

CENTRO PAULA SOUZA
FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Mecatrônica Industrial

Fernando Rodrigues
Leonardo Gouveia Gabriel

CORREÇÃO AUTOMÁTICA DO FATOR DE POTÊNCIA

Santo André – SP
2024

Fernando Rodrigues
Leonardo Gouveia Gabriel

CORREÇÃO AUTOMÁTICA DO FOTOR DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Tecnologia em Mecatrônica Industrial da FATEC Santo André, orientado pelo Prof. Me. Luiz Vasco Puglia, como requisito parcial para obtenção do título de tecnólogo em mecatrônica industrial.

Santo André – SP
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

R896c

Rodrigues, Fernando

Corretor automático de fator de potência / Fernando Rodrigues,
Leonardo Gouveia Gabriel. - Santo André, 2023. – 85f. il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, 2023.

Orientador: Prof. Luiz Vasco Puglia

1. Mecatrônica. 2. Fornecimento de energia. 3. Correção automática do fator de potência. 4. Energia elétrica. 5. Tecnologia. 6. Microcontrolador. 7. Arduino. 8. Capacitores. 9. Qualidade. 10. Cargas indutivas. I. Gabriel, Leonardo Gouveia. II. Corretor automático de fator de potência.

621.31924

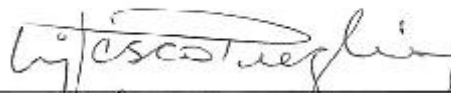
LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 16 de dezembro de 2024.

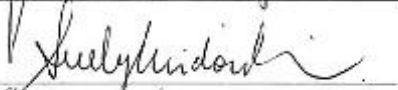
LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:
“CORRETOR AUTOMÁTICO PARA FATOR DE POTÊNCIA” DOS
ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

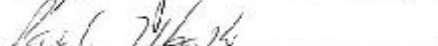
PRESIDENTE:
PROF. LUIZ VASCO PUGLIA



MEMBROS:
PROF. SUELY MIDORI AOKI



PROF. PAULO TETSUO HOASHI

**ALUNOS:**

FERNANDO RODRIGUES



LEONARDO GOUVEIA GABRIEL



DEDICATÓRIA

Dedicamos o nosso trabalho a nossos familiares e todos aqueles que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento dele.

AGRADECIMENTO

Ao Professor Luiz Vasco Puglia e Paulo Tetsuo Hoashi pela sua magnífica orientação durante o projeto e o curso, aos meus familiares que compreenderam e ajudaram a concluir, aos professores deste curso, pelo inestimável apoio, dedicação e por acreditarem no nosso potencial, e a todos meus companheiros que presenciarão esta trajetória

“Se o dinheiro for sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência”.

Henry Ford

RESUMO

A energia elétrica comercial, data do início do século XX, quando as primeiras gerações se tornaram produtivas. Inicialmente apenas iluminação era atendida pela eletricidade. Ao longo do tempo a aplicação se cresceu e passou a mover transportes públicos, indústria, comércio e uso doméstico. Esse crescimento, obriga a otimizações de produção e controle de qualidade no fornecimento, para satisfazer a necessidade dos consumidores. A qualidade da energia fornecida, passa então a ser controlada. Fatores como distorções harmônicas, ruídos de chaveamento, oscilações da tensão, defasagem entre tensão e corrente entre outros passa a ser controlados para garantir o bom funcionamento das cargas. As concessionárias passam, então para garantir o fornecimento, a sobretaxar consumidores que não atendam condições que evitem a perda de qualidade da energia. Dentre diversos itens controlados, o cosseno ϕ , que mede a defasagem entre tensão e corrente, pode também ser aferido pela relação entre as potências ativa, reativa e aparente, tendo grande importância. Quando desrespeitado um limite contratado, a multa gerada tem valor elevado, que pode ser evitada. O monitoramento das defasagens entre tensão e corrente da rede elétrica de entrada de uma industrial e a ligação de banco de carga corretiva, impede que essa defasagem atinja valores fora do contratado, consequentemente evitando a multa de ultrapassagem. Nesse estudo de caso propõe-se a construção de um equipamento de correção de cosseno ϕ microcontrolado automaticamente, garantindo a obediência aos valores contratados e evitando a multa. Por fim nesse sentido, entende-se que o presente projeto contribui para futuras novas atualizações como já foram feitas.

Palavras-chave: Correção automática do fator de potência. Microcontrolador Arduino. Capacitores. Cargas indutivas.

ABSTRACT

Commercial electrical energy dates back to the beginning of the 20th century, when the first generations became productive. Initially only lighting was supplied by electricity. Over time, the application grew and began to operate in public transport, industry, commerce and domestic use. This growth requires production optimization and quality control in supply to satisfy consumer needs. The quality of the energy supplied is then controlled. Factors such as harmonic distortions, switching noises, voltage fluctuations, the difference between voltage and current, among others, are now controlled to ensure the proper functioning of the loads. To guarantee supply, concessionaires then start surcharging consumers who do not meet conditions that prevent loss of energy quality. Among several controlled items, the cosine ϕ , which measures the difference between voltage and current, is of great importance. When a contracted limit is violated, the fine generated is high, which can be avoided. Monitoring the lags between voltage and current in the input electrical network of an industrial plant and connecting a corrective load bank prevents this lag from reaching values outside the contracted range, consequently preventing the mule from overtaking. In this case study, we propose the construction of cosine correction equipment ϕ automatically microcontrolled, ensuring compliance with contracted values and avoiding fines. Finally, in this sense, it is understood that this project contributes to future new updates as have already been done.

Keywords: Automatic power factor corrector. Arduino microcontroller. Capacitors. Inductive loads.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Triângulo das potências	12
Figura 2 - Arquitetura do projeto.....	17
Figura 3 - Protótipo Inicial.....	18
Figura 4 - Sinal analógico.....	20
Figura 5 - Sinal digital.....	21
Figura 6 - Fonte de alimentação simétrica convencional	22
Figura 7 - Fonte simétrica com regulagem por diodo zener	22
Figura 8 - Diagrama de blocos de circuito retificadores	23
Figura 9 - Retificação de meia onda.....	24
Figura 10 - Retificação de onda completa	24
Figura 11 - Circuito da fonte simétrica em placa	25
Figura 12 - Circuito da fonte simétrica na protoboard	28
Figura 13 - Preparo da placa de fenolite	30
Figura 14 - Layout da fonte simétrica	30
Figura 15 - Transferência do layout para placa	32
Figura 16 - Corrosão da PCI	33
Figura 17 - PCI após furação	34
Figura 18 - PCI após soldagem.....	34
Figura 19 - Fonte simétrica finalizada	35
Figura 20 - Eliminação de ruído.....	35
Figura 21 - Realimentação positiva do LM741	36
Figura 22 - Circuito comparador Schmitt Trigger	37
Figura 23 - Curva de histerese	38
Figura 24 - Diagrama de pinagem do LM741	39

Figura 25 - Circuito dos amplificadores na protoboard	40
Figura 26 - Conversão de sinais.....	41
Figura 27 - Layout do Schmitt Trigger	42
Figura 28 - PCI do Schmitt Trigger	42
Figura 29 - Esquemático da Adaptação do Nível de Tensão	43
Figura 30 - Placa de Fenolite Cobreada.....	44
Figura 31 - Estrutura do Arduino UNO	45
Figura 32 - Esquema elétrico da automação.....	46
Figura 33 - Fluxograma da programação	47
Figura 34 - Limites de comportamento.....	49
Figura 35 - Módulo de relé	54
Figura 36 - Descrição do Módulo	54
Figura 37 - Ligação do banco de capacitores.....	55
Figura 38 - Projeto inicial completo	57
Figura 39 - Defasagem no sistema	58
Figura 40 - Testes finais	58
Figura 41 - Presença de ruído.....	59
Figura 42 - Mudança nos indutores.....	60
Figura 43 - Esquemático do filtro auxiliar	60
Figura 44 - Circuitos atualizados	61
Figura 45 - Aspecto final do Schmitt Trigger	61
Figura 46 - Projeto final completo.....	62

LISTA DE QUADROS

Tabela 1 - Tabela resumo dos componentes e equipamentos.....	19
Tabela 2 - Tabela de Acionamentos.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Art.	Artigo
Cos.	Cosseno
CV	Cavalo à Vapor
FP.	Fator de Potência
Nº	Número
Sen.	Seno
VA	Volt – Ampère
VAR	Volt - Ampère Reativo
W	Watts
PCI	Placa de Circuito Impresso
VCC	Voltagem Corrente Contínua
GND	Ground
IN	Input
NO	Normal Open
NC	Normal Close
COM	Comum

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potência Ativa
=	Sinal de Igualdade
$\sqrt{}$	Sinal de Raiz Quadrada
S	Potência Aparente
–	Sinal de Subtração
Q	Potência Reativa
$\times$	Sinal de Multiplicação
φ	Defasagem
$\div$	Sinal de Divisão
+	Sinal de Soma
<	Sinal de Menor
$\geq$	Sinal de Maior ou Igual
$\cong$	Sinal de Aproximadamente
Q_0	Potência em vazio do transformador
S_0	Potência aparente em vazio
I_0	Corrente em vazio, da corrente nominal do transformador
%	Sinal de Porcentagem
S_r	Potência aparente nominal do transformador
$\pm$	Sinal de Mais ou Menos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo	11
1.2	Motivação.....	11
1.3	Conteúdo	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	Base teórica e conceitual	12
2.2	Baixo fator de potência	14
2.2.1	Consequências de um baixo fator de potência	14
2.2.2	Causas de um baixo fator de potência.....	15
2.3	Correção do fator de potência.....	15
3	DESENVOLVIMENTO.....	17
3.1	Metodologia	17
3.1.1	Aplicação da discrepância no sistema	18
3.1.2	Transformações	20
3.1.2.1	Sinal analógico.....	20
3.1.2.2	Sinal digital.....	21
3.1.2.3	Fonte simétrica.....	21
3.1.2.4	Schmitt trigger.....	35
3.1.3	Automação do projeto	43
3.1.4	Correção no sistema.....	53
3.1.4.1	Módulo de relé.....	53
3.1.4.2	Banco de capacitores.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSÕES	57

4.1	Problemas e Correções.....	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
5.1	Conclusão	63
5.2	Trabalhos Futuros	64
	REFERÊNCIAS.....	65
	APÊNDICE - CÓDIGO COMPLETO DA AUTOMAÇÃO.....	67
	ANEXO A - DATASHEET LM741.....	71
	ANEXO B - DATASHEET DO MÓDULO DE RELÉ.....	74
	ANEXO C - DATASHEET DO TRANSISTOR BC337.....	76
	ANEXO D - DATASHEET DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE SCT-013.....	78

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo a qualidade de energia elétrica vem caindo isso é resultado da inserção de cargas não lineares ou reativas nas redes de energia elétrica. Dentre diversos problemas que podem afetar a qualidade da energia. A defasagem entre a tensão e a corrente de um sistema elétrico estão totalmente relacionadas com o fator de potência (Fp). Segundo Boylestad (2011), ele é uma medida que indica o quanto de potência elétrica fornecida ao circuito está sendo transformada em trabalho útil [1]. O seu valor está entre 0 e 1 e quanto mais próximo ele estiver do valor unitário mais eficiência o meu circuito terá. Um baixo fator de potência tende a ter uma corrente elétrica elevada, isto ocasiona em custos e uma maior capacidade de geração de energia por parte das concessionárias. Para as organizações a baixa qualidade de energia trazem impactos em formas de multas nas faturas de energia.

Deste modo, o fator de potência possui bastante importância em relação a eficiência da energia elétrica dentro do projeto. A sua correção pode ser feita por implementação de componentes capacitivos em paralelo a carga do sistema. A especificação da capacitância do circuito dependerá das implementações impostas dentro do circuito. Segundo Mamede (2007), em projetos que apresentam cargas em regimes de utilização distintos para diferentes intervalos de tempo, a utilização de sistemas automáticos de correção de fator de potência possui grande importância, já que temos uma execução constante e periódica [2]. Geralmente nestes projetos se utiliza banco de capacitores que nas condições apresentadas no circuito podem estabilizar e retirar a defasagem em questão.

Existem modelos com tecnologia mais avançada e com alto custo no mercado, mas vale salientar que este projeto é de fim acadêmico. Com isso o presente trabalho tem por finalidade desenvolver por meio de um sistema eletrônico de baixa potência, utilizando a plataforma Arduino.

Por fim, o estudo será constituído por tópicos: Referencial teórico, Metodologia, Desenvolvimento e Conclusão. No primeiro tópico será descrito em termos acadêmicos sobre a correção do fator de potência e a utilização da plataforma Arduino. Logo em seguida será mostrada a metodologia aplicada, será detalhado os conceitos a serem seguidos, ideias para a realização. Com isso a conclusão será debatida os principais pontos e sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Objetivo

- Desenvolver um produto que realize de maneira automática a correção do fator de potência.
- Finalidade:
 - Auxiliar os consumidores industriais na utilização da rede elétrica;
 - Evitar problemas futuros aos clientes e a concessionária de energia elétrica.
- Benefícios:
 - Utilização de uma rede elétrica com maiores taxas de qualidade, fornecimento de energia.
 - Aperfeiçoar o funcionamento e controle de cargas conectadas.

1.2 Motivação

Com o intuito de inovar, resolver problemas e auxiliar de alguma forma, a correção do fator de potência dentro das indústrias, decidimos optar pela criação de um dispositivo automático que realize a manutenção do Fp, que além da sua importância é fundamental que esteja dentro das regularidades exigidas por lei, evitando conflitos e desperdícios de dinheiro e energia elétrica tanto por parte da concessionária como pelo consumidor que é um dos principais focos do projeto.

1.3 Conteúdo

No capítulo 2 mostrado a seguir, Apresenta – se uma introdução e base para o entendimento do conceito.

No capítulo 3 mostra a aplicação do projeto, demonstrando todo o desenvolvimento, trazendo a parte da teoria em prática.

No capítulo 4 irá intensificar mais na demonstração da utilização da plataforma Arduino e toda a simulação do projeto.

Por fim, no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões e discussões sobre novos projetos.

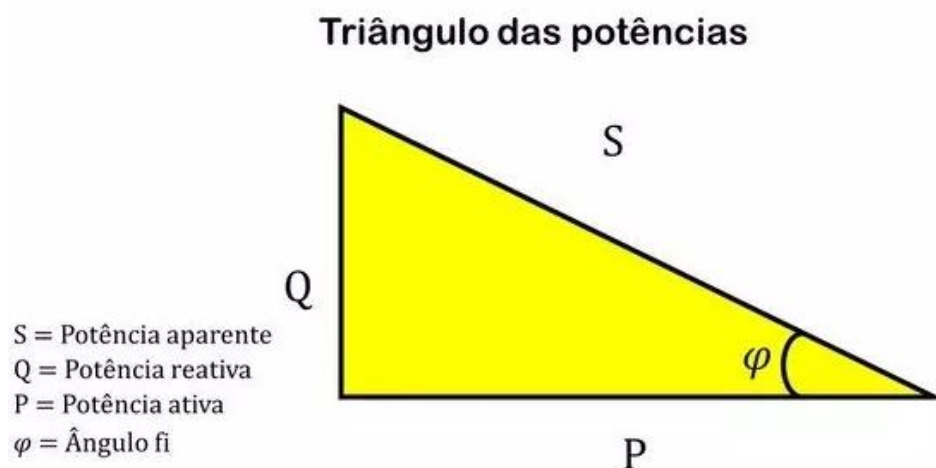
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir neste capítulo mostraremos o conceito sobre o fator de potência, sua utilização dentro do projeto e demonstrando a aplicação na prática e explicando a escolha de cada componente.

2.1 Base teórica e conceitual

As cargas indutivas presentes em circuitos elétricos, tais como: motores, transformadores, reatores, entre outros, necessitam de campos eletromagnéticos para seu funcionamento correto, desse modo, será necessário entender e compreender os tipos de potência presente nesses circuitos, como eles atuam e de que forma o Fp está relacionado a isso.

Figura 1 - Triângulo das potências



Fonte: MATTEDE, 2016.

Em um sistema de corrente alternada existem três tipos de potência, ativa, reativa e aparente.

- **Potência Ativa (P):** é a parcela da potência aparente que é transformada em potência mecânica, térmica ou luminosa nas máquinas e equipamentos, ela é medida em W (Watts).

Formas de calcular: $P = \sqrt{S^2 - Q^2}$; $P = S \times Fp$ ou $P = S \times \cos \varphi$

- Potência Reativa (Q): é a parcela da potência aparente transformada em campo magnético, necessário ao acionamento de dispositivos como motores, transformadores e reatores, onde pode ser aferida em VAR (Volt - Ampère Reativo).

Formas de calcular: $Q = S \times \text{Sen } \varphi$ ou $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

- Potência Aparente (S): ela é toda a potência disponibilizada pela concessionária de energia para a instalação, é uma potência espontânea, podendo ser medida em VA (Volt - Ampère).

Formas de calcular: $S = P \div Fp$ ou $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

- Fator de potência (Fp): O Fp é definido como a relação entre a energia elétrica industrial entregue pela concessionária de energia (Potência Aparente) e a energia que é convertida de acordo com alguns tipos de trabalhos dentro das empresas (Potência Ativa).

De maneira resumida, como já vimos anteriormente, a relação que a potência ativa recebe da potência aparente, sendo ela transformada em trabalho, recebe o nome de fator de potência. Ele indica a eficiência do uso da energia elétrica, valores altos do Fp aponta um uso adequado de energia elétrica, inversamente, valores baixos indicam que a energia está sendo mal aproveitada e desperdiçada.

Formas de calcular: $Fp = P (W) \div S (VA)$, onde $\epsilon = \text{Cos } \varphi$

A letra grega φ (φ) nas equações representam nossa defasagem, quando ela resulta em valores $<$ que 0,92 indicará péssima qualidade e aproveitamento de energia, de outro modo, valores $\geq$ que 0,92 indicaram mais eficiência e eficácia na utilização da energia, o valor padrão (0,92) será discutido posteriormente.

2.2 Baixo fator de potência

Um baixo F_p causa problemas preocupantes do que simplesmente desperdício na rede elétrica entregue pelas concessionárias. Quando ele se encontra em condições baixíssimas, resulta em maiores taxas de energia reativa circulando pelas linhas de alimentação. Desse modo, prejudicando equipamentos e instalações.

