

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LAURA STEFANINI PEREIRA

**PROJETO DE MALA DE TESTES MONOFÁSICA PARA ENSAIOS NOS RELÉS
SEL-751A E SEL-451**

**ILHA SOLTEIRA
2023**

LAURA STEFANINI PEREIRA

**PROJETO DE MALA DE TESTES MONOFÁSICA PARA ENSAIOS NOS RELÉS
SEL-751A E SEL-451**

Trabalho de Graduação apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” como requisito para
conclusão do curso de graduação em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Marcos de Souza
Ribeiro

ILHA SOLTEIRA

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P436p Pereira, Laura Stefanini.
Projeto de mala de testes monofásica para ensaios nos relés SEL-751a e SEL-451 / Laura Stefanini Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
65 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Jean Marcos de Souza Ribeiro

Inclui bibliografia

1. Proteção de sistemas elétricos. 2. Automação. 3. Mala de testes. 4.
Subestações.

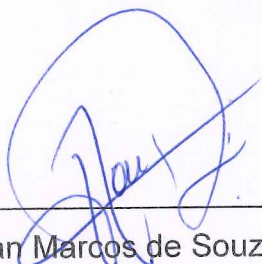


Amanda Sertori dos Santos

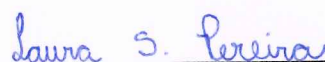
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos trinta dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e três, a discente **Laura Stefanini Pereira**, matriculada sob o nº 182053946, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro, o Doutorando Rodrigo Serra Daltin e o Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Projeto de mala de teste monofásica para ensaios nos reles SEL-751A e SEL-451", obtendo a nota 10 (DEZ) e conceito aprovada.



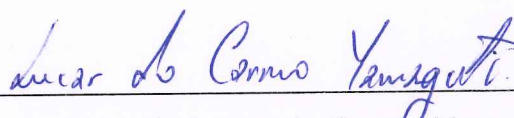
Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- orientador -



Laura Stefanini Pereira
- discente -



Doutorando Rodrigo Serra Daltin
- Membro da Banca -



Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti
- Membro da Banca -

Aos meus pais, Rozinei e Alcir, pelo apoio incondicional e aos bons amigos que me acompanharam nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Rozinei, por guiar meus caminhos, confiar nos meus sonhos e lutar por eles junto comigo desde os primeiros dias, por ser minha inspiração de força e mulher. E ao meu pai, Alcir, por incentivar minha educação e mostrar que o conhecimento é a coisa mais valiosa que podemos conquistar, essa conquista também é de vocês.

Aos meus colegas de turma e grandes amigos, Pedro, Tarcísio, Heitor e André, que foram minha alegria e meu alicerce durante essa jornada, agradeço pela companhia nessa caminhada, por todas as histórias compartilhadas e pelos dias lindos e difíceis que passamos juntos. Foi graças ao amor e parceria de vocês que eu cheguei até aqui.

Às meninas que tornaram nossa república uma família, me acolheram e apoiaram durante esses anos, das quais cito Beatriz, Thais, Ana Luiza, Isabela, Amanda, Nicole, Lilybeth e todas aquelas que já dividiram ou ainda dividirão este lar.

Ao meu orientador, professor Jean, por quem sinto grande admiração e que me inspirou desde a primeira aula. Por ser esse docente brilhante e dedicado e por sempre estar disposto a transmitir seus conhecimentos, independente das adversidades.

E à Lucas, pelo carinho, apoio, confiança, e toda a contribuição para com este trabalho. Agradeço por ter sido minha calma nos dias de tempestade.

“O conhecimento nos faz responsáveis”.

Che Guevara

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de uma mala de testes monofásica, com fonte de tensão e corrente alternadas e controladas, com variação de amplitude escolhida para teste das funções de proteção dos relés digitais dos modelos SEL-751A e SEL-451. O circuito de fonte de tensão é dado por um autotransformador variável “Variac”, e o circuito fonte de corrente é dado por um conversor CC/CA com estrutura em ponte completa, controlado por um sinal modulado em largura de pulso, gerado pelo microcontrolador Arduino UNO. Neste trabalho é proposto o circuito de comando e de força, com medição da corrente de saída do circuito, bem como medição do tempo de atuação da função de proteção do relé digital. Os resultados mostram que o controle do conversor por MLP realizado pelo Arduino UNO é eficiente para a faixa de variação de corrente desejada.

ABSTRACT

This work presents the project of a single-phase test case, with an alternating and controlled voltage and current source, with amplitude variation chosen for testing the protection functions of the digital relays of the SEL-751A and SEL-451 models. The voltage source circuit is given by a “Variac” variable autotransformer, and the current source circuit is given by a DC/AC converter with full bridge structure, controlled by a pulse width modulated signal, generated by the Arduino UNO microcontroller. In this work, the command and power circuit is proposed, with measurement of the output current of the circuit, as well as measurement of the actuation time of the protection function of the digital relay. The results show that the control of the converter by PWM performed by the Arduino UNO is efficient for the desired current variation range.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de Proteção.....	16
Figura 2 - Zonas de Proteção.....	19
Figura 3 - Exemplo de limites de zona.....	19
Figura 4 - Relé eletromecânico de sobrecorrente do tipo indução.....	20
Figura 5 - Blocos funcionais de um relé digital microprocessado.....	22
Figura 6 - Diagrama funcional simplificado do relé SEL-751A com legenda.....	24
Figura 7 - Característica de tempo para função de sobrecorrente 51.....	26
Figura 8 - Função 59 de tempo definido para tensões de linha.....	29
Figura 9 - Curva do relé de tensão instantâneo.....	30
Figura 10 - Diagrama elétrico do Variac monofásico modelo TDGC.....	33
Figura 11 - Regulador de tensão monofásico Variac modelo TDGC2.....	34
Figura 12 - Modulação por largura de pulso de dois níveis.....	35
Figura 13 - Sinal MLP de 3 níveis.....	36
Figura 14 - Modelo ideal da fonte de corrente senoidal em malha aberta.....	37
Figura 15 - Modelo do transformador de isolamento.....	40
Figura 16 - Circuito de controle da corrente de saída utilizando Arduino UNO.....	41
Figura 17 - Circuito para cálculo do tempo de atuação com Arduino UNO.....	43
Figura 18 - Sinal de entrada e saída de tensão no Variac.....	44
Figura 19 - Medição de corrente por amperímetro digital na saída do circuito.....	45
Figura 20 - Corrente de saída da fonte para $f=180$ Hz e $a=3$	46
Figura 21 - Corrente de saída da fonte para $f=480$ Hz e $a=3$	46
Figura 22 - Corrente de saída da fonte para $f=180$ Hz e $a=8$	47
Figura 23 - Corrente de saída da fonte para $f=480$ Hz e $a=8$	48
Figura 24 - Relação da corrente média de saída do inversor com a frequência de comutação.....	48
Figura 25 - Simulação do circuito para cálculo de tempo de resposta do relé digital.....	49
Figura 26 - Circuito de comando para início e parada da geração de sinais.....	51
Figura 27 - Circuito de força da mala de testes proposta.....	52
Figura A.1 - Tabela ANSI.....	56
Figura B.1 - Curva C1 Normalmente Inversa.....	57
Figura B.2 - Curva C2 Muito Inversa.....	58
Figura B.3 - Curva C3 Extremamente Inversa.....	59
Figura B.4 - Curva C4 Inversa de Tempo Longo.....	60
Figura B.5 - Curva C5 Inversa de Tempo Curto.....	61
Figura C.1 - Relação $I_D \times V_{GS}$ do MOSFET tipo P IRFP260NPBF.....	62
Figura C.2 - Relação $I_D \times V_{GS}$ do MOSFET tipo N IRFB7440PbF.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações associadas às curvas IEC para o IED SEL-751A.....	27
Tabela 2 - Faixas de correntes e parâmetros de projeto.....	38
Tabela 3 - Parâmetros estimados para o transformador de isolação.....	40
Tabela 4 - Especificações dos componentes.....	50
Tabela C.1 - Especificações técnicas do MOSFET tipo P IRFP260NPBF.....	62
Tabela C.2 - Especificações técnicas do MOSFET tipo N IRFP260NPBF.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CI	Circuito Integrado
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Eletronic Devices</i>
IHM	Interface Homem Máquina
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TD	<i>Time Dial</i>
TP	Transformador de Potencial

SUMÁRIO

ABSTRACT.....	16
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	13
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	15
2.1.1 ESTRUTURA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	16
2.1.2 REQUISITOS BÁSICOS DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	17
2.2 DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS INTELIGENTES (IED's).....	20
2.2.1 HISTÓRIA DOS RELÉS DIGITAIS.....	20
2.2.2 ESTRUTURA DO RELÉ DIGITAL.....	21
2.3 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO.....	24
2.3.1 FUNÇÃO DE SOBRECORRENTE (50/51).....	25
2.3.1.1 CARACTERÍSTICA DE TEMPO.....	25
2.3.1.2 FUNÇÕES DE SOBRECORRENTE EM RELÉS DIGITAIS.....	27
2.3.2 FUNÇÃO DE SUB E SOBRETENSÃO (27/59).....	28
2.3.2.1 PROTEÇÃO DE SOBRETENSÃO.....	28
2.3.2.2 PROTEÇÃO DE SUBTENSÃO.....	29
3. PROJETO DA MALA DE TESTES MONOFÁSICA.....	31
3.1 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	31
3.2 DESENVOLVIMENTO.....	31
3.2.1 ESPECIFICAÇÃO DOS REQUISITOS.....	31
3.2.2 SELEÇÃO DOS COMPONENTES.....	32
3.2.2.1 FONTE DE TENSÃO.....	33
3.2.2.2 FONTE DE CORRENTE.....	34
3.3 PROJETO DA FONTE DE CORRENTE.....	35
3.3.1 CONVERSOR CC-CA COM MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO.....	35
3.3.2 ESTRUTURA DA FONTE DE CORRENTE SENOIDAL.....	36
3.3.3 FILTRO LC.....	38
3.3.4 TRANSFORMADOR DE ISOLAÇÃO.....	39
3.4 DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DE CONTROLE.....	40
3.4.1 ESTRUTURA DE CONTROLE DO INVERSOR DA FONTE DE CORRENTE.....	40
3.4.2 ALGORITMO DE CONTROLE PARA CÁLCULO DO TEMPO DE ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO.....	42
4. RESULTADOS.....	44
4.1 SIMULAÇÕES.....	44
4.2 ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES.....	49
4.3 CIRCUITO DE COMANDO.....	50
4.4 CIRCUITO DE FORÇA.....	52

5 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXO A - Tabela ANSI.....	56
ANEXO B - Curvas da função 51.....	57
ANEXO C - Especificação Técnica de Componentes.....	62
C.1 MOSFET tipo P.....	62
C.2 MOSFET tipo N.....	63
APÊNDICE A - Código para Cálculo do Tempo de Atuação da Proteção no Arduino UNO.....	64

1 INTRODUÇÃO

O crescimento dos avanços tecnológicos no Sistema Elétrico de Potência (SEP) trouxe a necessidade da substituição de equipamentos analógicos e eletromecânicos por equipamentos digitais e de alta precisão. Quando se trata da proteção do sistema elétrico, estão sendo implantados dispositivos cada vez mais precisos, rápidos e confiáveis, de modo a cumprir os requisitos básicos para a confiabilidade de um sistema de proteção.

Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED's) estão tomando o lugar dos obsoletos relés eletromecânicos, devido à sua capacidade de comunicação com outros equipamentos e com sistemas supervisórios, além de realizar medições precisas, apresentar alarmes e relatórios de eventos do sistema protegido. Ademais, um único equipamento é capaz de possuir diversas funções de proteção, diferente dos dispositivos eletromecânicos.

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho tem como motivação o teste das funções de proteção dos relés digitais dos modelos SEL-751A e SEL-451, da fabricante Schweitzer Engineering Laboratories, que se encontram no laboratório PMEG, do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Devido ao valor de mercado de uma mala de testes atualmente estar na casa dos milhares, como as da marca Omicron e Conprove, o intuito do projeto é tornar viável a montagem de uma mala com um valor mais acessível para o Departamento, além de aprimorar a experiência dos alunos com o laboratório PMEG, tornando possível o estudo das funções de proteção de sobrecorrente (50/51) e de sobre e subtensão (59/27).

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

O presente trabalho visa contribuir para a formação dos estudantes de engenharia elétrica, incentivando e tornando possível o estudo aprofundado e o conhecimento prático sobre proteção de sistemas elétricos. Em resumo, a mala monofásica de injeção de tensão e corrente proposta neste trabalho representa uma

solução acessível e prática para o teste das funções de proteção dos relés SEL-751A e SEL-451. O projeto visa suprir a necessidade de um equipamento específico para essa finalidade nos laboratórios da faculdade, por conseguinte, sugere-se uma continuação deste estudo de modo a montar a mala e realizar testes de aceitação, trazendo melhorias para o projeto aqui proposto.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo deste trabalho consiste na motivação para a realização deste projeto e a contextualização sobre a automação do Sistema Elétrico de Potência.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre proteção de sistemas elétricos, história e estrutura de relés digitais, e funções de proteção, que estão relacionadas com a motivação do trabalho.

O terceiro capítulo é dedicado à descrição do processo de desenvolvimento do projeto da mala de testes, com a especificação dos requisitos do projeto, dos componentes necessários, da apresentação dos circuitos propostos para geração de sinais, bem como a apresentação do circuito de controle da saída de tensão e de corrente.

No capítulo 4 apresentam-se os circuitos de comando e de força, bem como a descrição dos componentes utilizados em cada um deles para cumprir o propósito de gerar sinais de tensão e corrente variáveis para teste das funções de proteção dos relés. Além disso, esse capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos.

O capítulo 5 traz a conclusão geral sobre o projeto proposto, e uma análise dos resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o teste das funções de proteção dos IEDs é imprescindível um conhecimento básico sobre proteção de sistemas elétricos, relés digitais e funções de proteção, que são apresentados nessa revisão bibliográfica.

2.1 PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Em um Sistema Elétrico complexo como o Sistema Interligado Nacional (SIN), usualmente ocorrem falhas em seus componentes, que consequentemente interrompem o fornecimento de energia aos consumidores e reduzem a qualidade da distribuição.

As falhas mais comuns de ocorrer no SE são curto-circuitos e sobrecargas, que podem danificar equipamentos e colocar em risco a vida de operadores e da população consumidora. Além disso, existem as falhas de sub e sobretensão, muitas vezes decorrentes de descargas atmosféricas e dos curto-circuitos. Mamede (2013), define essas falhas como:

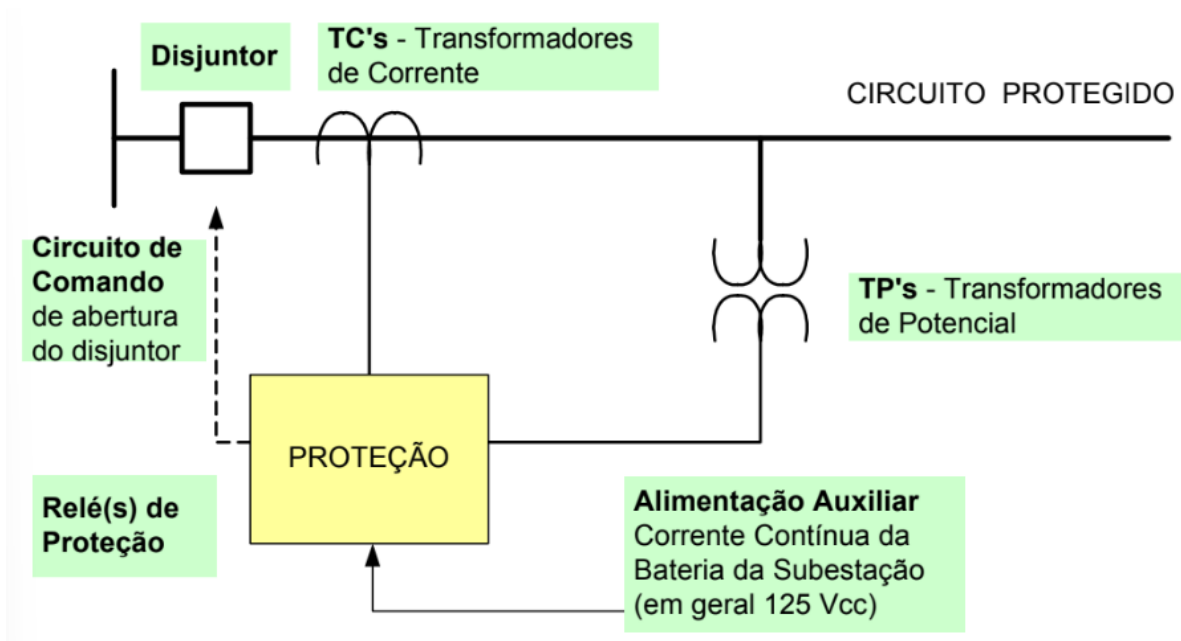
Os curtos-circuitos, as sobrecargas e as sub e sobretensões são inerentes ao funcionamento dos sistemas de potência, apesar das precauções e cuidados tornados durante a elaboração do projeto e a execução das instalações, mesmo seguindo as normas mais severas e as recomendações existentes. Essas anormalidades podem ter consequências irrelevantes ou desastrosas, dependendo do sistema de proteção preparado para aquela instalação em particular.

O sistema de proteção deve garantir o desligamento da parte do sistema sob falta ou que está operando fora dos limites estabelecidos para seu correto funcionamento, removendo os componentes sob anomalia, protegendo o restante do sistema da deterioração que pode vir a ocorrer devido a permanência da falha ou defeito por tempo elevado. Além disso, Mamede (2013) define que o sistema de proteção tem a função de fornecer as informações necessárias aos responsáveis pela operação do sistema, de modo a facilitar a identificação dos defeitos e a sua consequente recuperação.

Segundo Maezono (2003), o Sistema de Proteção é definido pela associação de conjuntos de relés (digitais ou eletromecânicos), equipamentos de teleproteção, circuitos de corrente alternada e corrente contínua, circuitos de comando e sinalização, bem como disjuntores e chaves seccionadoras, que têm como finalidade

proteger os componentes ou partes do sistema elétrico de potência de condições anormais de funcionamento. Ou seja, o sistema de proteção consiste em subsistemas que fazem parte conjuntamente da detecção e remoção da falha. Os subsistemas estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Sistema de Proteção



Fonte: (MAEZONO, 2003).

Cada equipamento que faz parte desse subsistema tem uma finalidade essencial para o funcionamento do conjunto que compõe o sistema de proteção, de modo a coordenar e manter a eficiência da proteção e reintegração do circuito após a remoção da falta.

