energia;
- Maiores perdas por efeito Joule;
- Necessidade de condutores com bitolas superiores às dimensionadas;
- Oscilação da tensão nos circuitos de distribuição.

2.2.2 Benefícios da correção

Existem vários benefícios ao elevar o fator de potência, como por exemplo, a eficiência do sistema de energia elétrica é aprimorada, reduzindo a necessidade de geração de energia para atender à mesma demanda de potência ativa. Isso contribui para a diminuição dos custos operacionais, tanto para as concessionárias de energia quanto para os consumidores, além de reduzir as perdas de energia nos sistemas de transmissão e distribuição. (DECKMANN, 2024).

De acordo com Franchi (2014), a melhoria na tensão ocorre porque a corrente associada à potência reativa se manifesta apenas na reatância indutiva. Como os capacitores reduzem essa corrente, a queda total de tensão também diminui, sendo equivalente ao produto da corrente do capacitor pela reatância. Assim, para determinar a elevação de tensão proporcionada pelos capacitores, basta conhecer a potência nominal do capacitor e a reatância do sistema, resultando em um aumento de tensão de aproximadamente 4 a 5%.

Devido a essas melhorias e também a redução de perda por efeito Joule, aqui estão algumas vantagens da correção:

- Redução da corrente reativa na rede;
- Aumento da eficiência energética da empresa;
- Aumento da vida útil dos equipamentos;
- Redução do custo de energia elétrica.

2.2.3 Como calcular o fator de potência

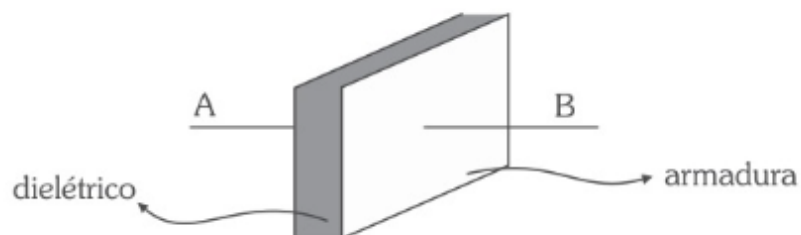
Como citado na seção 2.2 deste trabalho, o fator de potência pode ser definido como o cosseno do ângulo de defasagem entre tensão e corrente, ou seja, $\cos(\phi)$. De acordo com Mohan (2016), há diversas maneiras de determinar o fator de potência, já que sua definição fundamental é a eficiência com que uma carga absorve potência ativa. Em um sistema monofásico, o fator de potência pode ser calculado conforme a equação 8.

$$FP = \frac{P}{|S|} = \frac{P}{VI} = \cos(\phi) \quad (8)$$

2.3 Capacitores

Conforme Alexander e Sadiku (2013), o capacitor é um componente passivo projetado para armazenar energia na forma de campo elétrico. Suas aplicações abrangem diversas áreas, como eletrônica, comunicação, computação e sistemas de energia. Alguns exemplos incluem circuitos de sintonia em receptores de rádio e elementos de memória dinâmica em sistemas computacionais. Estruturalmente, um capacitor é formado por duas placas condutoras separadas por um material isolante, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Composição de um capacitor



Fonte: Cruz (2014).

Quando uma fonte de tensão V é conectada a um capacitor, ela transfere uma carga positiva q para uma das placas e uma carga negativa $-q$ para a outra, permitindo que o capacitor armazene carga elétrica. A quantidade de carga armazenada, representada por q , é diretamente proporcional à tensão aplicada V , conforme descrito na equação 9. (CRUZ, 2014):

$$q = C * V \quad (9)$$

A constante de proporcionalidade C , chamada de capacitância do capacitor, é medida em farads (F), em homenagem ao físico inglês Michael Faraday (1791-1867). A partir da equação 9, é possível definir a capacitância como a razão entre a carga depositada em uma das placas do capacitor e a diferença de potencial entre as duas placas. (SEDRA; SMITH; CARUSONE, 2023).

Segundo Cruz (2014), a capacitância de um capacitor de placas paralelas depende da área (m^2) delas, da distância (m) entre ambas e do material dielétrico, que é caracterizado pela sua permissividade absoluta.

2.3.1 Banco de capacitores

O fator de potência é uma característica que depende das especificações e da forma como uma carga é utilizada. Ele é fornecido pelo fabricante do equipamento e não pode ser alterado diretamente pelo usuário, porém, como a maioria das cargas tem natureza indutiva, bancos de capacitores podem ser empregados para corrigir o fator de potência (FP) de uma carga individual ou de toda a instalação, onde são conectados em paralelo com as cargas. A Figura 3 apresenta um modelo de capacitor comumente utilizado, especialmente em bancos de capacitores nas indústrias. (SEIXAS; PINTO; MATSUBARA, 2018).

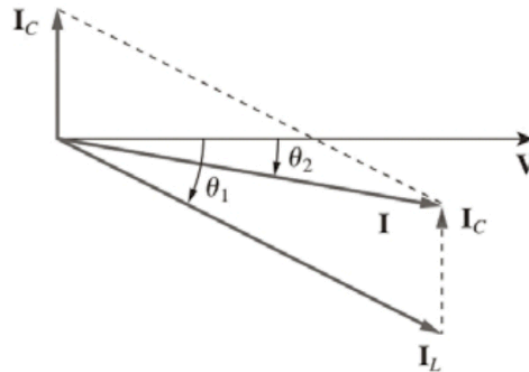
Figura 3 - Capacitor WEG utilizado em banco de capacitores.



Fonte: WEG (2024).

Eles praticamente não aumentam a potência ativa da instalação, mas diminuem o ângulo de fase entre a tensão e a corrente fornecidas, de θ_1 para θ_2 , resultando no aumento do fator de potência, como ilustrado na Figura 4. (SEIXAS; PINTO; MATSUBARA, 2018).

Figura 4 - Efeito da adição do banco de capacitores.



Fonte: Alexander e Sadiku (2014).

2.3.1.1 Cálculo do banco de capacitores

De acordo com Silva (2021), para dimensionar adequadamente o banco de capacitores a ser instalado em uma planta, é necessário calcular corretamente o fator de potência com base no consumo da planta. Para realizar a correção do FP, deve-se calcular o $\cos(\varphi)$ de uma carga individual ou do conjunto de cargas. Uma vez definido o fator de potência da instalação e o valor desejado para o fator de potência, é possível calcular a potência reativa do banco de capacitores necessária para realizar a correção, utilizando as equações apresentadas abaixo. Inicialmente, sabendo a potência ativa e os valores de tensão e corrente, pode-se calcular a potência aparente e a potência reativa com base nas equações 10 e 11, respectivamente.

$$S = V * I \quad (10)$$

$$Q(kVAr) = \sqrt{(S^2 - P^2)} \quad (11)$$

Após obter a potência reativa, ativa e aparente do circuito podemos estipular um fator de potência desejado, que fique acima de 0,92. Segundo Creder (2021), podemos obter o novo valor da potência aparente através da equação 12:

$$Scorrigido(kVA) = P(kW) \div FPdesejado \quad (12)$$

Após calcularmos a potência aparente com o novo fator de potência, podemos utilizar uma das variações da fórmula da própria potência aparente. Utilizando a mesma base da equação 11, obtemos a potência reativa corrigida através da equação 13:

$$Q_{\text{corrigido}}(kVAr) = \sqrt{(S_{\text{corrigido}})^2 - (P)^2} \quad (13)$$

Assim, a potência reativa com o fator de potência desejado é diminuída da potência reativa do calculado, formando a potência reativa compensada :

$$Q_c(kVAr) = Q(kVAr) - Q_{\text{corrigido}}(kVAr) \quad (14)$$

Por fim, podemos obter a capacitância utilizando os valores obtidos, utilizando a seguinte equação. (COSTA; SEIXAS; FREITAS, 2018).

$$C = \frac{Q_c}{2 * \pi * f * (V^2)} \quad (15)$$

2.4 Métodos de correção do fator de potência

O uso de capacitores para corrigir o fator de potência em motores apresenta a vantagem de estabilizar o fator de potência, mantendo-o próximo de 100%, independentemente da carga aplicada ao motor. Esse comportamento proporciona eficiência constante e facilita o gerenciamento do sistema elétrico. A escolha do local de instalação dos capacitores depende das características do projeto. Em novas instalações, é comum conectá-los diretamente aos terminais do motor. Em instalações existentes, pode ser mais prático posicioná-los entre um relé térmico e um contator. Em situações onde os capacitores devem permanecer conectados continuamente, a conexão entre o dispositivo de proteção e o contator pode ser a opção mais adequada. (CREDER, 2021). Algumas maneiras de correção serão apresentadas a seguir.

2.4.1 Correção individual

Segundo o Comitê de Distribuição de Energia Elétrica (2004), a correção do fator de potência é realizada através da instalação de capacitores junto ao equipamento, conforme ilustrado na Figura 5. O objetivo dessa prática é melhorar a eficiência energética do sistema, reduzindo a

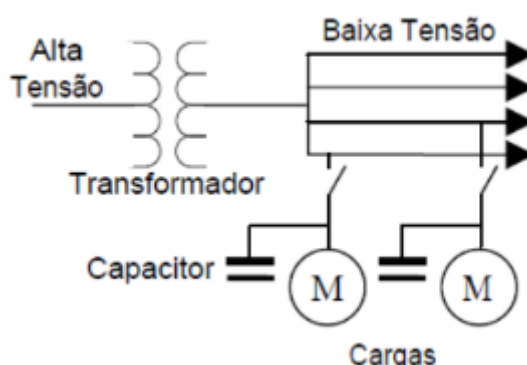
quantidade de energia reativa circulante na rede elétrica. Do ponto de vista técnico, essa é a melhor solução, oferecendo as seguintes vantagens:

- Utilização de um sistema único de acionamento para a carga e o capacitor, o que economiza em equipamentos de manobra;
- Redução da carga nos circuitos de alimentação dos equipamentos compensados;
- Melhora os níveis de tensão de toda a instalação.

Entretanto, algumas desvantagens também são observadas:

- Muitos capacitores de pequena potência têm custo maior que capacitores concentrados de potência maior;
- Para motores, deve-se compensar no máximo 90% da energia reativa necessária, para que o fator de potência não fique muito próximo de 1 ou até se torne capacitivo, o que também gera multas.

Figura 5 - Correção individual.

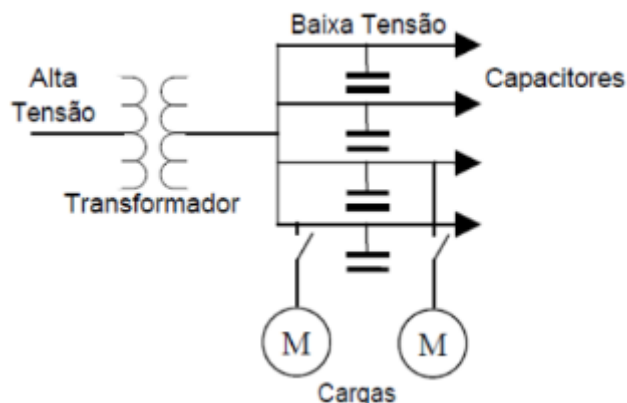


Fonte: COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (2004).