Portanto, com a legislação brasileira, através dos decretos Nº 62.724 de 1968 Art. 7º, Nº 75.887 de 1975, Nº 479 de 1992 e Nº 456 de 2000, determina a manutenção e assistência do fator de potência o mais próximo de 1,0 tanto pela parte da concessionária quanto pelos consumidores da rede elétrica. Isso determina que consumidores que trabalham com o F_p abaixo do mínimo permitido 0,92 não mantendo suas instalações adequadas com sobrecargas entre outros, podem sofrer por parte das concessionárias cobranças de sobretaxas ou multas. [7]

2.2.1 Consequências de um baixo fator de potência

Trabalhos realizados dentro das indústrias onde o fator de potência é utilizado de maneira irregular, gera consequências severas tanto aos consumidores como a concessionária de energia. Algumas consequências geradas por irregularidade da rede são: acréscimos na conta de energia elétrica dos consumidores, fraqueza da capacidade dos transformadores, queda na tensão e flutuações, onde a extensão da corrente elétrica devido ao excesso de energia reativa aplicada, leva a queda de tensão. Podendo ocasionar a interrupção da rede elétrica ou sobrecargas em equipamentos, as quedas de energia provocam apagões nas iluminações e aumento da corrente dos motores, necessidade de aumento do diâmetro dos condutores por conta do efeito joule. [4]

Perdas de equipamentos conectados a instalação são umas das consequências principais quando falamos do baixo fator de potência, pois com o calor gerado por perdas de energia, a geração de correntes aumenta nos sistemas por conta da utilização de energia reativa em excesso, ela proporciona aquecimento indesejáveis em condutores e equipamento.

2.2.2 Causas de um baixo fator de potência

Excessos de carga indutivas ou capacitivas operando de maneira simultânea na rede são uma das principais causas de um Fp baixo, outras condições existentes que permitem que o Fp seja colocado em condições indesejáveis são: motores de indução trabalhando a vazio, ou seja, não conectado a nenhum equipamento, apenas a tensão de alimentação, motores e transformadores superdimensionados, onde componentes eletromagnéticos devem ser dimensionados de maneira correta com a utilização de valores nominais coerentes com a cargas, a utilização de reatores de baixo Fp no sistema de iluminação, fornos de indução ou a arco, máquinas de solda e nível de tensão trabalhando acima do valor nominal, ocasionando um aumento no consumo de energia reativa. [4]

Podemos ver que são diversas as causas para que um fator de potência não esteja em condições desejáveis, dessa maneira, é de extrema importância que os profissionais da área se atentem a essas condições e que estejam sempre fiscalizando e realizando manutenções e correções quando necessárias.

2.3 Correção do fator de potência

A correção pode ser feita instalando os capacitores de quatro maneiras diferentes, tendo como objetivos a conservação de energia e a relação custo/benefício [8]:

- A Correção na entrada da energia de alta tensão: corrige o fator de potência visto pela concessionária, permanecendo internamente todos os inconvenientes citados pelo baixo fator de potência e o custo é elevado.
- Correção na entrada da energia de baixa tensão: permite uma correção bastante significativa, normalmente com bancos automáticos de capacitores. Utiliza-se este tipo de correção em instalações elétricas com elevado número de cargas com potências diferentes e regimes de utilização pouco uniformes. A principal desvantagem consiste em não haver alívio sensível dos alimentadores de cada equipamento.
- Correção por grupos de cargas: o capacitor é instalado de forma a corrigir um setor ou um conjunto de pequenas máquinas (<10 CV). É instalado junto ao quadro de

distribuição que alimenta esses equipamentos. Tem como desvantagem não diminuir a corrente nos circuitos de alimentação de cada equipamento.

A correção do fator de potência ela pode ser feita de várias formas como já foi dito, mas quando utilizamos cargas indutivas individuais como neste projeto será feito, no caso são os transformadores, o nosso método que utilizamos é teórico e acadêmico, onde visamos exemplificar que para compensar quando uma das nossas cargas indutivas estiver sendo utilizadas e gerar uma defasagem será corrigido com capacitores fixos ou individuais.

Para a correção de fator de potência de transformadores em vazio, o banco de capacitores é selecionado de acordo com a corrente em vazio do transformador:

$$Q_0 \cong S_0 = \frac{I_0 \times S_r}{100}$$

- Q_0 – Representado em kvar;
- S_0 – Representado em kVA;
- I_0 – Representado em %;
- S_r – Representado em kVA.

3 DESENVOLVIMENTO

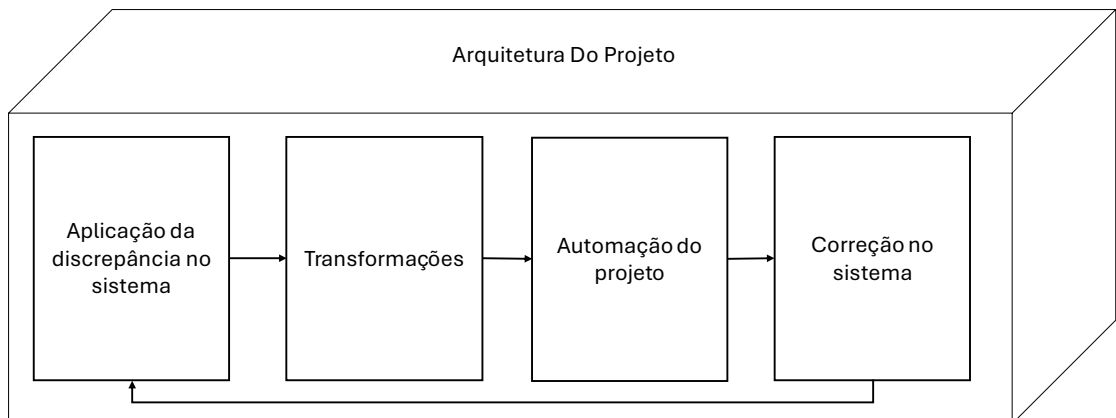
Neste capítulo iremos apresentar o respectivo desenvolvimento do projeto, do mesmo modo que seus dimensionamentos, montagens e aplicações baseados na metodologia deste projeto.

3.1 Metodologia

A metodologia utilizada para a construção do projeto possui foco de atuar de maneira crítica ao realizar a defasagem na rede elétrica, realizar as transformações necessárias para o projeto e o processamento das situações e correções de maneira automática.

O projeto apresenta uma arquitetura separada em 4 grupos principais, como mostra a Figura 2:

Figura 2 - Arquitetura do projeto



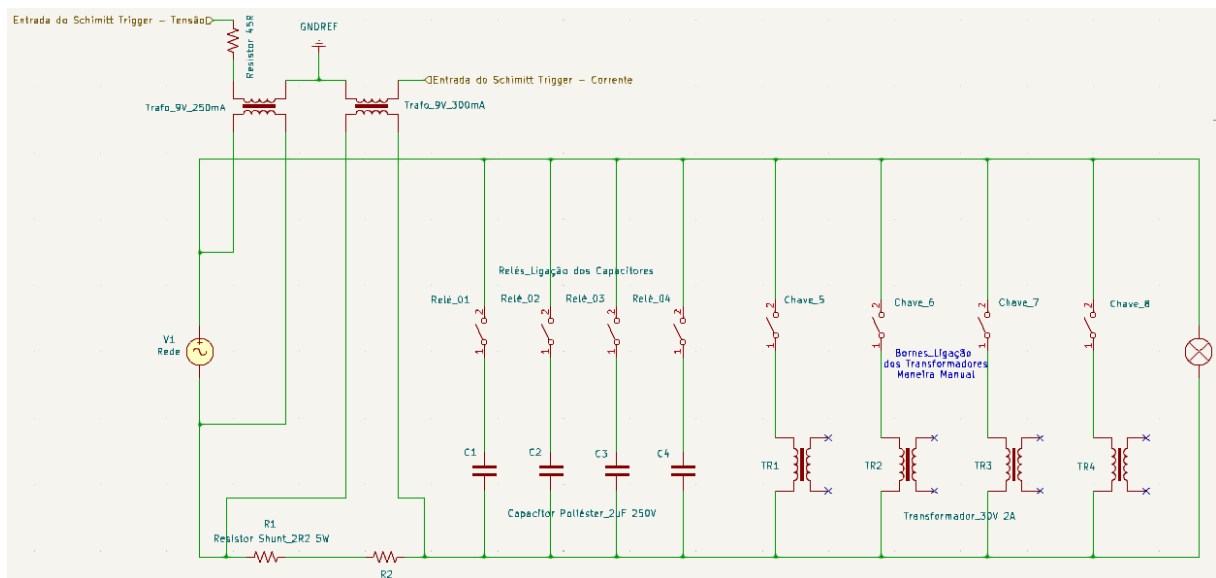
Fonte: Autor, 2024.

Onde, a aplicação da discrepância no projeto será realizada totalmente de maneira manual, ao acionar os indutores (Transformadores), que estarão trabalhando em vazio e resultarão no avanço da defasagem no sistema, os Schmitt Triggers serão responsáveis pela transformação de uma onda senoidal para uma onda quadrada que será futuramente importantíssima para a realização da automação do projeto, os dados de processamento será realizado pelo microcontrolador (Arduino) que será responsável por identificar se há defasagem no sistema e posteriormente fazer os acionamentos dos dispositivos necessários para a correção no projeto.

3.1.1 Aplicação da discrepância no sistema

Como já comentado anteriormente, os indutores no projeto serão a fonte principal do avanço da defasagem no sistema, e os capacitores a forma de resolver essa defasagem utilizando o efeito contrário, com a intenção de realizar a defasagem no sistema para promover uma análise prática de como isso acontece na rede elétrica, a montagem de um protótipo inicial será a forma de promover essa análise como mostra a Figura 3:

Figura 3 - Protótipo Inicial



Fonte: Autor, 2024.

No protótipo inicial, o acionamento dos transformadores e dos capacitores serão de maneira manual, como forma de compreender como serão as formas das ondas senoidais entre tensão e corrente com a defasagem na rede elétrica.

Os componentes e equipamentos utilizados nessa parte do projeto podem ser vistos na tabela 1.

Tabela 1 - Tabela resumo dos componentes e equipamentos

Componente	Especificações Técnicas	Função
Transformadores	Tensão primária: 110V (conectado ao primário) Tensão secundária: 30V Corrente: 2A Tipo: Transformador de indutância Quantidade: 4 unidades	Simular defasagem em aplicações industriais, como motores e reatores. Usado para ajustar a indutância e reduzir a tensão (no caso do transformador de 9V) para amplificadores.
Capacitores de Poliéster	Capacitância: 2 μ F Tensão nominal: 250V Tipo: Poliéster Quantidade: 4 unidades	Correção do fator de potência e compensação de energia reativa, estabilizando a corrente e a tensão no sistema.
Resistor Shunt	Valor de Resistência: Depende do circuito (tipicamente baixo valor) Potência: Variável (dependente do circuito) Tipo: Derivador resistivo	Medir correntes elevadas, instalado em série no circuito para gerar uma queda de tensão proporcional à corrente que passa.
Rede Elétrica - Monofásica	Tensão: 127V ou 220V (dependente da região) Frequência: 50/60 Hz	Fonte de alimentação do sistema, fornecendo a energia elétrica necessária para o funcionamento dos componentes.
Bornes (Plug Banana)	Quantidade: 8 bornes Tipo de Conexão: Plug banana	Permite o acionamento manual dos equipamentos, conectando-os à rede elétrica. Cada borne é utilizado para um equipamento do protótipo.
Osciloscópio	Banda passante: Depende do modelo (geralmente de 20 MHz até 1 GHz) Entradas: 2 ou mais canais Tensão máxima de entrada: Variável (geralmente até 400V) Tipo de display: Digital ou analógico	Medição e visualização das formas de onda, análise da defasagem entre tensão e corrente, além de monitoramento geral do sistema elétrico e comportamento de sinais.

Fonte: (Autores).

3.1.2 Transformações

Com objetivo de realizar uma futura automação no projeto, a realização de uma transformação de analógica (Onda Senoidal) para digital (Onda Quadrada) acaba sendo indispensável.

Optar por essa escolha traz uma série de benefícios e nos ajuda a selecionar e se prevenir de alguns problemas, como o objetivo principal do projeto é realizar a correção do fator de potência de maneira automática é entendido que será utilizado um microcontrolador para realizar a parte de controle e processamento de dados no sistema.

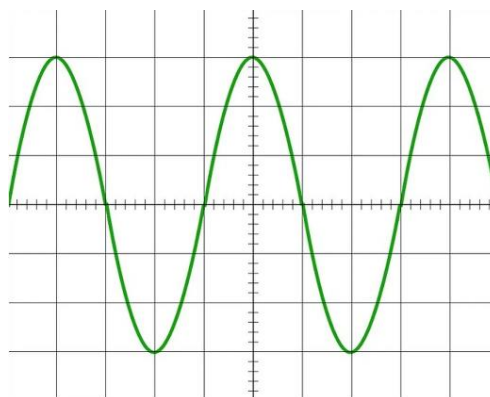
Dessa maneira, realizar a automação é necessário por vários motivos, sendo eles, interpretação do sinal que o microcontrolador fará, onde eles geralmente lidam com sinais digitais, ou seja, sinais analógicos como uma onda de tensão ou corrente precisam ser enquadrados para que o microcontrolador realize a interpretação correta e a eliminação de ruídos, distorções e interferências que sinais analógicos podem possuir para um processamento limpo e eficiente.

3.1.2.1 Sinal analógico

Os sinais analógicos são sinais contínuos que variam ao longo do tempo e podem assumir qualquer valor ao longo de um intervalo, transmitindo informações como som, temperatura, luz, entre outros.

“A representação do tipo de onda que compõe o sinal analógico é uma série de parábolas que se alternam sobre um centro.” [9]. Como mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Sinal analógico



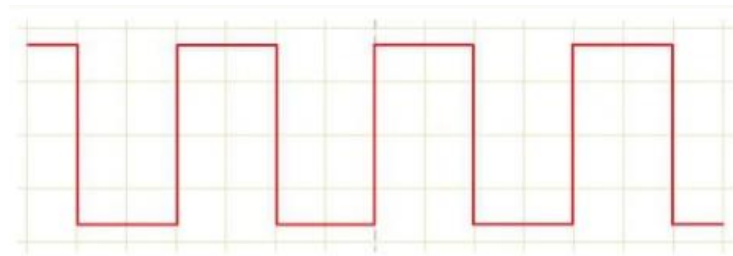
Fonte: (TechTudo, 2023).

3.1.2.2 Sinal digital

Os sinais digitais são formas de ondas discretas que são representadas por 0 e 1, muito usado em computadores e outros dispositivos digitais, para processar e transmitir informações.

Os sinais digitais possuem uma representação de onda quadrada com valores descontínuos no tempo e na amplitude, como mostrado na figura 5.

Figura 5 - Sinal digital



Fonte: (Ciriaco, 2016).

Dessa maneira, podemos resumir que os sinais digitais, comparados com os sinais analógicos possuem um menor custo, tempo de processamento e maior precisão, essas são as principais vantagens.

3.1.2.3 Fonte simétrica

A fonte simétrica é um equipamento usado para alimentação de dispositivos que necessitam de uma alimentação simétrica, ou seja, que necessitam de uma tensão positiva e negativa em relação ao ponto de referência (terra).

Fonte simétricas são amplamente usadas na alimentação de circuitos que utilizam amplificadores operacionais, conversores AC/DC, comparadores de tensão, entre outros.

Com o objetivo de realizar uma transformação de sinal analógico para sinal digital, utilizando amplificadores operacionais em conjunto com microcontrolador. A fonte simétrica será um equipamento indispensável, já que os amplificadores precisam de uma tensão positiva como negativa em relação a um ponto de referência (terra).

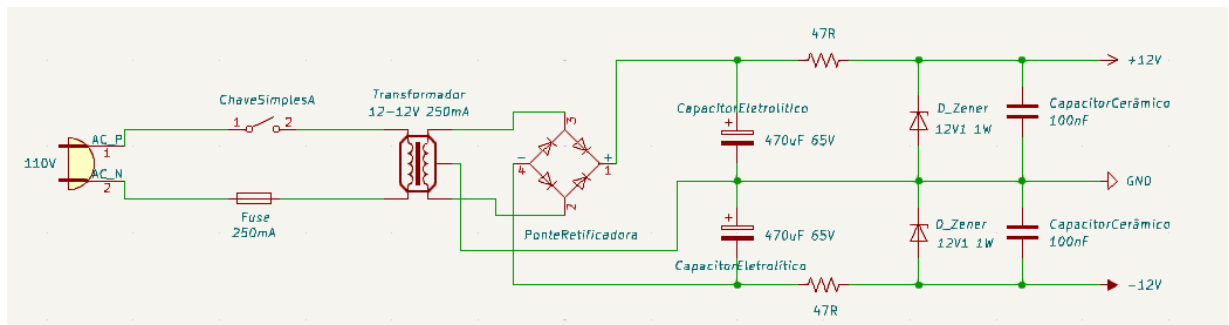
Figura 6 - Fonte de alimentação simétrica convencional



Fonte: (Impac, 2024).

A fonte simétrica projetada para a realização do projeto terá regulação por diodo zener que será o futuro estabilizador da tensão para a saída na carga. Como mostrado na figura 7.

Figura 7 - Fonte simétrica com regulação por diodo zener



Fonte: (Autores).

Uma fonte de tensão possui uma série de objetivos finais, que atendam as expectativas para um funcionamento adequado e eficiente dos equipamentos conectados a ela.

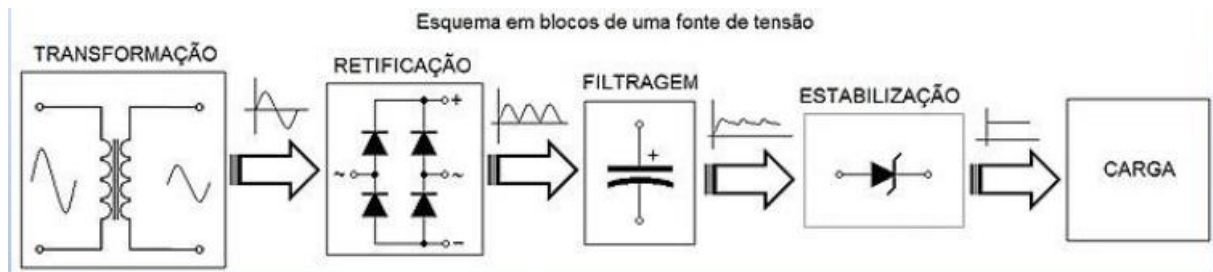
A fonte simétrica montada e utilizada no projeto realizará uma redução e conversão de tensão para ser utilizada junto aos amplificadores operacionais.

A fonte simétrica receberá da energia elétrica monofásica uma tensão de 110VAC, sendo ligado ou desligado por uma chave simples de painel, um fusível de 250mA será integrado a ligação para realizar a proteção dos outros componentes.

- Circuito Retificador:

Os próximos componentes da fonte simétrica serão responsáveis pela redução e transformação de tensão de AC para DC. Como mostrado na figura 8.

Figura 8 - Diagrama de blocos de circuito retificadores



Fonte: (Maia, 2022).