2.1.1 ESTRUTURA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO

O sistema de proteção possui um funcionamento básico que é ilustrado na Figura 1 e descrito nos itens a seguir, onde são apresentados seus diversos componentes (MAMEDE, 2013).

- a) **Entrada:** São os equipamentos responsáveis por receber diretamente as anomalias do sistema protegido, como por exemplo os transformadores de

corrente (TC's) e transformadores de potencial (TP's), que enviam os sinais recebidos para a unidade de conversão do relé, além de ser responsável pelo isolamento do dispositivo de proteção.

- b) Conversão de sinal: Essa unidade recebe diretamente o sinal dos TC's e TP's, e converte o sinal obtido do sistema elétrico em valores mais baixos, adequados aos valores de entrada do relés de proteção.
- c) Medida: Esta unidade é responsável por comparar os valores do sinal recebido, como módulo, frequência e ângulo da corrente e tensão, e compará-los com os valores armazenados como referência no relé. Com isso, caso o sinal de entrada esteja fora da faixa de operação pré-estabelecida, esta unidade envia um comando à saída do dispositivo.
- d) Fonte de alimentação auxiliar: Responsável por prover energia ao dispositivo de proteção. Geralmente é constituída por uma bateria ou uma associação de baterias da subestação, que geram uma tensão contínua (usualmente 125 VCC), que fornece tensão às unidades de medida e de saída, além da unidade de acionamento, onde uma bobina aciona o contato auxiliar para enviar um comando.
- e) Saída: Pode se dar tanto por uma chave semicondutora como por uma bobina interna ao relé, que aciona um contato auxiliar. Responsável por enviar comandos e sinalizações, como comando de abertura e fechamento de disjuntor, ou sinalização de falha do relé, por exemplo.

Mamede (2013), acrescenta à isso mais um fator,

Em alguns esquemas de proteção, os transformadores de potencial podem ser suprimidos, como no caso da proteção de sobrecorrente. Quando se trata somente da proteção de sub e sobretensão, não é necessária, no entanto, a aplicação do transformador de corrente. E, finalmente, em alguns esquemas de proteção utilizando relés primários, não é necessário empregar nenhum transformador de medida.

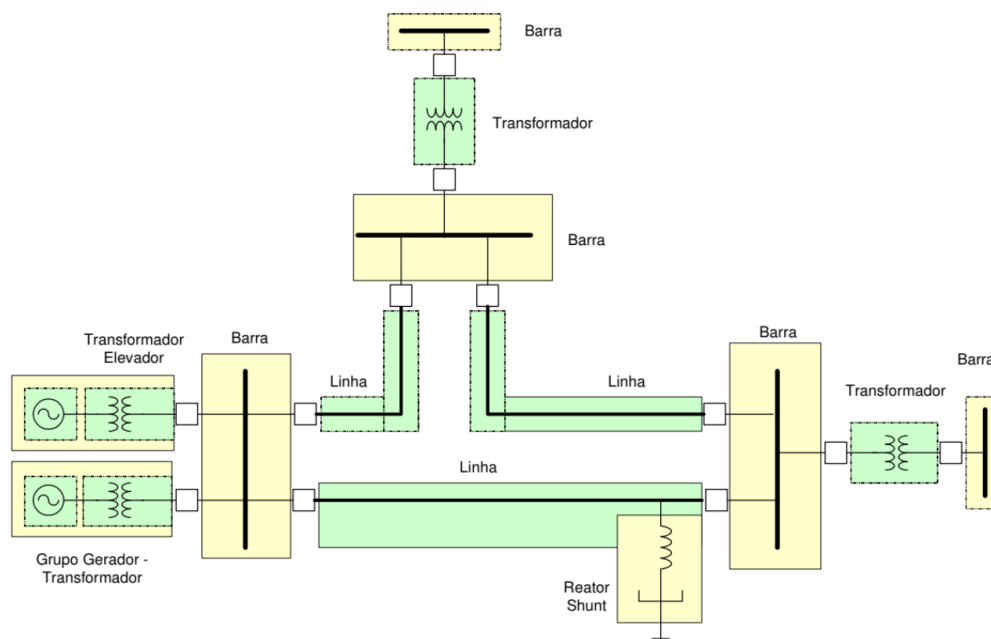
2.1.2 REQUISITOS BÁSICOS DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO

Para a realização do projeto de um sistema de proteção devem ser considerados alguns requisitos básicos, de modo a garantir o funcionamento

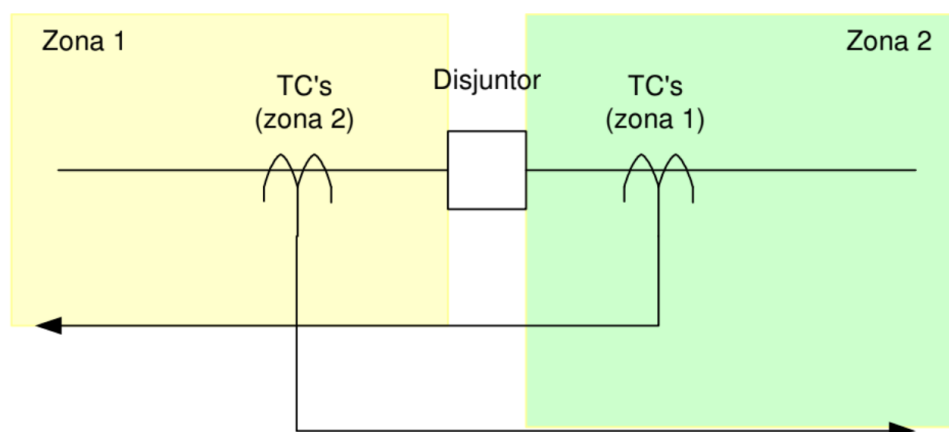
adequado do sistema e uma proteção eficaz. Segundo Maezono (2003) e Mamede (2013), as propriedades fundamentais são as seguintes:

- a) Seletividade: Se dá pela capacidade do sistema de proteção de manter a continuidade de fornecimento de energia elétrica à parte protegida, com um mínimo de desligamentos ao isolar a falta do restante do sistema. Ou seja, o elemento de proteção que está mais próximo do defeito é responsável por desconectar a falha do restante do circuito.
- b) Confiabilidade: Atuação do sistema de proteção de forma correta e sempre que necessário, com exatidão e eficácia, evitando desligamentos e operações desnecessárias.
- c) Velocidade: Habilidade do sistema de garantir o menor tempo de falta, ou seja, realizar o desligamento da parte do circuito sob falta no menor tempo possível, de modo que as consequências no sistema protegido sejam mínimas, como danos ou instabilidades.
- d) Economia e Simplicidade: Relação custo x benefício, onde deve ser oferecida a máxima proteção com o menor custo, visando a utilização da menor quantidade possível de equipamentos e circuitos que realizam a proteção necessária do circuito.
- e) Zonas de Proteção: Para garantir o mínimo de desligamentos possível e preservar a continuidade do fornecimento de energia quando da ocorrência de uma falta, o sistema elétrico é dividido em zonas de proteção, geralmente para geradores, transformadores, barras, linhas de transmissão, circuitos de distribuição e etc. (MAEZONO, 2003). Ou seja, em um sistema de proteção cada elemento protetor deve ter uma abrangência de atuação, que é denominada por zona de proteção (MAMEDE, 2013). Um exemplo de divisão dessas zonas é mostrado na Figura 2.

Maezono (2003) ainda acrescenta que a separação das zonas se dá através da localização de disjuntores e transformadores de corrente que alimentam os relés de proteção, como é mostrado na Figura 3.

Figura 2 - Zonas de Proteção

Fonte: (MAEZONO, 2003).

Figura 3 - Exemplo de limites de zona

Fonte: (MAEZONO, 2003).

Neste exemplo, verifica-se a utilização de transformadores de corrente em ambos os lados do disjuntor, de modo a evitar uma “zona morta”, que é compreendida por uma área sem cobertura da proteção.

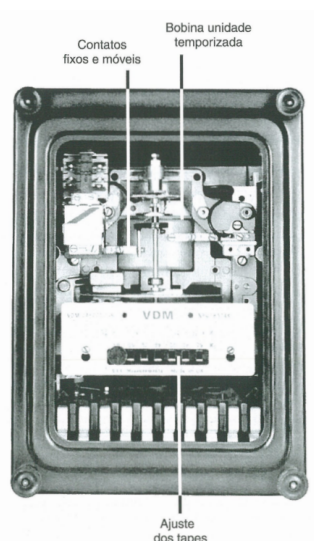
2.2 DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS INTELIGENTES (IED's)

O crescimento exponencial do uso de eletricidade nas últimas décadas é apontado por Magalhães (2019): “(...) o consumo final de energia elétrica em 2016 atingiu 20.863 TWh, apresentando um crescimento médio anual de 3,3%, desde o ano de 1974”, tal expansão teve como consequência um desenvolvimento tecnológico visando garantir as regulamentações e as demandas do setor elétrico (MAGALHÃES, 2019). Esse crescimento da tecnologia na rede elétrica incentivou a automação de subestações, integrando seus equipamentos analógicos com equipamentos digitais microprocessados, aumentando a precisão das medições e comandos, e tornando possível o acesso remoto à esses valores e histórico de eventos, a partir dos relés digitais e sistemas supervisórios.

2.2.1 HISTÓRIA DOS RELÉS DIGITAIS

O primeiro dispositivo de proteção desenvolvido foi o relé eletromecânico, em 1901, que teve uma progressiva evolução. Este equipamento consiste de bobinas, disco de indução, molas, bem como contatos fixos e móveis, que se traduzem em um relé de proteção de sobrecorrente do tipo indução, mostrado na Figura 4 (MAMEDE, 2013). Após a evolução dos dispositivos eletromecânicos ao longo dos anos, sua robustez e precisão se tornaram meritórios.

Figura 4 - Relé eletromecânico de sobrecorrente do tipo indução



Fonte: (MAMEDE, 2013).

Atualmente este equipamento não é mais fabricado, porém ainda é frequentemente encontrado em subestações de energia elétrica e outros lugares onde é utilizado, devido ao seu longo tempo de vida útil, sendo substituído apenas quando o local passa por reforma a fim de aprimorar o desempenho no fornecimento de energia (MAMEDE, 2013).

A partir do desenvolvimento da microeletrônica, em meados de 1980, foram criadas as primeiras unidades de proteção digital, que não foram rapidamente absorvidas pelo mercado na substituição dos relés eletromecânicos. Mamede (2013) acrescenta: “Algumas concessionárias, receosas com o uso dos relés digitais, chegaram a utilizá-los juntamente com os relés eletromecânicos como proteção de retaguarda”.

Atualmente, com crescente evolução da automação dos sistemas elétricos de potência (SEP), os relés digitais dominam o mercado e são elementos indispensáveis desse sistema (MAMEDE, 2013). Para Magalhães (2019), os dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) são responsáveis pelo controle, proteção e monitoramento das subestações e redes elétricas, muitas vezes de forma remota com o uso de sistemas supervisórios.

2.2.2 ESTRUTURA DO RELÉ DIGITAL

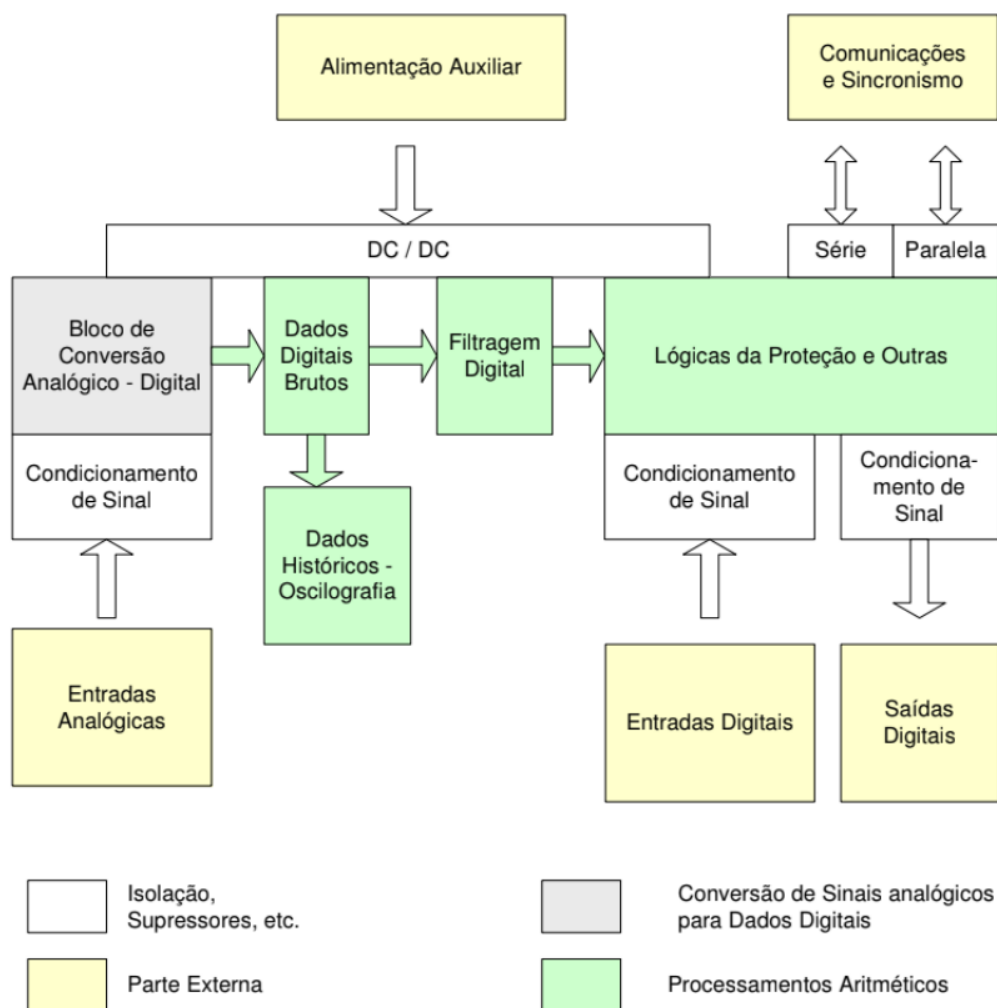
Os relés digitais mantêm os mesmos princípios de proteção que antes eram aplicados aos relés eletromecânicos, porém sua proteção é baseada em microprocessadores, que oferecem novas funções, bem como velocidade, sensibilidade, interface amigável e acesso remoto (MAMEDE, 2013). Segundo Kindermann (2012) os relés digitais “são microcomputadores específicos a este fim, onde sinais de entrada das grandezas e parâmetros digitados são controlados por um software que processa a lógica da proteção através de um algoritmo”.

Neste tipo de relé, assim como no eletromecânico, as grandezas de entrada (corrente e tensão) ainda são analógicas, se tornando sinais digitais através de conversores analógicos/digitais (A/D) (MAMEDE, 2013). Ainda segundo Mamede (2013) “Ao contrário dos relés eletromecânicos de indução e dos relés eletrônicos, os relés digitais, devido ao fato de operarem segundo uma programação inteligente, tem a capacidade de processar digitalmente os valores medidos do sistema, tais

como tensão, corrente, frequência etc., e de realizar operações lógicas e aritméticas".

Na Figura 5 são mostrados os blocos funcionais de um IED e suas ligações externas.

Figura 5 - Blocos funcionais de um relé digital microprocessado



Fonte: (MAEZONO, 2003).

A interface com o processo elétrico, ou seja, o bloco responsável pela conversão analógico/digital converte os sinais dos secundários de TC's e TP's ligados ao relé em dados microprocessados. Já o bloco de processamento aritmético é responsável pelas lógicas, filtrações digitais, cálculos de algoritmos, supervisão e gerenciamento interno da proteção digital (MAEZONO, 2003).

Maezono (2003) acrescenta à isso:

O condicionamento dos sinais que entram e saem do relé é muito importante considerando que uma proteção digital executa operações aritméticas de alta velocidade (inferior a 0,3 microssegundo) usando sinais de nível relativamente baixo (2 a 5 Volts).

Os microprocessadores recebem os sinais digitais já convertidos, além dos sinais digitais gerados pelos contatos auxiliares do relé ou de equipamentos ligados à eles, e executam funções de medição, proteção e controle (MAMEDE, 2013). Além disso, “os microprocessadores também exercem a função de auto supervisão e comunicação serial. São operados por programas dedicados denominados algoritmos, responsáveis pela elaboração dos cálculos” (MAMEDE, 2013).

Os relés digitais também possuem uma IHM (Interface Homem Máquina) amigável para obtenção de dados de medição, histórico de eventos e informações de comunicação. Geralmente o IED possui um *software* para permitir a comunicação entre o equipamento e o usuário, permitindo a alteração dos ajustes dos relés, bem como acessar e salvar informações.

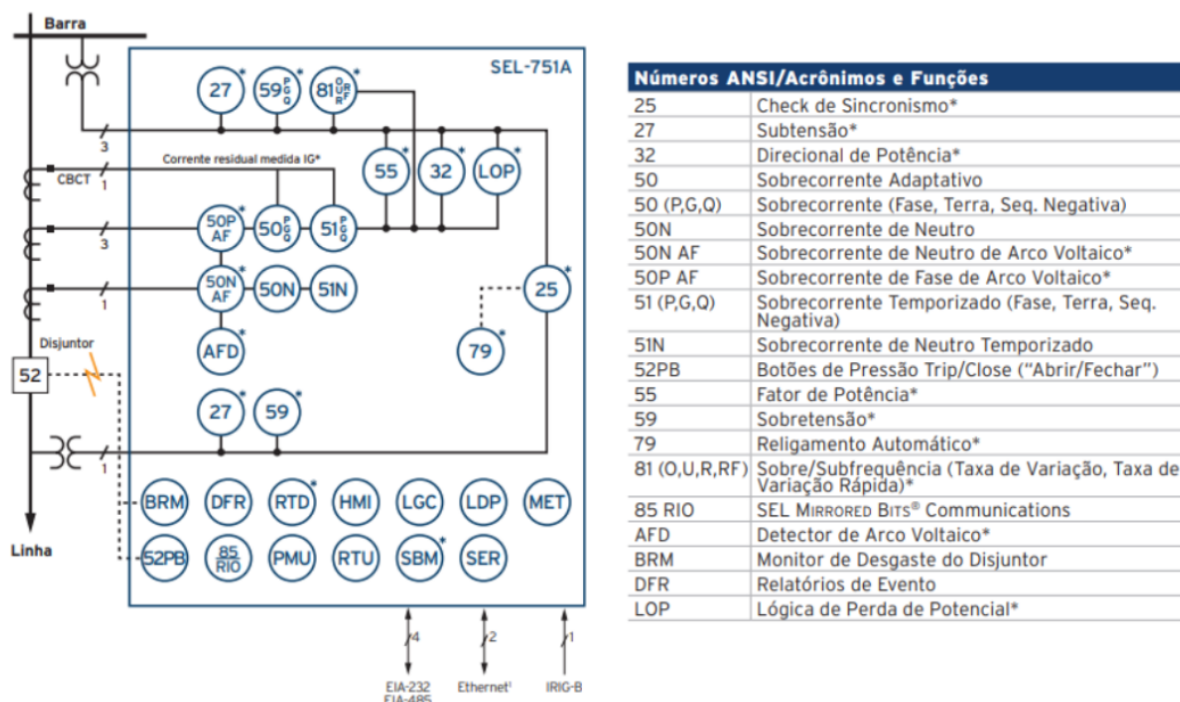
Além disso, os relés digitais possuem memória para armazenamento de eventos, e apresentam informações sobre os últimos defeitos ocorridos no sistema elétrico que está sob proteção, permitindo análise do relatório de falhas e oscilografias (MAMEDE, 2013).