2.4.2 Correção por grupo de cargas

De acordo com Braga (2009), trata-se de um sistema no qual o banco de capacitores é instalado para corrigir setores específicos de uma instalação, geralmente em máquinas com potências inferiores a 10 cv, como ilustrado na Figura 6. Os capacitores são instalados junto ao quadro de distribuição que alimenta esses equipamentos. A desvantagem desse método é que a corrente não é reduzida na alimentação de cada equipamento.

Figura 6 - Compensação por grupo de cargas.

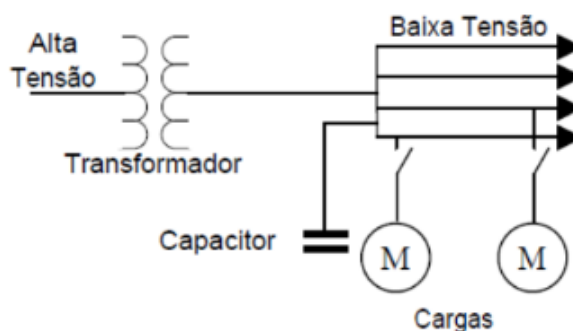


Fonte: COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (2004).

2.4.3 Correção geral

Neste caso, o banco de capacitores é instalado na saída do transformador ou no quadro de distribuição geral, conforme ilustrado na Figura 7, caso a instalação seja alimentada em baixa tensão. Esse método é utilizado em instalações elétricas com um grande número de cargas, que possuem diferentes potências e regimes de utilização pouco uniformes. Entre as vantagens, destacam-se a fácil supervisão, a possibilidade de controle automático do banco e uma melhoria geral no nível de tensão. (COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2004).

Figura 7 - Correção geral.



Fonte: COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (2004).

2.5 Tipos de cargas

A maioria das concessionárias atende a diferentes tipos de cargas. As cargas industriais variam conforme o tipo de indústria, enquanto as cargas comerciais e residenciais geralmente incluem uma variedade de tipos distintos.

2.5.1 Cargas Resistivas

As cargas resistivas não causam defasagem entre a tensão e a corrente, recebendo do gerador apenas a potência ativa, que é totalmente dissipada. Essas cargas são caracterizadas por um fator de potência unitário, ou seja, $FP = \cos 0^\circ = 1$. Exemplos de cargas puramente resistivas incluem lâmpadas incandescentes e aquecedores elétricos. Em geral, dispositivos e equipamentos resistivos são especificados apenas pela tensão de alimentação (VRMS) e pela potência ativa que consomem (W). (MARKUS, 2009).

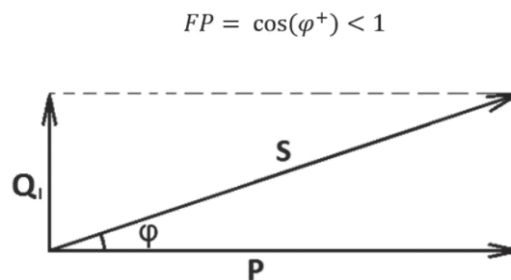
2.5.2 Cargas Capacitivas

De acordo com Rodrigues e Souza (2017), as cargas capacitivas são aquelas que provocam um atraso na tensão em relação à corrente nos sistemas elétricos. Em sua maioria, essas cargas são compostas por equipamentos que incluem capacitores de entrada, como fontes de alimentação de computadores e lâmpadas LED. Outro exemplo comum são os capacitores utilizados para a correção do fator de potência. Esses componentes são projetados especificamente para corrigir o fator de potência e, teoricamente, consomem apenas potência ativa.

2.5.3 Cargas Indutivas

Equipamentos indutivos geralmente apresentam um fator de potência defasado, em que a corrente fica atrasada em relação à tensão. Esse grupo inclui motores assíncronos, reatores para lâmpadas de descarga e equipamentos de solda elétrica, que são comuns em instalações industriais. As cargas elétricas típicas com essas características não são puramente indutivas, resultando em um fator de potência menor que 1, conforme mostrado na Figura 8, mas não igual a zero. (SEIXAS; PINTO; MATSUBARA, 2018).

Figura 8 - Diagrama fasorial de uma carga indutiva.

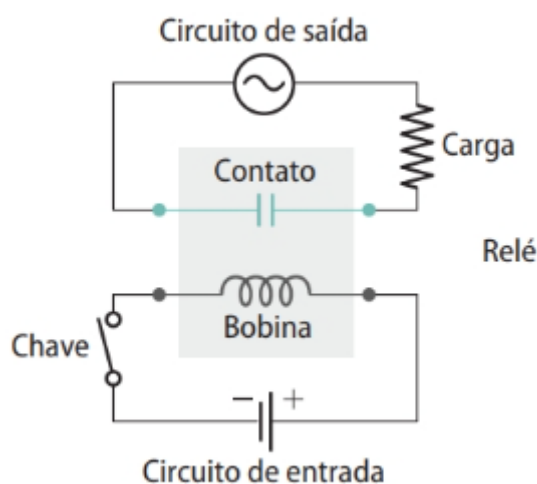


Fonte: Rodrigues e Souza (2017).

2.6 Relés Eletromecânicos

Segundo Petruzella (2013), um relé eletromecânico pode ser definido como um interruptor acionado por um eletroímã. O relé liga ou desliga uma carga no circuito energizando um eletroímã, que abre ou fecha os contatos conectados em série com a carga. Conforme ilustrado na Figura 9, um relé é composto por dois circuitos: a bobina de entrada e os contatos de saída. Em essência, ele se assemelha a um contator, mas a principal diferença entre eles é o número de contatos, já que o relé é utilizado em circuitos de acionamento com correntes pequenas.

Figura 9 - Relé de acionamento eletromecânico.



Fonte: Petruzella (2013).

O funcionamento do relé eletromecânico pode ser compreendido observando-se seus aspectos operacionais e funcionais. Este dispositivo atua como um intermediário em circuitos elétricos, com dois lados distintos. De um lado, há um circuito de comando, que utiliza tensões e

correntes de baixa intensidade (em corrente contínua ou alternada) para energizar a bobina do relé. Do outro lado, encontram-se os contatos elétricos, que, sob a influência do campo magnético gerado pela bobina, permitem controlar circuitos de potência significativamente maiores do que os do circuito de comando. Seu acionamento depende do contato normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF), onde para o acionamento de um motor, por exemplo, geralmente se conecta ao NA, levando em conta que quando o relé for acionado o motor irá ligar. (FILHO; DIAS, 2014).

2.7 Microcontroladores

De acordo com Petruzella (2013), um microcontrolador é um circuito integrado em larga escala que funciona como um computador completo em um único chip, contendo processador, memória e funções de entrada e saída. Ele é projetado para executar tarefas específicas, ao contrário de um computador de propósito geral, que realiza múltiplas tarefas. O software desenvolvido para essas funções é frequentemente chamado de firmware e é armazenado em memórias somente de leitura ou memórias flash, em vez de em unidades de disco.

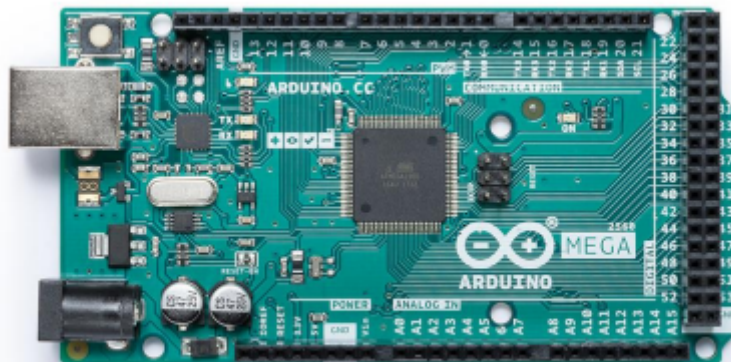
Apesar das limitações de memória, os microcontroladores são ideais para tarefas simples de controle em uma ampla gama de setores. Os principais fatores que os tornaram uma solução acessível e amplamente utilizada para diversos fins foram seu baixo custo e a produção em larga escala. (GIMENEZ, 2010).

2.7.1 Arduino

De acordo com Júnior e Silva (2015), o Arduino foi desenvolvido em 2005 com o objetivo de criar um dispositivo acessível, simples de programar e funcional, voltado tanto para estudantes quanto para pessoas que o utilizariam em projetos pessoais. Adotou-se uma abordagem que permitia que qualquer pessoa montasse, modificasse e personalizasse o dispositivo a partir de seu projeto básico.

Um dos modelos destacados é o Arduino Mega 2560, que possui uma faixa de tensão de alimentação entre 0V e +5V. Ele conta com 54 pinos de entrada e saída, incluindo 15 saídas *Pulse-Width Modulation* (PWM), 16 entradas analógicas, 4 *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UARTs), um cristal oscilador de 16 megahertz (MHz), porta USB para conexão com o computador, conector de alimentação, botão reset e conexão *In Circuit Serial Programmer* (ICSP). (JÚNIOR; SILVA, 2015). A Figura 10 ilustra esse modelo:

Figura 10 - Arduino Mega 2560 Rev3.



Fonte: Arduino (2024).