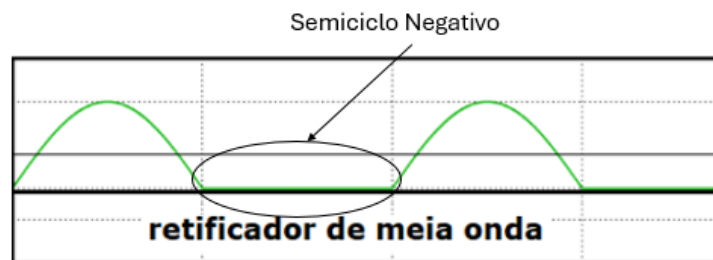
A transformação de tensão será realizada por um transformador de 9+9V 250mA, um transformador funciona por meio de indução eletromagnética, onde ele possui dois enrolamentos de fios (primário e secundário) envolvidos em um núcleo metálico, dessa maneira, modifica a tensão de 110VAC do primário, para 9VAC do secundário.

A retificação será função da ponte retificadora, que é um dispositivo composto por 4 diodos retificadores em um único encapsulamento, a ponte retificadora irá converter a tensão de alternada (AC) para contínua (DC). Sendo ela uma retificação de onda completa.

- Retificação de meia-onda:

Na retificação de meia onda, apenas um dos semiciclos de corrente alternada é aproveitado, geralmente o semiciclo positivo. Utiliza-se um diodo retificador, que permite a passagem da corrente apenas quando o semiciclo da tensão é positivo, bloqueando o semiciclo negativo, e a tensão indo a zero. Como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Retificação de meia onda

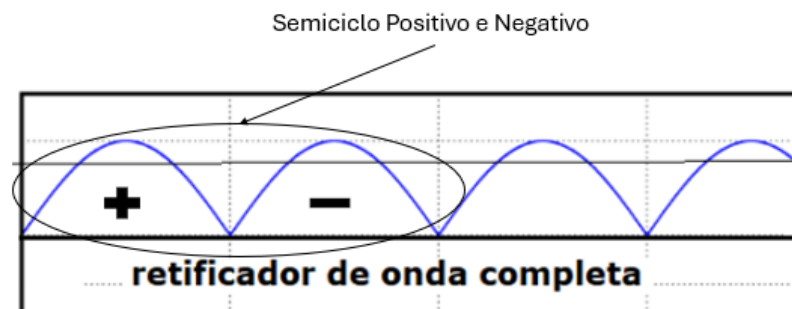


Fonte: (Autores).

- Retificação de onda completa:

Em comparação com a meia-onda, a retificação de onda completa utiliza o semiciclo positivo e negativo da tensão de entrada, convertendo-o em uma corrente pulsante de mesma polaridade. No projeto será utilizada uma ponte retificadora que podemos interpretar como quatro diodos conectados em uma configuração de ponte, em cada ciclo da CA, mas apenas dois diodos farão o papel da retificação e saída com a mesma retificação. Como mostrado na imagem 10.

Figura 10 - Retificação de onda completa



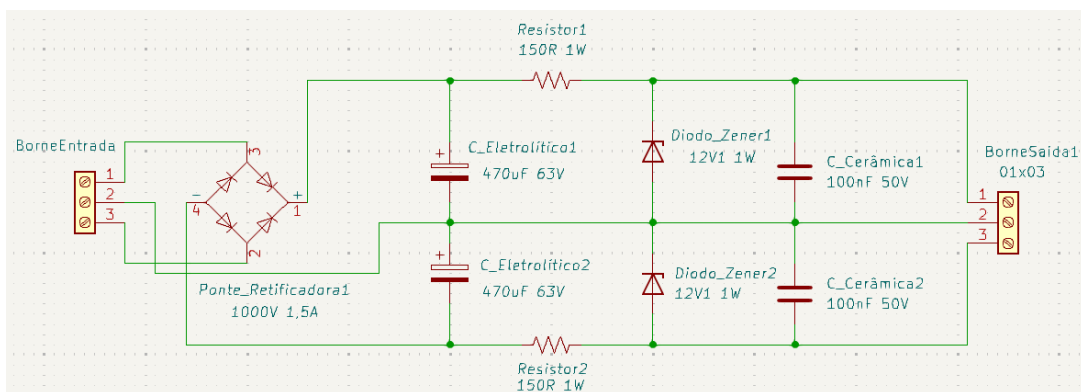
Fonte: (Autores)

A filtragem será realizada após a retificação por capacitores eletrolíticos em paralelo com a rede elétrica, que farão a redução das harmônicas que causam os distúrbios na frequência da rede, ou seja, realizara uma conversão de tensão contínua pulsada em tensão contínua com uma variação menor, reduzindo a ondulações na saída da ponte retificadora.

A parte de estabilização da tensão será responsabilidade dos diodos zeners que iram manter a tensão de maneira constante após atingir a tensão de ruptura, dessa forma, permanecendo a tensão de saída praticamente invariável.

O protótipo inicial da fonte simétrica será realizado em uma placa de prototipagem (Protoboard), seguindo o circuito da Figura 11, onde com base em cálculos, iremos montar e realizar testes para uma análise e verificação dos componentes e atuação do circuito antes de realizar a montagem final em uma placa de circuito impresso (PCI).

Figura 11 - Circuito da fonte simétrica em placa



Fonte: (Autores).

Antes da escolha e montagem dos componentes, a realização de alguns cálculos será feita, para dimensionamento dos componentes corretos que atendam os objetivos finais da fonte.

O transformador dimensionado para essa fonte tem principal relação com os amplificadores operacionais utilizados futuramente. Os amplificadores operacionais LM741 possui uma faixa de tensão de alimentação de ± 3 até $\pm 18V$, os transformadores usados será de 12+12V 250mA que corresponderá perfeitamente para esse limite.

A ponte retificadora será dimensionada com base na tensão e corrente, a corrente da ponte deverá ser igual ou maior que a corrente máxima da fonte, por questão de segurança o valor da corrente da ponte deverá ser pelo menos 2x maior que a corrente máxima.

Exemplo: Corrente máxima da fonte = 250mA

$$\text{Corrente da ponte retificadora: } I_{\text{ponte}} = 250mA \times 2$$

Portanto a corrente da ponte retificadora será no mínimo 500mA.

Desse modo, a tensão da ponte retificadora deverá ser pelo menos o dobro da tensão de pico da fonte.

Exemplo: Tensão de pico da fonte:

$$V_{\text{pico}} = V_{\text{ef}} \times \sqrt{2}$$

$$V_{\text{pico}} = 12 \times \sqrt{2}$$

$$V_{\text{pico}} = 17V$$

Então, a equação para descobrir a tensão da ponte retificadora ficará da seguinte maneira:

$$V_{\text{ponte}} = V_{\text{pico}} \times 2$$

$$V_{\text{ponte}} = 17 \times 2$$

$$V_{\text{ponte}} = 34V$$

Os capacitores de filtro serão dimensionados com base na corrente máxima da fonte, os capacitores de filtro utilizados não podem possuir uma capacitância muito alta, pois capacitores utilizados com capacitâncias altíssimas recarregam muita carga e possuem uma descarga muito lenta.

Os capacitores serão dimensionados através da seguinte fórmula:

$$C = \frac{I}{F \times V_{ripple}}$$

- I - Corrente de saída desejada;
- F - Frequência da ondulação;
- V_{ripple} - Tensão de ripple permitida.

$$C = 250mA \div (120Hz \times 4.48V_{ripple})$$

$$C = 250mA \div 537.6$$

$$C = 465\mu F$$

Um valor de capacitor que chega mais próximo e pode ser encontrado no mercado é 470 μ F.

O dimensionamento dos resistores pode ser feito pela lei de ohm, onde a fórmula será:

$$V = I \div R$$

- V - Tensão da fonte;
- I - Corrente de saída;
- R - Resistência da fonte.

$$R = V \div I$$

$$R = 8V \div 54mA$$

$$R = 150\Omega$$

A resistência usada deve ser ajustada para manter a corrente dos zeners na faixa segura, será de 150 Ω com 1W de potência.

Os diodos zeners foram dimensionados em relação com o valor da tensão de saída da fonte que será $\pm 12V$. O diodo zener utilizado é um 1N4742 de 12V 1W de potência.

Os capacitores de cerâmica serão utilizados para complementar os capacitores eletrolíticos onde os dois iram trabalhar em conjunto para fornecer uma tensão mais limpa e estável com uma interferência menor, filtrar a alta frequência, entre outros.

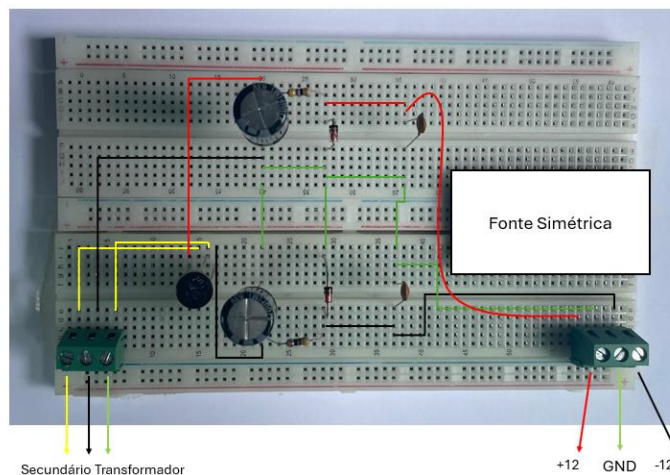
Os componentes eletrônicos e dispositivos utilizados para a confecção da fonte simétrica podem ser encontra-se a seguir:

- Plug macho para tomada;
- Chave simples de painel;
- Fusível de 250mA;
- Porta fusível de rosca;
- 2 – Conector bornes KRE de 3 vias;
- Transformador de 12+12V 250mA;
- Ponte retificadora de 1000V 1.5A;
- 2 – Capacitores Eletrolíticos de 470uF 65V;
- 2 – Resistores de 150Ω 1W;
- 2 – Diodos zeners 1N4742 12V1 1W;
- 2 – Capacitores Cerâmicos de 100nF 50V;
- Tubo termo retrátil;
- Organizador de cabos em espiral.

Os componentes montados na protoboard foram divididos e testados por partes, começando pela parte de transformação até a estabilização. Dessa forma, podemos analisar e ter a certeza de que a fonte está funcionando de maneira correta.

Na Figura 12, podemos ver exatamente a ligação dos componentes na placa de prototipagem e suas determinadas ligações para seu funcionamento correto.

Figura 12 - Circuito da fonte simétrica na protoboard



Fonte: (Autores).

A construção de qualquer circuito eletrônico, digital ou analógico podem ser feitos de duas formas principais, a primeira é usando uma placa de prototipagem (protoboard), que é uma Matriz de contato que permite realizar a montagem e testes de maneira rápida e provisória ainda em parte do desenvolvimento. A único problema da protoboard é a presença de mal contatos e a fixação dos componentes que podem ficar se soltando em certos momentos.

A implementação de um circuito quando definitivo, a melhor opção é realizar a confecção de uma placa de circuito impresso que possui um aspecto mais profissional e eficiente quando colocado em prática.

Desse modo, o protótipo final da fonte simétrica em placa de circuito impresso, pode ser realizado de várias formas ou jeitos diferentes de realizar a confecção de uma PCI, a confecção que irá ser apresentada no projeto será a mais simples, com a utilização de um ferro de passar roupa e percloroeto de ferro que será o principal produto para a confecção da placa.

- **Materiais necessários:**

Uma lista completa do material necessário para a confecção de placas de circuito impresso encontra-se a seguir.

1. Transparência do layout em papel fotográfico ou couchê;
2. Ferro de passar roupa, de preferência sem vapor ou água;
3. Caneta esferográfica para CD;
4. Furadeira;
5. Broca de 1 ou 1.5 mm;
6. Placa de circuito impresso de fenolite ou fibra com 150mm x 50mm;
7. Bandeja com água;
8. Percloroeto de ferro líquido ou em pó;
9. Esponja de aço;
10. Acetona;
11. Lenços de papel;
12. Ferro de solda;
13. Estanho;
14. Pasta de solda.

Os primeiros passos no preparo da placa envolvem uma limpeza cuidadosa, essencial para que o layout seja bem transferido para a superfície.

Primeiramente, utiliza-se uma esponja de aço para polir o cobre, deixando-o uniforme e livre de gordura e manchas.

Em seguida, recomenda-se aplicar acetona com papel higiênico para remover resíduos metálicos deixados pela esponja. Após essa limpeza, é importante evitar o contato direto com o cobre para não comprometer o resultado. Como mostrado na Figura 13.

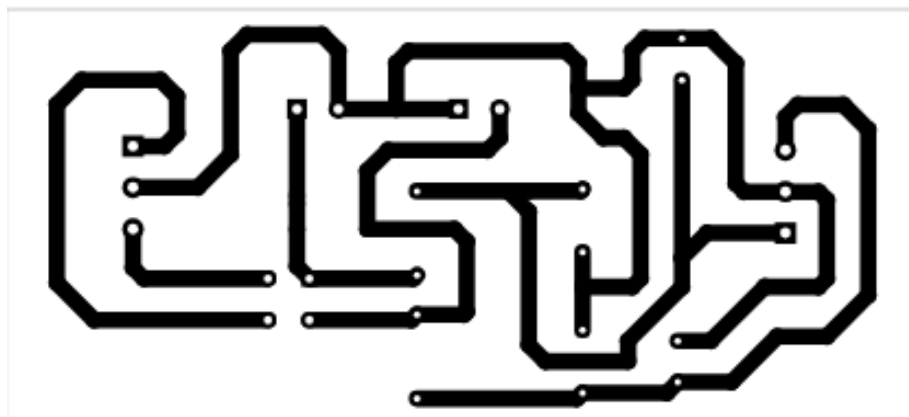
Figura 13 - Preparo da placa de fenolite



Fonte: (Autores).

Para transferir o layout do circuito para a placa, recomenda-se utilizar uma impressora a laser, imprimindo o layout em papel fotográfico ou couchê. Impressoras a jato de tinta não são indicadas, pois, além de terem um lado poroso, produzem impressões menos transparentes, o que pode comprometer a qualidade e a nitidez do layout. Na figura 14, será apresentado o layout do circuito, que será futuramente transferido para a placa.

Figura 14 - Layout da fonte simétrica



Fonte: (Autores).

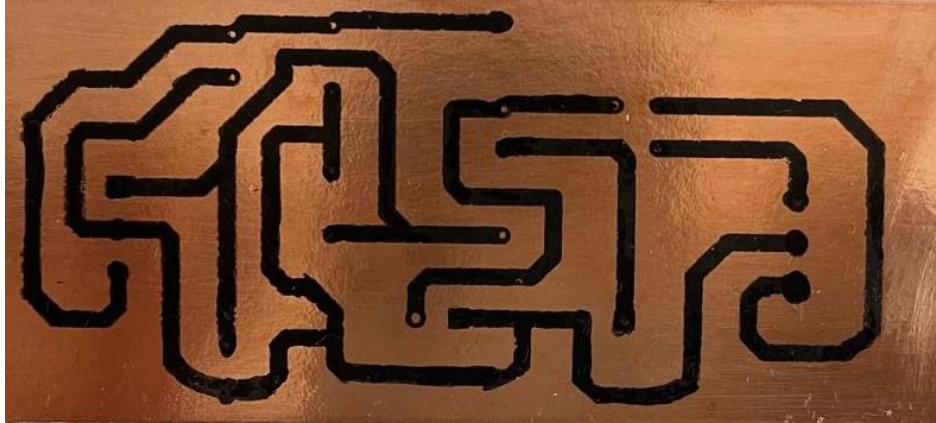
A transferência do layout do circuito para a placa é uma etapa delicada do processo. Apesar de simples, requer habilidade e atenção para obter um bom resultado.

Passo a Passo:

1. Não toque na placa (após limpá-la com esponja de aço e acetona) nem na transparência (antes ou depois da impressão).
2. Identifique o lado da transparência que contém a tinta, observando o reflexo da luz sobre a parte impressa.
3. Coloque o lado impresso da transparência sobre o cobre da placa, ajustando o layout para caber na superfície.
4. Posicione algumas camadas de papel higiênico ou toalha de papel sobre a transparência para ajudar a distribuir calor e pressão.
5. Regule o ferro de passar roupas na temperatura máxima e, quando estiver bem aquecido, pressione-o sobre a placa por 15 a 20 segundos, sem aplicar muita força.
6. Com o ferro, faça movimentos circulares sobre toda a placa para distribuir o calor uniformemente, mantendo a pressão durante cerca de 3 minutos.
7. Retire o ferro e deixe a placa esfriar antes de remover o papel ou a transparência. Isso evita que a tinta se espalhe ou saia junto com a transparência.
8. Após esfriar, retire a transparência e verifique se o layout foi transferido para o cobre. Pequenas falhas podem ser corrigidas com uma caneta para CDs [15].

A figura 15, mostrará como a PCI ficará quando o processo de transferência for realizado.

Figura 15 - Transferência do layout para placa



Fonte: (Autores).

Erros Comuns e Soluções:

- Pressão insuficiente ou tempo curto: Trilhas claras ou com falhas parciais.
- Pressão excessiva ou tempo longo: Trilhas alargadas, com tinta escorrendo.
- Distribuição irregular de calor ou sujeira: Trilhas ausentes em certas áreas.

Caso ocorra algum desses erros, limpe a placa com acetona e esponja de aço e repita o processo desde o início.

Após a transferência do layout, a próxima etapa é a corrosão da placa.

Para isso, utiliza-se percloroeto de ferro diluído em água dentro de uma bacia plástica. A proporção recomendada é de 50g de percloroeto para cada 100ml de água.

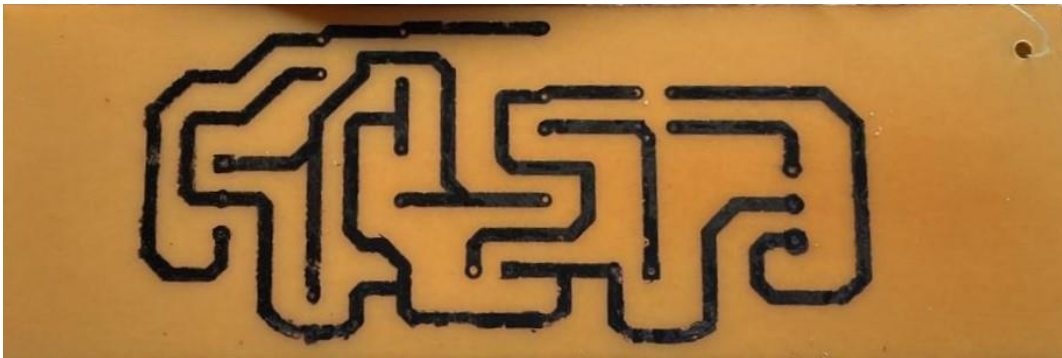
Quando diluído, o percloroeto de ferro se torna ácido, sendo essencial usar luvas e máscara para evitar contato prolongado com a pele e inalação dos vapores, pois ele pode ser prejudicial à saúde.

Passo a Passo:

1. Faça um pequeno furo na placa e prenda-a com uma linha de náilon ou de costura.
2. Mergulhe a placa no ácido, segurando apenas pela linha para evitar contato direto com o ácido.
3. Agite a placa de tempos em tempos para soltar as partes já corroídas e acelerar o processo.
4. Deixe a placa no ácido por cerca de 30 minutos, variando conforme a qualidade do ácido e o movimento aplicado. O cobre ficará rosa até ser totalmente corroído, revelando a fibra ou fenolite.
5. Quando o cobre estiver completamente removido, retire a placa do ácido e lave-a em água corrente [15].