A respeito do desempenho do IED, Mamede (2013) acrescenta que:

Os relés também devem responder com extrema rapidez as grandezas elétricas para as quais estão ajustados, garantindo, desse modo, um tempo muito pequeno de duração do defeito. Não se deve confundir temporização voluntária de um relé com lentidão de seus mecanismos de operação. A primeira diz respeito a técnica de projeto de proteção que prevê, entre outras, a seletividade entre unidades do sistema. Já a segunda é própria das suas características construtivas.

Na Figura 6 é apresentado um diagrama interno simplificado que mostra estrutura lógica interna do relé SEL-751A, da fabricante Schweitzer Engineering Laboratories, com a sua respectiva ligação com os instrumentos de medição no campo (TC e TP), bem como seu circuito de comando ligado ao disjuntor. As funções de proteção mostradas serão detalhadas posteriormente neste trabalho.

Figura 6 - Diagrama funcional simplificado do relé SEL-751A com legenda



Fonte: (SEL, 2022).

Na Figura 6 é possível observar os diversos componentes que fazem parte do sistema de proteção e da estrutura do relé digital, como os TC's e TP's ligados à barra, responsáveis por enviar os sinais de corrente e tensão nos níveis de operação do IED, o circuito de comando de abertura e fechamento do disjuntor, bem como as portas de comunicação do relé.

2.3 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

Os relés digitais possuem funções de proteção que são um conjunto de atributos desempenhados pelo sistema de proteção, com fins previamente definidos de acordo com a categoria ou finalidade da sua atuação. Com o intuito de padronizar os códigos que determinam as funções de proteção, a ANSI (American National Standards Institute) incorporou uma tabela com todos os códigos e funções, apresentada no Anexo A.

2.3.1 FUNÇÃO DE SOBRECORRENTE (50/51)

Mamede (2013) define a função de sobrecorrente como:

Entende-se por relé de proteção de sobrecorrente aquele que responde à corrente que flui no elemento do sistema que se quer proteger quando o módulo dessa corrente supera o valor previamente ajustado.

Ou seja, essa função serve para detectar condições de curto-circuito no sistema, onde a corrente de fase é sensivelmente maior que a corrente de carga (MAEZONO, 2003).

Maezono (2003) define ainda que existem dois tipos de corrente à serem detectados por essa função de proteção:

- Corrente de fase superior à de carga, decorrente de curto-circuito;
- Corrente de terra, decorrente de curto-circuito à terra.

Mamede (2013) acrescenta à isso:

As proteções com relés de sobrecorrente são utilizadas em alimentadores de média tensão, linhas de transmissão, geradores, reatores e capacitores e, de forma geral, nos esquemas de proteção onde são necessários tempos de operação inversamente proporcionais às correntes que circulam no sistema.

Os relés de sobrecorrente possuem funções direcionais, diferenciais e de distância.

Os dispositivos responsáveis por esse tipo de proteção são ligados no lado secundário dos transformadores de corrente, sendo acionados por correntes proporcionais àquelas que circulam no primário.

2.3.1.1 CARACTERÍSTICA DE TEMPO

Segundo Maezono (2003), os relés de sobrecorrente podem ser classificados em instantâneos (função 50) e temporizados (função 51). Onde os elementos temporizados são classificados conforme sua característica de tempo de atuação x corrente.

A função de sobrecorrente instantânea (50) recebe esse nome pois não realiza temporização quando o limite de corrente ajustado é atingido, ou seja, sua

atuação apresenta apenas a temporização inerente do IED que está realizando a proteção (MAEZONO, 2003).

O elemento instantâneo também é denominado de relé de tempo definido, pois, para qualquer valor de corrente de curto circuito acima do valor ajustado no IED, há atuação com um tempo definido. Ou seja, para o elemento instantâneo de sobrecorrente, a proteção atua instantaneamente (MAEZONO, 2003).

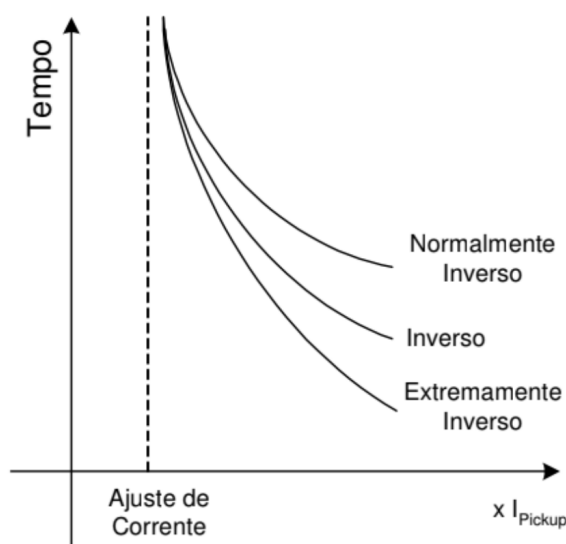
Mamede (2013) define que “a corrente mínima de acionamento do elemento instantâneo deve ser inferior à menor corrente simétrica de curto circuito no trecho protegido pelo disjuntor”.

No caso dos relés temporizados (função 51), a atuação da função de proteção segue a característica da curva tempo x corrente, que pode ser:

- Normalmente Inverso;
- Muito Inverso;
- Extremamente Inverso;

As características dessas curvas estão mostradas na Figura 7.

Figura 7 - Característica de tempo para função de sobrecorrente 51



Fonte: Adaptado de MAEZONO (2003).

No Anexo B são apresentadas as curvas características associadas à função de sobrecorrente de tempo inverso (51) de acordo com a norma IEEE C37.112-1996 do relé SEL-751A. Neste mesmo IED é possível escolher entre nove diferentes curvas para esta mesma função.

Segundo Mamede (2013), as curvas são selecionadas em função das características operacionais da carga, podendo ser indicadas da seguinte forma:

- Relés de tempo curto operam rapidamente de modo a impedir danos nos equipamentos.
- Relés de tempo longo não operam no início de uma sobrecarga muito intensa.
- Relés de tempo moderadamente inverso operam para valores elevados de sobrecorrente em um tempo constante.
- Relés de tempo inverso ou muito inverso operam mais rapidamente para valores de maior sobrecorrente.

2.3.1.2 FUNÇÕES DE SOBRECORRENTE EM RELÉS DIGITAIS

Os relés digitais podem realizar a proteção de diferentes partes do circuito e, portanto, os ajustes necessários devem satisfazer às características específicas do elemento ou trecho do circuito a ser protegido (MAMEDE, 2013). Para isso, a partir da condição de proteção requerida, deve ser escolhida uma curva, determinada por uma equação de atuação própria do relé a ser utilizado. Na Tabela 1 são apresentadas as equações das curvas do elemento de sobrecorrente temporizado, de acordo com o padrão IEEE C37.112-1996 *Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays* (SEL, 2022).

Tabela 1 - Equações associadas às curvas IEC para o IED SEL-751A

Tipo de Curva	Tempo de Operação	Tempo de Reset	Figura
C1 (Normalmente inversa)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{0,14}{M^{0,02}-1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{13,5}{1-M^2} \right)$	B.1
C2 (Muito inversa)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{13,5}{M-1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{47,3}{1-M^2} \right)$	B.2
C3 (Extremamente inversa)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{80}{M^2-1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{80}{1-M^2} \right)$	B.3
C4 (Inversa de tempo longo)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{120}{M-1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{120}{1-M} \right)$	B.4
C5 (Inversa de tempo curto)	$t_p = TD \cdot \left(\frac{0,05}{M^{0,04}-1} \right)$	$t_r = TD \cdot \left(\frac{4,85}{1-M^2} \right)$	B.5

Fonte: Adaptado de SEL (2022).

Sendo:

t_p = Tempo de operação em segundos;

t_r = Indução eletromecânica - tempo de reset do disco de emulação em segundo (se essa opção for selecionada no relé);

M = Relação entre a corrente de curto circuito e a corrente de ajuste, ou seja, múltiplo da corrente de *pickup*;

TD = Configuração de *time-dial*, ou seja, o multiplicador de tempo da curva.

O valor da configuração de *time-dial* para a IEC pode variar entre 0,05 a 3,20, influenciando na posição da curva em relação ao tempo. Quanto menor for o valor de TD, mais rápida será a atuação do relé.

Kindemann (2012) acrescenta à isso:

O ideal na proteção é que todos os relés tenham a mesma característica de inclinações das curvas. Deste modo, a coordenação é facilitada e se consegue garantia de coordenação em todas as correntes de curtos-circuitos do sistema.

2.3.2 FUNÇÃO DE SUB E SOBRETENSÃO (27/59)

Essa função de proteção detecta condições de tensão superiores ou inferiores aos valores aceitos para a operação do sistema ou circuito protegido (MAEZONO, 2003). Ou seja, a proteção atua quando a tensão elétrica ultrapassa (no caso da função de sobretensão), ou fica abaixo (para a função de subtensão) do valor pré ajustado no relé. A proteção é realizada através de relés conectados nos lados secundários dos transformadores de potencial.

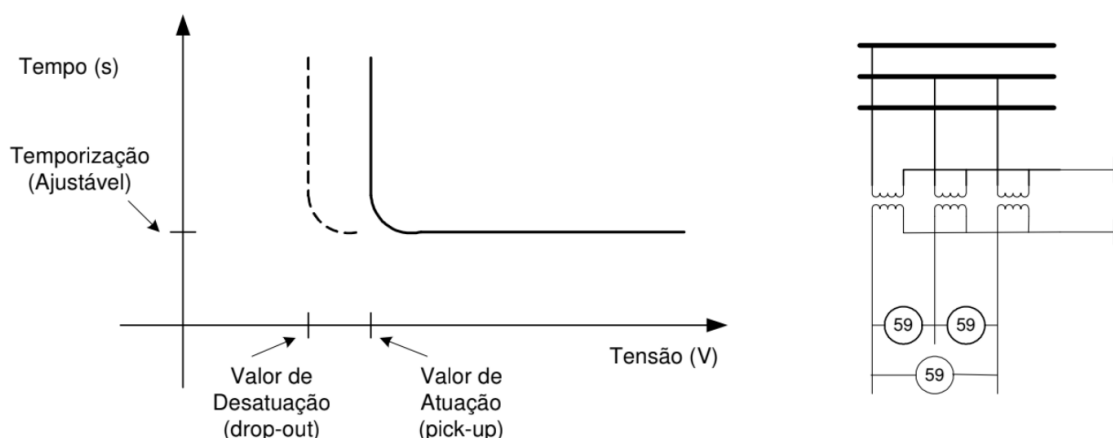
2.3.2.1 PROTEÇÃO DE SOBRETENSÃO

A proteção recebe o código ANSI 59 e atua em uma condição de tensão superior ao valor ajustado no relé. Assim como a proteção de sobrecorrente, essa função pode ser instantânea ou temporizada.

Mamede (2013) menciona que: “[...] os níveis máximos de tensão admitidos num sistema de potência são de 110% do valor nominal, devendo-se admitir como ajuste do relé valores não inferiores a 115% para unidades temporizadas e 120% para unidades instantâneas.”

No caso da função instantânea não há temporização intencional, apenas a temporização inerente ao processamento de relé digital. Já a função temporizada possui uma temporização intencional e ajustável. Os relés de sobretensão temporizados possuem, geralmente, uma característica de tempo definido (não inversa), como mostrado na Figura 8 (MAEZONO, 2003).

Figura 8 - Função 59 de tempo definido para tensões de linha



Fonte: (MAEZONO, 2003).

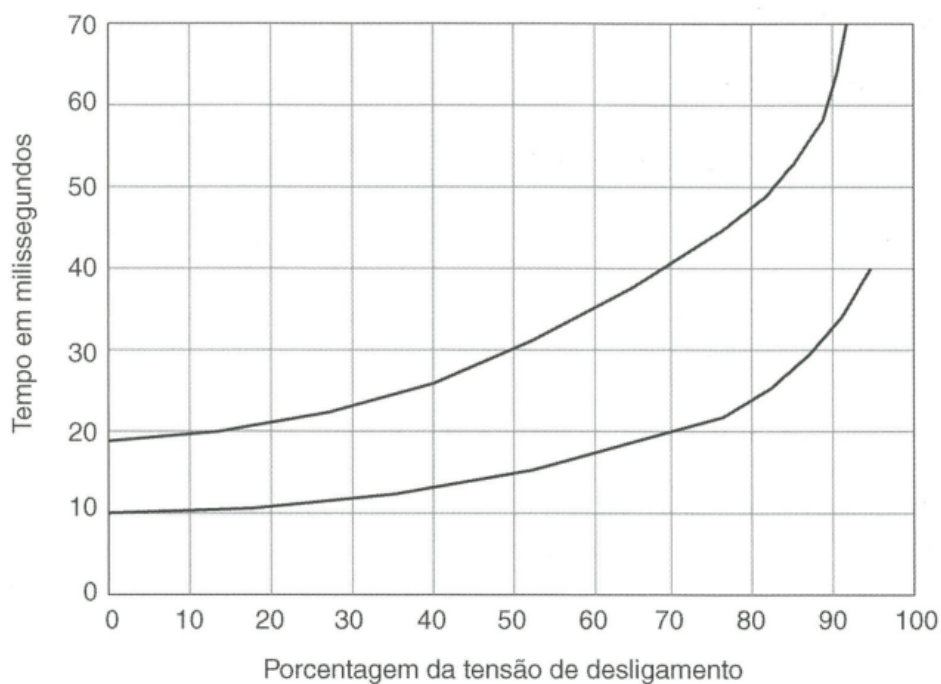
Segundo Kindermann (2012), a proteção de elevação de tensão pode ser realizada utilizando-se um ou mais relés de sobretensão, dependendo do porte do sistema elétrico a ser protegido, podendo ser utilizados até 3 relés de sobretensão, conectados entre fases ou entre fase e terra, por exemplo.

2.3.2.2 PROTEÇÃO DE SUBTENSÃO

O relé de subtensão, caracterizado pela função 27 da tabela ANSI, atua para um valor de tensão abaixo do ajustado para o equipamento, ou seja, são destinados à proteção de sistemas elétricos que são submetidos a níveis de tensão abaixo dos valores aceitáveis para a operação do sistema ou dos equipamentos elétricos. Segundo Mamede (2013):

[...] os níveis mínimos de tensão admitidos num sistema de potência são de 80% a 90% do valor nominal, devendo-se admitir como ajuste do relé valores não inferiores a 90% para unidades temporizadas e 80% para unidades instantâneas, cuja curva de temporização própria é dada de forma genérica na Figura 9.

Figura 9 - Curva do relé de tensão instantâneo



Fonte: (MAMEDE, 2013).

3. PROJETO DA MALA DE TESTES MONOFÁSICA

Para desenvolvimento da mala de testes como proposto, é necessária a especificação dos requisitos de projeto a serem cumpridos pelo equipamento, dos componentes a serem utilizados e do método de controle considerado para variação dos valores de tensão e corrente injetados.

3.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento do projeto de uma mala de testes monofásica que seja capaz de realizar injeção de corrente e tensão controladas em relés de proteção, especificamente da marca SEL, tornando possível, dessa forma, a verificação de suas funções de proteção, como sobrecorrente, subtensão e sobretensão, entre outras. O projeto visa proporcionar um recurso eficiente, prático e econômico para o desenvolvimento de uma mala de testes, de modo a oferecer um ambiente controlado para estudo de relés, funções de proteção e proteção de Sistemas Elétricos, no geral.

3.2 DESENVOLVIMENTO

Neste item são apresentados os requisitos a serem atendidos pelo projeto e o detalhamento dos componentes utilizados para fonte de corrente e fonte de tensão da mala de testes.

3.2.1 ESPECIFICAÇÃO DOS REQUISITOS

A primeira etapa desse projeto consiste em especificar quais são os requisitos básicos que a mala de testes deve atender, visando o custo-benefício desejado e a aplicação para qual ela será utilizada. Com isso, foram verificados os seguintes requisitos:

- a) Capacidade de injeção de corrente e tensão nas faixas aceitáveis pelos relés da SEL. De modo a testar suas funções de proteção, ou seja, que a mala seja capaz de injetar de 0 a 10 A de corrente alternada, e de 0 a 115 VCA. Além disso, a mala deve ser capaz de operar com a fonte de alimentação

disponível nos laboratórios do campus, ou seja, em tomadas bifásicas ou trifásicas, portanto, ela deve ser projetada para operar com a faixa de alimentação em torno de 220V, com uma margem de segurança.

- b) Controle da corrente e tensão a serem injetadas. Ou seja, a mala deve permitir ao usuário controlar os valores de corrente e tensão que vão ser enviados às entradas analógicas dos relés, permitindo variações desses valores quando necessário.
- c) Precisão e estabilidade. Os sinais gerados pela mala de testes devem ser os mais estáveis e precisos possíveis de modo a garantir a confiabilidade dos testes de proteção a serem realizados nos IEDs. Além disso, o equipamento deve possuir instrumentos de medição precisos (como amperímetros e voltmímetro digitais), capazes de fornecer os valores exatos de corrente e tensão que estão sendo injetados nos relés no momento dos testes.
- d) Proteções de segurança. Para trabalhos com valores de corrente elevados, é imprescindível que sejam aplicadas as devidas proteções de segurança, como o aterramento e isolamento de superfícies de modo a proteger o usuário, bem como o uso de disjuntores termomagnéticos para proteção contra sobrecargas e curto-circuitos no equipamento.

Além dos tópicos mencionados, vale ressaltar que o objetivo do trabalho é permitir a montagem e utilização desse equipamento com baixo custo, e nos laboratórios do Campus 3 da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, portanto, os componentes a serem utilizados devem ser acessíveis financeiramente e/ou já disponíveis nas dependências do Departamento de Engenharia Elétrica.