2.8 Trabalhos Similares

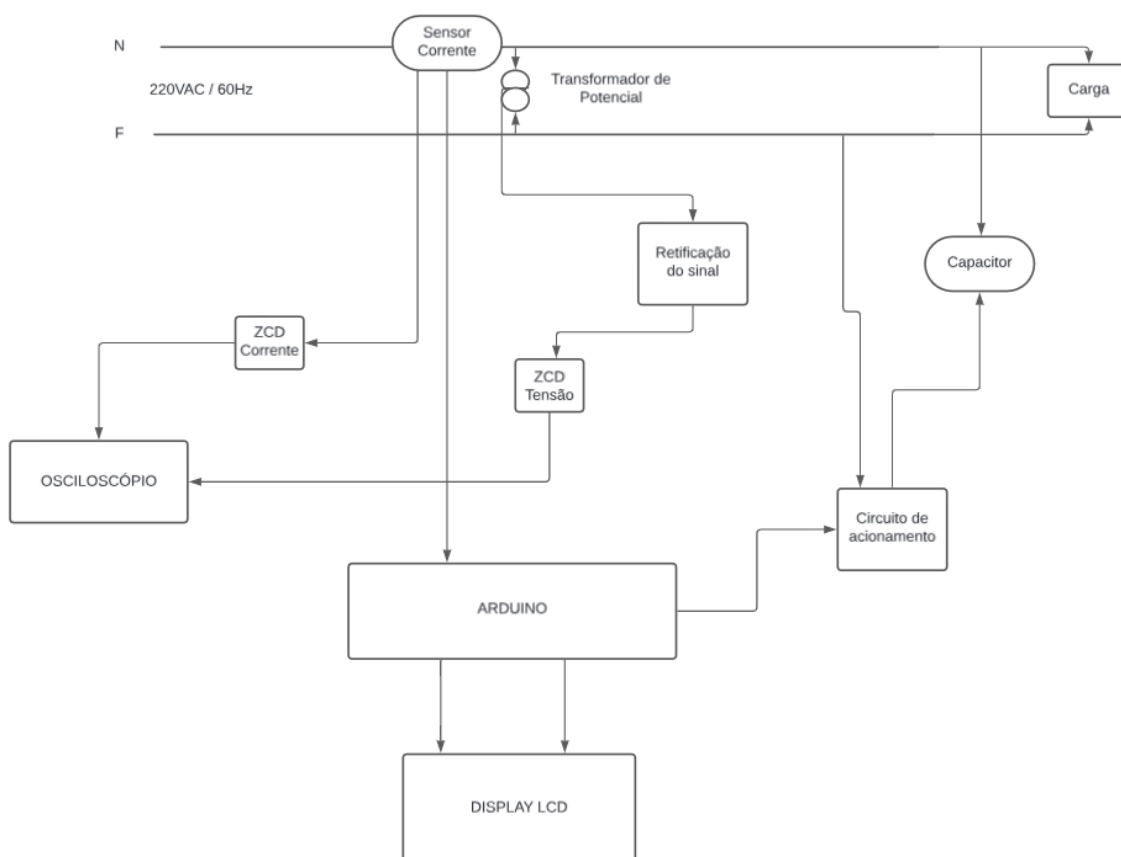
Em seu trabalho, Santos (2022), utilizou da mesma abordagem para aplicar os conceitos necessários, e realizou assim um projeto para implementar um sistema de controle para a correção do fator de potência utilizando um microcontrolador, no caso um ESP 32, para analisar as cargas conectadas ao sistema e controlar a injeção de potência reativa através do desenvolvimento de um banco de capacitores, o qual é acionado através de um Triac (triodo de corrente alternada).

Em outro caso, Augusto (2010), utilizou uma abordagem ainda mais parecida, onde utiliza uma bancada de cargas monofásica em paralelo com o banco de capacitores, e também um microcontrolador para manter o fator de potência acima de 0,92. Em seu circuito, foi necessário adquirir os sinais de tensão e corrente, calcular o fator de potência através do tempo de defasagem que os sinais passam por zero e mostrar o valor em tempo real em um display, e por fim acionar um banco de capacitores caso necessário para injetar energia reativa.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve o desenvolvimento dos circuitos essenciais para o projeto: o circuito de medição e detecção, o circuito principal e o circuito acionador. O circuito de medição e detecção é responsável por realizar as medições de corrente e fator de potência, além de detectar o momento em que as ondas de corrente e tensão passam por zero. O circuito principal se trata do microcontrolador que recebe a leitura do valor de corrente e mostra o valor em um display LCD. O mesmo também irá calcular o fator de potência com base nos valores lidos pelo sensor e valores específicos da carga utilizada, e mostrá-lo no display LCD. Outra função deste circuito é decidir com base no fator de potência calculado, se há necessidade de acionamento do capacitor. Por fim, o circuito acionador utiliza um relé e é o responsável por inserir o capacitor de correção à rede caso necessário. A Figura 11 mostra um diagrama de blocos completo do projeto:

Figura 11 - Diagrama de blocos do projeto.



Fonte: Autor (2024).

3.1 Transformador de tensão

Segundo Cruz e Aniceto (2019), um transformador é composto por um núcleo de material ferromagnético que suporta dois enrolamentos de fios esmaltados, devidamente isolados entre si. No enrolamento primário, onde se aplica uma tensão alternada V_1 , há N_1 espiras, enquanto no enrolamento secundário, com N_2 espiras, é gerada a tensão transformada V_2 . Essa relação entre tensões e espiras é expressa matematicamente pela Equação 16, conforme apresentado no estudo.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (16)$$

A corrente alternada aplicada no enrolamento primário produz um fluxo magnético variável no núcleo do transformador, o que resulta na indução de uma tensão alternada no enrolamento secundário. Essa tensão induzida é proporcional ao número de espiras no secundário. Assim, a tensão no secundário pode ser aumentada ou reduzida, dependendo da proporção entre o número de espiras dos dois enrolamentos (CRUZ; ANICETO, 2019).

Neste trabalho foi utilizado um transformador abaixador de 220VAC para 12VAC a fim de conseguir trabalhar em uma faixa de tensão baixa, requerida pelo microcontrolador e pelo circuito de passagem por zero.

3.2 Sensor de corrente

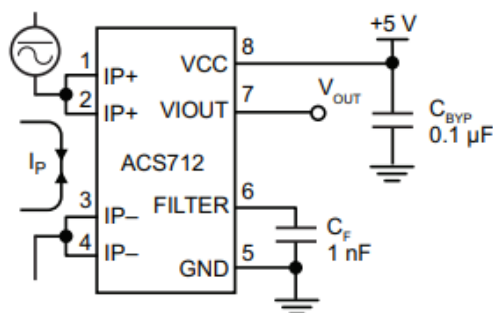
Em um circuito, se utiliza sensores de corrente com base em suas peculiaridades e aplicações, no caso deste trabalho, o sensor escolhido é o ACS712. Segundo Allegro Microsystems (2024), ele utiliza o efeito Hall para detectar o campo magnético gerado pela passagem de corrente, produzindo uma tensão de saída proporcional de 66 mV/A em seu modelo de 30 A. Esse sensor é adequado para medir tanto em corrente alternada (AC) quanto em corrente contínua (DC), oferecendo isolamento entre os terminais de conexão e o circuito integrado (CI).

Algumas de suas principais especificações:

- Faixa de medição de -30A a +30A;
- Alimentação: 5 V;
- Tempo de resposta: 5 us;
- Saída analógica de proporcionalidade 66 mV/A.

A Figura 12 ilustra o esquema desse sensor.

Figura 12 - Esquema sensor ACS712-30A.



Fonte: Allegro Microsystems (2024).

3.3 Fonte de tensão

A maioria dos microcontroladores trabalham com uma tensão de 5V para alimentação. No caso deste trabalho, o microcontrolador utilizado trabalha na faixa entre 0V e +5V, e os componentes utilizados no circuito também serão alimentados com essa tensão, portanto, uma fonte de tensão DC é necessária para alimentá-los. Pelo fato de não ser o foco do trabalho, a fonte utilizada não foi desenvolvida, e assim, uma fonte estável de bancada foi utilizada para alimentar todos os componentes. Essa escolha se deu pelo motivo de utilizar um optoacoplador para a leitura da passagem por zero da tensão, e justamente, a fonte que iria ser desenvolvida necessita de um capacitor de filtragem após a ponte retificadora, o que nesse tipo de circuito desenvolvido, após alguns testes, afetava o sinal de detecção por zero.

Portanto, a fonte que foi utilizada é a disponível em laboratório ajustada para 5VDC, como mostra a figura 13.

Figura 13 - Fonte de tensão.



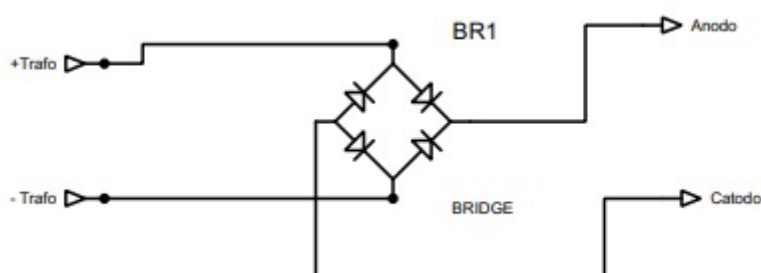
Fonte: Cofemeta.com (2024).

3.4 Retificação do sinal

Um retificador de onda completa utiliza ambos os semiciclos da onda senoidal de entrada, convertendo o semiciclo negativo em positivo para gerar uma saída unipolar. Durante o semiciclo positivo, apenas dois diodos (de um conjunto em configuração de ponte) conduzem, enquanto no semiciclo negativo, os outros dois diodos conduzem, sempre operando em polarização direta (SEDRA; SMITH; CARUSONE, 2023).

Sendo assim, o retificador transforma CA em CC pulsante, ou seja, a forma de onda resultante não é contínua. A retificação é essencial devido ao nível de tensão na saída do transformador e a escolha do circuito que detecta a passagem por zero, onde é fundamental para o funcionamento correto do mesmo. A Figura 14 exemplifica a ponte retificadora de onda completa utilizada.

Figura 14- Ponte retificadora de onda completa.



Fonte: Autor (2024).

A próxima parte deste projeto se dá pelo desenvolvimento de um detector de passagem por zero para tensão e outro para corrente. Se trata de um dispositivo que converte uma onda senoidal em uma onda quadrada para calcular o atraso de fase entre a tensão e a corrente. Foram utilizados dois detectores distintos conforme a necessidade para identificar o instante de passagem de cada onda por zero, o tempo de atraso entre essas ondas resulta no fator de potência.

3.5 Detectores de passagem por zero

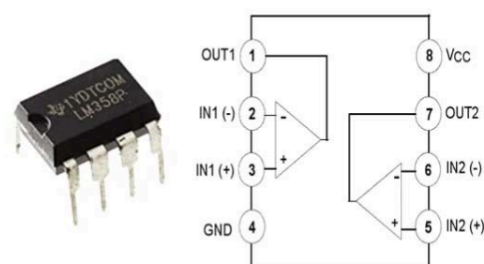
De acordo com Junior (2015), em um comparador não inversor, o sinal da variável a ser monitorada é aplicado à entrada não inversora, enquanto a entrada inversora recebe um sinal de referência. Isso faz com que a saída do comparador sature, alternando entre nível alto e baixo. Essa

alternância de estados pode ser utilizada, dependendo do circuito, para realizar a detecção da passagem por zero.

3.5.1 Detector de passagem por zero da corrente

O CI utilizado foi o LM358 ilustrado na Figura 15, onde é usado como comparador não inversor e funciona como detector de passagem por zero.

Figura 15 - Comparador LM358.



