



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

LUCAS EDUARDO CRUZADO

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE RELÉS DE PROTEÇÃO
APLICADOS A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

LUCAS EDUARDO CRUZADO

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE RELÉS DE PROTEÇÃO
APLICADOS A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de graduação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Jônatas Boás Leite.
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C957m Cruzado, Lucas Eduardo.
Modelagem computacional de relés de proteção aplicados a sistemas elétricos de potência / Lucas Eduardo Cruzado. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
74 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026

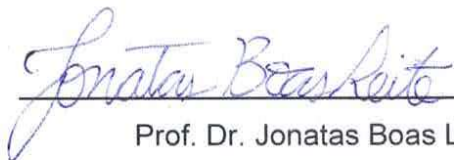
Orientador: Jônatas Boás Leite

Inclui bibliografia

1. Relé de proteção digital. 2. Proteção de Sistemas de energia. 3. Modelagem computacional. 4. Processamento digital de sinais. 5. Sistema elétrico de potência.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos oito dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e seis, o discente **Lucas Eduardo Cruzado**, matriculado sob o nº 191051543, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jonatas Boas Leite, o Doutorando Vagner Antonio de Moraes da Cruz e a Doutoranda Elis Caroline De Souza Trindade, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado: "**Modelagem Computacional de Relés de Proteção Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência**", obtendo a nota 9,5 (NOVE E MEIO) e conceito APROVADO



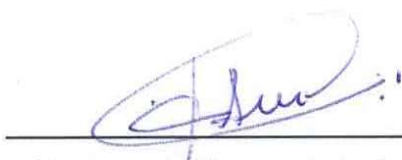
Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Orientador -



Lucas Eduardo Cruzado

- Discente -

Doutorando Vagner Antonio de Moraes da
Cruz

- Membro da Banca -



Documento assinado digitalmente

ELIS CAROLINE DE SOUZA TRINDADE

Data: 08/07/2026 18:04:25-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutoranda Elis Caroline De Souza Trindade

- Membro da Banca -

RESUMO

Relés de proteção digitais desempenham papel fundamental na operação segura e confiável dos sistemas elétricos de potência, sendo os responsáveis pela detecção e eliminação rápida de faltas e condições anormais. Neste trabalho, são apresentados os princípios de funcionamento e aplicações dos relés digitais de sobrecorrente, direcional, distância, diferencial e frequência. Com base nesses conceitos, foram desenvolvidos modelos computacionais, utilizando o software *Matlab/Simulink*. Os modelos implementados são submetidos a simulações em diferentes condições de operação e de falta, permitindo avaliar seu comportamento e validar os algoritmos desenvolvidos. Dessa forma, o trabalho contribui para o estudo e compreensão dos princípios de operação dos relés digitais, oferecendo uma ferramenta didática para análise, ensino e desenvolvimento de sistemas de proteção de energia elétrica.

Palavras-chave: relé de proteção digital; proteção de sistemas de energia; modelagem computacional; processamento digital de sinais; sistema elétrico de potência.

ABSTRACT

Digital protection relays play a fundamental role in the safe and reliable operation of electric power systems, being responsible for the rapid detection and clearing of faults and abnormal conditions. This paper presents the operating principles and applications of digital overcurrent, directional, distance, differential, and frequency relays. Based on these concepts, computational models were developed using *Matlab/Simulink* software. The implemented models are subjected to simulations under various operating and fault conditions, allowing for the evaluation of their behavior and the validation of the developed algorithms. Thus, this work contributes to the study and understanding of the operating principles of digital relays, offering a didactic tool for the analysis, teaching, and development of electric power protection systems.