3.2.2 SELEÇÃO DOS COMPONENTES

A seleção dos componentes busca cumprir os requisitos de projeto e obter o melhor resultado possível mantendo o objetivo de ser acessível financeiramente. Os componentes utilizados para a fonte de corrente serão apresentados nessa seção, porém serão detalhados no item 3.3, onde o projeto da fonte de corrente é desenvolvido.

3.2.2.1 FONTE DE TENSÃO

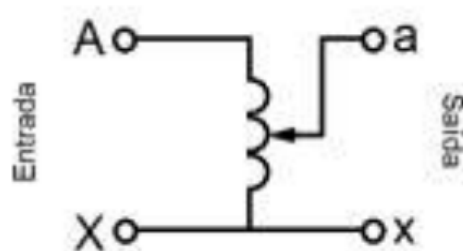
Para a geração do sinal de tensão que atenda a especificação a), ou seja, forneça uma tensão que varie de 0 a 115 V senoidal, é proposta a utilização de um regulador de tensão por indução do tipo Variador de Escovas Deslizantes Transversais “Variac”.

Este equipamento, também denominado de autotransformador, se trata de um transformador com enrolamento secundário variável, como mostrado na Figura 10. Ou seja, sua relação entre a tensão de entrada e saída é igual à relação entre o número de voltas dos enrolamentos.

Dentre as vantagens desse equipamento, podemos citar uma variação praticamente contínua da tensão de saída do mesmo. Além disso, sua faixa de variação de tensão é bem ampla, chegando a variar de 0 a 250 Vca quando alimentado em uma tensão nominal de entrada de 220 Vca.

Entre os contras da utilização desse componente, é importante mencionar sua baixa capacidade de sobrecarga e de curto circuito, pois diferente de um transformador comum, o Variac não possui isolamento galvânico entre os terminais primário e secundário, sendo limitado a baixas potências de saída. Para o modelo TDGC monofásico, mostrado na Figura 10, a resistência de isolação é de 5MΩ. O sinal de saída do Variac não possui frequência variável, mantendo-se a mesma frequência da alimentação do componente, ou seja, a da rede. Como o intuito da mala de testes projetada não é fornecer altas potências de saída e nem um controle da frequência de saída, este aspecto construtivo é aceitável.

Figura 10 - Diagrama elétrico do Variac monofásico modelo TDGC



Fonte: (JNG, 2020).

O autotransformador possui o controle da amplitude da tensão de saída por meio de um botão localizado na própria estrutura do componente, mostrado na Figura 11, oferecendo um controle robusto e eficaz do valor da tensão que se deseja injetar. Além disso, esse regulador de tensão possui um fusível de proteção na entrada e na saída do mesmo.

Figura 11 - Regulador de tensão monofásico Variac modelo TDGC2



Fonte: (INSTRUM, 2023).

3.2.2.2 FONTE DE CORRENTE

Para a geração de uma corrente alternada controlada na saída da mala de testes, propõe-se a utilização de um conversor CC-CA, que fornece tensões alternadas na saída, com uma frequência fixa, e permite o controle da corrente de saída. Esse conversor deve fornecer uma corrente alternada, com sua frequência, forma e amplitude definidas por um sistema de controle, podendo operar em malha aberta ou fechada.

Morais (2006), utiliza uma técnica de modulação por largura de pulso (MLP) no comando de chaves semicondutoras de um inversor em ponte alimentado por uma fonte de tensão CC para uma fonte de corrente controlada. Segundo Moraes (2006), essa estratégia de projeto para fontes de corrente senoidais de baixa potência possui a vantagem de apresentar um menor conteúdo harmônico na saída do inversor.

3.3 PROJETO DA FONTE DE CORRENTE

O projeto da fonte de corrente senoidal, como mencionado anteriormente, será desenvolvido considerando a técnica de modulação por largura de pulso em um conversor CC-CA fonte de corrente. Esta seção irá especificar o circuito projetado, bem como os componentes que farão parte dessa parte do circuito.

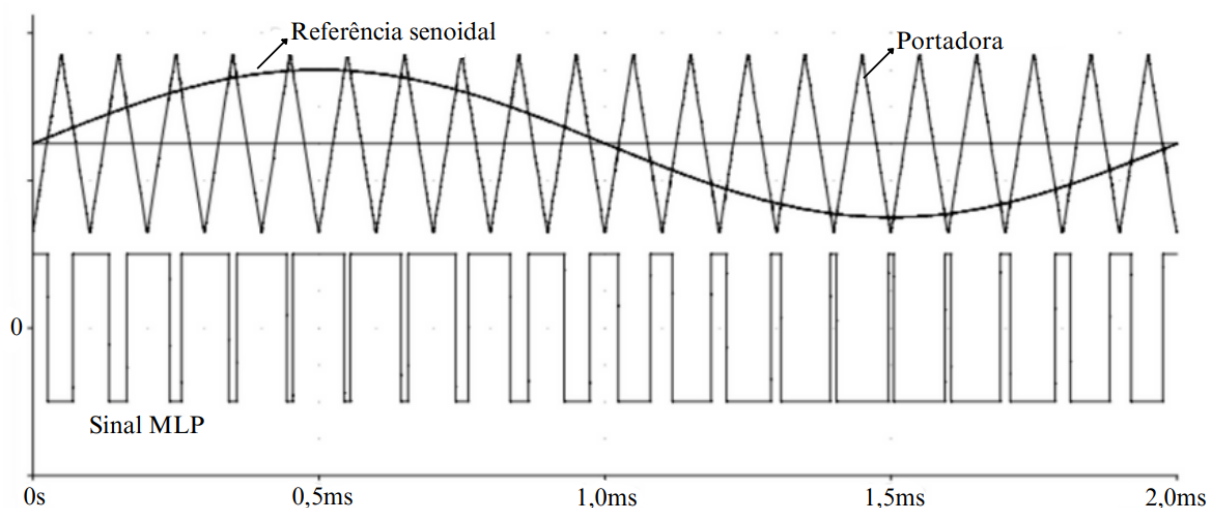
3.3.1 CONVERSOR CC-CA COM MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO

A modulação por largura de pulso (em inglês Pulse Width Modulation - PWM) em um conversor CC-CA se dá a partir da comparação de uma tensão de referência com um sinal triangular simétrico, por meio de um comparador, cuja frequência do sinal triangular determina a frequência de chaveamento dos semicondutores. A amplitude relativa do sinal de referência em relação à portadora determina a largura do pulso de saída do modulador.

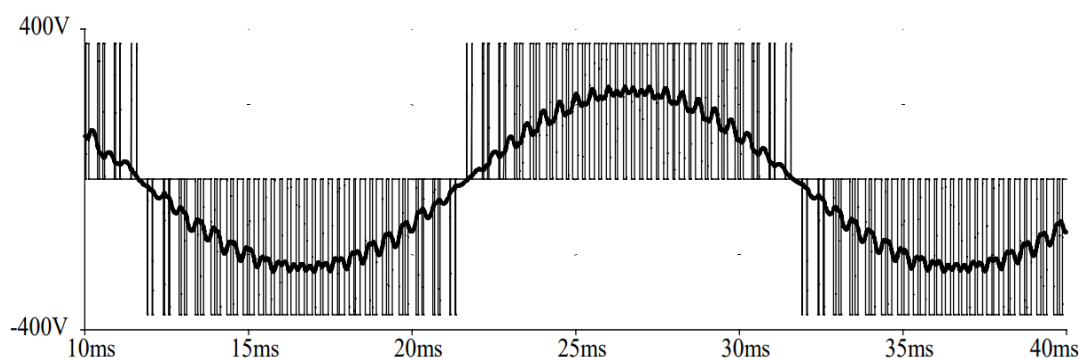
Dependendo da maneira com que o comando dos interruptores ocorre, a MLP pode ocorrer em dois níveis (positivo e negativo), ou em três níveis (positivo, negativo e zero). Morais (2006) considera que a MLP a três níveis é mais vantajosa devido ao menor conteúdo harmônico na tensão de saída do inversor.

Na Figura 12 é ilustrada uma onda senoidal modulada em dois níveis, já na Figura 13 é mostrada uma modulação em três níveis.

Figura 12 - Modulação por largura de pulso de dois níveis



Fonte: Adaptado de POMILIO (2017).

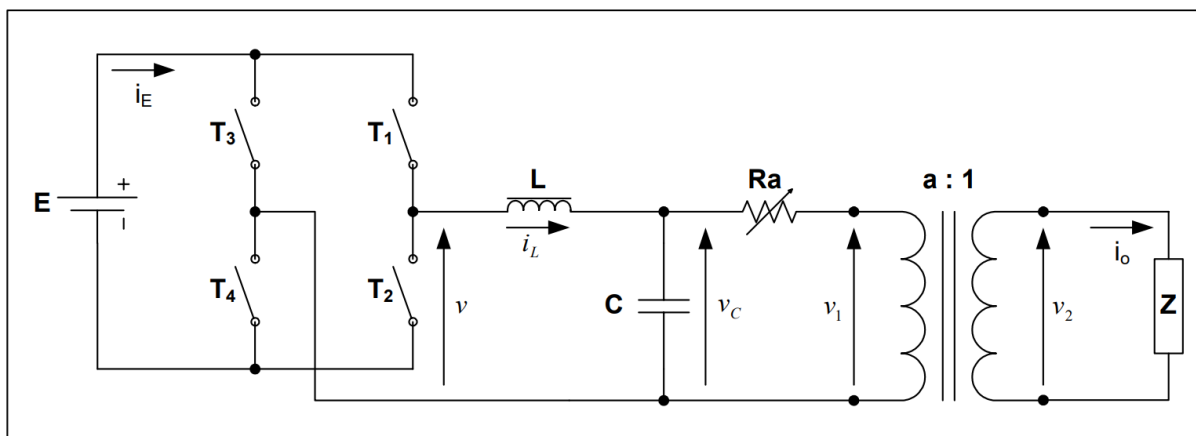
Figura 13 - Sinal MLP de 3 níveis

Fonte: (POMILIO, 2017).

O arranjo deste inversor pode ser tanto em ponte completa, que para um inversor monofásico necessita de 4 chaves ou semicondutores, ou um arranjo chamado de semi-ponte. Para o escopo do presente projeto, será considerado um inversor monofásico em ponte completa, como detalhado no item a seguir.

3.3.2 ESTRUTURA DA FONTE DE CORRENTE SENOIDAL

Para a fonte de corrente controlada, baseado nas considerações de Moraes (2006) acerca da melhor estrutura de projeto, será utilizado um inversor monofásico em ponte completa com modulação por largura de pulsos de três níveis e um filtro passivo de segunda ordem na saída do inversor. Além disso, será utilizado um resistor variável e um transformador abaixador de tensão, que terá função de isolamento galvânica e ajuste das amplitudes das correntes do circuito. A carga representa a bobina de corrente da entrada analógica do relé, onde a saída do circuito será conectada para realizar a injeção de corrente, sendo, idealmente, uma carga puramente indutiva. Na Figura 14 é apresentado um modelo ideal em malha aberta da fonte de corrente senoidal proposta por Moraes (2006), e considerada para este trabalho.

Figura 14 - Modelo ideal da fonte de corrente senoidal em malha aberta

Fonte: (MORAIS, 2006).

Para que a corrente no indutor se mantenha estável e dentro de uma restrita faixa de variação, independente da corrente de saída da fonte, é necessário o uso de um transformador com *taps* ajustáveis, ou seja, com diversos enrolamentos no secundário. Já o resistor variável R_a possui a função de manter as tensões no capacitor dentro de uma faixa de variação, independente da corrente de saída.

Conforme as especificações apresentadas em 3.2.1, a fonte deve ser capaz de gerar correntes senoidais com amplitudes de 0 a 10A para teste das funções de proteção do IEDs. Para atender essa faixa de valores, Moraes (2006), realiza um cálculo das faixas de correntes do circuito mostrado na Figura 14, considerando uma tensão CC constante para a alimentar o inversor, com um valor determinado para que a queda de tensão nas chaves semicondutoras seja desprezível. Além disso, as correntes no indutor e tensões no capacitor são mantidas em um faixa pré-determinada, como mencionado anteriormente.

Os valores das faixas de corrente obtidos por Moraes (2006), para um índice de modulação entre 0,3 e 0,95 (fora dessa faixa de modulação a distorção harmônica na saída do inversor sofre um aumento), estão apresentados na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 - Faixas de correntes e parâmetros de projeto

<i>Faixas</i>	$I_o(A_{rms})$		$I_L(A_{rms})$		$V_c(V_{rms})$		$E(V)$	$R_a(\Omega)$	$P_a(W)$	a
1	15,7	5,3	0,65	0,22	20,15	6,80	30	30	12,9	24
2	5,3	2,0	0,66	0,25	20,15	7,64	30	30	13,3	8
3	2,0	0,5	0,67	0,21	20,15	6,36	30	30	13,3	3

Fonte: Adaptado de MORAIS (2006).

Sendo:

I_o : Corrente de saída do inversor;

I_L : Corrente no indutor;

V_c : Tensão no capacitor;

E : Tensão CC de entrada do inversor;

R_a : Resistência variável;

P_a : Potência de saída;

a : *Taps* no secundário do transformador.

Observa-se a partir da Tabela 2 que com 3 *taps* no secundário do transformador e com uma tensão de alimentação de 30 Vcc, foi possível atingir os valores desejados de corrente de saída da fonte, de acordo com os requisitos do projeto.

Como a carga considerada para este projeto não é variável, se tratando apenas na bobina de corrente da entrada analógica dos IED's a serem testados, não há a necessidade de realizar um controle com malha fechada, utilizado apenas para casos em que a carga é variável. Portanto, para este trabalho será considerado o circuito em malha aberta mostrado na Figura 14, onde o controle da corrente de saída ocorrerá a partir do controle da comutação das chaves semicondutoras do inversor.

3.3.3 FILTRO LC

Com o intuito de reduzir o conteúdo harmônico gerado na saída do conversor CC-CA, é inserido um filtro de segunda ordem na saída do mesmo, visto que

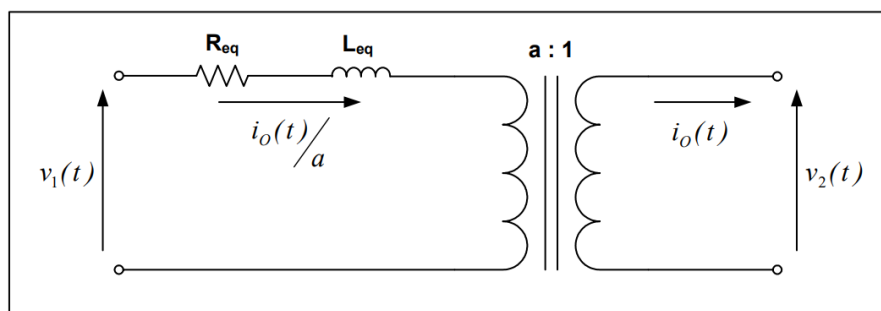
dependendo da amplitude das componentes harmônicas um filtro de primeira ordem pode não ser suficiente para garantir a atenuação necessária e a qualidade do sinal de saída (PUPO, 2015).

Pupo (2015), descreve o filtro LC como uma indutância ligada em série com a saída do inversor e um elemento capacitivo em derivação, o que caracteriza um filtro passa-baixas. Esse tipo de filtro é utilizado para conexões em que a carga tem característica indutiva, como no caso da bobina de corrente dos relés SEL-751A e SEL-451 a serem testados.

Em Morais (2006), são calculados os parâmetros de um filtro de segunda ordem, a partir das equações da tensão no indutor do circuito LC durante o crescimento e decaimento da corrente no mesmo, para uma corrente mínima do indutor de $0,35\sqrt{2A_{pico}}$ e uma corrente máxima de 40%, uma alimentação de 30V e a frequência da modulação por largura de pulso de $f_{MLP} = 50kHz$, os valores de indutância e capacitância obtidos por Morais (2006) foram $L = 376\mu H$ e $C \approx 1,7\mu F$. A frequência de corte desse filtro é de $f_c = 6,25kHz$. Esse filtro foi calculado considerando um transformador ideal e, portanto, desconsiderando a corrente de magnetização.

3.3.4 TRANSFORMADOR DE ISOLAÇÃO

Para estudo do sistema em malha aberta, será apresentado o modelo do transformador de isolamento, como elemento do sistema. O modelo considerado por Morais (2006) para o transformador está apresentado na Figura 15. No transformador ideal sua relação de transformação é representada por a , e as indutâncias e resistências de dispersão dos terminais primário e secundário estão sendo consideradas. A partir da Tabela 2, sabe-se que o transformador precisa de 3 *taps* no secundário para cumprir as especificações do projeto, e a partir de ensaios a vazio e em curto-circuito realizados por Morais (2006), foram obtidos os parâmetros necessários do transformador para os enrolamentos, sendo R_{eq} e L_{eq} , respectivamente, a resistência e a indutância de dispersão refletidas no primário do transformador.

Figura 15 - Modelo do transformador de isolação

Fonte: (MORAIS, 2006).

Tabela 3 - Parâmetros estimados para o transformador de isolação

<i>Enrolamento</i>	$R_{eq} (\Omega)$	$L_{eq} (mH)$	a
1	0,30	0,80	24
2	0,28	0,25	8
3	0,26	0,10	3

Fonte: Adaptado de MORAIS (2006).

3.4 DESENVOLVIMENTO DA ESTRUTURA DE CONTROLE

A estrutura de controle foi desenvolvida a partir do microcontrolador Arduino UNO, que possui custo acessível, é baseado em ATmega328P e é programado em linguagem C. O Arduino realiza o controle tanto do inversor da fonte de corrente, como do cálculo de tempo para atuação do relé digital.

3.4.1 ESTRUTURA DE CONTROLE DO INVERSOR DA FONTE DE CORRENTE

Conforme mencionado anteriormente no item 3.3.2, como a bobina de entrada de corrente do relé se trata de uma carga não variável, o controle da corrente de saída será feito em malha aberta, e a partir da frequência de comutação das chaves semicondutoras.