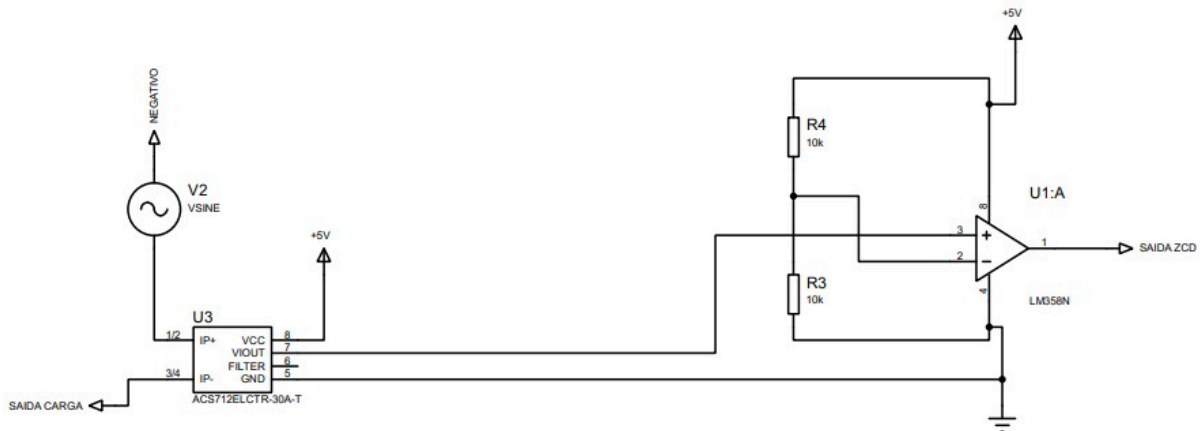
Fonte: Adaptado de electronicclinic.com (2024).

Segundo Júnior e Silva (2015), a saída de um comparador estará em um nível alto quando sua saturação for positiva e em um nível baixo quando a saturação for negativa. A referência utilizada na entrada positiva do CI foi o pino Vout do sensor ACS712, onde quando a corrente estiver em zero o seu valor de offset é de 2,5V. (TEXAS INSTRUMENTS, 2024).

Na entrada negativa foi utilizado um divisor de tensão com dois resistores de 10k Ω e uma alimentação de 5V para o mesmo, resultando em 2,5V na sua saída.

Portanto, a utilização do divisor de tensão cria uma comparação com a saída do sensor de corrente, assim, quando a tensão do sensor passa de 2,5V, a saída do LM358 satura em um nível lógico alto, e quando ela abaixa desse valor satura em nível lógico baixo, formando um detector de passagem por zero. A Figura 16 mostra o circuito descrito acima:

Figura 16 - Detetor de passagem por zero da corrente

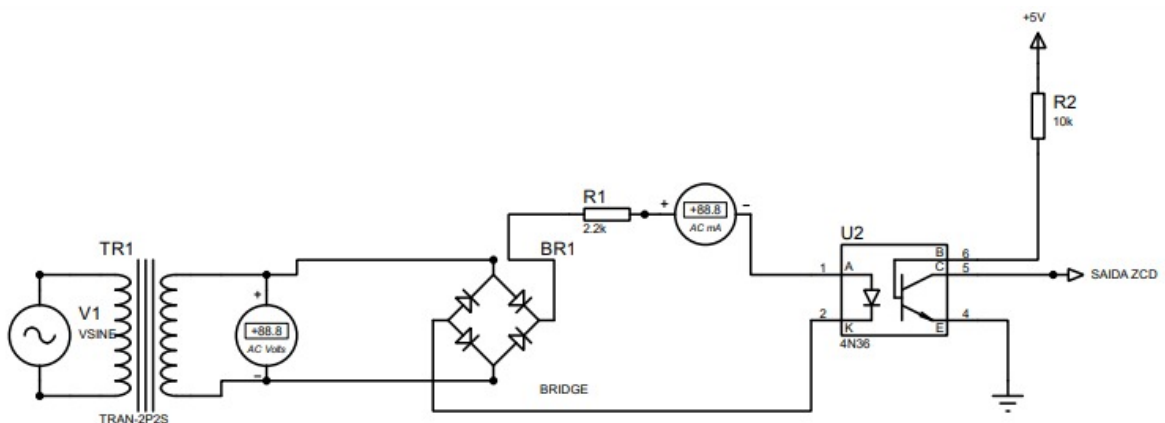


Fonte: Autor (2024).

3.5.2 Detetor de passagem por zero da tensão

Para o detetor da onda de tensão uma abordagem diferente foi utilizada, onde através da necessidade de redução do nível de tensão para algo próximo de 5VDC, foram utilizados um transformador de 220VAC para 12VAC, e uma ponte retificadora de onda completa, transformando a onda em CC pulsante. Para detecção da passagem por zero foi utilizado um optoacoplador modelo 4n36 que permite a isolamento de dois circuitos, portanto há 12V na entrada e uma alimentação de 5V na saída. A Figura 17 mostra o circuito de detecção de passagem por zero da tensão.

Figura 17 - Circuito de detecção de passagem por zero da tensão.



Fonte: Autor (2024).

3.5.2.1 Optoacoplador

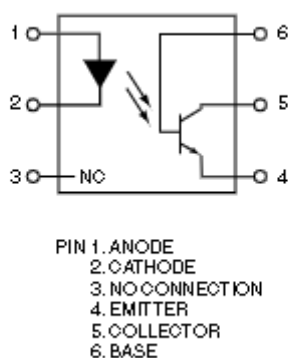
Segundo Duarte (2017) um optoacoplador pode separar dois circuitos com diferentes potenciais, onde utiliza em sua entrada um LED que emite luz para um fotodiodo, ou seja, se houver variações de corrente na entrada isso irá mudar a intensidade do LED e consequentemente o fotodiodo irá perceber essas mudanças.

Com base nisso, foi aplicado o sinal positivo retificado de 12V ao anodo do optoacoplador, juntamente com um resistor de $2.2k\Omega$ que irá limitar a corrente em cerca de 4mA, e o terminal negativo foi conectado ao catodo. Assim, quando a tensão lida pela entrada é suficientemente alta para superar a queda de tensão do led, ele emitirá um sinal de luz, ao contrário, o led estará apagado.

Vale ressaltar que o pino coletor foi alimentado com 5VDC juntamente com um resistor de pull up de $10k\Omega$ para evitar flutuações, já o pino emissor foi conectado ao GND da referência de 5VDC.

Portanto, a saída irá ficar variando entre 5V e 0V, e sabendo que quando a tensão da entrada se aproxima de 0V o LED ficará apagado, podemos detectar a passagem por zero desta maneira. A Figura 18 ilustra o esquema de um optoacoplador.

Figura 18 - Esquemático Optoacoplador 4n36



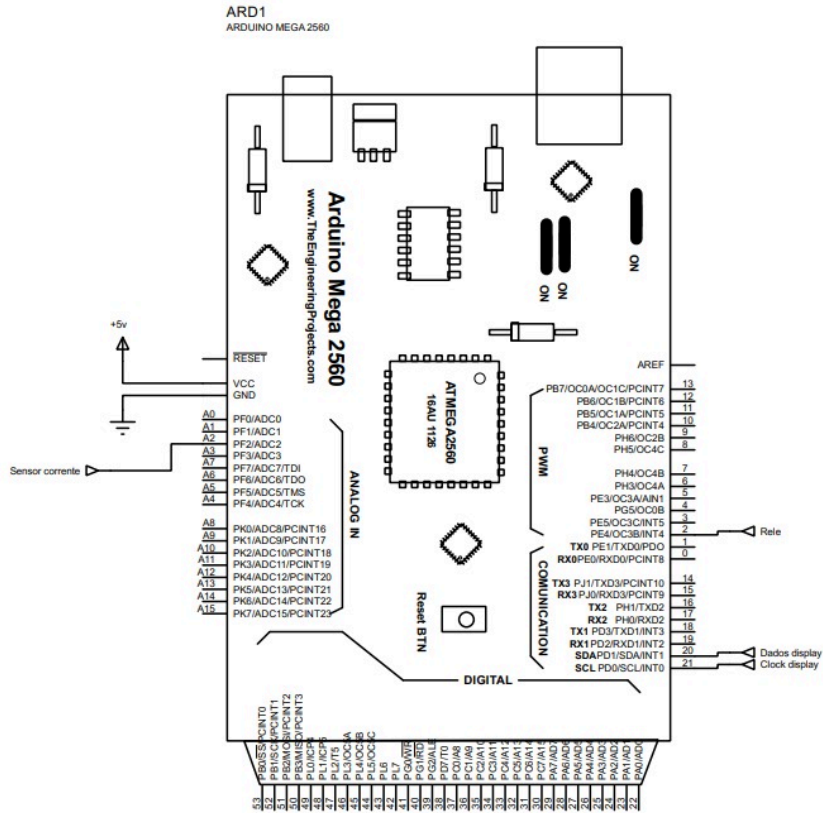
Fonte: Adaptado de alldatasheet.com (2024).

3.6 Circuito principal

Após a conclusão do circuito de medição, o próximo passo se dá pela leitura dos valores e o cálculo do fator de potência. Sendo assim, o Arduino Uno ilustrado na Figura 19, foi utilizado

como microcontrolador e estará conectado ao circuito e ao display, onde irá mostrar as grandezas necessárias através de medições e cálculos das informações recebidas.

Figura 19 - Arduino utilizado como circuito de controle no software Proteus.



Fonte: Autor (2024).

Como podemos ver, o microcontrolador recebe o valor da corrente lida pelo sensor no pino A2, e, com base nos valores de potência do motor e da tensão da rede que são fixos, irá calcular o fator de potência e exibi-lo no display juntamente com o valor lido da corrente.

Além disso, se o fator de potência calculado for abaixo de 0,92 o pino 2 irá acionar o relé, adicionando assim o capacitor de correção à rede. Os pinos SDA e SCL são apenas para o display onde se tratam dos dados transmitidos e de um clock que coordena a comunicação, respectivamente.

3.6.1 Fluxograma de programação

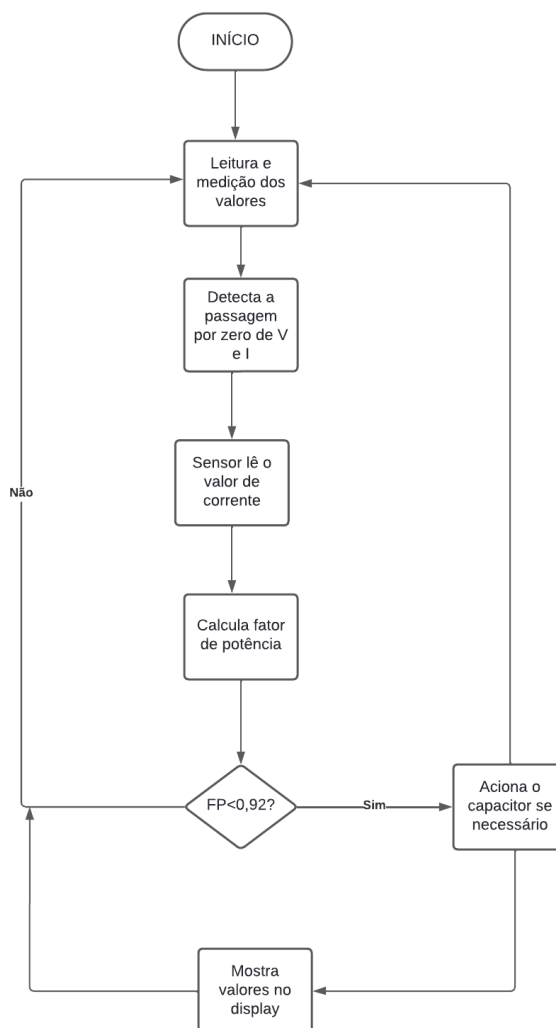
A ideia por trás da programação é simples, quando uma carga indutiva for conectada a rede, as ondas de tensão e corrente irão se alterar, ou seja, terão uma defasagem maior entre elas. Através dos detectores de passagem por zero e do valor de corrente lido pelo sensor podemos

analisar o tempo de atraso entre as ondas e com base no valor de corrente e outras informações calcular o fator de potência.