A figura 16, mostrará como a PCI ficará quando o processo de corrosão for realizado.

Figura 16 - Corrosão da PCI

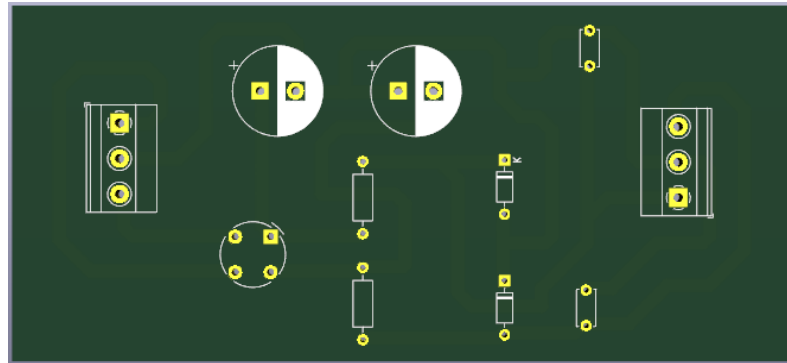


Fonte: (Autores).

Antes de furar e fixar os componentes na placa, é recomendável limpá-la novamente com acetona e esponja de aço para remover a tinta da impressão sobre as trilhas.

A furação da placa será realizada com uma broca de 1,5 mm, utilizando uma furadeira de bancada para maior precisão. O uso de um punção é essencial, pois serve como guia para a broca, evitando que ela deslize e cause arranhões ou furos indesejados na placa. Na Figura 17, será mostrado o processo de furação realizado por completo:

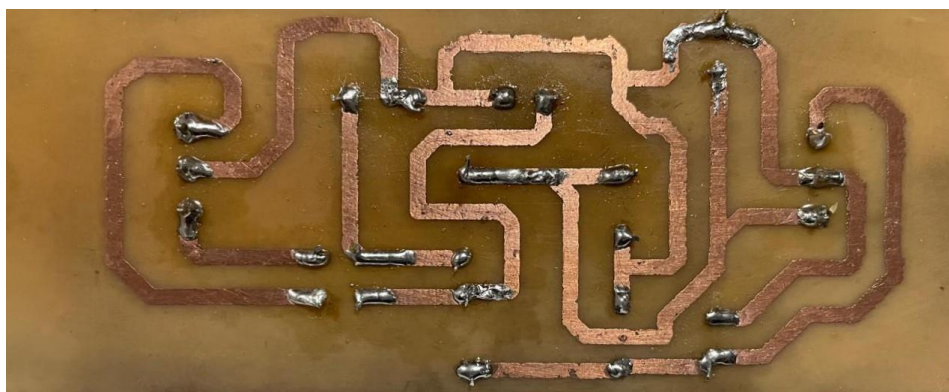
Figura 17 - PCI após furação



Fonte: (Autores).

Após essa limpeza, a soldagem dos componentes pode ser iniciada. Utilizar solda nova é fundamental, pois facilita a remoção caso seja necessário corrigir algum erro. Além disso, o uso de pasta de solda é importante, pois ajuda na fixação e na limpeza das áreas onde os componentes serão soldados. Na figura 18, será apresentado a forma de placa após soldagem.

Figura 18 - PCI após soldagem

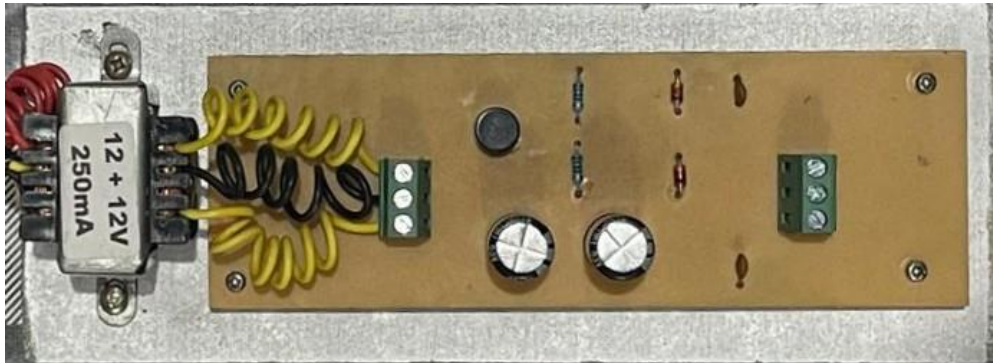


Fonte: (Autores).

Com a placa de circuito impresso finalizada, a fonte simétrica está pronta para uso, podendo alimentar circuitos que utilizem dispositivos como amplificadores operacionais.

A figura 19 mostra a aparência final da placa vista de cima, destacando a fixação dos componentes e montagem final.

Figura 19 - Fonte simétrica finalizada

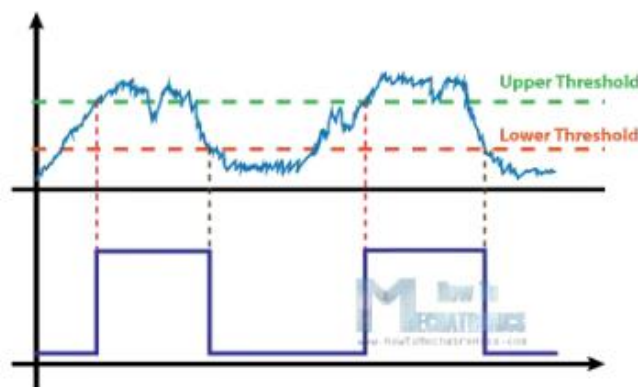


Fonte: (Autores).

3.1.2.4 Schmitt Trigger

O Schmitt trigger é uma ferramenta essencial que em circuitos eletrônicos realiza a transformações de sinais analógicos em sinais digitais, desse modo, os Schmitt triggers são amplamente utilizados para estabilizar melhorar a precisão e eliminar ruídos de sistemas que trabalham com sinais digitais. Como mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Eliminação de ruído



Fonte: (Dejan)

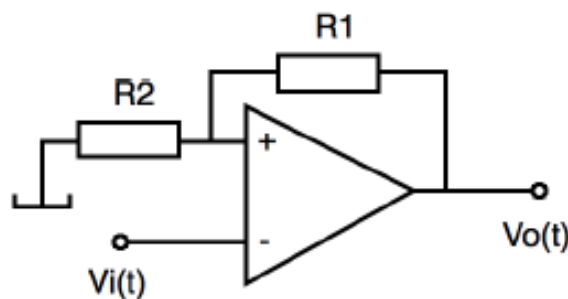
Ele é um tipo de comparador que possui histerese, ou seja, ele opera com dois limiares distintos, um de limite superior (de baixo para alto), e um de inferior (de alto para baixo). Isso permite que o Schmitt trigger filtre os ruídos e flutuações nos sinais de entrada, evitando que a saída mude de estado constantemente.

Portanto, o Schmitt Trigger é utilizado para estabilizar sinais analógicos, convertendo-os em sinais digitais confiáveis, especialmente em sistemas que precisam corrigir defasagens, onde o ruído pode causar oscilações indesejadas ou leituras incorretas. Ele é amplamente aplicado em entradas de microcontroladores e em sistemas digitais que requerem processamento de sinais de forma estável e precisa.

A ferramenta Schmitt trigger utilizada nesse projeto será implantada com base na utilização de amplificadores operacionais LM741. O LM741 será configurado para trabalhar como um Schmitt trigger, criando um comparador com histerese para estabilizar sinais de entradas analógicos ruidosos.

O LM741 não possui histerese integrada como o CI 74HC14, dessa forma o LM741 precisa ser configurado no circuito para possuir dois níveis lineares: um superior e um inferior. Isso é feito aplicando a realimentação positiva no circuito, o que cria a histerese desejada. Como mostrado na figura 21.

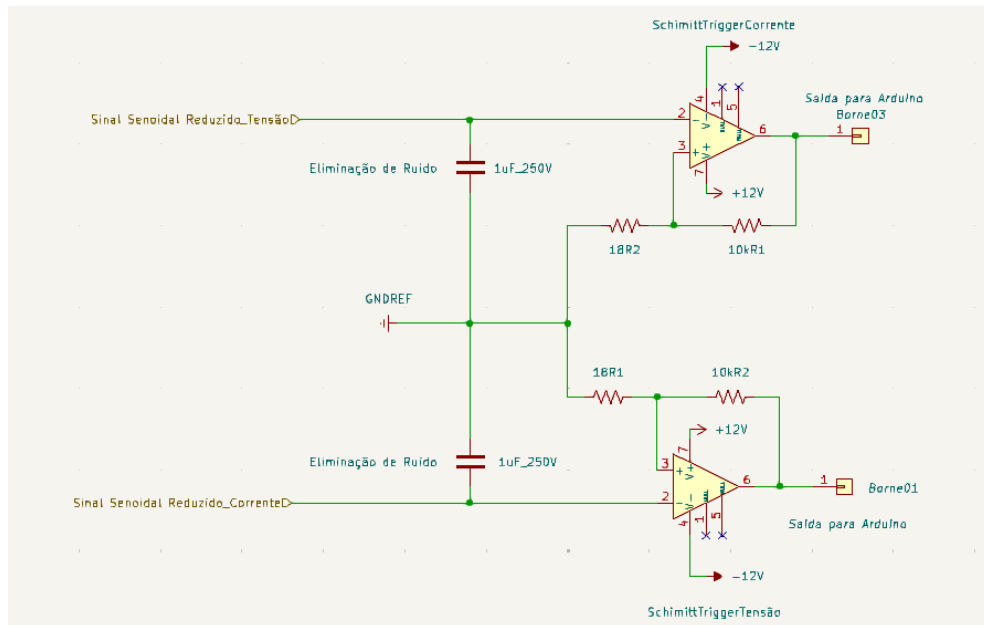
Figura 21 - Realimentação positiva do LM741



Fonte: (PUGLIA, Vasco).

No modo de realimentação positiva, ele pode ser configurado como um comparador com histerese (Schmitt Trigger), alternando rapidamente entre os estados alto e baixo. Essa configuração é útil em circuitos que precisam de saídas digitais, limpando sinais ruidosos e estabilizando a saída, mesmo que a entrada seja analógica e sujeita a ruído. Como mostrado na imagem 22.

Figura 22 - Circuito comparador Schmitt Trigger



Fonte: (Autores).

A realimentação positiva consiste em implementar um divisor de tensão entre a saída do amplificador operacional e o GND. O ponto intermediário desse divisor é então conectado à entrada não inversora do LM741.

A construção do Schmitt Trigger envolve uma série de cálculos futuros para que seja possível entender como é formada a histerese no sistema.

A tensão de alimentação do amplificador operacional será representada pela tensão de saturação (V_{sat}). No projeto, A fonte simétrica será a principal responsável pela representação de valor.

A tensão de histerese sendo positiva ou negativa será representada pela tensão de chaveamento ($\pm V_{st}$).

Onde pode ser encontrada pelas seguintes fórmulas:

$$+V_{st} = +V_{sat} \times R2 \div (R1 + R2)$$

$$+V_{st} = +12 \times 18\Omega \div (10k\Omega + 18\Omega)$$

$$+V_{st} = +12 \times 18\Omega \div 10,018k\Omega$$

$$+V_{st} = +12 \times 0,0018\Omega$$

$$+V_{st} = +21,6mV$$

$$-V_{st} = -V_{sat} \times R2 \div (R1 + R2)$$

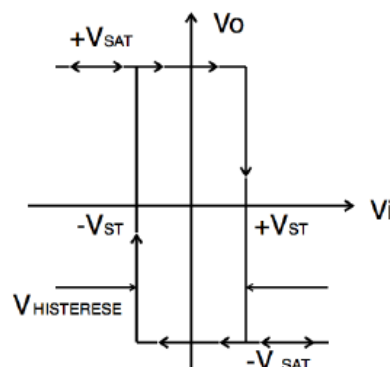
$$-V_{st} = -12 \times 0,0018\Omega$$

$$-V_{st} = -21,6mV$$

Com uma tensão de entrada variável de $\pm 21,6V$, o divisor de tensão fornece um valor intermediário que oscila proporcionalmente entre $-21,6V$ e $+21,6V$. Dessa forma, a tensão de realimentação introduz uma histerese no circuito, permitindo que o amplificador operacional alterne entre os níveis de saída com base nos limites definidos pela realimentação positiva.

Na figura 23 será mostrado o formato da histerese quando alterna dos limiares superior e inferior.

Figura 23 - Curva de histerese



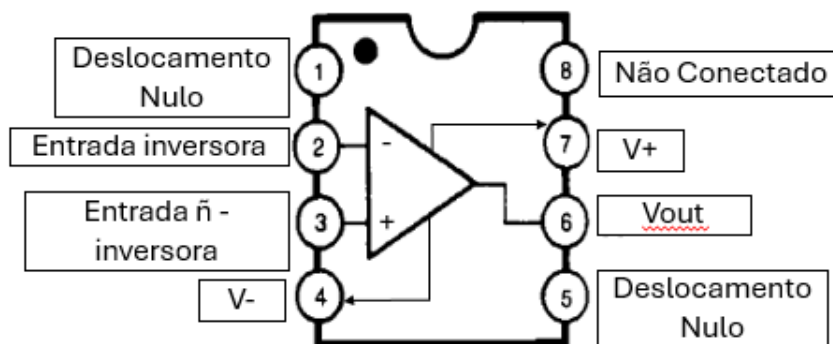
Fonte: (PUGLIA, Vasco).

Portanto, a realimentação positiva realiza uma diferença de tensão entre a entrada não inversora (+) e a entrada inversora (-), gerando os limiares superior e inferior.

O LM741 como outros amplificadores operacionais possui algumas características quase iguais, ao analisar o datasheet dos componentes podemos entender seus aspectos como, estrutura, pinagem, entre outros.

As características do LM741, basicamente são, duas entradas, a inversora, representada pelo sinal negativo (-), e a não inversora, representada pelo sinal positivo (+). Além disso, o amplificador operacional tem uma saída (V_o) que futuramente será incrementada na porta do microcontrolador para leitura em sinal digital, uma entrada (V_i) que será analógica, vindo da medição da corrente ou tensão, uma alimentação positiva (+Vcc) e a alimentação negativa (-Vcc) que virá da fonte simétrica já confeccionada anteriormente. Na imagem 24 será mostrado a pinagem e a estrutura do amplificador.

Figura 24 - Diagrama de pinagem do LM741



Fonte: (Autores)

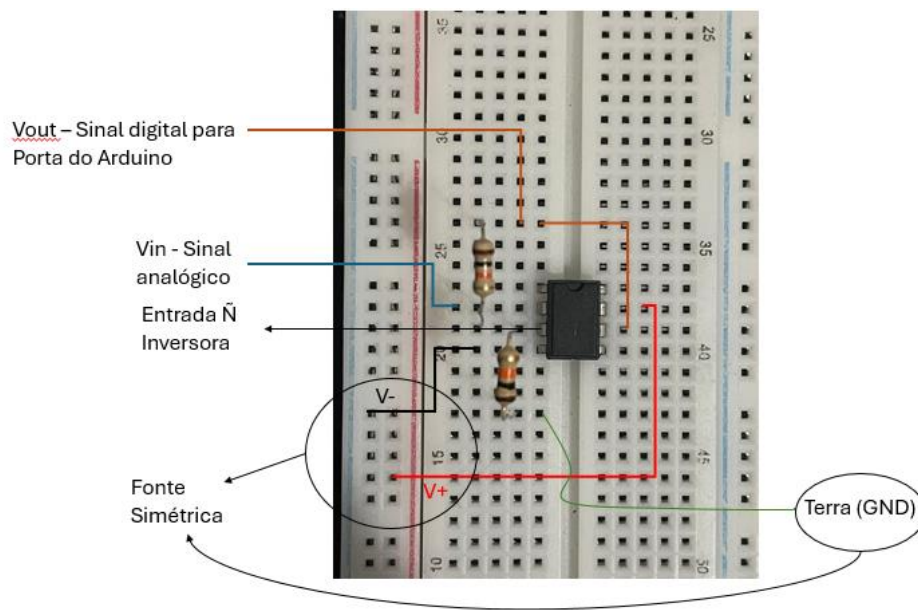
No projeto serão utilizados dois amplificadores operacionais, um será responsável por transformar o sinal analógico vindo da corrente em sinal digital, e o outro responsável pela tensão.

Os amplificadores operacionais LM741 podem receber uma alimentação na faixa de ± 3 até $\pm 18V$ (como mostra seu *datasheet* que se encontra no “Anexo A”). A fonte simétrica usado para realizar a alimentação dos amplificadores possui uma alimentação máxima de $\pm 12V$, desse modo, estando dentro da faixa permitida.

Para esse circuito, serão utilizados dois resistores um de 18Ω sendo representado pelo resistor de entrada e um outro de $10k\Omega$, como divisores de tensão para definir os limiares superiores e inferiores, os resistores serão conectados entre a saída do amplificador operacional (V_{out}) e a entrada não inversora (+), dessa forma, recebendo a tensão de realimentação positiva.

Os amplificadores operacionais serão testados em uma placa de prototipagem antes de serem levados para a placa de circuito impresso, desse modo, podemos analisar seu funcionamento e entender como as devidas conversões funcionam. Como mostrado na Figura 25.

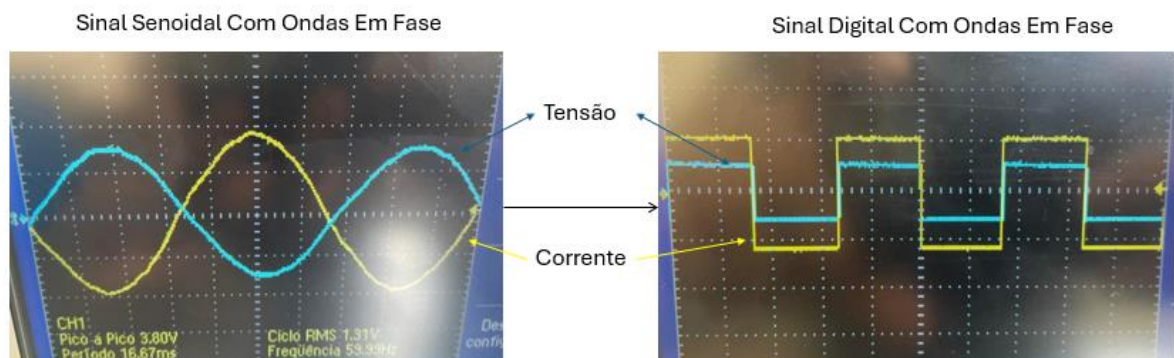
Figura 25 - Circuito dos amplificadores na protoboard



Fonte: (Autores).