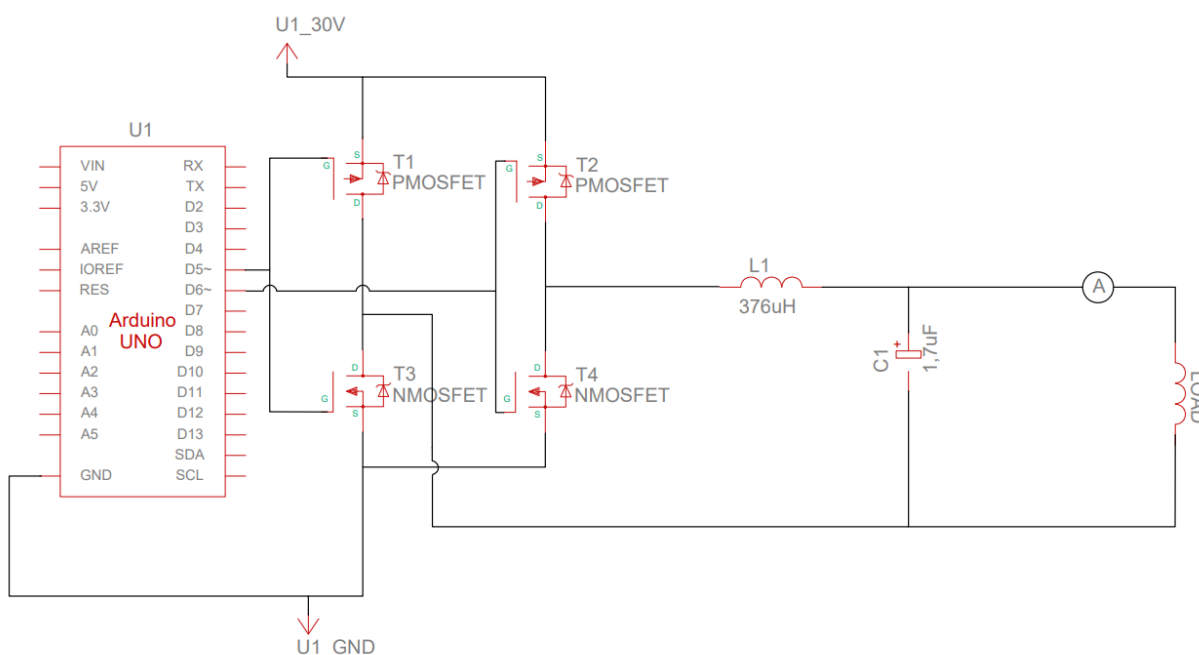
Para o modelo de conversor CC/CA apresentado na Figura 14, serão utilizadas chaves semicondutoras do tipo MOSFET, que permite altas frequências de chaveamento, baixa queda de tensão e suporta valores elevados de corrente para os MOSFETs de potência.

Para a geração do sinal PWM será utilizado o microcontrolador Arduino UNO, que possui pinos digitais (que podem ser configurados como entradas ou saídas digitais), específicos para a geração de sinais PWM. Esses pinos estão identificados com seus respectivos números, seguido do símbolo “~”, representando uma saída para geração de sinais PWM. Neste caso, serão utilizados os pinos D4~ e D5~.

Para o controle das chaves semicondutoras, os pinos digitais 4 e 5 do Arduino UNO devem ser ligados nos gates dos MOSFETs, fornecendo os sinais de controle. Morais (2006) sugere a utilização do circuito integrado (CI) IR2127, que fornece corrente nos níveis aceitáveis para o gate do MOSFET, além de realizar a proteção dos semicondutores. Neste projeto consideramos apenas o Arduino UNO ligado aos MOSFETs para controle da comutação dos componentes.

O circuito de controle implementado utilizando o microcontrolador Arduino Uno está apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Circuito de controle da corrente de saída utilizando Arduino UNO



Fonte: Elaborado pela autora.

Como observado na Figura 16, os transistores T1 e T3 estão sendo controlados pela mesma saída do Arduino, porém, por se tratarem de um MOSFET tipo P e um MOSFET tipo N (um permite a condução quando o sinal está em nível lógico alto e outro permite a condução com o sinal em nível lógico baixo), os dois

sempre estarão em estados diferentes, ou seja, quando um está aberto o outro está fechado. A mesma análise serve para os transistores T2 e T4 ligados ao pino D6 do Arduino.

É importante mencionar que a frequência de modulação do inversor determina a taxa de alternância dos estados ligado e desligado dos dispositivos de comutação, enquanto o sinal PWM controla a largura dos pulsos de comutação. Com isso, a amplitude média da corrente de saída é controlada através da modulação do ciclo de trabalho do sinal PWM, que, para uma modulação em 3 níveis, foi representado na simulação pelo trecho do código:

```
% Sinal PWM para controle da comutação dos MOSFETs em 3 níveis
ciclo_trabalho = [-1, -0.5, 0, 0.5, 1];
```

3.4.2 ALGORITMO DE CONTROLE PARA CÁLCULO DO TEMPO DE ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO

Com o intuito de apresentar o tempo que o relé demora para apresentar a resposta da atuação da função de proteção, a partir do início da injeção de tensão ou corrente em suas entradas analógicas, utilizou-se o microcontrolador Arduino UNO.

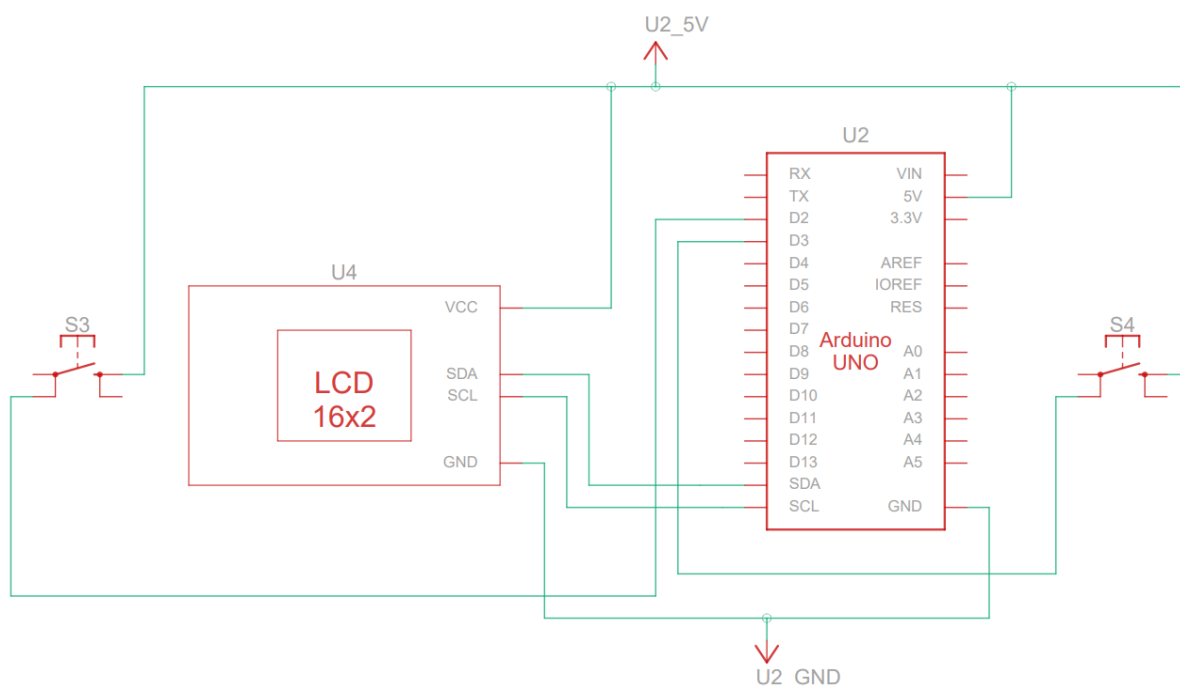
Uma das entradas digitais do microcontrolador é ligada a uma botoeira responsável pelo início da injeção de corrente, assim, ao se dar início à injeção do sinal no relé, um sinal de 5V é enviado à input do controlador, e o Arduino começa a contagem de tempo.

Essa entrada digital do Arduino ligada à botoeira de início, também é programada para começar a geração do sinal PWM, assim, ao se apertar o botão de “ligar”, a geração de PWM começa a ser enviada para o inversor, que dá início à geração de corrente pela mala.

A outra entrada digital do microcontrolador, responsável pela parada do tempo, é ligada em uma saída digital do relé a ser testado, que deve ser configurada para o sinal de “TRIP”, assim, quando o relé atuar a função de proteção, enviando o sinal de TRIP para a saída digital, o Arduino finaliza a contagem de tempo. Este tempo de atuação é apresentado em um display LCD conectado à placa do Arduino, onde é mostrada a mensagem “Tempo de Atuação = X ms”.

O circuito proposto nessa etapa do projeto, para cálculo do tempo de atuação da função de proteção no relé, é apresentado na Figura 17. O código utilizado para este cálculo do tempo de atuação é apresentado no Apêndice A. O resultado obtido com a simulação desse circuito é apresentado na Figura 25.

Figura 17 - Circuito para cálculo do tempo de atuação com Arduino UNO



Fonte: Elaborado pela autora.

Nesse circuito mostrado na Figura 17, o botão S3 (entrada digital 2 do Arduino UNO), representa o sinal enviado pelo botão responsável por dar início à injeção de corrente no relé, e o botão S4 representa uma OUT (saída digital do relé), programada digitalmente para enviar um pulso quando a função de proteção do IED atuar. Assim, o Arduino UNO realizará o cálculo do tempo de atuação da função de proteção e apresentará essa informação no display LCD 16x2.

Esse atributo do projeto tem a função de validar o teste de proteção realizado pela mala, comparando o tempo esperado de atuação da proteção, com o tempo real do teste, possibilitando a verificação da velocidade e confiabilidade do relé a ser testado.

4. RESULTADOS

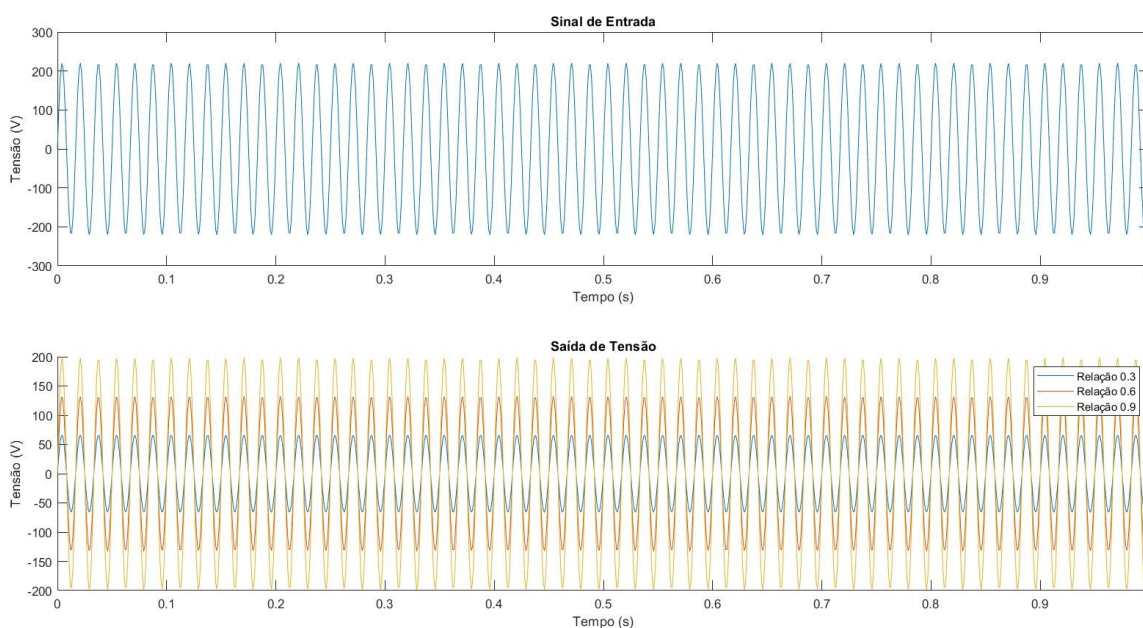
Os resultados aqui apresentados são obtidos a partir da geração do sinal modulado por largura de pulso (PWM) pelo microcontrolador Arduino UNO, para controle da frequência de comutação das chaves semicondutoras tipo MOSFET, na fonte de corrente por inversor. Além da simulação da tensão de saída do auto transformador Variac, que tem sua amplitude controlada no próprio equipamento.

4.1 SIMULAÇÕES

A partir do projeto proposto no capítulo anterior, foram realizadas simulações utilizando os softwares MatLab e Simulink, com o intuito de observar a resposta de saída do circuito da mala de teste, conforme os métodos de controle apresentados para determinar a amplitude do sinal de saída.

A simulação da saída de tensão da mala de testes apresentada na Figura 18 mostra a tensão de alimentação do Variac, com 220V de amplitude e 60 Hz de frequência, bem como os sinais de saída que foram simulados para 3 diferentes *taps*. Observa-se pela Figura 18 que a frequência do sinal de saída não é alterada pelo transformador, se mantendo igual à frequência de alimentação do equipamento.

Figura 18 - Sinal de entrada e saída de tensão no Variac

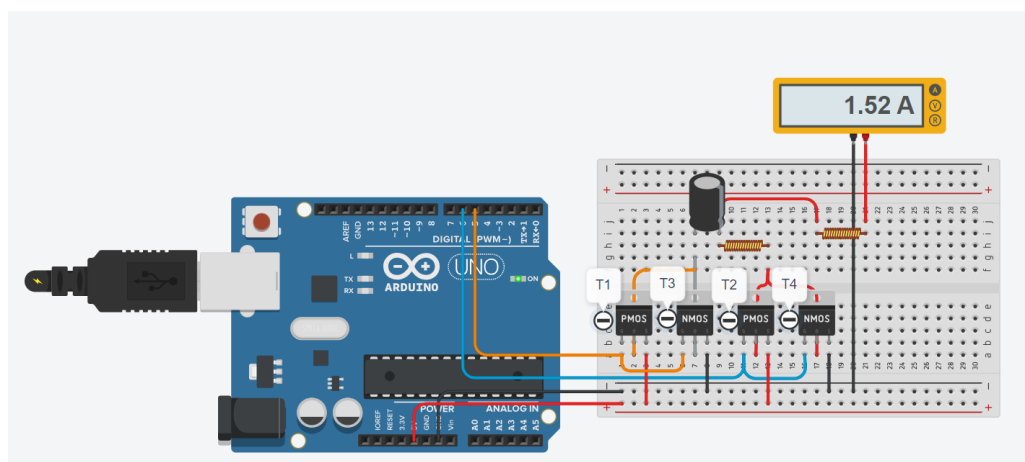


Fonte: Elaborado pela autora.

Para a simulação da saída da fonte de corrente por inversor, é considerado o circuito apresentado na Figura 16, sem considerar o transformador de isolamento apresentado na Figura 14.

O sinal modulado por largura de pulso é gerado pelas saídas digitais do microcontrolador Arduino UNO, que permite o controle da amplitude da corrente de saída a partir da frequência de comutação dos transistores tipo MOSFET que compõem o conversor CC/CA. O valor da medição da amplitude de corrente feito pelo amperímetro mostrado na Figura 16 foi simulado utilizando o software Tinkercad, que permite a simulação de circuitos utilizando o Arduino UNO. O circuito e a medição de corrente pelo amperímetro são mostrados na Figura 19. Este circuito desconsidera a presença do resistor variável e do transformador de saída. Vale ressaltar que a maioria dos amperímetros digitais suportam uma medição de corrente direta de até 5A, para valores superiores de corrente recomenda-se o uso de um TC. A Tabela 4 apresenta a especificação de um medidor digital e um transformador de corrente sugeridos para o projeto.

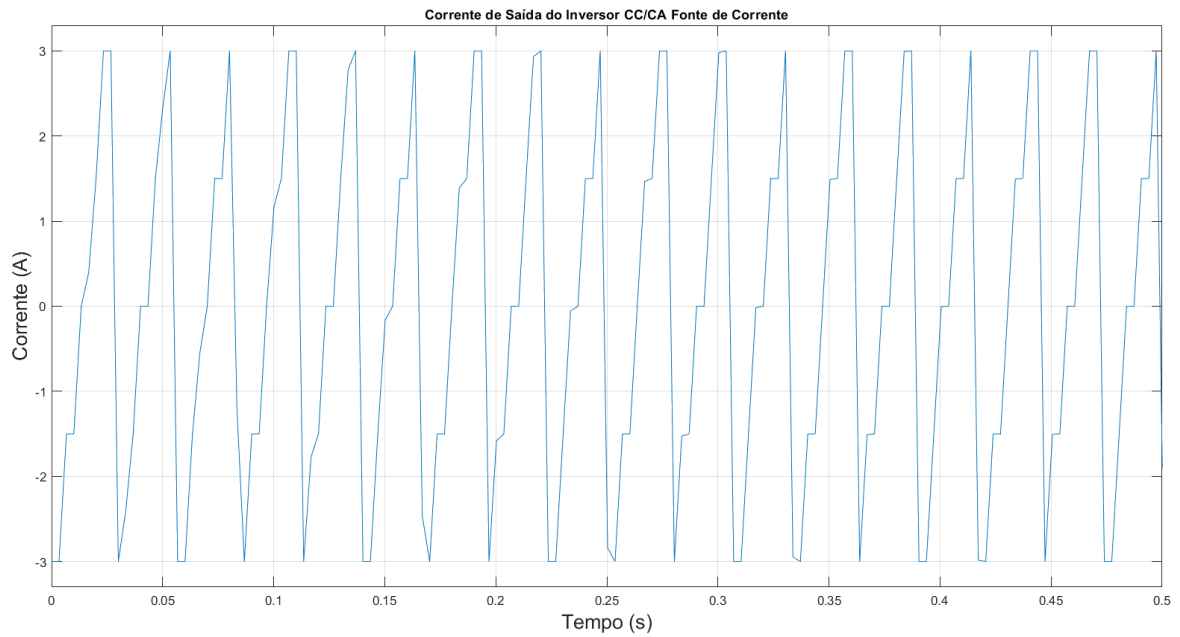
Figura 19 - Medição de corrente por amperímetro digital na saída do circuito



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 20, obtida a partir de simulação pelo software MatLab, é mostrado o sinal da corrente de saída do conversor CC/CA com uma frequência de comutação de 180Hz e *tap* do transformador de saída em 1:3, controlado pelas saídas PWM do Arduino UNO. As simulações do sinal da corrente de saída mostradas nas Figuras a seguir foram obtidas considerando um transformador ideal e uma carga com resistência de 10Ω.