Caso esse valor seja inferior a 0,92 o capacitor de correção será acionado para corrigir o fator de potência através do microcontrolador, e caso esse valor não seja inferior ao mínimo estipulado, os detectores irão continuar fazendo a leitura, porém o capacitor não será acionado.

Em paralelo a isso, é necessário mostrar os valores de corrente e o fator de potência no display que estará conectado ao Arduino. A programação desenvolvida está no Apêndice A. A Figura 20 representa o fluxograma da lógica de programação.

Figura 20 - Fluxograma de programação.



Fonte: Autor (2024).

3.7 Circuito de acionamento do capacitor de correção

Por fim temos a última etapa do circuito que é a parte de acionamento, onde com base nas medições adquiridas e calculadas, o Arduino irá acionar o capacitor de correção caso for necessário através do relé, ou seja, caso uma carga seja adicionada à rede e o fator de potência calculado for abaixo de 0,92, o capacitor será injetado na rede para obter um fator de potência próximo de 1.

3.7.1 Cargas utilizadas

O objetivo principal desta etapa é o cálculo do banco de capacitores, onde é necessário saber o tipo e algumas especificações das cargas que estão instaladas na rede, portanto, este projeto utilizou um motor de baixa potência com 3/4 cv, ligação em 220V, 60Hz e 6A de corrente nominal, onde ao ser injetado na rede ocasionará no aumento do fator de potência que será corrigido pelo circuito. Na Figura 21, um exemplo de motor monofásico:

Figura 21 - Motor monofásico WEG 3/4cv.



Fonte: WEG (2024).

3.7.2 Cálculo do banco de capacitores

Uma vez definidas as cargas a serem utilizadas, com base nas suas especificações pode-se calcular o valor da capacitância e definir a quantidade de capacitores que serão utilizados. Primeiramente sabemos que o motor tem 3/4cv, após, utilizando as medições de valores na carga obtemos uma tensão de 229V, uma corrente de 4.3A com o mesmo operando a vazio e uma rede de 60Hz. Primeiramente, é transformado o valor de cv para potência ativa (W), onde segundo

Creder (2021) podemos multiplicar o valor em cv do motor por 736 para obtermos a potência ativa. Posteriormente é calculado o fator de potência atual com a inserção do motor na rede, utilizando a equação 8.

$$P = 0,75 * 736 = 551W$$

$$FP = \frac{551}{(229*4,3)} = 0.56$$

Com base nisso, utilizaremos as fórmulas citadas na seção 2.3.1.1 para calcular a capacitância necessária. Inicialmente, utilizando a equação 10 é possível obter a potência aparente.

$$S = 229 * 4,3 = 984,7 VA \text{ ou } 0,9847 kVA$$

Próximo passo é calcular a potência reativa através da equação 11:

$$Q(kVAr) = \sqrt{(0,9847^2) - (0,551^2)} = 0,816kVAr$$

Agora podemos calcular a capacitância do capacitor de correção, utilizando um fator de potência desejado de 0,98. Para isso utiliza-se as equações 12, 13 e 14 respectivamente:

$$Scorrigido(kVA) = \frac{0,551}{0,98} = 0,562kVA$$

$$Qcorrigido(kVAr) = \sqrt{(0,562^2) - (0,551^2)} = 0,11kVAr$$

$$Qc(kVAr) = (0,816 - 0,11) = 0,706kVAr$$

Por fim, com esse valor podemos calcular a capacitância necessária, utilizando a equação 15:

$$C = \frac{706}{2*\pi*60*(229^2)} = 35\mu F$$

Portanto, o valor necessário de capacitância para os valores obtidos é de 35 μ F, onde conectado a rede, e prevendo variações nos valores lidos, irá corrigir o fator de potência para cerca de 0,98.

O tipo de capacitor escolhido, foi um kit capacitivo ETZ 0055 da marca Anzo, onde o mesmo dispõe de 3 capacitores de 10 μ F e 3 capacitores de 5 μ F totalizando 45 μ F. Esse kit foi escolhido devido a facilidade de ligar e desligar capacitores a rede, também por ser possível aumentar a capacitância em pequenos valores, além dos capacitores serem adequados para tensão alternada e suportarem 400V. A Figura 22 mostra o kit utilizado.

Figura 22 - Kit capacitivo ETZ0055 Anzo.



Fonte: Autor (2024).

Como podemos ver na Figura 22, foram ligados juntamente com o relé de acionamento e a rede, todos os bornes dos capacitores, portanto, poderia ser adicionado a capacitância total do kit, porém, foi necessário apenas 35 μ F.

3.7.3 Relés para acionamento do capacitor de correção

Para a inserção e desligamento do capacitor de correção foi utilizado um relé eletromecânico controlado pelo Arduino. A ligação do relé juntamente ao capacitor, se dá pela fase da rede ligada direto a um dos cabos do capacitor, enquanto o neutro da rede é conectado ao terminal comum (COM) do relé, já o terminal normalmente aberto (NO) é ligado ao outro cabo do capacitor. O relé é alimentado pela fonte com 5V, e o outro terminal (IN) tem a função de acionar esse relé, e é conectado ao pino 2 do Arduino, ou seja, quando for necessário a inserção do capacitor, será pelo cabo de sinal que o microcontrolador irá enviar o comando, fazendo com que o contato entre o comum e o normalmente aberto feche, conectando assim os dois terminais do capacitor à rede. Da mesma forma, quando o relé for desativado pelo circuito de controle, seu contato fecha com o normalmente fechado (NF), desconectando o capacitor da rede. A Figura 23 ilustra um modelo comercial do relé utilizado.

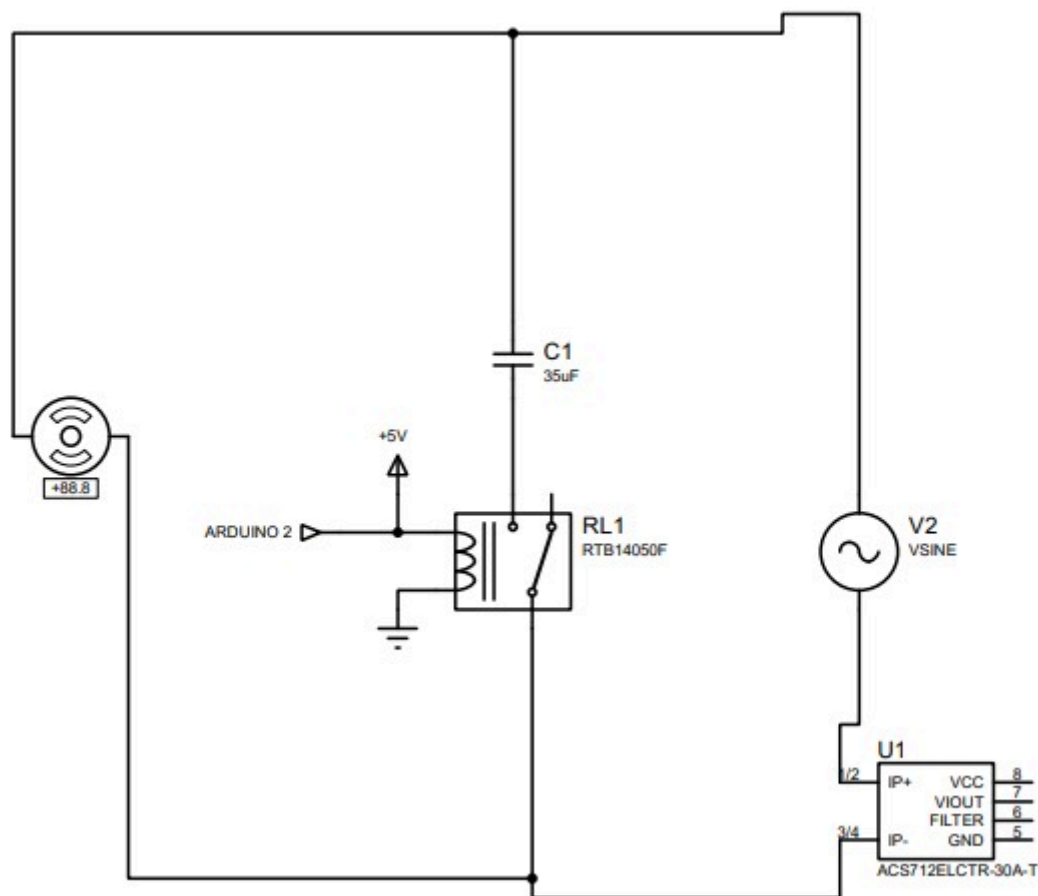
Figura 23 - Módulo Relé SRD-05VDC-SL-C.



Fonte: naylampmechatronics.com (2024).

Na Figura 24 podemos observar as ligações do circuito de acionamento, mostradas pelo desenvolvimento do mesmo no software Proteus.

Figura 24 - Circuito de acionamento.



Fonte: Autor (2024).

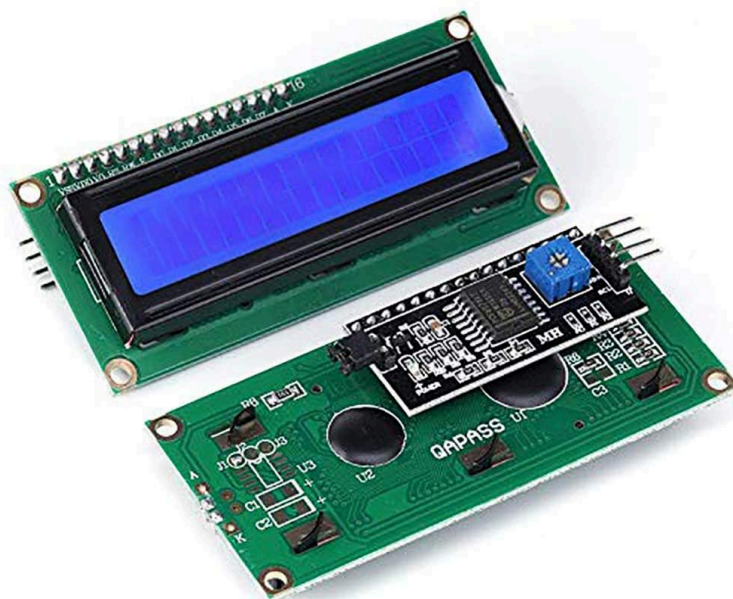
3.8 Display LCD

Os displays LCD são formados por duas lâminas transparentes que contêm células preenchidas com um líquido cristalino polarizador da luz. Esse cristal líquido é controlado através de dois eletrodos que fornecem uma tensão elétrica, alterando a orientação das moléculas do líquido e permitindo a passagem de luz para gerar a imagem.