Keywords: digital protection relay; power system protection; computational modeling; digital signal processing; electric power system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relé eletromecânico	17
Figura 2 – Relé digital	17
Figura 3 – Diagrama de blocos de um relé digital	18
Figura 4 – Simplificação do diagrama do relé digital	19
Figura 5 – Diagrama do bloco de aquisição de dados	19
Figura 6 – Fenômeno de aliasing.....	22
Figura 7 – Diagrama de blocos componentes ortogonais.....	23
Figura 8 – Zonas de atuação do relé de distância	28
Figura 9 – Diagrama R/X com característica Mho.....	29
Figura 10 – Característica quadrilateral	29
Figura 11 – Operação do relé diferencial: (a) Falta fora da zona de proteção, (b) Falta dentro da zona de proteção	30
Figura 12 – Característica de operação do relé diferencial percentual.....	32
Figura 13 – Diagrama conexão em quadratura do relé direcional	33
Figura 14 – Modelo do bloco de condicionamento de sinal.....	36
Figura 15 – Bloco de medição.....	37
Figura 16 – Modelo do relé de sobrecorrente.....	37
Figura 17 – Modelo do relé de sobrecorrente direcional.....	38
Figura 18 – Modelo do relé de distância	39
Figura 19 – Modelo de detecção de zona	40
Figura 20 – Modelo do relé diferencial	41
Figura 21 – Modelo do relé de frequência.....	42
Figura 22 – Simulação do bloco de condicionamento de sinal	43
Figura 23 – Comparação entre o sinal original e o condicionado	44
Figura 24 – Simulação do bloco de medição.....	45
Figura 25 – Medição de magnitude e ângulo do sinal.....	45
Figura 26 – Sistema do relé de sobrecorrente simulado.....	46
Figura 27 – Bloco do relé de sobrecorrente simulado.....	46
Figura 28 – Correntes de carga e de curto-circuito para o relé de sobrecorrente	47
Figura 29 – Disparo do relé de sobrecorrente	47
Figura 30 – Sistema do relé de sobrecorrente direcional simulado.....	48
Figura 31 – Bloco do relé de sobrecorrente direcional simulado	49
Figura 32 – Correntes de carga e de curto-circuito para o relé direcional	49
Figura 33 – Disparo do relé de sobrecorrente direcional	51
Figura 34 – Bloqueio do relé de sobrecorrente direcional	51
Figura 35 – Sistema do relé de distância simulado	52
Figura 36 – Bloco do relé de distância simulado	52
Figura 37 – Disparo da zona 1 do relé de distância.....	53
Figura 38 – Disparo da zona 2 do relé de distância.....	53
Figura 39 – Sistema do relé diferencial simulado	54
Figura 40 – Bloco do relé diferencial simulado	55

Figura 41 – Disparo do relé diferencial para falta interna.....	56
Figura 42 – Bloqueio do relé diferencial para falta externa	56
Figura 43 – Bloqueio do relé diferencial na energização	57
Figura 44 – Níveis da componente fundamental e 2º harmônico.....	57
Figura 45 – Bloqueio do relé diferencial na sobre-excitação	58
Figura 46 – Bloqueio do relé diferencial na sobre-excitação	59
Figura 47 – Sistema do relé de frequência simulado.....	60
Figura 48 – Bloco do relé de frequência simulado.....	61
Figura 49 – Correntes de carga e trip do relé de sobrefrequência	61
Figura 50 – Comportamento da frequência para o relé de sobrefrequência.....	62
Figura 51 – Correntes de carga e trip do relé de subfrequência	62
Figura 52 – Comportamento da frequência para o relé de subfrequência	63
Figura 53 – Curvas IEC 1	68
Figura 54 – Curvas IEC 2.....	69
Figura 55 – Curvas ANSI.....	70
Figura 56 – Curva extremamente inversa ANSI	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valor das constantes para curvas IEC.....	26
Tabela 2 – Valor das constantes para curvas ANSI.....	26
Tabela 3 – Sinais de polarização e operação do relé direcional	33
Tabela 4 – Unidades de medida para diferentes tipos de falta	40
Tabela 5 – Tabela ANSI	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico Digital
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DC	Corrente Contínua
S/H	<i>Sample and Hold</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	AQUISIÇÃO DE DADOS	19
2.2	CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL	20
2.3	EFEITO DE ALIASING	21
2.4	FILTRO DIGITAL	22
2.5	ESTIMAÇÃO DE FASORES	23
2.6	BLOCO DE DECISÃO	24
2.7	RELÉ DE SOBRECORRENTE.....	24
2.8	CURVAS DE TEMPO INVERSO	25
2.8.1	Curvas de tempo inverso IEC 60255-3	25
2.8.2	Curvas de tempo inverso ANSI (IEEE C37.112).....	26
2.9	RELÉ DE DISTÂNCIA	26
2.10	RELÉ DIFERENCIAL	30
2.11	RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL	32
2.12	RELÉ DE FREQUÊNCIA.....	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	MODELO CONDICIONAMENTO DE SINAL	36
3.2	MODELO BLOCO DE MEDIÇÃO	36
3.3	MODELO RELÉ DE SOBRECORRENTE.....	37
3.4	MODELO RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL	38
3.5	MODELO RELÉ DE DISTÂNCIA	39
3.6	MODELO RELÉ DIFERENCIAL	41
3.7	MODELO RELÉ DE FREQUÊNCIA	42
4	RESULTADOS	43
4.1	SIMULAÇÃO CONDICIONAMENTO DE SINAL	43
4.2	SIMULAÇÃO BLOCO DE MEDIÇÃO	44
4.3	SIMULAÇÃO RELÉ DE SOBRECORRENTE	45
4.4	SIMULAÇÃO RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL.....	48
4.5	SIMULAÇÃO RELÉ DE DISTÂNCIA	52