Foram realizados testes em protoboard utilizando os amplificadores operacionais LM741, analisando seu comportamento na conversão de ondas dentro do projeto. Esses amplificadores convertem a entrada de sinal (V_{in}) na entrada inversora (-), sinal analógico que se deseja monitorar, representado pela corrente e tensão do sistema, em um sinal digital limpo. Como mostrado na figura 26.

Figura 26 - Conversão de sinais



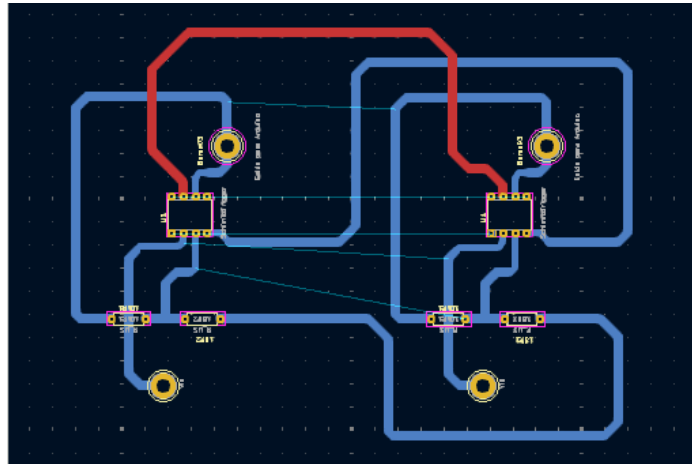
Fonte: (Autores)

Na figura 26, podemos ver de maneira nítida como o Schmitt Trigger realiza a conversão de um sinal analógico para digital, desse modo, podemos analisar e compreender como é realizada a conversão de sinais.

Após a realização de testes com os amplificadores operacionais na protoboard, a realização da confecção de uma PCI é necessária, desse modo, a fixação definitiva auxilia muito no protótipo final, deixando o Schmitt Trigger com um aspecto profissional, evitando mal contato, sendo mais versátil e eficiente em sua utilização.

Na figura 27, será mostrado o layout do Schmitt Trigger que será transferido para placa de PCI.

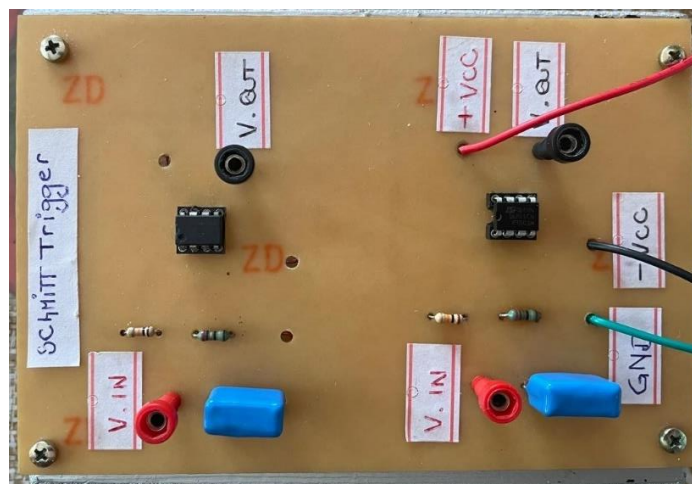
Figura 27 - Layout do Schmitt Trigger



Fonte: (Autores).

Após a conclusão dos processos mencionados anteriormente como, transferência do layout, corrosão do cobre excedente, furação para os componentes e soldagem, a PCI foi finalizada. A Figura 28 apresenta a visão superior da placa, destacando a fixação dos componentes e o resultado da montagem.

Figura 28 - PCI do Schmitt Trigger



Fonte: (Autores).

O Schmitt Trigger é amplamente útil em projetos com microcontroladores.

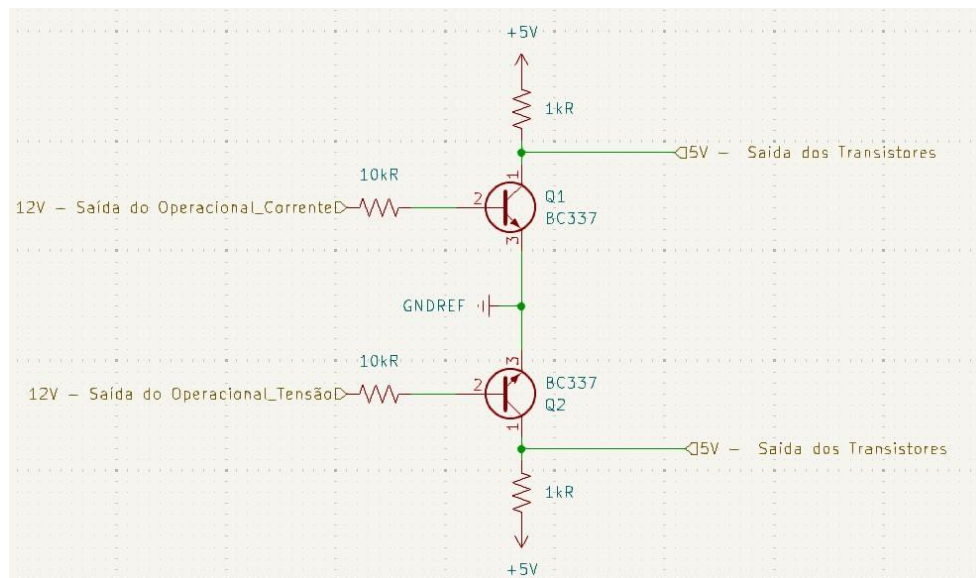
Dado que este projeto visa uma futura automação, onde a transformação de sinais analógicos para digitais serão fundamentais para um cálculo, monitoramento e correção da defasagem no sistema, o Schmitt Trigger desempenhará um papel essencial ao converter e filtrar sinais antes de serem enviados aos pinos digitais do microcontrolador, evitando leituras instáveis ou incorretas.

Utilizando o amplificador operacional LM741, o Schmitt Trigger permitirá transformar um sinal analógico ruidoso em uma saída digital estável e pronta para ser processada pelo microcontrolador.

3.1.3 Automação do projeto

Uma adaptação do nível de tensão proveniente dos amplificadores operacionais deve ser ajustada antes de ser aplicada ao Arduino, a fim de evitar danos ao microcontrolador devido a tensões excessivas. A figura 29 mostrará o esquemático para essa adaptação de tensão.

Figura 29 - Esquemático da Adaptação do Nível de Tensão

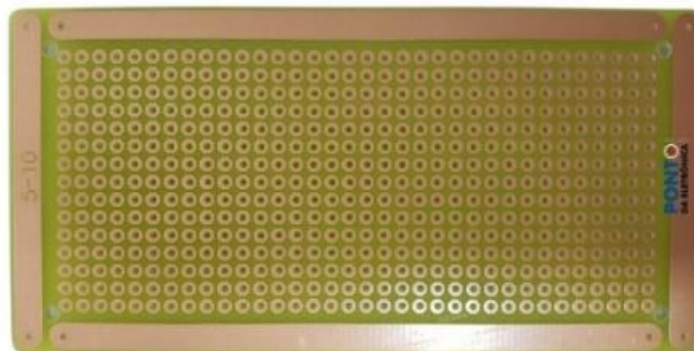


Fonte: (Autores).

Os sinais de 12V correspondem às tensões de saída dos amplificadores operacionais que precisam ser ajustadas. Essas entradas são conectadas às bases dos transistores BC337 por meio de resistores de 10 k Ω (como mostra seu *datasheet* que se encontra no “Anexo C”). Os transistores funcionam como chaves, controlando os sinais e reduzindo-os para a faixa de 0V a 5V, compatível com microcontroladores. Além disso, resistores de 1 k Ω conectados ao +5V, em conjunto com os transistores, garantem que a tensão de saída seja limitada a 5V, conhecida como "Saída dos Transistores". Em resumo, o circuito adapta os sinais de 12V para a faixa de 0V a 5V, permitindo seu uso seguro em dispositivos como o Arduino.

O sistema de redução com transistores será montado em uma placa de fenolite com ilhas de cobre e já perfurada, o que simplifica a montagem e a fixação dos componentes. Essa abordagem elimina a necessidade de corrosão ou criação de um layout específico para fabricação futura. A Figura 30 apresenta o modelo e o formato da placa utilizada.

Figura 30 - Placa de Fenolite Cobreada



Fonte: (Autores).

Com o objetivo principal de realizar uma correção da defasagem de maneira automática, será necessária a utilização de algum microcontrolador para que seja possível realizar a automação.

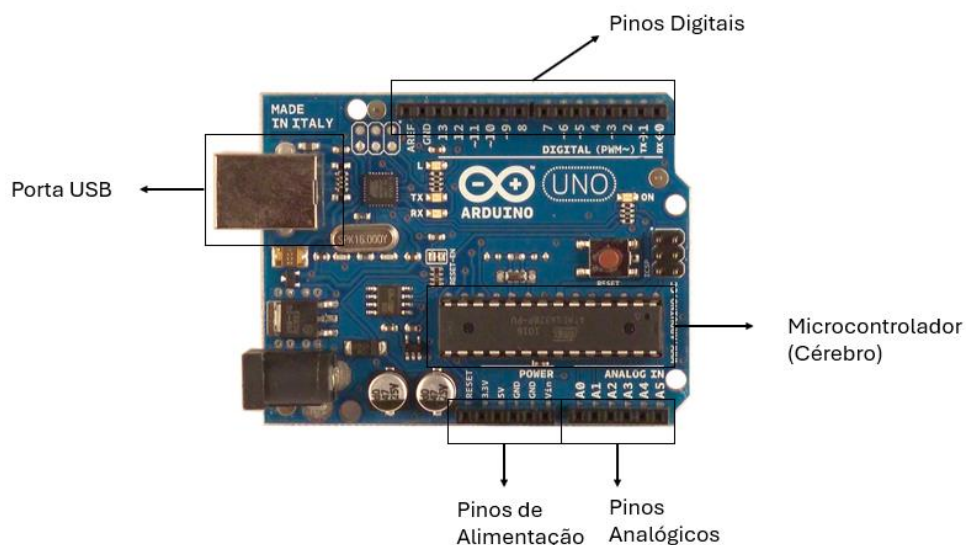
O microcontrolador escolhido para realizar essa função foi o ATmega328P-PU que pode ser encontrado no Arduino UNO.

O Arduino é uma plataforma de programação onde possui uma placa de prototipagem eletrônica baseada em software e hardware livres, que pode ser usada para desenvolver projetos eletrônicos, executando tarefas como, acionamentos, leituras de sensores, cálculos por meio de programação, comunicação com outros dispositivos, entre outros.

O Arduino usado para a realizar a automação do projeto será o UNO, sendo a placa mais popular e ideal para projetos pequenos e de simples ação.

O Arduino UNO, possui 14 pinos digitais de entrada e 6 pinos analógicos de saída. a placa utilizada possui um microcontrolador da família ATmega da fabricante Atmel, esse microcontrolador será o cérebro da placa e o componente que realizara toda a parte de controle e processamento. Como mostrado na figura 31.

Figura 31 - Estrutura do Arduino UNO

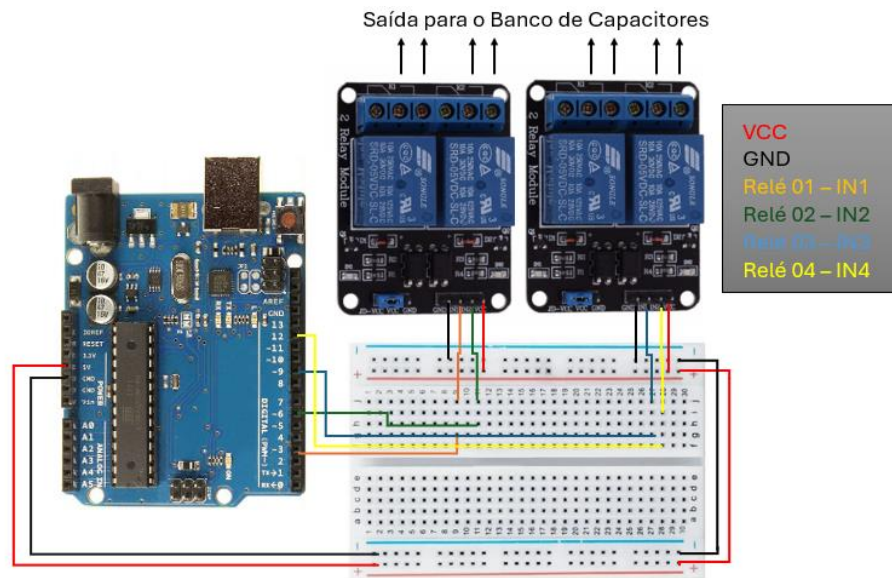


Fonte: (Autores).

A programação será realizada através do software de desenvolvimento Arduino IDE, onde por meio da linguagem de programação C/C++ será possível escrever, compilar e gerar o update na placa.

O Arduino será o responsável no sistema por realizar o monitoramento da defasagem e o controle automático dos bancos de capacitores que serão acionados por relês interligados ao Arduino. Como mostrado na figura 32.

Figura 32 - Esquema elétrico da automação



Fonte: (Autores).

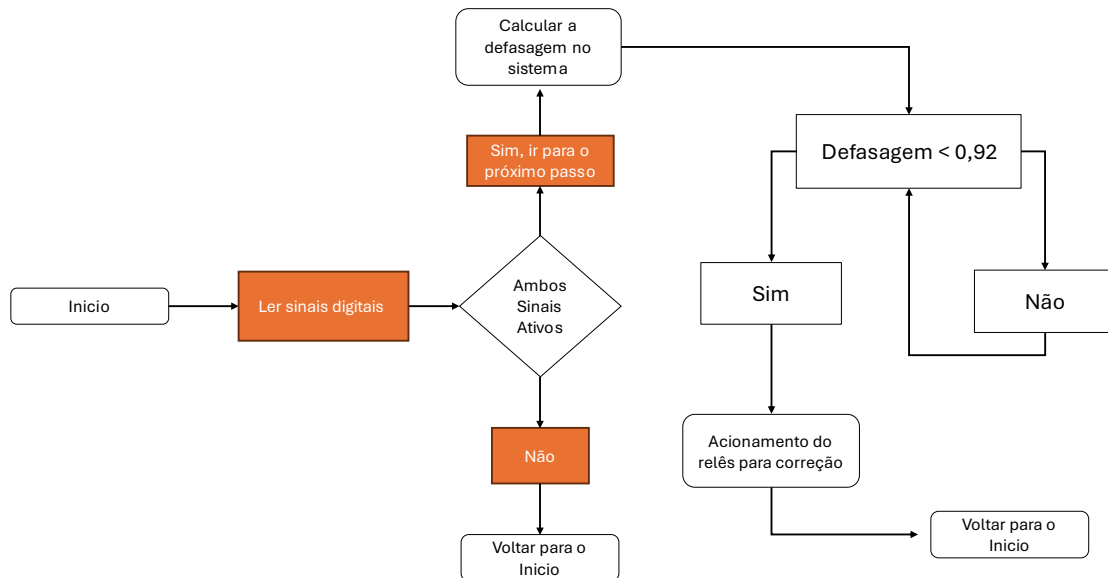
Por base de programação o Arduino irá identificar e medir a corrente e a tensão já convertidos para sinal digital, calcular a defasagem entre eles e acionar os relês para a correção através dos bancos de capacitores.

A programação do sistema será baseada em cálculos e em monitoramento através de um contador que fará o Arduino identificar se há ou não defasagem imposta no sistema.

Os sinais, convertidos para digital pela ferramenta Schmitt Trigger, serão enviados às portas digitais do Arduino. A programação do microcontrolador permitirá identificar esses sinais e calcular a defasagem entre eles. Se a defasagem for maior que o valor desejado de 0,92, o microcontrolador não realizará nenhuma ação. No entanto, se a defasagem ficar abaixo do limite permitido, o Arduino acionará o módulo de relês, ativando o banco de capacitores para corrigir a defasagem, conforme planejado.

A figura 33, mostrará o fluxograma da programação para uma melhor compreensão.

Figura 33 - Fluxograma da programação



Fonte: (Autores).

O fluxograma segue uma lógica clara e eficiente. Garantindo que a correção da defasagem só ocorra quando necessário, otimizando o uso dos relés e capacitores. Esse processo é adequado para sistemas de controle onde a defasagem deve ser mantida dentro de limites específicos para evitar problemas de sincronização ou eficiência.

A programação do sistema para uma operação futura com a utilização do microcontrolador Arduino será monitorar e analisar duas ondas digitais de entrada, uma para corrente e a outra para tensão, calcula a defasagem entre elas a cada carga indutiva aplicada e aciona os relés com base nessa defasagem.

Nas próximas páginas, será detalhado as principais partes do código criado para realizar a automação no presente projeto, mostrando também a tabela e lógica utilizada:

```

const int onda1Pin = 2;
const int onda2Pin = 3;

//pino para controlar os relés
#define Rele01 4
#define Rele02 5

volatile unsigned long tempoOnda1 = 0;
volatile unsigned long tempoOnda2 = 0;

volatile unsigned long ultimaTransicaoOnda1 = 0;
volatile unsigned long ultimaTransicaoOnda2 = 0;

// Defina a frequência da onda (em Hz)
const float frequencia = 60.0; // 60 Hz
const float periodo = 1000000.0 / frequencia; // Período em
microssegundos

bool rele01Ativado = false; // Estado do relé 01
bool rele02Ativado = false; // Estado do relé 02

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    //definições de entradas e saídas
    pinMode(onda1Pin, INPUT);
    pinMode(onda2Pin, INPUT);
    pinMode(Rele01, OUTPUT);
    pinMode(Rele02, OUTPUT);

    //lógica inversa - HIGH - Desliga, LOW - Liga
    //Relês começando desligados.
    digitalWrite(Rele01, HIGH);
    digitalWrite(Rele02, HIGH);

```

```

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(onda1Pin),
detectarTransicaoOnda1, CHANGE);

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(onda2Pin),
detectarTransicaoOnda2, CHANGE);

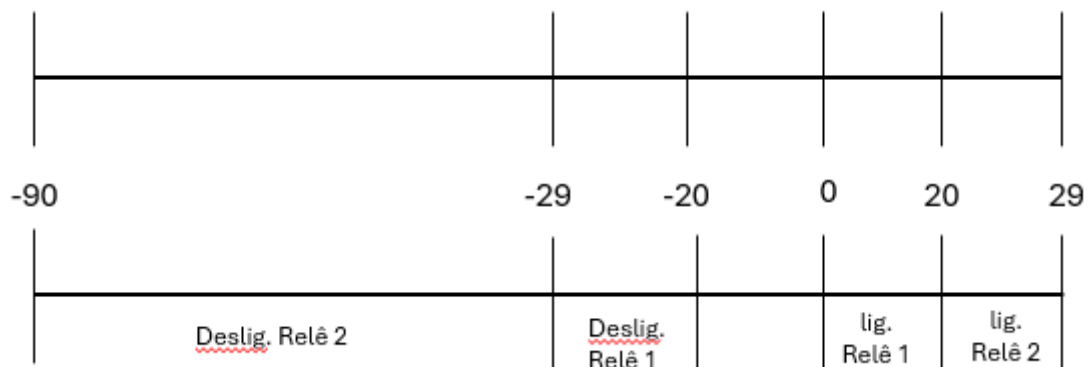
    tempoOnda1 = 0;
    tempoOnda2 = 0;
    ultimaTransicaoOnda1 = 0;
    ultimaTransicaoOnda2 = 0;

}

```

Para implementar uma correção automática neste projeto, foi necessário criar e utilizar parâmetros específicos e compreender o comportamento dos componentes, como transformadores e capacitores, ao serem acionados no sistema. Como mostrado na figura 34.