Existem diversos tipos de LCDs no mercado, alguns considerados "inteligentes" porque possuem microcontroladores integrados. Esses microcontroladores facilitam tanto o interfaceamento de hardware com outros sistemas microcontrolados quanto a programação de software necessária para controlá-los. As dimensões dos LCDs variam amplamente, desde tamanhos muito pequenos até grandes dimensões para televisores de grande porte. (GIMENEZ, 2010).

Para que seja possível a visualização de alguns valores importantes no contexto do trabalho, foi utilizado um display 16x02, onde a escolha baseou-se na quantidade de linhas para que fosse possível mostrar os valores de corrente medida, além do fator de potência calculado.

Figura 25 - Display LCD 16x02 I2C.



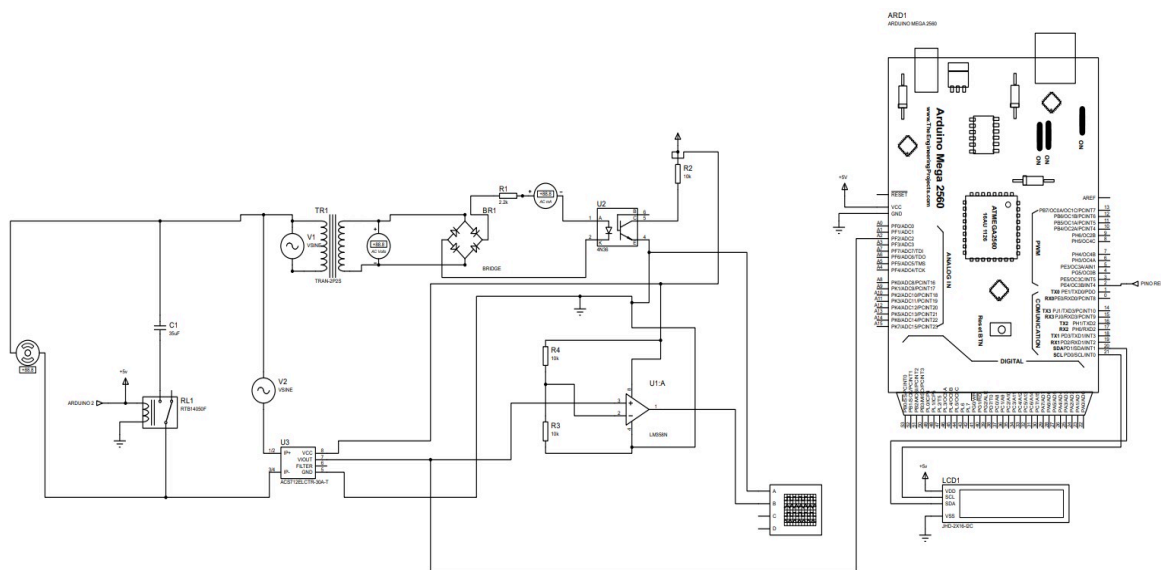
Fonte: naradaelectronics.rw (2024).

O mesmo está interligado ao Arduino, onde dentro da programação foram definidas as variáveis a serem amostradas, no caso, os valores obtidos e calculados no Arduino para quando o motor e o capacitor estiverem desligados ou ligados.

3.9 Diagrama geral do circuito

A Figura 26 mostra o esquema completo do circuito desenvolvido no software Proteus. No Apêndice B é possível observar o circuito de forma mais clara.

Figura 26 - Esquema completo realizado no software Proteus.



Fonte: Autor (2024).

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os testes realizados e os resultados obtidos. As ideias apresentadas durante o capítulo 3 serão avaliadas através dos resultados obtidos pelo osciloscópio e pelo sensor de corrente. Além disso foi realizada uma comparação entre a simulação e os resultados práticos.

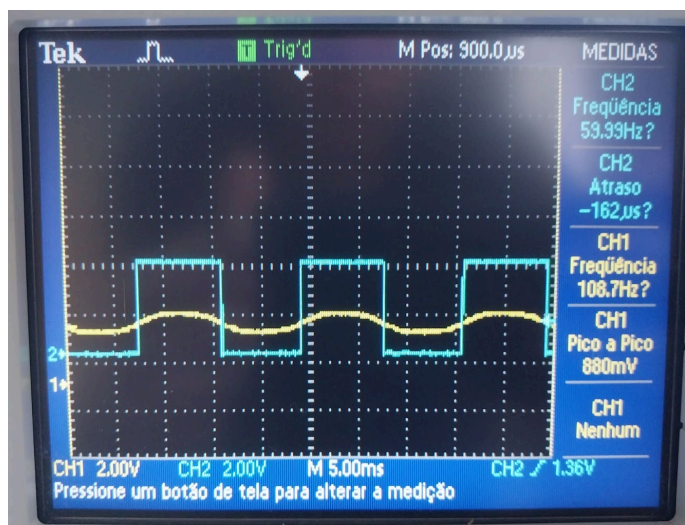
4.1 Medições de corrente

Sabendo que o sensor utilizado tem uma sensibilidade de 66mV/A, temos que analisar o valor de pico do mesmo para após sabermos o valor RMS da corrente. Portanto o resultado obtido no osciloscópio foi de 880mV de pico a pico, portanto, o valor de pico é de 440mV. Para obter o valor de IRMS, dividimos o valor obtido por raiz de 2, assim podemos obter o valor aproximado de corrente lido pelo sensor através de:

$$IRMS = \left(\frac{440}{66}\right) \div \sqrt{2} = 4,7A \quad (16)$$

Então, o valor de corrente obtido através do sensor foi de 4,7A, e juntamente a ele foi observado o detector de passagem por zero da corrente, onde o resultado obtido foi a detecção no ponto exato em que a onda cruza por zero. A Figura 27 mostra o valor de pico a pico da corrente juntamente com seu detector de passagem por zero.

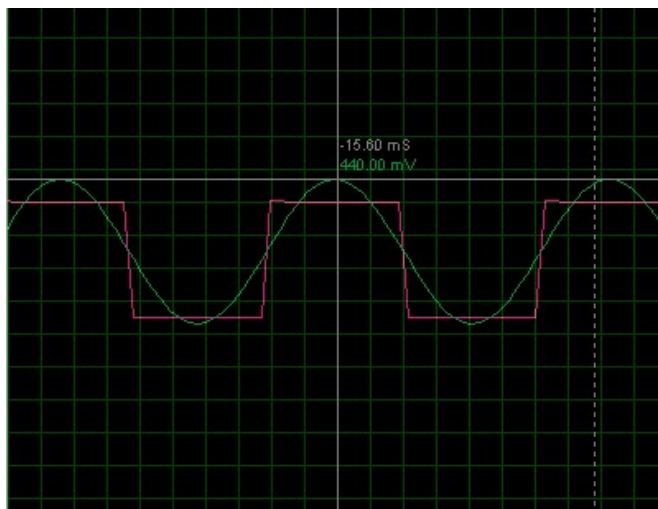
Figura 27 - Onda da corrente obtida juntamente com o detector de passagem por zero.



Fonte: Autor (2024).

Comparando os valores de pico e também o detector de passagem por zero com a simulação podemos observar que o resultado está coerente, como mostra a Figura 28:

Figura 28 - Valor de corrente lido pelo sensor.



Fonte: Autor (2024).

Comparando o valor obtido pelo sensor ACS712 com um aparelho de medição na configuração de amperímetro da marca Fluke, podemos ver uma discrepância no valor de corrente obtido. O valor registrado variou de 4.3A a 4.4A como mostra a Figura 29, ocasionando uma diferença de cerca de 0.3A.

Figura 29 - Corrente medida por um amperímetro.

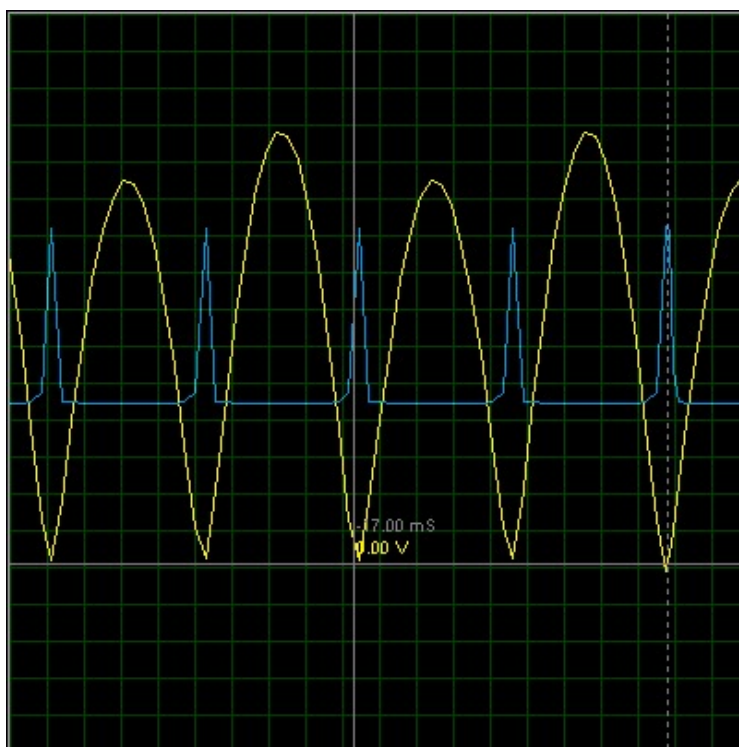


Fonte: Autor (2024).

4.2 Medições de tensão

Primeiramente temos o gráfico da tensão retificada após a ponte retificadora, onde a cada vez que essa onda se aproximar de zero o detector irá apontar o resultado no osciloscópio. Portanto a Figura 30 mostra a onda de tensão CC pulsante, juntamente com o seu detector de passagem por zero, simulados no software Proteus.