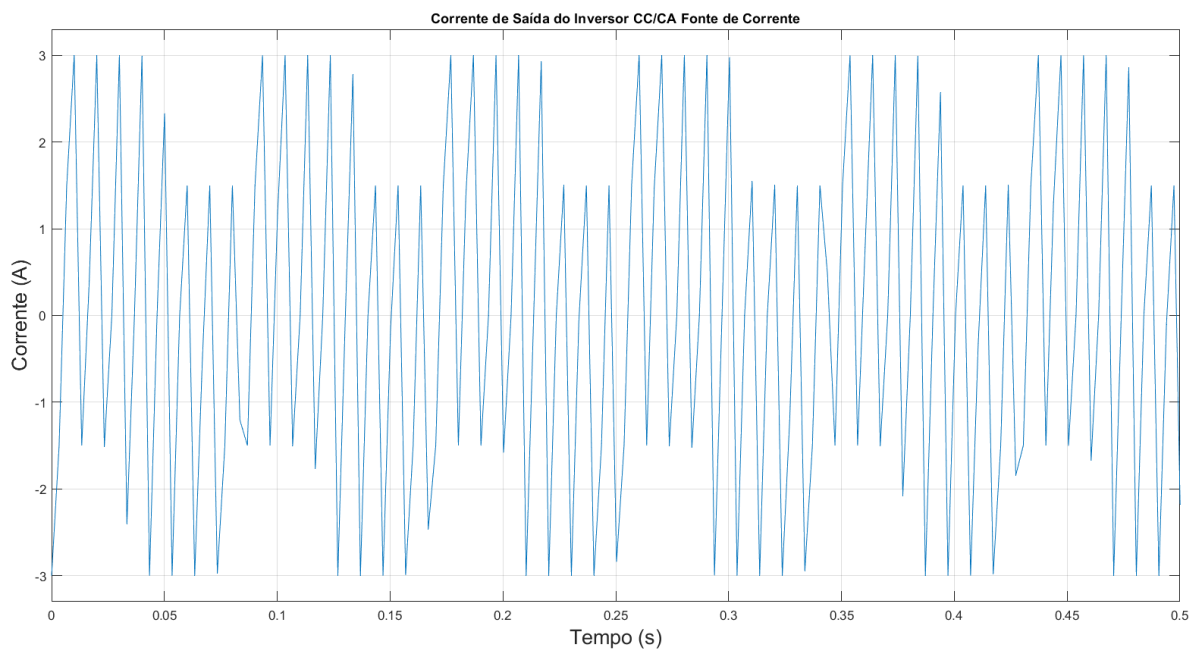
Figura 20 - Corrente de saída da fonte para $f = 180 \text{ Hz}$ e $a = 3$



Fonte: Elaborado pela autora.

Agora, mantendo o *tap* do transformador em 3 e aumentando a frequência de comutação dos MOSFETs do inversor, temos a saída de corrente mostrada na Figura 21.

Figura 21 - Corrente de saída da fonte para $f = 480 \text{ Hz}$ e $a = 3$

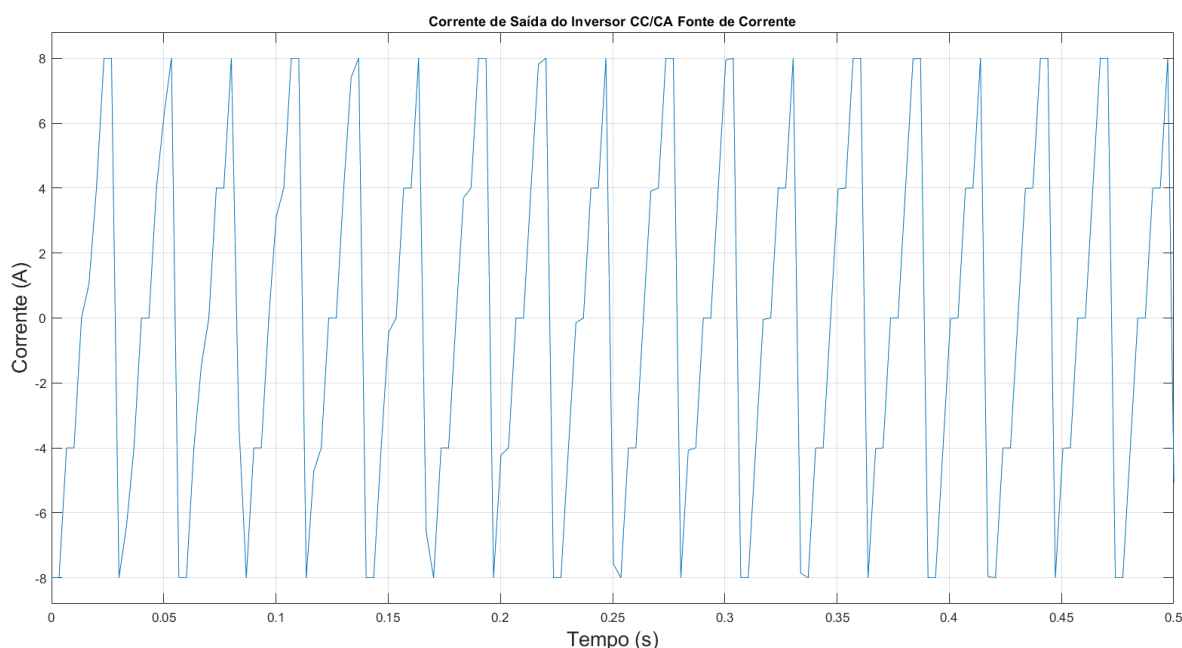


Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se a partir da Figura 21, que o valor médio da corrente é reduzido com o aumento da frequência, mesmo que o *tap* do transformador seja o mesmo.

Na Figura 22 é apresentada a corrente de saída com a mesma frequência do sinal PWM da Figura 20, porém agora com um *tap* de 8.

Figura 22 - Corrente de saída da fonte para $f = 180 \text{ Hz}$ e $a = 8$



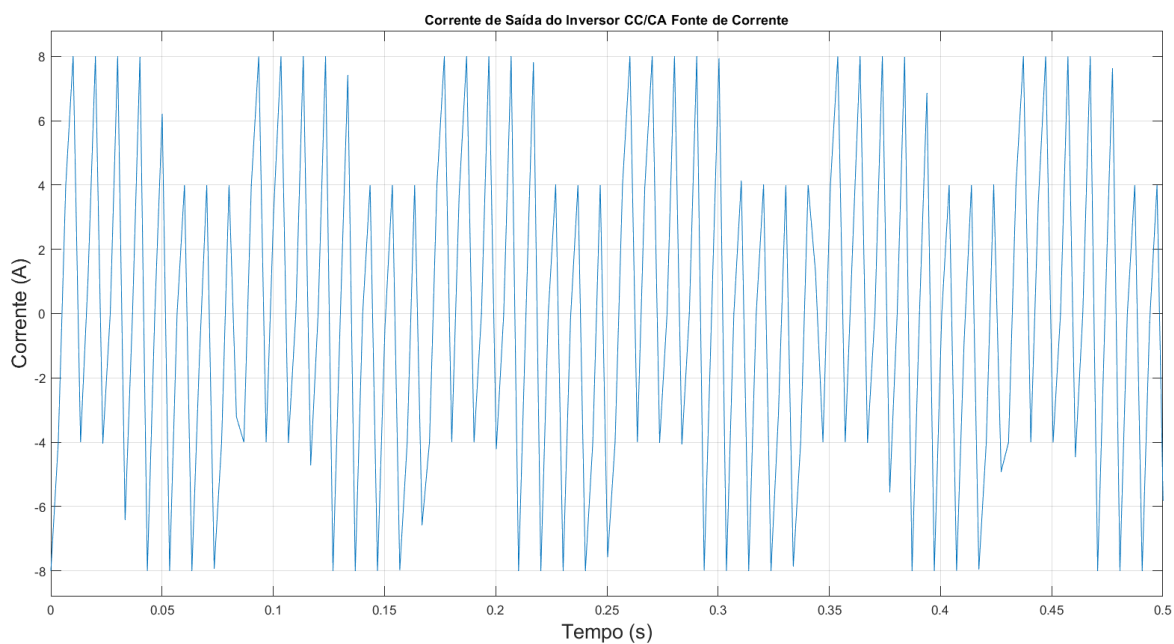
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 23 mostra o sinal da saída de corrente para o mesmo *tap* do transformador, porém agora com uma frequência de comutação de 480 Hz, gerada pelo sinal PWM do Arduino.

Foi possível observar novamente na Figura 23 que o valor médio da corrente que sai da fonte, é reduzido para um valor maior da frequência de comutação. Na Figura 24 é apresentada a relação entre a amplitude média da corrente de saída do circuito com relação à frequência de comutação das chaves semicondutoras MOSFET, definido pela modulação PWM.

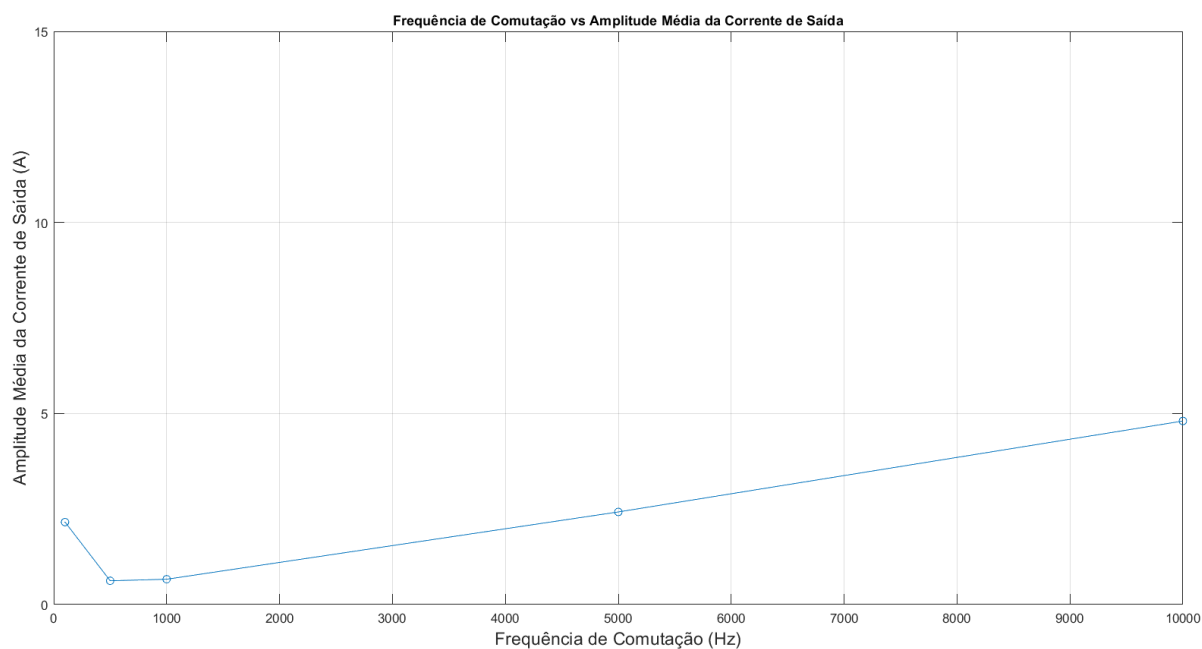
Observa-se que para valores de frequência até 500 Hz, o valor médio da corrente de saída decresce conforme a frequência aumenta, já para valores superiores a 500 Hz, o comportamento da corrente é o oposto, que aumenta conforme a frequência de comutação dos transistores cresce.

Figura 23 - Corrente de saída da fonte para $f = 480 \text{ Hz}$ e $a = 8$



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 - Relação da corrente média de saída do inversor com a frequência de comutação



Fonte: Elaborado pela autora.

Para simulação do circuito elaborado para cálculo do tempo de atuação do relé digital, mostrado na Figura 17, foi realizado um teste em bancada, de modo que

o Arduino UNO recebeu 5V em suas entradas digitais 2 e 3, respectivamente, e a diferença de tempo entre esses dois sinais recebidos foi apresentada no *display* LCD 16x2, como mostrado na Figura 25. O circuito utilizado para essa simulação está no Apêndice A deste trabalho. Como já mencionado, o intuito dessa medição é mostrar o tempo de resposta do relé digital, desde o recebimento do sinal até a atuação da função de proteção, de modo a validar os testes realizados com os IED's.

Figura 25 - Simulação do circuito para cálculo de tempo de resposta do relé digital



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES

De modo a contemplar os requisitos de projeto especificados anteriormente, foram escolhidos componentes específicos para a aplicação desejada, garantindo-se que suportem valores de tensão e corrente na faixa especificada para a geração da mala de testes.

Os componentes utilizados no projeto, bem como suas especificações técnicas e preço médio de mercado estão apresentados na Tabela 4. Ressalta-se que as especificações dos componentes do filtro LC e do isolador galvânico já foram detalhadas no tópico 3 deste trabalho.

Os MOSFETs mostrados na Tabela 4 são melhores detalhados no Anexo C deste trabalho.

Além dos componentes propostos na Tabela 4, recomenda-se o uso de disjuntores termomagnéticos para a alimentação dos componentes, como medida de segurança contra curtos-circuitos e sobrecargas no circuito projetado, de modo a proteger o usuário e os componentes.

Tabela 4 - Especificações dos componentes

Componente	Descrição	Alimentação [V]	Capacidade de Corrente [A]	Preço [R\$]	Especificação
Arduino Uno	Microcontrolador Arduino UNO	7-12 (CC)	0,02	100,00	Placa de microcontrolador baseada em ATmega328P com 6 pinos para PWM
Display	LCD 16x2	5 (CC)	-	30,00	-
MOSFET tipo P	IRFP260NPBF	-	50	22,00	Anexo C.1
MOSFET tipo N	IRFB7440PBF	-	120	22,00	Anexo C.2
Variac	Variador de Tensão Monofásico 5kVA modelo TDGC2	220 (CA)	20	1845,00	Entrada: 220Vca $\pm 10\%$ Saída: 0-220Vca $\pm 10\%$
Medidor Digital	Amperímetro Digital Sibratec AOB294I-5X1	220 (CA)	50	235,00	Mede correntes de até 1000A com TC
Transformador de Corrente	TC Phoenix Contact PACT MCR-V1-21-4 4- 50-5A-1	-	50	89,70	Relação 50:5

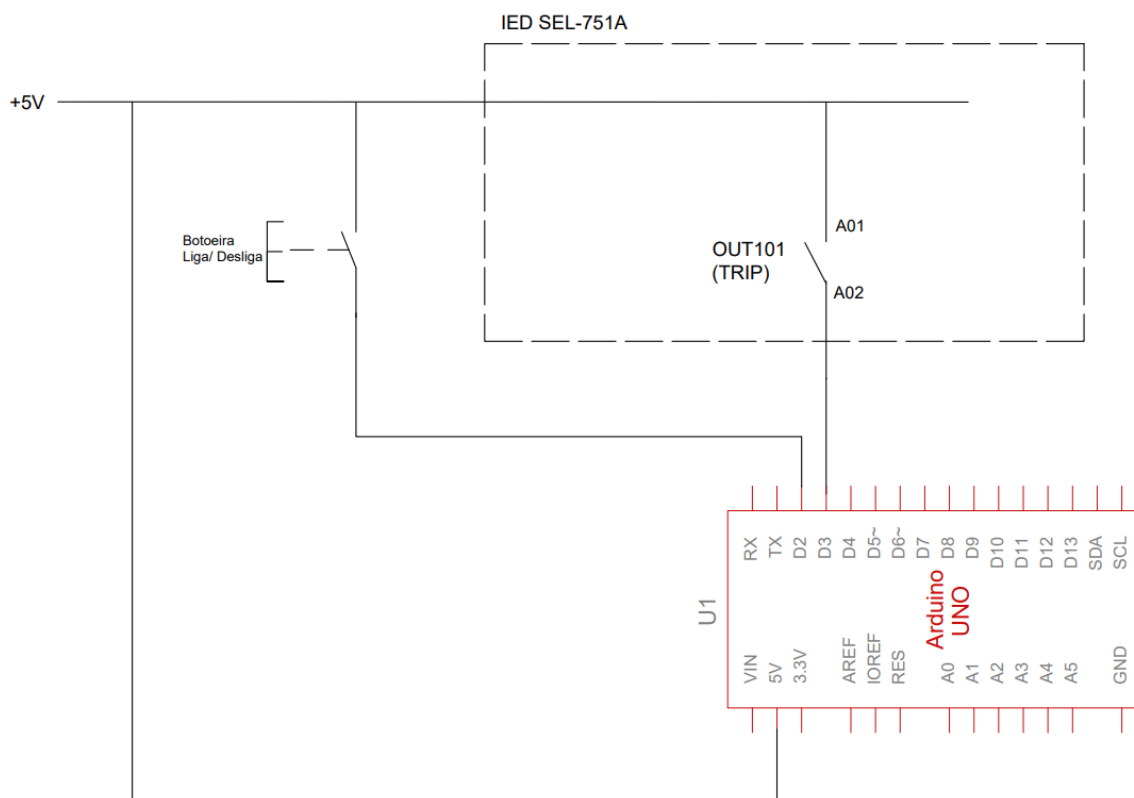
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 CIRCUITO DE COMANDO

Para o circuito de comando responsável pelo início e parada de injeção de sinal pela mala, propõe-se o circuito apresentado na Figura 26. Será utilizada a

mesma entrada digital do Arduino para início e parada da geração de sinais, a partir de uma lógica de SET e RESET na programação. O botão de desligar deve ser utilizado por segurança no caso do IED não atuar a proteção devidamente, mantendo o contato da OUT aberto.

Figura 26 - Circuito de comando para início e parada da geração de sinais



Fonte: Elaborado pela autora.

Os pinos digitais D1 e D2 do Arduino UNO são ligados à botoeira de início e à OUT de TRIP com o intuito de realizar a medição de tempo da atuação da proteção do relé, como já mostrado na Figura 17 do item 3.4.2. A mesma entrada digital D2 é utilizada no controle do início e fim da geração de sinal PWM pelo microcontrolador.

No caso do IED não atuar a função de proteção, mantendo o sinal da OUT baixo, deve ser utilizado o botão de parada, que será inserido na lógica de geração do sinal PWM para interromper a geração de corrente. Neste caso, o Arduino não realizará contagem de tempo, visto que a entrada digital D3 permanecerá em 0, mostrando que o IED não atuou corretamente.