Figura 34 - Limites de comportamento



Fonte: (Autores)

Após a obtenção dos limites, a criação de uma tabela de funcionamento, para determinar os limites impostos pelo transformador e capacitor em forma de graus considerado como fator de potência, quando ambos são acionados, respectivamente na tabela, dito esta tabela é específica para detalhar o funcionamento físico do relé para o seu acionamento de acordo com a lógica imposta no script. Como mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Tabela de Acionamentos

Configuração de Acionamento	Bobina 1	Bobina 2	Capacitor 1	Capacitor 2	Cosseno Fi (Fator de Potência)
Caso 1	Ligado	Desligado	Desligado	Desligado	25,5°
Caso 2	Desligado	Ligado	Desligado	Desligado	30°
Caso 3	Ligado	Ligado	Desligado	Desligado	36°
Caso 4	Desligado	Desligado	Ligado	Desligado	-21°
Caso 5	Desligado	Desligado	Desligado	Ligado	-21°
Caso 6	Desligado	Desligado	Ligado	Ligado	-36°

Fonte: (Autores)

Com base nos valores obtidos durante o acionamento dos componentes e nas faixas configuradas para essa aplicação específica, a programação responsável pelo controle dos relés foi concluída.

```
void loop()
{
    if (tempoOnda1 > 0 && tempoOnda2 > 0) {
        long atraso = tempoOnda2 - tempoOnda1;

        Serial.print("Atraso entre as ondas: ");
        Serial.print(atraso);

        Serial.println(" microssegundos");
    }
}
```

```

// Converte o atraso em graus

float graus = (float)(atraso) / periodo * 360.0;

Serial.print("Atraso em graus: ");

Serial.println(graus);

if ( (graus > 26.0) && (graus < 29.0) ) {

    Serial.println(" 1 - Defasagem maior que 33 graus. Acionando o
relé 02 e mantendo o relé 01 ligado.");

    digitalWrite(Rele01, LOW); // Mantém o relé 01 ligado

    digitalWrite(Rele02, HIGH); // Liga o relé 02

    rele01Ativado = true;

    rele02Ativado = false;

}else if ( (graus > 29.0) && (graus <= 90.0) ) {

    Serial.println("2 -Defasagem maior que 23 graus. Acionando o
relé 01.");

    digitalWrite(Rele01, LOW); // Liga o relé 01

    digitalWrite(Rele02, LOW); // Liga o relé 02

    rele01Ativado = true;

    rele02Ativado = true;

} else if ( (graus <-19.0) && (graus >= -29.0) ) {

    Serial.println("3 -Defasagem maior que 23 graus. Acionando o
relé 01.");

    rele01Ativado = false;

    rele02Ativado = false;

    digitalWrite(Rele02, HIGH);

    digitalWrite(Rele01, HIGH);

    Serial.println("Rele 1 ou 2 esta ativado e o grau abaixo de 5
vou desligar pq nao tem mais o trasnformador ");

```

```

    } else if ( (graus < -29.0) && (graus > -90.0) ){

        Serial.println("4 -Defasagem maior que 23 graus. Acionando o
relé 01.");

        digitalWrite(Rele01, LOW);

        digitalWrite(Rele02, HIGH);

        rele01Ativado = false;

    }

    tempoOnda1 = 0;

    tempoOnda2 = 0;

}

delay(500);

}

void detectarTransicaoOnda1() {

    unsigned long tempoAtual = micros();

    if (digitalRead(onda1Pin) == HIGH) {

        tempoOnda1 = tempoAtual;

    }

    ultimaTransicaoOnda1 = tempoAtual;

}

void detectarTransicaoOnda2() {

    unsigned long tempoAtual = micros();

    if (digitalRead(onda2Pin) == HIGH) {

        tempoOnda2 = tempoAtual;

    }

    ultimaTransicaoOnda2 = tempoAtual;

}

```

O funcionamento do código que pode ser encontrado de forma completa no “Apêndice”. A programação completa se resume em realizar o monitoramento das ondas digitais de entrada no microcontrolador, sendo correspondentes a corrente e a tensão do sistema, capturando o tempo que cada uma está ativa.

Realizar o cálculo da defasagem entre os sinais, se o ângulo da defasagem calculado for menor que 0.92 os relés serão acionados para possivelmente realizar uma correção no projeto.

A aplicação desse tipo de código pode ser utilizada para sistema onde o controle e uma sincronização de sinais é crítica, como, sistemas de energia elétrica e automação industrial, demonstrando assim uma medição precisa em tempo real da defasagem e correções eficientes.

3.1.4 Correção no sistema

Umas das coisas mais importantes nos dias de hoje, quando falamos sobre automação é a possibilidade de controlar e acionar coisas de maneira automática.

Na percepção de (Sistema e tecnologia aplicada), uma das principais formas de realizar o controle de dispositivos utilizando o Arduino, em projetos que operam com tensões altas comparadas com a tensão do Arduino (5V). O Arduino, não pode realizar a manipulação de dispositivos como, lâmpadas, ventiladores, aquecedores e outros eletrodomésticos, por trabalharem em tensões significativamente alta comparada com ele.

Desse modo, a utilização de módulos de relés ajudará o Arduino, no acionamento de dispositivos desejados para controle.

3.1.4.1 Módulo de relé

O relé é um dispositivo que opera eletricamente como um interruptor que quando aplicado uma corrente em sua bobina ele realiza um campo eletromagnético fechando o contato de maneira automática.

O relé é um dispositivo que pode ser controlado por baixas tensões como 3.3V ou 5V (como mostra seu *datasheet* que se encontra no “Anexo B”). Quando ligado realiza a passagem de corrente no circuito podendo acionar o dispositivo desejado.

O módulo de relé pode possuir diversas formas e compor de diversos relés como desejado em módulo. Nesse projeto serão utilizados 2 módulos de relés de 2 canais, portanto, com 2 relés em cada um. A figura 35, mostrará o tipo de relé que será utilizado no projeto.

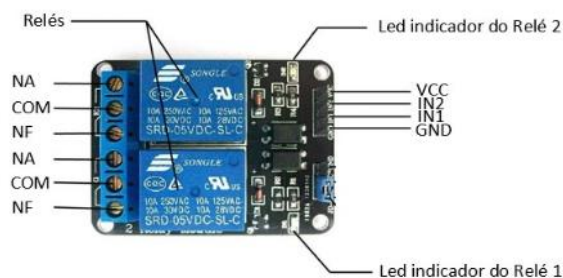
Figura 35 - Módulo de relé



Fonte: (Sistema e tecnologia aplicada, 2024).

O módulo de relé possui conexões de alimentação simples, que conta com pinos de VCC, GND e IN1 e IN2, que são as conexões acopladas no Arduino, e saídas referentes a conexões ligadas ao dispositivo desejado, como, normalmente aberto (NO) ou normalmente fechado (NC) dependendo da aplicação e o pino da bobina comum (COM). A figura 36, mostrará de maneira detalhada a descrição do módulo com suas conexões e componentes importantes.

Figura 36 - Descrição do Módulo



Fonte: (Sistema e tecnologia aplicada, 2024).

A partir de um conjunto do Arduino com os módulos de relés, a automação do projeto será realizada, o principal dispositivo a ser controlado será o banco de capacitores que atuam na rede como corretores da defasagem.

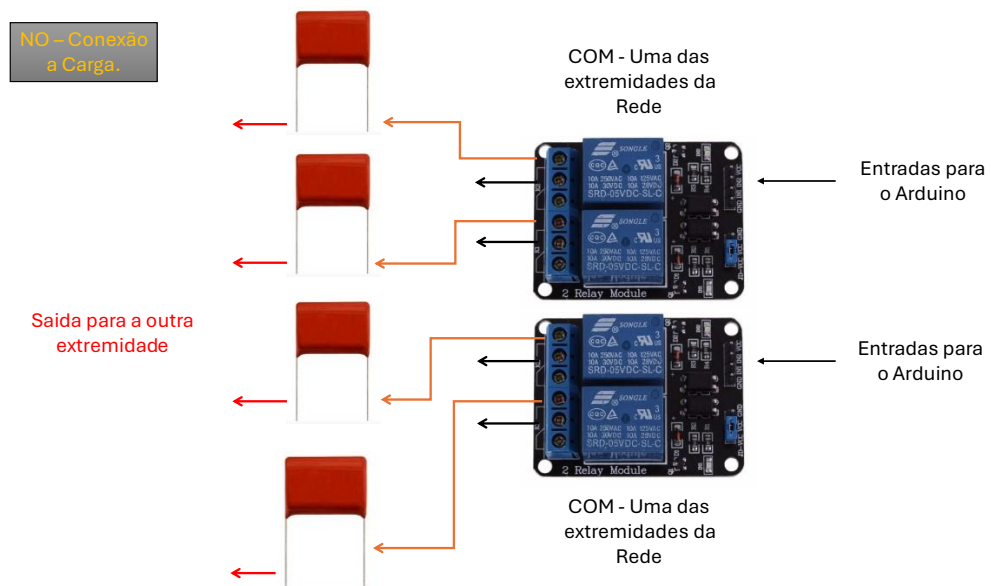
3.1.4.2 Banco de capacitores

Os capacitores serão os dispositivos que comparado com os transformadores serão os dispositivos que irão atrasar a defasagem, desse modo corrigindo a mesma.

O banco de capacitores será composto por quatro capacitores de poliéster de 2 μF 250 V, operando de forma individual. Cada capacitor será acionado por um relé e contará com seu próprio transformador para corrigir o avanço.

Através da programação o Arduino irá identificar a defasagem, e acionar os relés quando necessário, o relé fará o acionamento dos capacitores e como desejado ele fará a correção. Na figura 37, mostrará como será realizada a ligação dos relés aos capacitores.

Figura 37 - Ligação do banco de capacitores



Fonte: (Autores).

O módulo de relé atuará como um interruptor no circuito. Inicialmente, os capacitores permanecerão desligados, pois estarão conectados à saída normalmente aberta (NO) dos relés. O pino comum (COM) do relé será ligado a uma das extremidades do circuito principal, que neste caso corresponde ao circuito da rede elétrica onde será monitorada e medida a defasagem. A outra extremidade dos capacitores estará conectada à outra ponta do circuito principal. Quando o relé for acionado, os capacitores serão incluídos no circuito, efetuando a correção necessária.

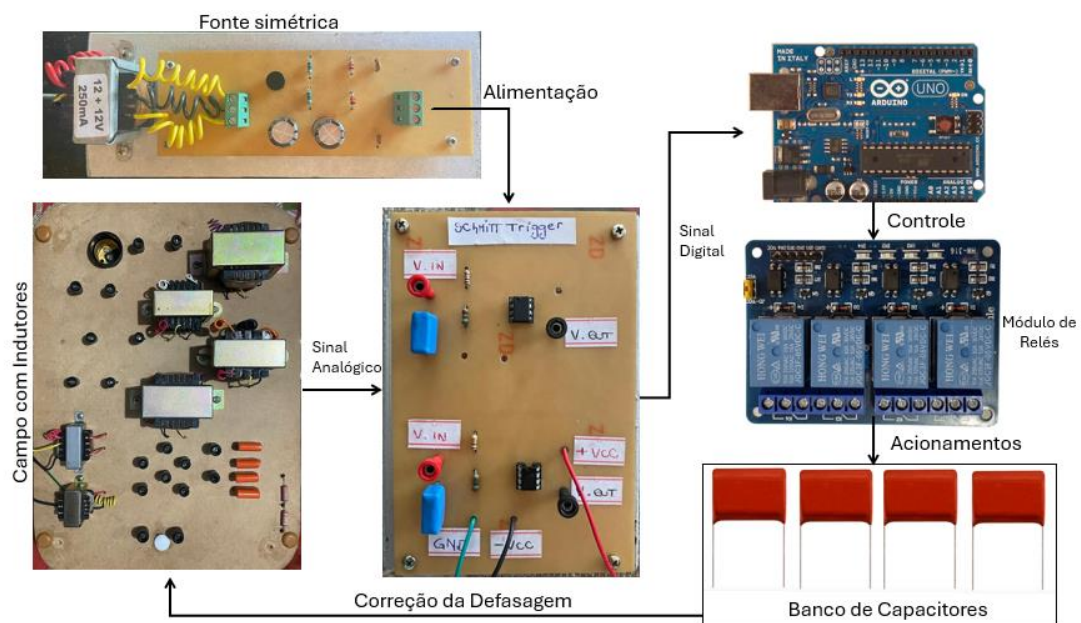
4 RESULTADOS E DISCUSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados alcançados a partir do desenvolvimento e implementação do hardware e software do projeto.

Os testes realizados foram altamente expressivos e didáticos, permitindo uma compreensão clara das funções individuais de cada componente e de como eles se conectam e se complementam dentro do sistema.

Os experimentos conduzidos no protótipo demonstraram resultados consistentes com as expectativas iniciais, abrangendo desde a introdução da defasagem na rede elétrica até sua correção. A Figura 38 ilustra o projeto inicial completo, com base na arquitetura apresentada na Figura 2.

Figura 38 - Projeto inicial completo

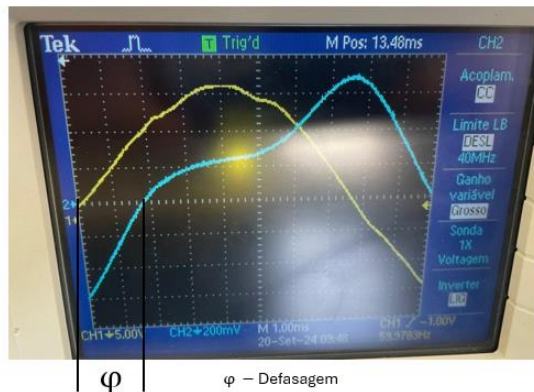


Fonte: (Autores).

O campo com os indutores realiza a introdução da defasagem na rede, a geração da defasagem é realizada de maneira manual, simulando a atuação de uma carga qualquer inserida na rede elétrica a qualquer momento, sendo um motor, reator ou até um transformador como utilizado.

A introdução da defasagem foi realizada e o monitoramento através de um instrumento como o osciloscópio torna visível essa irregularidade. A figura 39, mostrará o avanço da defasagem quando o transformador é acionado.

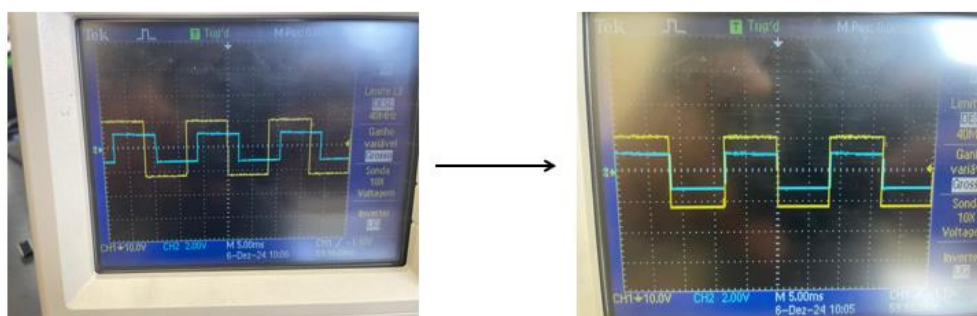
Figura 39 - Defasagem no sistema



Fonte: (Autores).

A fonte simétrica desempenha um papel fundamental no sistema, fornecendo energia para os Schmitt Triggers, responsáveis pela conversão de sinais que contribui para uma futura automação utilizando o microcontrolador Arduino. Por meio da programação, o Arduino monitora, identifica e controla os módulos de relés, que, por sua vez, acionam os capacitores de acordo com o grau de defasagem, garantindo a correção automática do sistema. A figura 40, mostrará a correção da defasagem desejada através do formato de onda.

Figura 40 - Testes finais



Sistema com defasagem –
Banco de capacitores
desligados

Sistema sem defasagem –
Banco de capacitores ligados

Fonte: (Autores).

4.1 Problemas e Correções

O projeto inicial desenvolvido apresentou alguns problemas de funcionamento, especialmente em dois pontos principais: no campo dos transformadores, onde será necessário implementar manualmente a defasagem, e no Schmitt Trigger, responsável pelas transformações dos sinais.

O primeiro problema está presente nos transformadores, que quando acionados no sistema, incrementam um tipo de ruído que posteriormente dificultará nas leituras de sinais e na própria automação. Na figura 41, mostrará o ruído presente na onda.

Figura 41 - Presença de ruído



Fonte: (Autores).

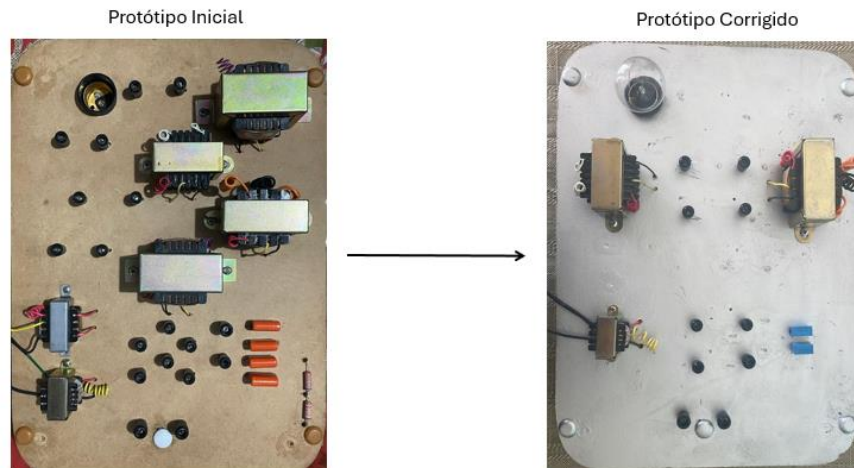
Um dos fatores que geraram o ruído no sistema é o fato de os transformadores estarem muito próximos uns dos outros, o que faz com que seus campos eletromagnéticos se sobreponham, gerando ruído e flutuação. Além disso, outro fator é o fato de alguns transformadores apresentarem pouco entreferro em seus núcleos.

Assim, diante dos problemas apresentados, decidimos retirar dois transformadores e posicioná-los de maneira que seus campos não se sobreponham, empregamos um transformador de 9 V e um transformador de corrente de 50 A (como mostra seu *datasheet* que se encontra no “Anexo D”). para realizar a redução da tensão e da corrente.