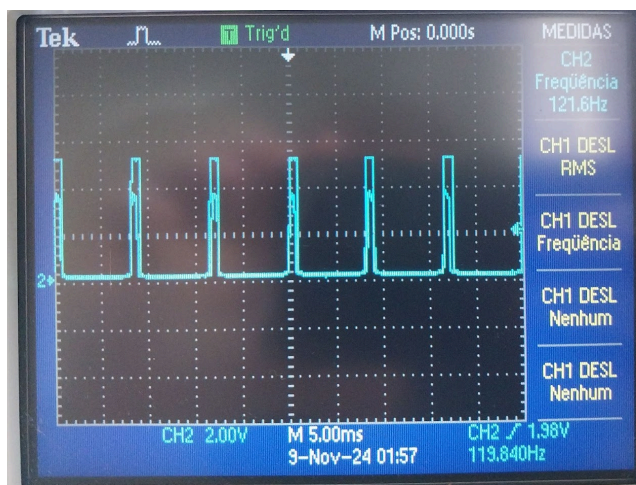
Figura 30 - Gráfico de tensão antes da ponte retificadora.



Fonte: Autor (2024).

Na prática, não foi possível obter o resultado da onda de tensão CC pulsante devido ao GND do osciloscópio estar em 5V conectado ao detector de zero, portanto, seria necessário outro tipo de circuito ou então outro tipo de ponteiros para o osciloscópio. Foi possível obter o resultado apenas do detector de passagem por zero, o qual condiz com a simulação mostrando que o mesmo está de acordo. A Figura 31 mostra o resultado do detector obtido na prática.

Figura 31 - Gráfico de tensão após a ponte retificadora.



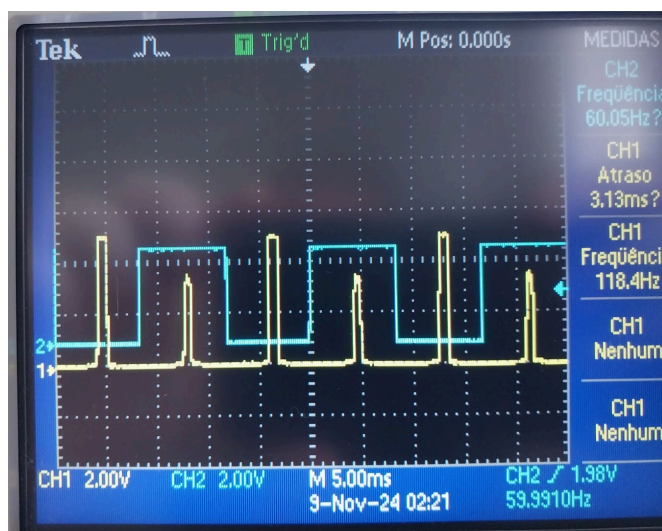
Fonte: Autor (2024).

Como podemos ver ele condiz com a simulação, porém tem diferentes amplitudes devido a variações na onda CC pulsante, assim como vimos oscilações na própria Figura 30. Porém em alguns momentos foi possível observar um detector perfeito sem oscilações, dependendo das variações que haviam na rede.

4.3 Comparação dos detectores de passagem por zero

Sabendo as características do motor, notou-se o atraso entre as ondas de tensão e corrente quando o motor era acionado. O fator de potência ficou abaixo de 0,92, estando em cerca de 0.6 quando a carga foi acionada. A Figura 32 mostra esse atraso detectado pelo circuito.

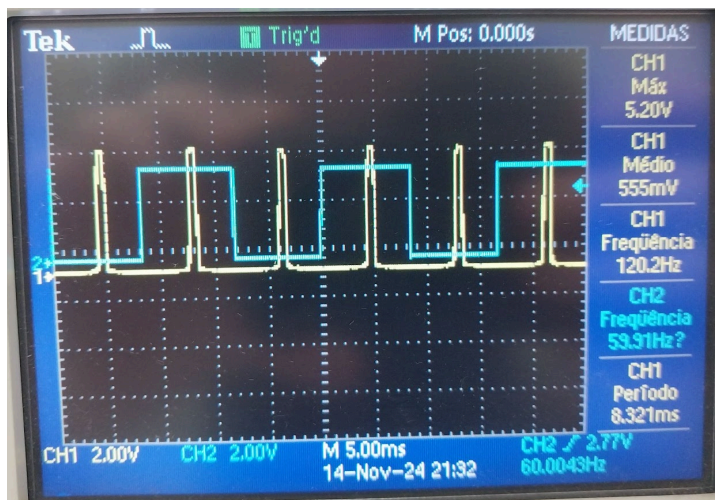
Figura 32 - Comparação dos detectores de passagem por zero.



Fonte: Autor (2024).

Como podemos ver no detector há uma variação de amplitude no referencial da tensão, porém isso não interfere na leitura de atraso e em nenhum valor. A Figura 33 mostra esse mesmo atraso, porém sem variações.

Figura 33 - Comparação do atraso dos detectores com o motor acionado.



Fonte: Autor (2024).

Nesse momento, o display mostra o valor de corrente e fator de potência atuais, ou seja, momentos antes do capacitor de correção ser acionado, como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Valores de corrente e FP sem o capacitor de correção.



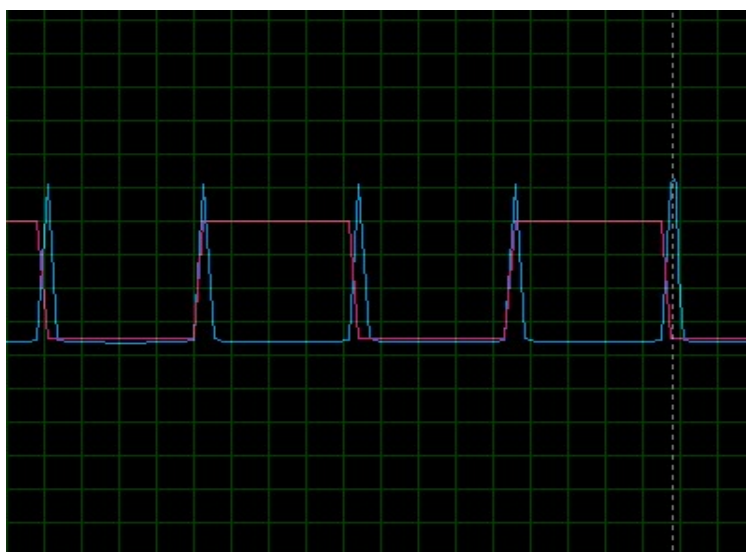
Fonte: Autor (2024).

Portanto, os valores condizem com os calculados, embora haja uma variação no valor de corrente entre 4A e 4,5A, os valores estão de acordo com o esperado. Já o fator de potência

também havia variação pois tem ligação direta com o valor de corrente lido, portanto havia uma variação entre 0.56 até 0.63.

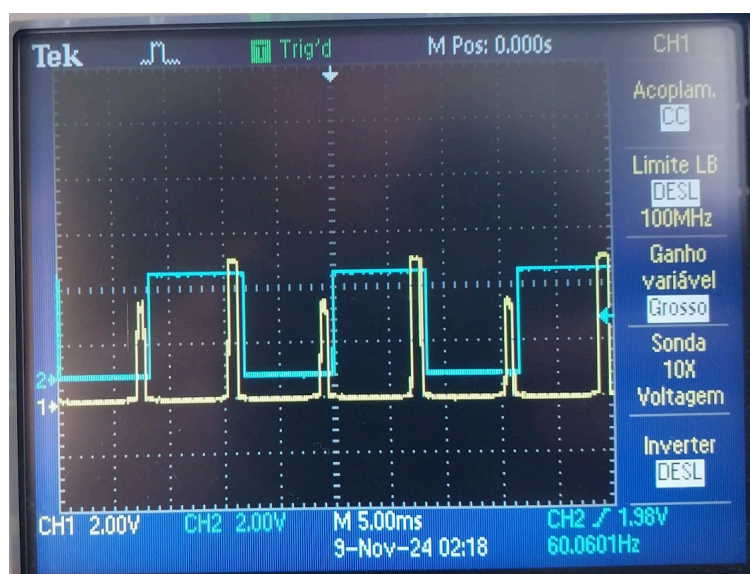
Com o valor calculado bem abaixo de 0,92, havia necessidade do acionamento do capacitor de correção, onde após cerca de 10 segundos em que o fator de potência ficasse abaixo do permitido, o relé iria acioná-lo para a correção. As Figura 35 e 36, respectivamente, mostram a comparação dos detectores de zero simulados e na prática após o acionamento do capacitor.

Figura 35 - Simulação dos detectores após acionamento do capacitor.



Fonte: Autor(2024).

Figura 36 - Comparação no osciloscópio após acionamento do capacitor.



Fonte: Autor (2024).

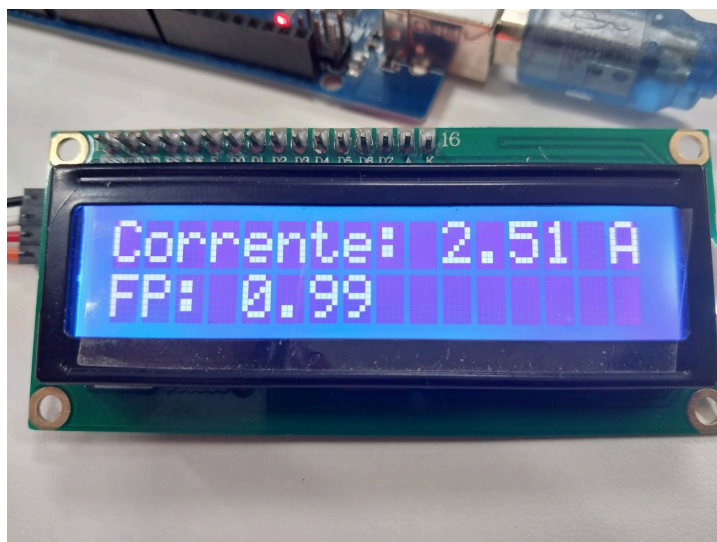
Como pode-se observar, houve uma pequena defasagem entre a simulação e prática, porém isso se deve às variações, e até transitórios da rede, o que não era o foco e nem era considerado para a realização do trabalho.

Já na questão de atraso entre as ondas, o valor ficou em cerca de 555 μ S, o que comparado aos valores sem o capacitor, mostra que a correção do fator de potência foi realizada com sucesso.

Podemos notar a correção também nos valores mostrados no display, pois como o capacitor foi adicionado a rede compensando a corrente reativa gerada pela carga, a corrente medida no motor deve diminuir também. Como calculado na seção 3.7.2 a utilização de um capacitor de 35 μ F faria com que o fator de potência ficasse bem próximo de 1, onde devido a variações nos valores lidos foi a alternativa necessária para que esse valor não ficasse abaixo de 0,92 em nenhum momento.

A Figura 37 mostra os valores obtidos no display após o acionamento do capacitor de correção.

Figura 37 - Valores do display após o acionamento do capacitor.