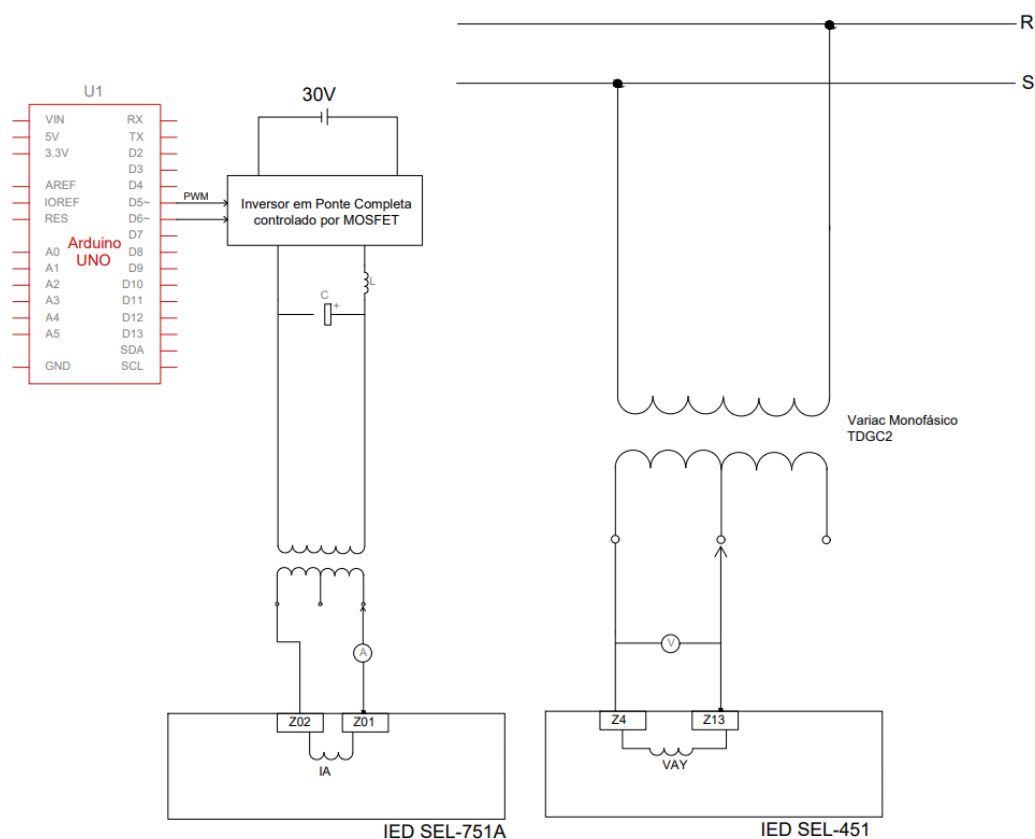
4.4 CIRCUITO DE FORÇA

O circuito de força proposto para a injeção de tensão e corrente nos relés é apresentado na Figura 27, a seguir. Neste circuito, o inversor para fonte de corrente senoidal é o apresentado na Figura 14. O início e parada da geração de corrente é controlado pela entrada digital 2 do Arduino, responsável por controlar a saída do sinal PWM do mesmo, como mostrado na Figura 26 do item 4.3.

Para o circuito de tensão, o Variac monofásico é ligado direto na rede, e sua saída ligada diretamente à entrada de tensão do relé digital. Na Figura 27 o IED SEL-451 está sendo utilizado para demonstrar a medição de tensão, pois o SEL-751A do laboratório PMEG não possui entradas para medição de tensão.

É interessante que o circuito de tensão não tenha um início ou parada abruptos, pois as funções de proteção de sub e sobretensão são usualmente testadas com sinal em rampa, onde a tensão é aumentada ou diminuída linearmente, até atingir o *pick-up* da proteção, definido no relé.

Figura 27 - Circuito de força da mala de testes proposta



Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento do presente trabalho foi possível realizar um estudo aprofundado sobre a proteção de sistemas elétricos, aprofundando nos equipamentos digitais utilizados para monitoramento e controle preciso do sistema protegido, como os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes, responsáveis pela automação e controle de sistemas de geração, transmissão e distribuição.

O projeto desenvolvido teve como objetivo possibilitar a montagem do protótipo de uma mala de testes monofásica que realize uma injeção controlada de tensão e corrente nos IEDs da marca SEL, presentes no Laboratório PMEG do Campus 3 da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Os resultados obtidos em simulação mostraram que é possível obter sinais de tensão e corrente de amplitudes variáveis, a partir das técnicas de controle propostas. Para a geração de tensão, observou-se que o Variac cumpre a função de fornecer uma tensão variável em sua saída, com a amplitude controlada por um botão no próprio equipamento, que controla a comutação dos *taps* internos do transformador. Para a geração de corrente, foi proposto um conversor CC/CA com controle das chaves semicondutoras MOSFET realizado por modulação por largura de pulso. O controle da amplitude da corrente gerada por esse inversor foi realizado pelo microcontrolador Arduino Uno, que possui saídas digitais específicas para geração de sinal PWM. A simulação realizada mostra que a amplitude da corrente de saída varia conforme a frequência de comutação das chaves semicondutoras do inversor, como o esperado, mostrando que este método é efetivo para controlar a amplitude de saída da corrente em malha aberta, visto que não há necessidade de uma malha fechada pois a carga considerada não é variável.

Além da geração dos sinais, foi desenvolvido um algoritmo para cálculo do tempo de resposta do relé digital ao atuar a respectiva função de proteção ao ter uma falta simulada pela mala de testes. Para este fim, o microcontrolador Arduino UNO foi utilizado, por se tratar de uma solução acessível e eficaz para esse tipo de controle. O resultado do tempo medido é apresentado em um display LCD acoplado à placa do Arduino. A proposta da mala de testes projetada é apresentar medições precisas da corrente de saída do circuito, ou seja, que está sendo injetada no relé, a partir da utilização de um amperímetro digital ligado a um transformador de corrente.

REFERÊNCIAS

IRFB7440PbF HEXFET Power MOSFET: Datasheet. [S. l.]: International Rectifier, 2015. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon_IRFB7440_DataSheet_v01_01_EN-3166228.pdf. Acesso em: 31 maio 2023.

IRFP260NPBF HEXFET Power MOSFET: Datasheet. [S. l.]: International Rectifier, 2010. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon_IRFP260N_DataSheet_v01_01_EN-3166401.pdf. Acesso em: 31 maio 2023.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 3. ed. aum. Florianópolis - SC: [s. n.], 2012. 288 p. v. 1. ISBN 978-85-910875-2-5.

MAEZONO, P. K. **CURSO DE PROTEÇÃO - Proteção de Transformadores e Reatores Shunt**. Virtus Consultoria e Serviços Ltda. [S. l.], 2003. 152 p.

MAGALHÃES, L. F.. **Plataforma de Testes e Virtualização de Dispositivos Eletrônicos Inteligentes baseados na Norma IEC 61850**. Orientador: Prof. Lucas Silveira Melo. 2019. 97 p. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/45269/1/2019_tcc_lfmagalhaes.pdf. Acesso em: 1 maio 2023.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 622 p. ISBN 978-85-216-1884-3.

MORAIS, M. C. de. **Fonte de Corrente Alternada Programável para Ensaios de Equipamentos Elétricos**. Orientador: Prof. Paulo Fernando Seixas. 2006. 102 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2006.

POMILIO, J. A. Conversores CC/CA - Inversores. In: **ELETRÔNICA de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. [S. l.]: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2017. cap. 5. Disponível em:

<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/cap5.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2023.

PUPO, A. D. **Estudo de Metodologias de Projeto para Filtros de Saída de Inversores**. Orientador: Prof. Rafael Cardoso. 2015. 102 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco - PR, 2015. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/14894/1/PB_COELT_2015_1_02.pdf. Acesso em: 13 maio 2023.

SEL – Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial Ltda. **SEL-751A Feeder Protection Relay Instruction Manual**. [S. l.], 2007-2022. 694 p.

TABELA ANSI. In: **SEL: Schweitzer Engineering Laboratories**, Inc.. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/tables/ansi/>. Acesso em: 1 jun. 2023.

VARIADOR de Tensão Manual de Instrução: Modelos: TDGC/TSGC. [S. l.]: JNG, 2020. Disponível em: http://www.jng.com.br/upload/download/%7B8F8F46FA-1CC2-4E76-A1FF-A0F09CE11459%7D_Manual%20Variac%20-TDGC%20TSGC%2012_2017%20JNG.pdf. Acesso em: 1 mai. 2023.

VARIADOR de Tensão Monofásico 5 KVA. [S. l.]: Instrum Instrumentos de Medição, 6 jun. 2023. Disponível em: <https://www.instrumbrasil.com.br/eletrica/variador-de-tensao-1/variador-de-tensao-monofasico-5-kva-20-amp-ac-e-dc.phtml>. Acesso em: 26 abr. 2023.

ANEXO A - Tabela ANSI

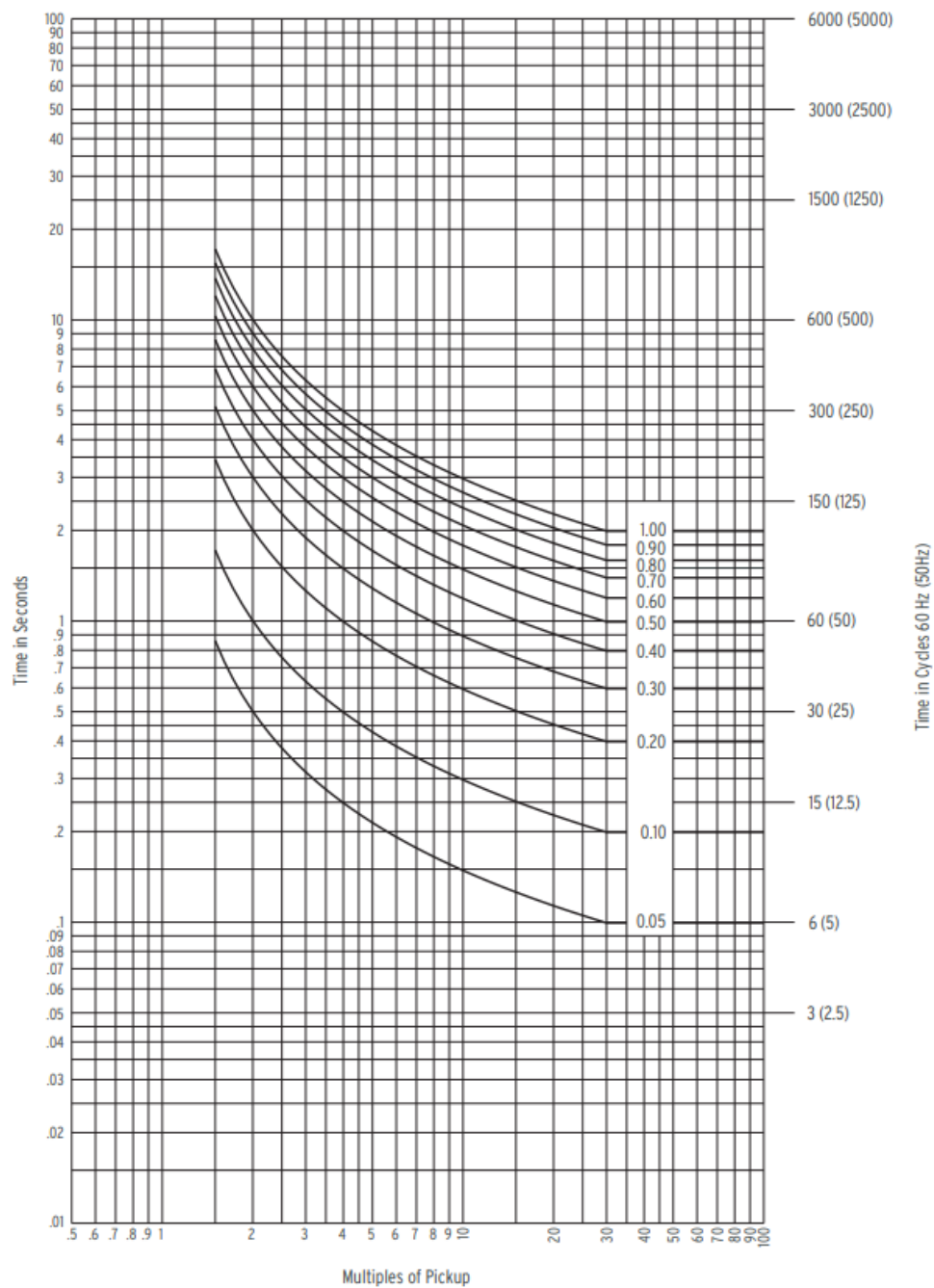
Figura A.1 - Tabela ANSI

Nr	Denominação	Nr	Denominação	Nr	Denominação	Nr	Denominação
1	Elemento Principal	25	Relé de verificação de Sincronismo	49	Relé térmico	73	Contator de resistência de carga
2	Relé de partida ou fechamento temporizado	26	Dispositivo térmico do equipamento	50	Relé de sobrecorrente instantâneo	74	Relé de alarme
3	Relé de verificação ou interbloqueio	27	Relé de subtensão	51	Relé de sobrecorrente temporizado	75	Mecanismo de mudança de posição
4	Contator principal	28	Detector de chama	52	Disjuntor de corrente alternada	76	Relé de sobrecorrente CC
5	Dispositivo de interrupção	29	Contator de isolamento	53	Relé para excitatriz ou gerador CC	77	Dispositivo de telemedicação
6	Disjuntor de partida	30	Relé anunciador	54	Dispositivo de acoplamento	78	Relé de medição de ângulo de fase / proteção contra falta de sincronismo
7	Relé de taxa de variação	31	Dispositivo de excitação	55	Relé de fator de potência	79	Relé de religamento
8	Dispositivo de desligamento da energia de controle	32	Relé direcional de potência	56	Relé de aplicação de campo	80	Chave de fluxo
9	Dispositivo de reversão	33	Chave de posicionamento	57	Dispositivo de aterramento ou curto-circuito	81	Relé de frequência (sub ou sobre)
10	Chave comuladora de sequência das unidades	34	Dispositivo master de sequência	58	Relé de falta de reficificação	82	Relé de religamento de carga de CC
11	Dispositivo multifunção	35	Dispositivo para operação das escovas ou curto-circuitar anéis coletores	59	Relé de sobretensão	83	Relé de seleção / transferência automática
12	Dispositivo de sobrevelocidade	36	Dispositivo de polaridade ou polarização	60	Relé de balanço de corrente ou tensão	84	Mecanismo de operação
13	Dispositivo de rotação síncrona	37	Relé de subcorrente ou subpotência	61	Sensor de densidade	85	Relé receptor de sinal de telecomunicação (teleproteção)
14	Dispositivo de subvelocidade	38	Dispositivo de proteção de mancal	62	Relé temporizador	86	Relé auxiliar de bloqueio
15	Dispositivo de ajuste ou comparação de velocidade e/ou frequência	39	Monitor de condições mecânicas	63	Relé de pressão de gás (Buchholz)	87	Relé de proteção diferencial
16	Dispositivo de comunicação de dados	40	Relé de perda de excitação ou relé de perda de campo	64	Relé detector de terra	88	Motor auxiliar ou motor gerador
17	Chave de demarcação ou descarga	41	Disjuntor ou chave de campo	65	Regulador	89	Chave seccionadora
18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração	42	Disjuntor / chave de operação normal	66	Relé de supervisão do número de partidas	90	Dispositivo de regulação (regulador de tensão)
19	Contator de transição partida-marcha	43	Dispositivo de transferência ou seleção manual	67	Relé direcional de sobrecorrente	91	Relé direcional de tensão
20	Válvula operada eletricamente	44	Relé de sequência de partida	68	Relé de bloqueio por oscilação de potência	92	Relé direcional de tensão e potência
21	Relé de distância	45	Monitor de condições atmosféricas	69	Dispositivo de controle permissivo	93	Contator de variação de campo
22	Disjuntor equalizador	46	Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente	70	Reostato	94	Saídas digitais de alta velocidade para Trip
23	Dispositivo de controle de temperatura	47	Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão	71	Dispositivo de detecção de nível	95	Usado para aplicações específicas
24	Relé de sobreexcitação ou Volts por Hertz	48	Relé de sequência incompleta / partida longa	72	Disjuntor de corrente contínua	96	Relé auxiliar de bloqueio de barra

Fonte: (TABELA..., 2023).