Dessa forma, ambos os parâmetros foram ajustados aos valores ideais para o funcionamento dos amplificadores, sem apresentar qualquer problema. Dessa forma, não haverá mais ruído nem flutuação no sistema.

Na figura 42, mostrará o protótipo corrigido, após o problema apresentado.

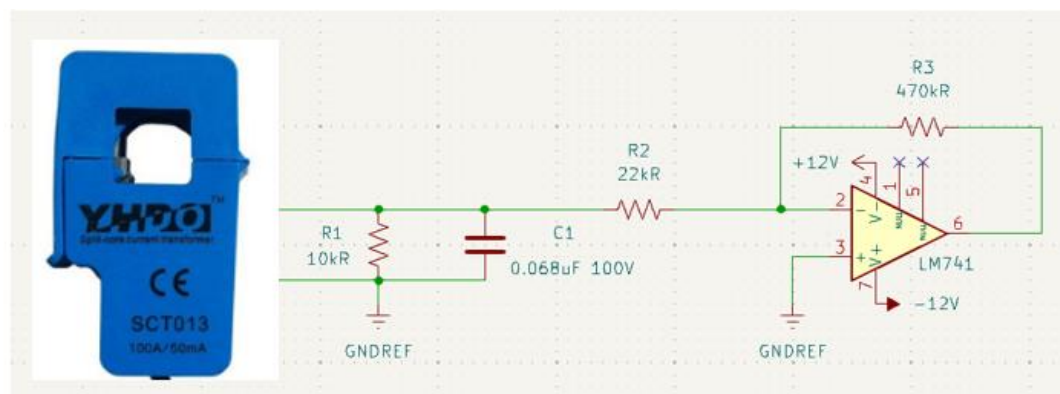
Figura 42 - Mudança nos indutores



Fonte: (Autores).

Após solucionarmos o problema do ruído no sistema, utilizamos um transformador de corrente que reduzirá a corrente para o circuito do Schmitt trigger. Contudo, a presença de um leve ruído foi apresentada, para resolver esse problema, desenvolvemos um circuito auxiliar como filtro que eliminou o mesmo, permitindo que a onda senoidal de corrente fosse encaminhada para o circuito do Schmitt trigger e convertida de maneira limpa.

Figura 43 - Esquemático do filtro auxiliar

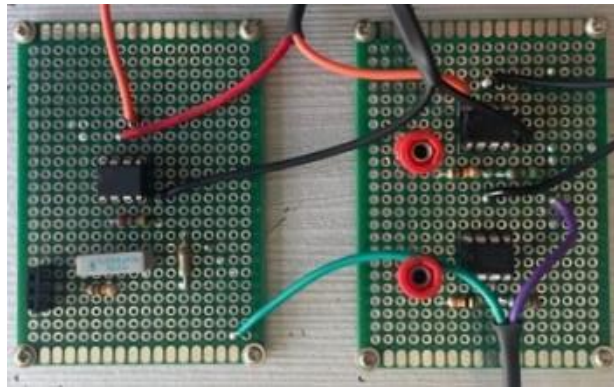


Fonte: (Autores)

O segundo problema principal está relacionado ao Schmitt Trigger desenvolvido inicialmente, cuja confecção da placa de circuito impresso resultou em mau contato nas trilhas e nas conexões dos componentes.

Dessa forma, decidimos desenvolver o circuito de filtro auxiliar e um novo circuito Schmitt Trigger em placas de circuito impresso feita com fibra de vidro já ilhada. Essa abordagem permitiu uma montagem mais simplificada e ágil, eliminando a necessidade de layouts complexos ou de corrosão futura. A figura 44 apresenta os novos aspectos dos circuitos atualizados respectivamente.

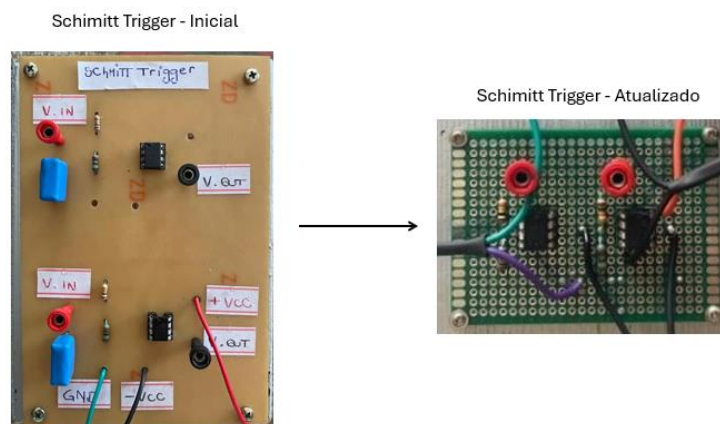
Figura 44 - Circuitos atualizados



Fonte: (Autores)

A figura 44 ilustra a atualização do circuito Schmitt Trigger, que foi aprimorado para eliminar completamente quaisquer problemas de mau contato ou conexões inadequadas dos componentes na placa. Na figura 45, mostrará a comparação de Schmitt Trigger inicial para o atual com as atualizações desejadas.

Figura 45 - Aspecto final do Schmitt Trigger

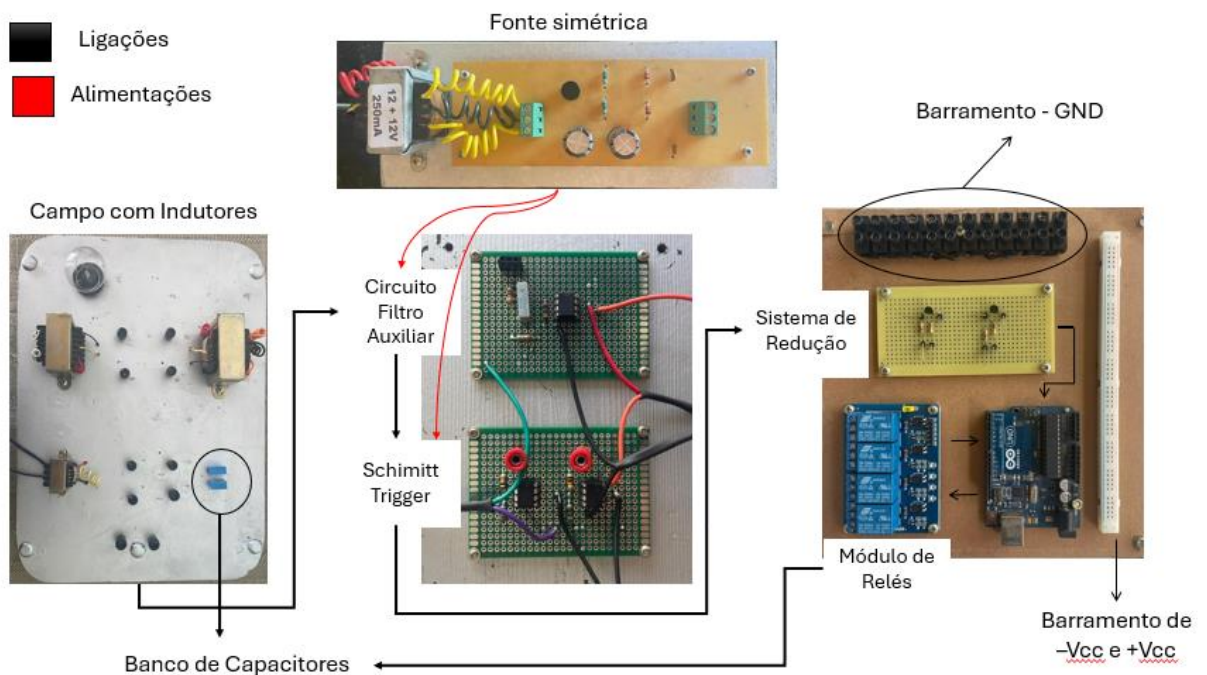


Fonte: (Autores).

Após a implementação de todas as correções e atualizações necessárias no projeto, foi realizada a montagem completa e revisada de todos os dispositivos e equipamentos. Essa nova montagem considerou as melhorias aplicadas aos circuitos, como a eliminação de ruídos, o aprimoramento das conexões e a utilização de placas de circuito impresso mais eficientes, garantindo maior confiabilidade e funcionalidade ao sistema.

A figura 46 apresenta o projeto final completo, com todos os dispositivos e equipamentos revisados e atualizados. Essa versão final é comparada ao projeto inicial, mostrado na figura 38, destacando as melhorias implementadas ao longo do processo.

Figura 46 - Projeto final completo



Fonte: (Autores)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo aborda as considerações finais sobre os resultados alcançados, bem como propõe sugestões para possíveis aprimoramentos e direções futuras relacionadas ao projeto.

5.1 Conclusão

O projeto foi separado em 4 formas principais, a introdução da discrepância, transformações de sinais necessários, automação com a utilização de microcontroladores e a correção com a implementação dos capacitores.

A criação da defasagem através dos indutores foi a principal ferramenta, pois foi em cima dela que o projeto foi desenvolvido.

As transformações de sinais facilitaram a automação, permitiu realizar cálculos e monitoramentos de maneira mais eficiente e simplificada.

O diferencial do projeto foi a parte automática, que identificou, calculou e controlou os dispositivos necessários para a correção.

A correção desse problema foi realizada por meio dos capacitores, que, conectados aos módulos de relés, geraram um efeito oposto ao dos transformadores. Em vez de avançar o sinal, os capacitores o atrasaram, promovendo assim a correção da defasagem.

Após os problemas apresentados no sistema, como o ruído, flutuações, mau contato, alta tensão e corrente, e após as análises realizadas para o desenvolvimento de circuitos com o objetivo de solucioná-los, pode-se concluir que, após essa demanda de problemas, foi possível realizar os testes conforme o projeto foi idealizado.

Portanto, a integração de todos os componentes no projeto torna possível a correção da defasagem, proporcionando aos consumidores e à concessionária de energia maior confiança e segurança no uso da rede elétrica, além de prevenir multas e problemas mais graves.

5.2 Trabalhos Futuros

- Aprimoramento no sistema de controle:

Aplicação de um microcontrolador mais avançado que o próprio Arduino, melhorando o controle, ajustando com maior precisão e velocidade na correção da defasagem.
- Monitoramento remoto:

Adicionar conectividade via Wi-Fi ou *bluetooth*, para permitir o monitoramento e controle remoto dos dispositivos. Optar pela criação de um aplicativo que exiba a informações em tempo real como, defasagem medida, ações de correção e desempenho geral do sistema.
- Expansão do Projeto:

Investigar o uso de componentes mais eficientes, como bancos de capacitores industriais, que oferecem maior durabilidade, eficiência e capacidade de operação em condições extremas. Implementar relés industriais para suportar tensões e correntes mais elevadas, garantindo maior confiabilidade, vida útil e segurança ao sistema. Dessa forma, o sistema não apenas aprimora sua capacidade de correção, mas também se torna apto a operar com cargas indutivas de maior porte, como motores trifásicos.

REFERÊNCIAS

- [1] BOYLESTAD, Robert. Introdução à análise de circuitos. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2011.
- [2] MAMEDE, J. Instalações Elétricas Industriais. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2007
- [3] DA SILVA, José Ivan Valentim. LIMA, **José Luiz Sousa. Simulação de um sistema automático de correção do fator de potência, microcontrolado pela plataforma Arduino. 2018.** Bacharelado em Ciência e Tecnologia. Universidade Federal Rural do Semiárido Rio Grande do Norte, 2018
- [4] WEG ACIONAMENTOS. Manual para correção do fator de potência. **WEG Transformando Energia em Solução**, Jaraguá do Sul, p. 5 – 6.
- [5] MATTEDE, Henrique. **Triângulo das potências**. Mundo da elétrica, 2016. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/formulas-de-potencia-quais-sao/#bio>, Acesso em: 30 maio 2024.
- [6] SOUZA, Teófilo M. de and BIANCHI, Inácio. Software para dimensionamento de bancos de capacitores para correção do fator de potência. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200057&lng=en&nrm=abn, Acesso em: 27 maio 2024.
- [7] BRAGA, Newton C. **Fator de Potência: a necessidade da correção**. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/819-fator-de-potenciaa-necessidade-da-correcao-art111.html>, Acesso em: 31 maio 2024.
- [8] SIEMENS. Conceitos e definições para correção do fator de potência através de carga capacitiva. P. 1 – 14, 2002.
- [9] TECHTUDO. **Entenda a diferença entre sinal analógico e digital**. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/2023/02/entenda-a-diferenca-entre-sinal-analogico-e-digital-edinfoeletro.ghtml>, Acesso em: 5 novembro 2024.
- [10] LIOHN Sensores. **Sinal analógico x Sinal digital – O que é? Vantagens e Desvantagens**. Disponível em: <https://www.liohm.com/br/noticia/sinais-analogicos-x-sinais-digitais-vantagens-e-desvantagens/>, Acesso em: 5 novembro 2024.
- [11] CIRIANO, Douglas. **Qual a diferença entre o sinal analógico e o digital?**. Disponível em: <https://canaltech.com.br/curiosidades/qual-a-diferenca-entre-o-sinal-analogico-e-o-digital-65147/>, Acesso em: 7 novembro 2024.
- [12] NEWTON C. Braga. **Projetos de fonte simétrica**. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/projetos/570-projetos-de-fontes-simetricas-art052.html>, Acesso em: 9 novembro 2024.

- [13] LIMA, Alex. **Como fazer uma fonte simétrica**. Disponível em: <https://blog.cursoelettricaecia.com.br/como-fazer-uma-fonte-simetrica-12v-gnd-12v-circuito-simples/>, Acesso em: 9 novembro 2024.
- [14] ZUIM, Edgar. Filtros Capacitivos, Cálculos e Análise da tensão de ripple. **Circuito de filtro capacitivo**, p. 1 – 12, 2024.
- [15] CAMPELLO, Sergio. **Tutorial para confecção de placas de circuito impresso**. Disponível em: https://b77a0b1d-68d5-46dd-a11a-f8d0a486e17a.filesusr.com/ugd/ddaddf_047c3f93d039476e81c91ccf084eb8b4.pdf, Acesso em: 10 novembro 2024.
- [16] DEJAN. **What is Schmitt Trigger – How it works**. Disponível em: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/schmitt-trigger/>, Acesso em: 12 novembro 2024.
- [17] ALVES, Pedro. **Amplificadores Operacionais**. Disponível em: <https://www.manualdaeletronica.com.br/amplificador-operacional-o-que-e-funcionamento-aplicacoes/>, Acesso em: 13 novembro 2024.
- [18] BARELLA, Flavio Augusto; PUGLIA, Luiz Vasco. Analógica 2. **Nota de aula de eletrônica analógica 2**, Santo André, p. 22 – 24, 2013.
- [19] STA. **Como utilizar módulo de relé com Arduino**. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/arduinos/como-utilizar-o-modulo-rele-com-arduino>, Acesso em: 16 novembro 2024.

APÊNDICE – CÓDIGO COMPLETO DA AUTOMAÇÃO

```
const int onda1Pin = 2;
const int onda2Pin = 3;

//pino para controlar os relés
#define Rele01 4
#define Rele02 5

volatile unsigned long tempoOnda1 = 0;
volatile unsigned long tempoOnda2 = 0;

volatile unsigned long ultimaTransicaoOnda1 = 0;
volatile unsigned long ultimaTransicaoOnda2 = 0;

// Defina a frequência da onda (em Hz)
const float frequencia = 60.0; // 60 Hz
const float periodo = 1000000.0 / frequencia; // Período em
microsegundos

bool rele01Ativado = false; // Estado do relé 01
bool rele02Ativado = false; // Estado do relé 02

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    //definições de entradas e saídas
    pinMode(onda1Pin, INPUT);
    pinMode(onda2Pin, INPUT);
    pinMode(Rele01, OUTPUT);
    pinMode(Rele02, OUTPUT);

    //lógica inversa - HIGH - Desliga, LOW - Liga
    //Relês começando desligados.
```

```

digitalWrite(Rele01, HIGH);
digitalWrite(Rele02, HIGH);

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(onda1Pin),
detectarTransicaoOnda1, CHANGE);

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(onda2Pin),
detectarTransicaoOnda2, CHANGE);

tempoOnda1 = 0;
tempoOnda2 = 0;
ultimaTransicaoOnda1 = 0;
ultimaTransicaoOnda2 = 0;

}

void loop()
{
  if (tempoOnda1 > 0 && tempoOnda2 > 0) {
    long atraso = tempoOnda2 - tempoOnda1;

    Serial.print("Atraso entre as ondas: ");
    Serial.print(atraso);
    Serial.println(" microssegundos");

    // Converte o atraso em graus
    float graus = (float)(atraso) / periodo * 360.0;

    Serial.print("Atraso em graus: ");
    Serial.println(graus);
    if ( (graus > 26.0) && (graus < 29.0) ) {
      Serial.println(" 1 - Defasagem maior que 33 graus. Acionando o
relé 02 e mantendo o relé 01 ligado.");
      digitalWrite(Rele01, LOW); // Mantém o relé 01 ligado
      digitalWrite(Rele02, HIGH); // Liga o relé 02
    }
  }
}

```

```

        rele01Ativado = true;
        rele02Ativado = false;
    }else if ( ( graus > 29.0 ) && ( graus <= 90.0 ) ) {
        Serial.println("2 -Defasagem maior que 23 graus. Acionando o
        relé 01.");
        digitalWrite(Rele01, LOW); // Liga o relé 01
        digitalWrite(Rele02, LOW); // Liga o relé 02
        rele01Ativado = true;
        rele02Ativado = true;
    } else if ( (graus <-19.0) && (graus >= -29.0) ) {
        Serial.println("3 -Defasagem maior que 23 graus. Acionando o
        relé 01.");
        rele01Ativado = false;
        rele02Ativado = false;
        digitalWrite(Rele02, HIGH);
        digitalWrite(Rele01, HIGH);
        Serial.println("Rele 1 ou 2 esta ativado e o grau abaixo de 5
        vou desligar pq nao tem mais o trasformador ");
    } else if ( (graus <-29.0) && (graus > -90.0) ){
        Serial.println("4 -Defasagem maior que 23 graus. Acionando o
        relé 01.");
        digitalWrite(Rele01, LOW);
        digitalWrite(Rele02, HIGH);
        rele01Ativado = false;
    }
    tempoOnda1 = 0;
    tempoOnda2 = 0;
}
delay(500);
}

void detectarTransicaoOnda1() {
    unsigned long tempoAtual = micros();
    if (digitalRead(onda1Pin) == HIGH) {

```

```
        tempoOnda1 = tempoAtual;
    }
    ultimaTransicaoOnda1 = tempoAtual;
}

void detectarTransicaoOnda2() {
    unsigned long tempoAtual = micros();
    if (digitalRead(onda2Pin) == HIGH) {
        tempoOnda2 = tempoAtual;
    }
    ultimaTransicaoOnda2 = tempoAtual;
}
```

ANEXO A – DATASHEET LM741

LM741

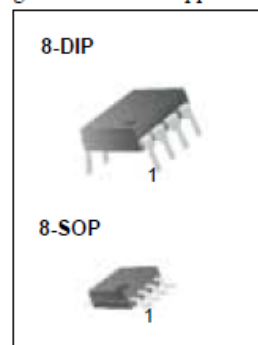
Single Operational Amplifier

Features

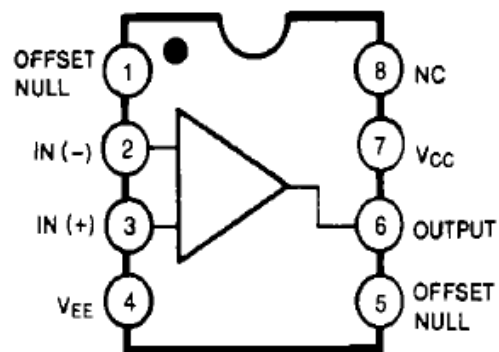
- Short circuit protection
- Excellent temperature stability
- Internal frequency compensation
- High Input voltage range
- Null of offset

Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers. It is intended for a wide range of analog applications. The high gain and wide range of operating voltage provide superior performance in integrator, summing amplifier, and general feedback applications.