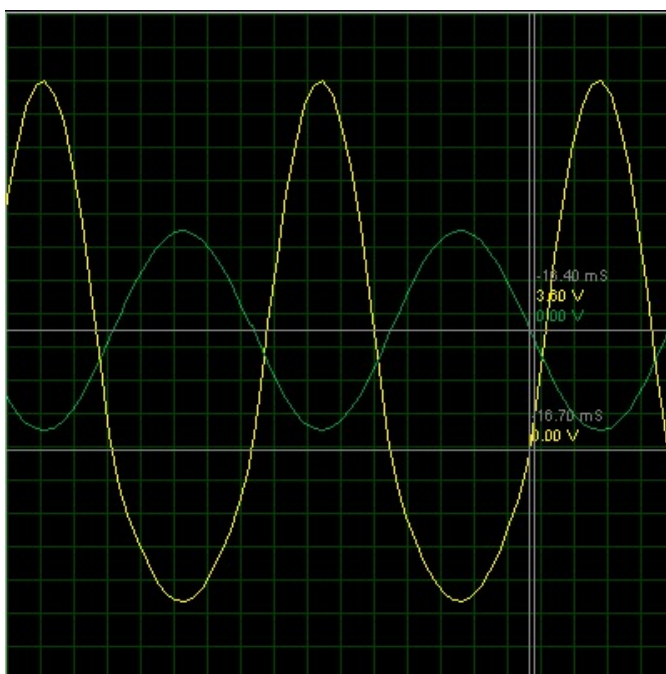


Fonte: Autor (2024).

O valor de corrente calculado após a adição do capacitor a rede era de aproximadamente 2,5A, já no display esse valor ficou variando de 2,3A a 2,6A, porém nada que fizesse o fator de potência ficar abaixo de 0,92.

Por fim, através das simulações podemos observar o resultado nas ondas da tensão e da corrente, onde as mesmas ficaram praticamente em fase, garantindo a correção do fator de potência. A Figura 38 ilustra isso:

Figura 38 - Ondas da tensão e corrente em fase.



Fonte: Autor (2024).

Essa imagem mostra que o tempo de atraso entre as ondas ficou em cerca de 0.3mS ou 300uS, comprovando a correção do fator de potência elevando o valor para próximo de 1.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo investigar e implementar um sistema de correção do fator de potência utilizando um microcontrolador. Através de simulações, foi possível confirmar a eficácia e a funcionalidade do circuito em geral visando melhorar a eficiência energética em sistemas elétricos.

As simulações atenderam todo o proposto, assim como o protótipo desenvolvido, onde os dois detectores de passagem por zero se mostraram funcionais, o sensor de corrente utilizado mediu a corrente em um valor aceitável comparado a um amperímetro e a correção do fator de potência foi alcançada.

Alguns problemas impediram a leitura do valor de tensão devido ao sinal de referência utilizado no optoacoplador ser de 12V após a retificação, e não 5V. Também não foi possível obter a leitura da onda de tensão, devido a diferença de tensão, o que impossibilitou a leitura pelo osciloscópio.

A programação em si se mostrou funcional, onde a mesma calculou o fator de potência de acordo com a corrente lida no sensor e quando esse valor permaneceu abaixo de 0,92 por um tempo, acionou o capacitor de correção. Talvez fosse necessário uma melhoria na desconexão do capacitor da rede utilizando um resistor de descarregamento, porém, nesse caso nenhum tipo de problema ocorreu.

Os resultados se mostraram coerentes com a simulação, embora houve algumas diferenças, nenhum resultado teve uma discrepância considerável. As pequenas divergências que ocorreram podem ter vários significados, como por exemplo, variações na rede, harmônicas, baixa potência do motor ou até baixo rendimento do mesmo. Embora isso, tanto os valores quanto os detectores se mostraram eficientes, onde os resultados obtidos no osciloscópio mostram o sucesso na correção do fator de potência, e os valores obtidos após a conexão do capacitor também.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos com aplicações**. Porto Alegre: Grupo A, 2013.

ALLDATASHEET. **Fairchild Semiconductor 4N36**. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/html-pdf/50077/FAIRCHILD/4N36/403/1/4N36.html>>. Acesso em: 12 out. 2024.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. **Sensor ACS712**. Disponível em: <<https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2024.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 1000, de 7 de dezembro de 2021**. Brasília: ANEEL, 2021.

ARDUINO. **Datasheet Arduino Mega 2560Rev3**. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2024.

AUGUSTO, Thiago Rider. **Controlador para Correção do Fator de Potência com Microcontrolador**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação). Brasília, 2010.

BRAGA, Newton C. **Fator de Potência: A Necessidade da Correção**. ART111 São Paulo, 2009. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/projetos/819-fator-de-potencia-a-necessidade-da-correcao-art111.html>>. Acesso em: 18 set. 2024.

COFERMETA. **Fonte De Alimentação Digital 32V/5A Dupla MPL-3305M - MINIPA**. Disponível em: <<https://www.cofermeta.com.br/acessorios/fonte-digital-32v-5a-dupla-mpl-3305m>>. Acesso em: 10 out. 2024.

COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de orientação aos consumidores: Energia Reativa Excedente**. Rio de Janeiro. 2004.

COSTA, Lucas A.; SEIXAS, Jordana L.; FREITAS, Pedro H C.; et al. **Análise de circuitos elétricos**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. São Paulo: Grupo GEN, 2021.

CRUZ, Eduardo César A. **Circuitos Elétricos: Análise em Corrente Contínua e Alternada**. Belo Horizonte: SRV Editora LTDA, 2014.

CRUZ, Eduardo César A.; ANICETO, Larry A. **Instalações Elétricas Fundamentos, Prática e Projetos em Instalações Residenciais e Comerciais**. Belo Horizonte: SRV Editora LTDA, 2019.

DECKMANN, Sigmar M. **Qualidade da energia elétrica**. São Paulo: Editora Blucher, 2024.

DUARTE, Marcelo de A. **Eletrônica Analógica Básica**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

ELECTRONIC CLINIC. **LM358 IC Pin Configuration**. Disponível em <https://www.electronicclinic.com/lm358-ic-pin-configuration-working-lm358-circuit-examples/>>. Acesso em: 15 out. 2024.

FILHO, Guilherme Eugênio Filippo F.; DIAS, Rubens A. **Comandos Elétricos: Componentes Discretos, Elementos de Manobra e Aplicações**. Rio de Janeiro: Érica, 2014.

FRANCHI, Claiton M. **Acionamentos Elétricos**. Belo Horizonte: SRV Editora LTDA, 2014.

GIMENEZ, Salvador P. **Microcontroladores 8051: Teoria e Prática**. Belo Horizonte: SRV Editora LTDA, 2010.

JÚNIOR., Antonio P. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

JÚNIOR, Sérgio Luiz S.; SILVA, Rodrigo A. **Automação e Instrumentação Industrial com Arduino: Teoria e Projetos**. Belo Horizonte: SRV Editora LTDA, 2015.

MARKUS, Otávio. **Circuitos Elétricos: Corrente Contínua e Corrente Alternada**. Belo Horizonte: SRV Editora LTDA, 2009.

MOHAN, Ned. **Sistemas Elétricos de Potência: Curso Introductório**. São Paulo: Grupo GEN, 2016.

NARADA ELECTRONICS. **(16×2) LCD Display with I2C**. Disponível em: <https://naradaelectronics.rw/product/16x2-lcd-display-with-i2c/>>. Acesso em: 15 out. 2024.

NAYLAMP MECHATRONICS. **Relay 5VDC SRD-05VDC-SL-C**. Disponível em: <https://naylampmechatronics.com/drivers/263-relay-5vdc-srd-05vdc-sl-c.html>>. Acesso em: 12 out. 2024.

PETRUZELLA, Frank D. **Motores elétricos e acionamentos**. Porto Alegre :Grupo A, 2013.

PINTO, Milton de O. **Energia Elétrica: Geração, Transmissão e Sistemas Interligados**. São Paulo: Grupo GEN, 2013.

RODRIGUES, Rodrigo; SOUZA, Diogo B. C.. **Eletrotécnica**. Porto Alegre: Grupo A, 2017.

SANTOS, Ygor Brandão dos. **Correção de Fator de Potência com Microcontrolador e TRIAC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Vitória, 2022.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C.; CARUSONE, Tony Chan. **Circuitos Microeletrônicos**. São Paulo: Grupo GEN, 2023.

SEIXAS, Jordana L.; PINTO, Alfred G M.; MATSUBARA, Lilian P.; et al. **Circuitos elétricos**. Porto Alegre: Grupo A, 2018.

SILVA, Talles. **Qualidade de energia Correção de fator de potência e harmônicas em instalações elétricas**. São Paulo, 2021. Disponível em: https://library.e.abb.com/public/3d3c203bebb641bf9118e25555eed056/Artigo_Talles.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2024.

TEXAS INSTRUMENTS. **Industry-Standard Dual Operational Amplifiers**. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2024.

WEG. **Correção do Fator de Potência**: Manual em Português. Jaraguá do Sul, 2018. Disponível em: <http://eletrica.ufpr.br/sebastiao/wa_files/Aula%202021%20-%20Manual%20correcao-do-fator-de-potencia%20WEG.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2024.

WEG. **Motor WPump Capacitor Permanente 0.75cv 2P 220 V 60 Hz**. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Monof%C3%A1sico/Bombas/WPump/WPump-com-Flange-Incorporada/WPump-Capacitor-Permanente-0-75-cv-2P-42Y-1F-220-V-60-Hz-IC01---ODP---Com-p%C3%A9s/p/14956456>>. Acesso em: 17 out. 2024.

WEG. **Unidade Capacitiva UCW0,83V25 J4**. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Capacitores-e-Corre%C3%A7%C3%A3o-do-Fator-de-Pot%C3%Aancia/Capacitores-para-Corre%C3%A7%C3%A3o-do-Fator-de-Pot%C3%Aancia/Unidade-capacitiva-monof%C3%A1sica/UNIDADE-CAPACITIVA-UCW0%2C83V25-J4/p/11488457>>. Acesso em: 10 out. 2024.

APÊNDICE A - Programação

```

#include "ACS712.h"
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

ACS712 sensor(ACS712_30A, A2);

const int rele = 2;
float tensao = 229.0;           // Tensão medida de 229VAC da rede.
float potencia = 551.0;        // Potência do motor em W.
float offset = 33.0;           // Offset de erro ocasionado pelo sensor.

void setup() {
  pinMode(rele, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  sensor.calibrate();
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Correção");
  lcd.print(0, 1);
  lcd.print("do FP");
}

void loop() {
  float I = (sensor.getCurrentAC() - offset);
  if (I < 0.17)
  {
    I = 0;
  }

  float FP = (potencia/(tensao*I));

```

```
if (FP > 1) FP = 0;

if (I > 2)
{

digitalWrite(rele, HIGH);
}

else
{

digitalWrite(rele, LOW);

}

lcd.clear();

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Corrente: ");
lcd.print(I, 2); // Mostra corrente com 2 casas decimais
lcd.print(" A");

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("FP: ");
lcd.print(FP, 2);

delay(500);
}
```

APÊNDICE B - Circuito Completo