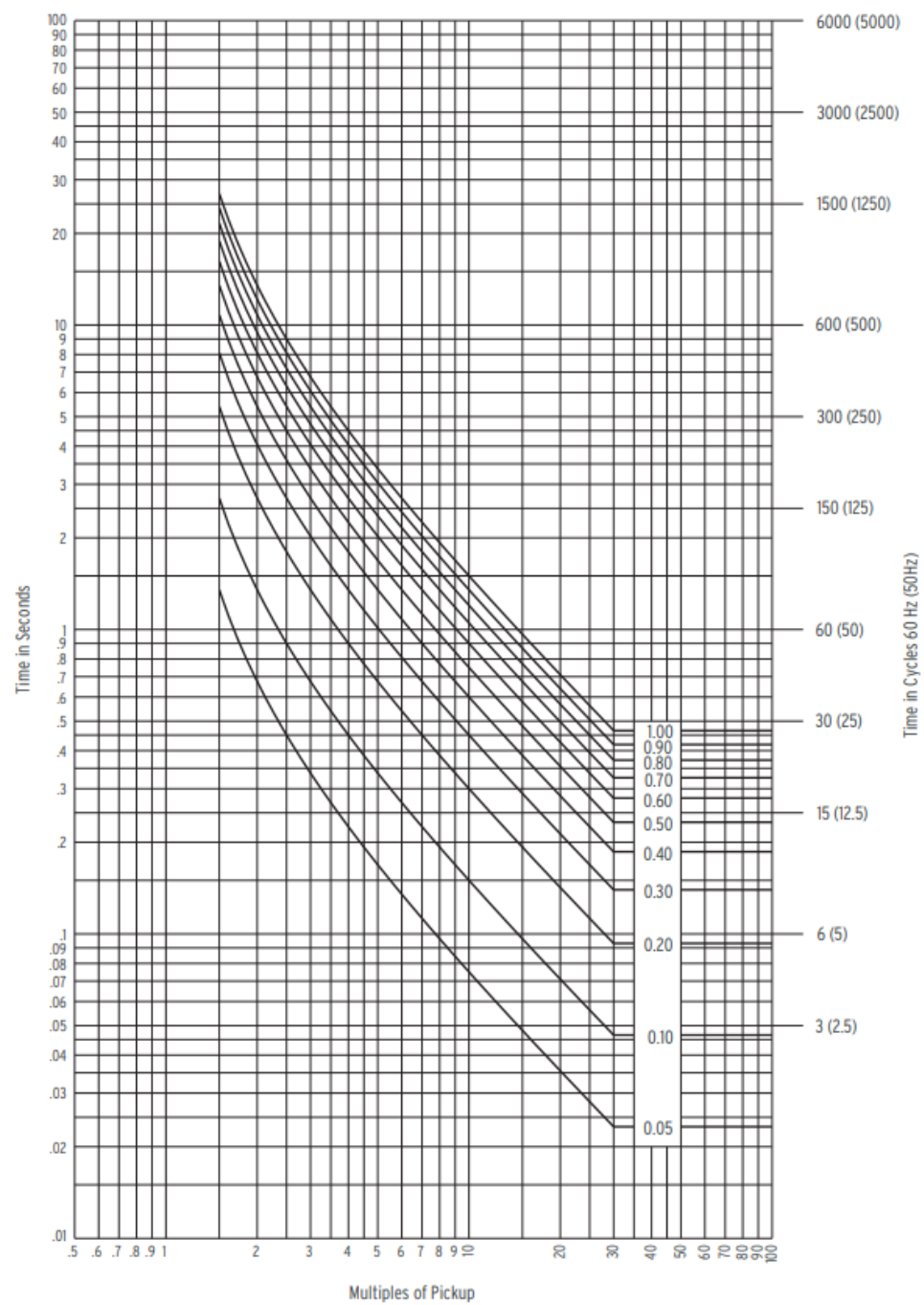
ANEXO B - Curvas da função 51

Figura B.1 - Curva C1 Normalmente Inversa



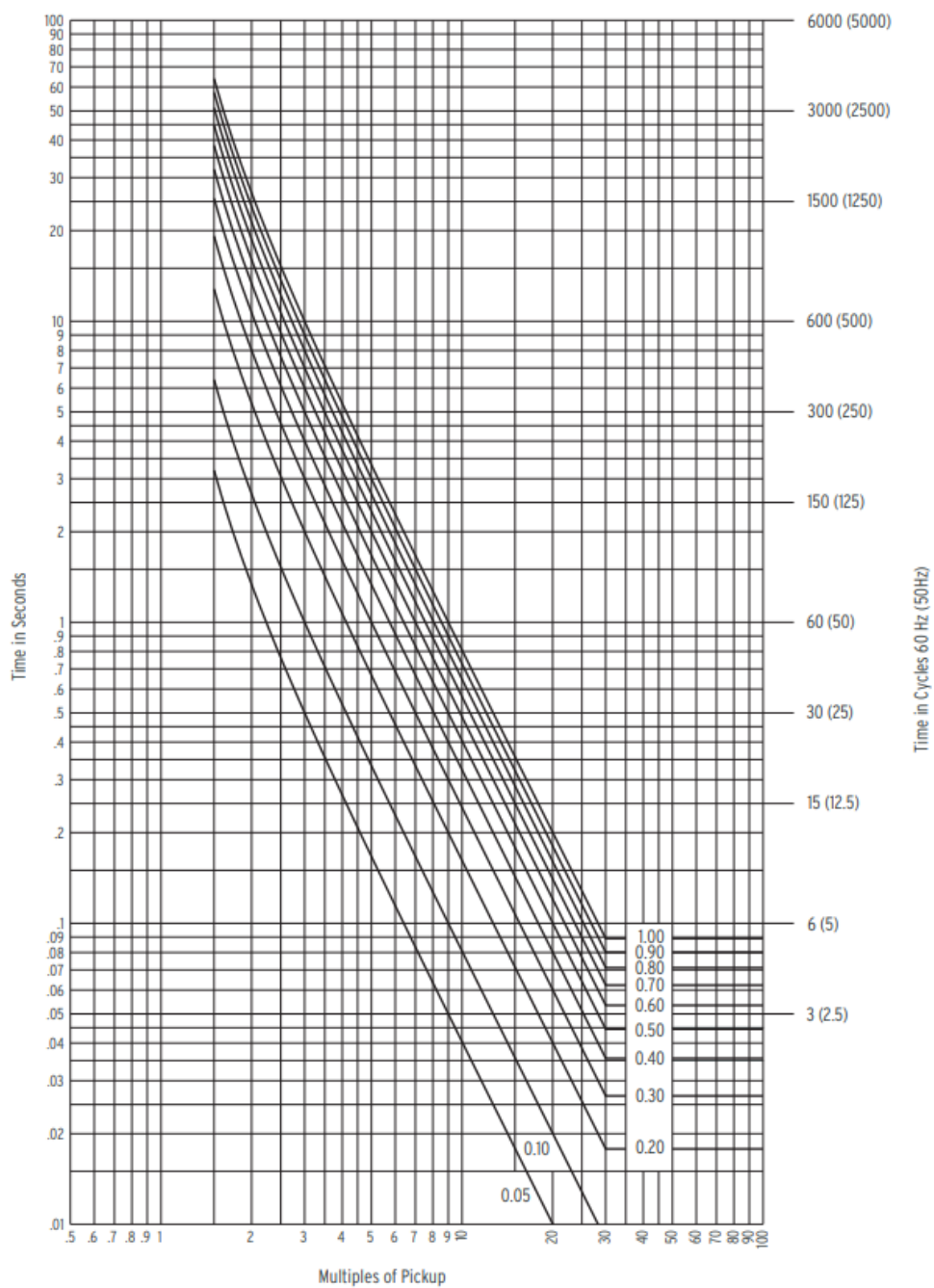
Fonte: (SEL, 2022).

Figura B.2 - Curva C2 Muito Inversa



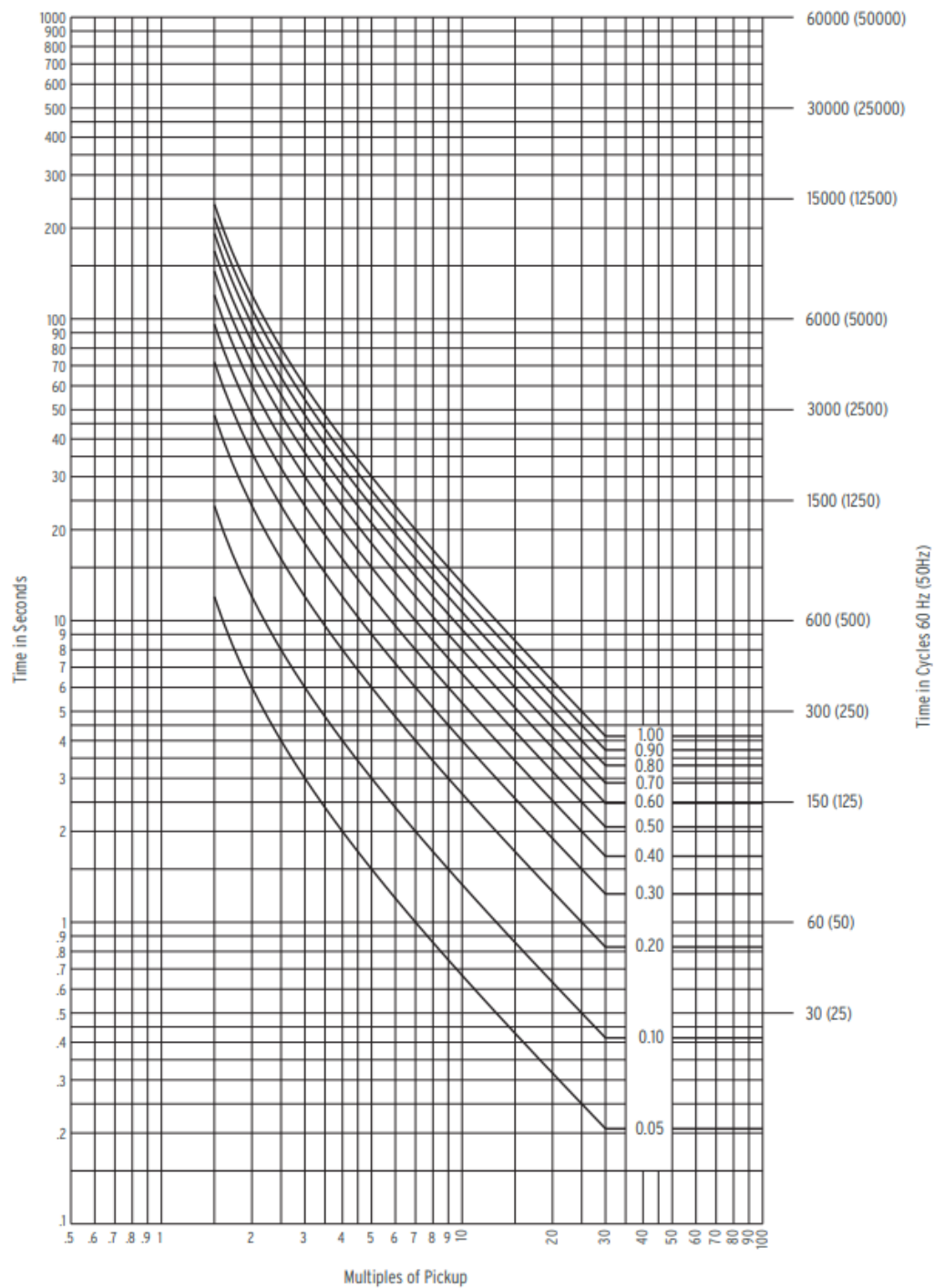
Fonte: (SEL, 2022).

Figura B.3 - Curva C3 Extremamente Inversa



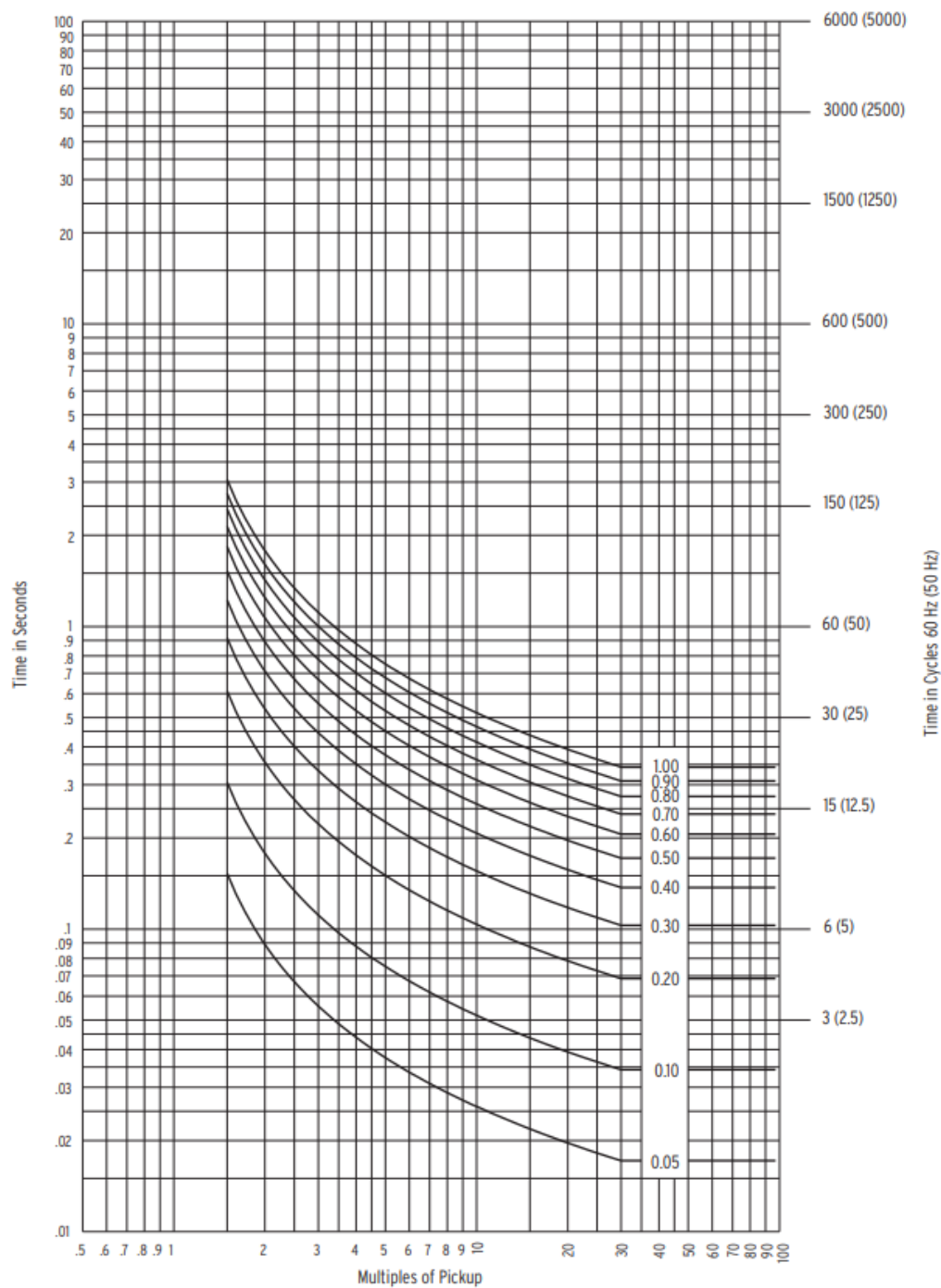
Fonte: (SEL, 2022).

Figura B.4 - Curva C4 Inversa de Tempo Longo



Fonte: (SEL, 2022).

Figura B.5 - Curva C5 Inversa de Tempo Curto



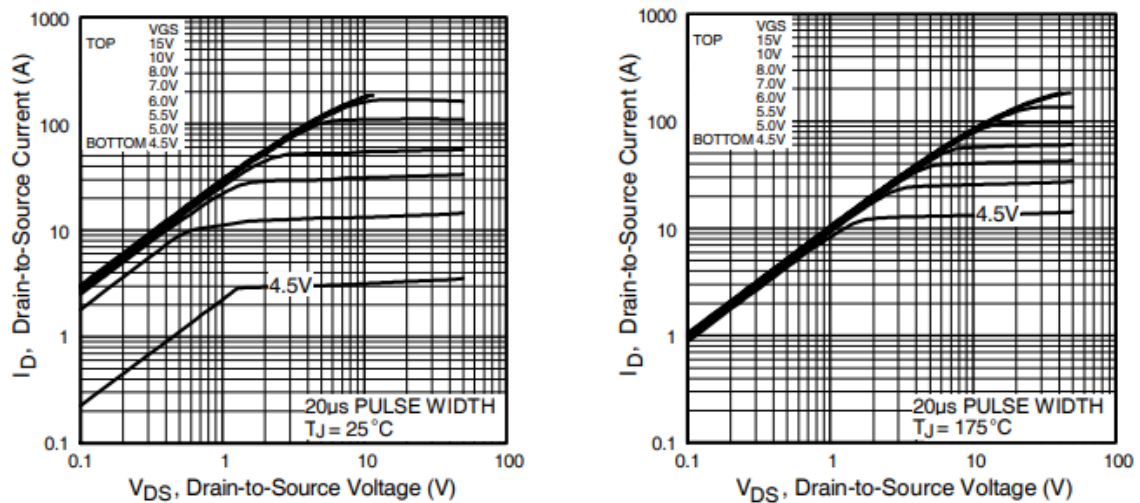
Fonte: (SEL, 2022).

ANEXO C - Especificação Técnica de Componentes

Neste Anexo são apresentados detalhadamente os transistores MOSFET do tipo P e do tipo N utilizados no inversor fonte de corrente, mostrados na Figura 16, apresentando a capacidade de corrente e valores nominais dos mesmos.

C.1 MOSFET tipo P

Figura C.1 - Relação $I_D \times V_{gs}$ do MOSFET tipo P IRFP260NPBF



Fonte: (IRFP260NPbF..., 2010).

Tabela C.1 - Especificações técnicas do MOSFET tipo P IRFP260NPBF

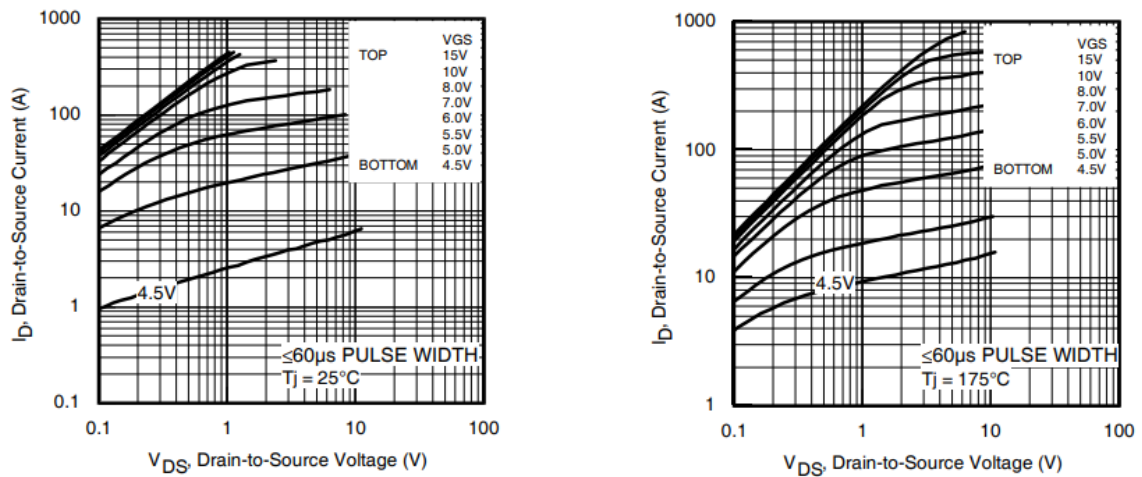
Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	50	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	35	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	200	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	300	W
	Linear Derating Factor	2.0	W/ $^\circ\text{C}$
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	560	mJ
I_{AR}	Avalanche Current①	50	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy①	30	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	10	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to +175	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Fonte: (IRFP260NPbF..., 2010).

C.2 MOSFET tipo N

Figura C.2 - Relação $I_D \times V_{gs}$ do MOSFET tipo N IRFB7440PbF



Fonte: (IRFB7440PbF..., 2015).

Tabela C.2 - Especificações técnicas do MOSFET tipo N IRFP260NPBF

Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	172①	A
I_D @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V	122①	
I_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, V_{GS} @ 10V (Wire Bond Limited)	120	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ②	772	
P_D @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	143	W
	Linear Derating Factor	0.95	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds (1.6mm from case)	300	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10lbf·in (1.1N·m)	

Fonte: (IRFB7440PbF..., 2015).

APÊNDICE A - Código para Cálculo do Tempo de Atuação da Proteção no Arduino UNO

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // define o endereço do LCD como 0x27
para um display de 20 colunas e 4 linhas

unsigned long tempo_inicial;
unsigned long tempo_final;
unsigned long tempo_total;

int entrada1 = 2;
int entrada2 = 3;

void setup() {
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Tempo de atuacao:");

    pinMode(entrada1, INPUT); // configura o pino da primeira entrada como
    entrada
    pinMode(entrada2, INPUT); // configura o pino da segunda entrada como
    entrada
}

void loop() {
    // Verifica o acionamento da primeira entrada
    if (digitalRead(entrada1) == HIGH) {
        tempo_inicial = millis(); // armazena o tempo inicial
    }
    // Verifica o acionamento da segunda entrada
    if (digitalRead(entrada2) == HIGH) {
        tempo_final = millis(); // armazena o tempo final
        tempo_total = tempo_final - tempo_inicial; // calcula o tempo total

        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Tempo = ");
        lcd.print(tempo_total);
        lcd.print(" ms");
    }
}
```