Internal Block Diagram



Absolute Maximum Ratings (T_A = 25°C)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V _{CC}	±18	V
Differential Input Voltage	V _{I(DIFF)}	30	V
Input Voltage	V _I	±15	V
Output Short Circuit Duration	-	Indefinite	-
Power Dissipation	P _D	500	mW
Operating Temperature Range LM741C LM741I	TOPR	0 ~ + 70 -40 ~ +85	°C
Storage Temperature Range	T _{STG}	-65 ~ + 150	°C

Electrical Characteristics

(V_{CC} = 15V, V_{EE} = - 15V, T_A = 25 °C, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	LM741C/LM741I			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V _{IO}	R _S ≤ 10KΩ	-	2.0	6.0	mV
		R _S ≤ 50Ω	-	-	-	
Input Offset Voltage Adjustment Range	V _{IO(R)}	V _{CC} = ±20V	-	±15	-	mV
Input Offset Current	I _{IO}	-	-	20	200	nA
Input Bias Current	I _{BIAS}	-	-	80	500	nA
Input Resistance (Note1)	R _I	V _{CC} = ±20V	0.3	2.0	-	MΩ
Input Voltage Range	V _{I(R)}	-	±12	±13	-	V
Large Signal Voltage Gain	G _V	R _L ≥ 2KΩ V _{CC} = ±20V, V _{O(P-P)} = ±15V	-	-	-	V/mV
			20	200	-	
Output Short Circuit Current	I _{SC}	-	-	25	-	mA
Output Voltage Swing	V _{O(P-P)}	V _{CC} = ±20V R _L ≥ 10KΩ	-	-	-	V
		R _L ≥ 2KΩ	-	-	-	
		V _{CC} = ±15V R _L ≥ 10KΩ	±12	±14	-	
		R _L ≥ 2KΩ	±10	±13	-	
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	R _S ≤ 10KΩ, V _{CM} = ±12V	70	90	-	dB
		R _S ≤ 50Ω, V _{CM} = ±12V	-	-	-	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	V _{CC} = ±15V to V _{CC} = ±15V R _S ≤ 50Ω	-	-	-	dB
		V _{CC} = ±15V to V _{CC} = ±15V R _S ≤ 10KΩ	77	96	-	
Transient Response	Rise Time	Unity Gain	-	0.3	-	μs
	Overshoot		-	10	-	%
Bandwidth	BW	-	-	-	-	MHz
Slew Rate	SR	Unity Gain	-	0.5	-	V/μs
Supply Current	I _{CC}	R _L = ∞Ω	-	1.5	2.8	mA
Power Consumption	P _C	V _{CC} = ±20V	-	-	-	mW
		V _{CC} = ±15V	-	50	85	

Electrical Characteristics

($0^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 70^{\circ}\text{C}$ $V_{CC} = \pm 15\text{V}$, unless otherwise specified)

The following specification apply over the range of $0^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +70^{\circ}\text{C}$ for the LM741C; and the $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +85^{\circ}\text{C}$ for the LM741I

Parameter	Symbol	Conditions	LM741C/LM741I			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V_{IO}	$R_S \leq 50\Omega$	-	-	-	mV
		$R_S \leq 10\text{K}\Omega$	-	-	7.5	
Input Offset Voltage Drift	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	-	-	-	-	$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Input Offset Current	I_{IO}	-	-	-	300	nA
Input Offset Current Drift	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	-	-	-	-	$\text{nA}/^{\circ}\text{C}$
Input Bias Current	I_{BIAS}	-	-	-	0.8	μA
Input Resistance (Note1)	R_i	$V_{CC} = \pm 20\text{V}$	-	-	-	$\text{M}\Omega$
Input Voltage Range	$V_{I(R)}$	-	± 12	± 13	-	V
Output Voltage Swing	$V_{O(P-P)}$	$V_{CC} = \pm 20\text{V}$	$R_S \geq 10\text{K}\Omega$	-	-	V
			$R_S \geq 2\text{K}\Omega$	-	-	
		$V_{CC} = \pm 15\text{V}$	$R_S \geq 10\text{K}\Omega$	± 12	± 14	
			$R_S \geq 2\text{K}\Omega$	± 10	± 13	
Output Short Circuit Current	I_{SC}	-	10	-	40	mA
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	$R_S \leq 10\text{K}\Omega$, $V_{CM} = \pm 12\text{V}$	70	90	-	dB
		$R_S \leq 50\Omega$, $V_{CM} = \pm 12\text{V}$	-	-	-	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_{CC} = \pm 20\text{V}$ to $\pm 5\text{V}$	$R_S \leq 50\Omega$	-	-	dB
			$R_S \leq 10\text{K}\Omega$	77	96	
Large Signal Voltage Gain	G_V	$R_S \geq 2\text{K}\Omega$	$V_{CC} = \pm 20\text{V}$, $V_{O(P-P)} = \pm 15\text{V}$	-	-	V/mV
			$V_{CC} = \pm 15\text{V}$, $V_{O(P-P)} = \pm 10\text{V}$	15	-	
			$V_{CC} = \pm 15\text{V}$, $V_{O(P-P)} = \pm 2\text{V}$	-	-	
				-	-	

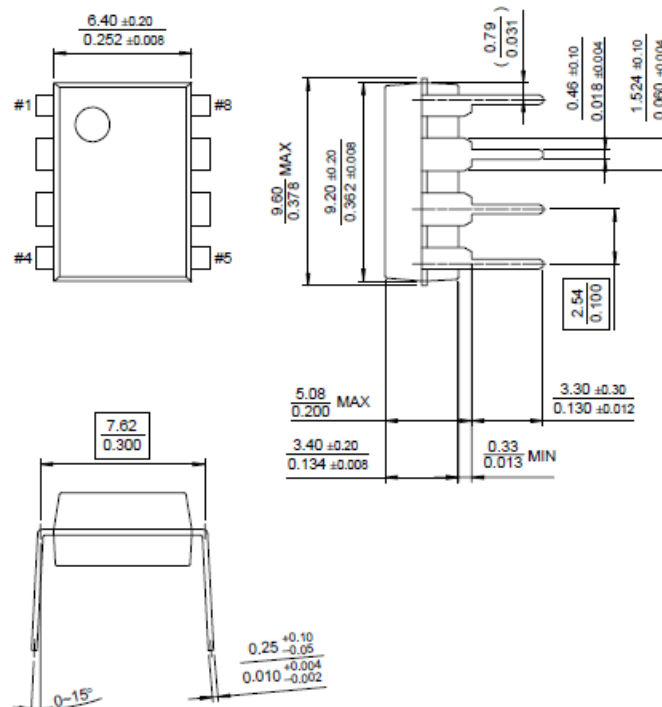
Note :

1. Guaranteed by design.

Mechanical Dimensions

Package

8-DIP



ANEXO B – DATASHEET DO MÓDULO DE RELÉ

PRODUCT SPECIFICATION

PCB JQC-T73

- 10A switching capability
- Small footprint
- Sealed type available
- Class B/F available
- Conform to RoHS,ELV directive
- Size : 19.2X15.4X15.4mm



ORDERING CODE

JQC - 3FF - S - H	
1	2 3
1. Relay Model JQC-T73 2. S: sealed	3. Z: Form C H: Form A D: Form B

COIL DATA (at 20 °C)

Nominal Voltage (VDC)	3	5	6	9	12	18	24	48	0.36W
Coil Resistance (Ω±10%)	25	69	100	225	400	900	1600	6400	
Rated Current (mA)	120	71.4	60	40	30	20	15	7.5	
Max Operate Voltage (VDC)	2.25	3.75	4.5	6.75	9	13.5	18	36	
Min Release Voltage (VDC)	0.15	0.25	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	2.4	
Max ApplicableVoltage	130% of nominal voltage at 70 °C				170% of nominal voltage at 23 °C				

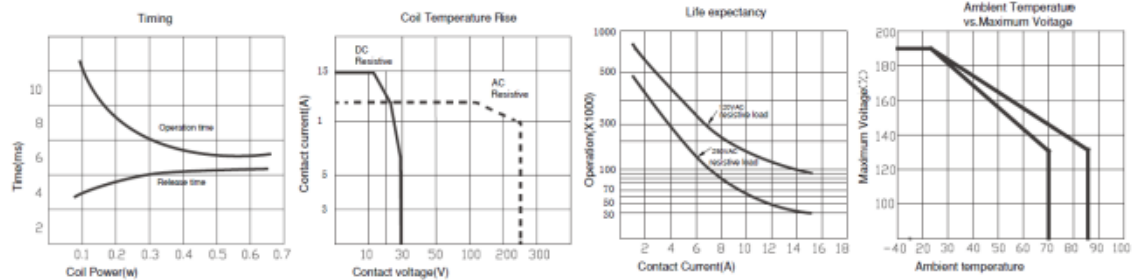
CONTACT DATA

Contact Form	1H/1Z
Contact Material	Silver Alloy
Load	Resistive load (COS Φ = 1)
Contact Ratings	10A 250vac 15A 125vac 10A 28vdc
Minimum load	100mA 5VDC
Max Switching Voltage	250VAC/30VDC
Max Switching Current	15A
Max Switching Power	2770VA/240W
Contact Resistance	100m Ω Max at 6VDC 1A
Life Expectancy	Electrical : 100,000 Operations(at30Operations/minute)
	Mechanical : 10,000,000 Operations(at300Operations/minute)

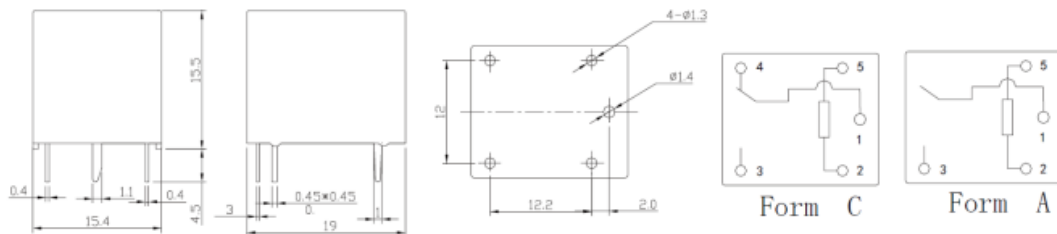
CHARACTERISTICS DATA

Insulation Resistance	100M Ω Min at 500VDC
Dielectric Strength Between Open Contacts	750VAC(50/60Hz for one minute)
Between Contacts and coil	1500VAC(50/60Hz for one minute)
Operate Time	10ms
Release Time	5ms
Temperature Range	-40 °C to +85 °C
Shock Resistance	Operating Extremes: 10G
	Damage Limits: 100G
Vibration Resistance	10-55Hz, 1.5mm
Max. switching frequency	Mechanical: 18,000 operations/hr
	Electrical: 1,800 operations/hr
Humidity	40-85%
Weight	Approx 10g
Safety Standard	CQC UL SGS TUV

ENGINEERING DATA



OVERALL AND MOUNTING DIMENSIONS

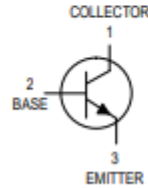


ANEXO C - DATASHEET DO TRANSISTOR BC337

MOTOROLA SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by BC337/D

Amplifier Transistors NPN Silicon



BC337,-16,-25,-40
BC338,-16,-25,-40



CASE 29-04, STYLE 17
TO-92 (TO-226AA)

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	BC337	BC338	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CE0}	45	25	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	50	30	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	5.0		Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	800		mA dc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625	5.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.5	12	Watt mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150		$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C/W}$

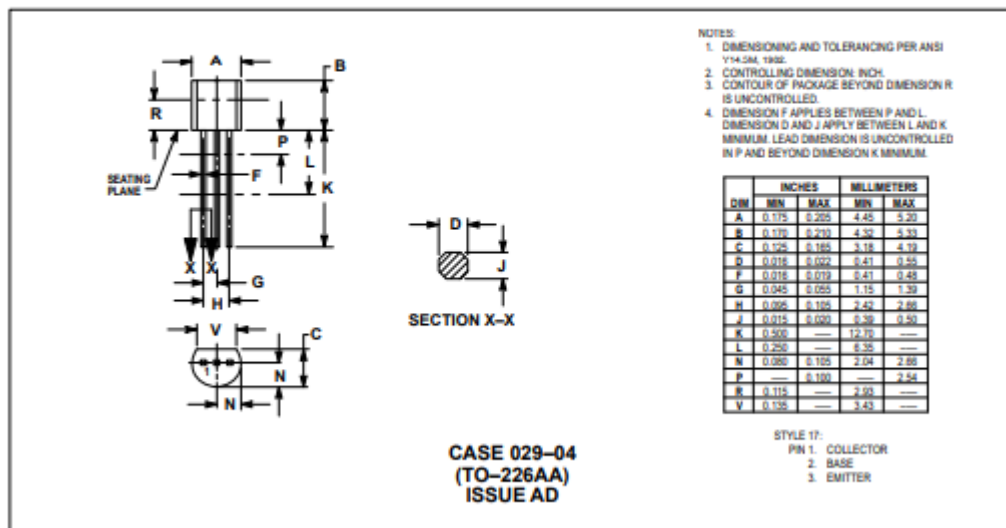
ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 10\text{ mA}$, $I_B = 0$)	$V_{(BR)CEO}$	45 25	— —	— —	Vdc
Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 100\text{ }\mu\text{A}$, $I_E = 0$)	$V_{(BR)CES}$	50 30	— —	— —	Vdc
Emitter-Base Breakdown Voltage ($I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$, $I_C = 0$)	$V_{(BR)EBO}$	5.0	—	—	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CB} = 30\text{ V}$, $I_E = 0$) ($V_{CB} = 20\text{ V}$, $I_E = 0$)	I_{CBO}	— —	— —	100 100	nAdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 45\text{ V}$, $V_{BE} = 0$) ($V_{CE} = 25\text{ V}$, $V_{BE} = 0$)	I_{CES}	— —	— —	100 100	nAdc
Emitter Cutoff Current ($V_{EB} = 4.0\text{ V}$, $I_C = 0$)	I_{EBO}	—	—	100	nAdc



BC337,-16,-25,-40 BC338,-16,-25,-40**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ON CHARACTERISTICS					
DC Current Gain ($I_C = 100\text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0\text{ V}$) BC337/BC338 BC337-16/BC338-16 BC337-25/BC338-25 BC337-40/BC338-40 ($I_C = 300\text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0\text{ V}$)	h_{FE}	100 100 160 250 60	— — — — —	630 250 400 630 —	—
Base-Emitter On Voltage ($I_C = 300\text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0\text{ V}$)	$V_{BE(on)}$	—	—	1.2	Vdc
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 500\text{ mA}$, $I_B = 50\text{ mA}$)	$V_{CE(sat)}$	—	—	0.7	Vdc
SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS					
Output Capacitance ($V_{CB} = 10\text{ V}$, $I_E = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	C_{ob}	—	15	—	pF
Current-Gain — Bandwidth Product ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0\text{ V}$, $f = 100\text{ MHz}$)	f_T	—	210	—	MHz

BC337,-16,-25,-40 BC338,-16,-25,-40**PACKAGE DIMENSIONS**

ANEXO D – DATASHEET DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

SCT-013

Split core current transformer

YHDC[®]

Model: SCT-013

Rated input current: 5A/100A

Characteristics: Opening size: 13mm*13mm,

Non-linearity $\pm 3\%$ (10%—120% of rated input current)

1m leading wire, standard $\Phi 3.5$ three core plug output.

Current output type and voltage output type (voltage output type built-in sampling resistor)

Purpose: Used for current measurement, monitor and protection for AC motor, lighting equipment, air compressor etc

Core material: ferrite

Mechanical strength: the number of switching is not less than 1000 times(test at 25°C)

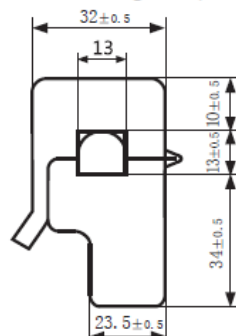
Safety index: Dielectric strength(between shell and output)1000V AC/1min

Fire resistance property: In accordance with UL94-Vo

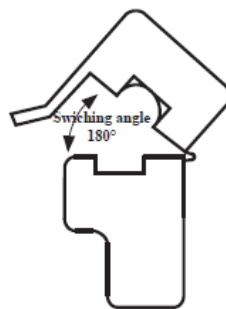
Work temperature: -25°C~+70°C



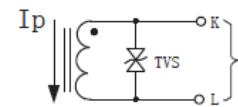
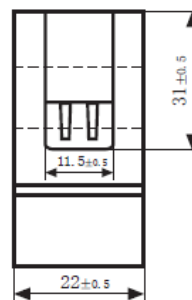
Outline size diagram: (in mm)



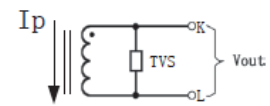
Front View



Side View



Current output type



Voltage output type

Schematic diagram

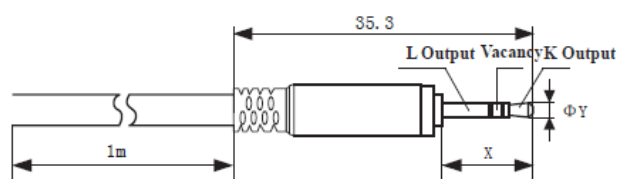


Diagram for standard three-core plug

Three-core plug size

	X	Y	
2.5mm Audio Plug	11.9	2.5	Optional
3.5mm Audio Plug	15.0	3.5	standard

Table of technical parameter:

Model	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
Input current	0-100A	0-5A	0-10A	0-15A	0-20A
Output type	0-50mA	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V
Model	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-000V
Input current	0-25A	0-30A	0-50A	0-60A	0-100A
Output type	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V

※ Output type: voltage output type built-in sampling resistor, current output type built-in protective diode.

Tel: 86-13933609279

Fax: 86-7929499-804 skype:macymeng1

Web (China): www.yhdc.com Web (Latvia): www.yhdc.lv