4.6	SIMULAÇÃO RELÉ DIFERENCIAL	54
4.7	SIMULAÇÃO RELÉ DE FREQUÊNCIA.....	60
5	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica desempenham papel fundamental no funcionamento da sociedade moderna, uma vez que o desenvolvimento tecnológico e as atividades do dia a dia dependem de um fornecimento de energia seguro, confiável e economicamente viável (Frazão, 2019). Nesse contexto, torna-se essencial garantir a operação adequada do sistema elétrico, reduzindo os impactos causados por perturbações que possam comprometer seu desempenho (Mamede Filho; Mamede, 2013).

Entre essas perturbações, destacam-se os curtos-circuitos, também chamados de faltas ou defeitos, que estão entre os eventos mais severos aos quais o sistema pode estar sujeito. Esse tipo de ocorrência pode provocar danos a equipamentos, interrupções no fornecimento e até comprometer a estabilidade do sistema como um todo (Frazão, 2019).

Diante disso, a proteção de sistemas elétricos é a área da engenharia elétrica responsável por identificar e isolar essas anormalidades de forma rápida e seletiva, buscando minimizar seus efeitos e evitar a propagação do problema para outras partes do sistema. Para isso, são utilizados dispositivos de proteção que atuam de maneira coordenada, contribuindo para a segurança, a confiabilidade e a continuidade da operação do sistema elétrico (Mamede Filho; Mamede, 2013).

Com o avanço das tecnologias, os sistemas de proteção evoluíram de equipamentos eletromecânicos até poderosos equipamentos microprocessados capazes de realizar diversas funções para atuar no sistema no instante de uma falha. Os relés digitais de proteção tornaram-se elementos centrais, permitindo não apenas maior precisão e flexibilidade, mas também a integração com sistemas de automação e comunicação avançados.

O relé de proteção é um elemento indispensável, cuja função é detectar trechos em falha, equipamentos defeituosos e condições anormais ou perigosas à rede. Quando alguma destas condições são identificadas, o circuito de controle é atuado, interrompendo a alimentação do sistema e isolando o segmento em falta. Entre as condições adversas pode-se citar sobre/subtensão, sobre/subcorrente, sobre/subfrequência, direção de potência/corrente, temperatura, pressão, entre outros (Mamede Filho; Mamede, 2013).

Em contraposição com relés eletromecânicos, relés digitais são capazes de concentrar dezenas de lógicas e funções que verificam continuamente o estado do sistema elétrico, tornando-os extremamente versáteis e compactos, sem afetar sua precisão na eliminação de um defeito. Portanto, entender o funcionamento e os princípios de aplicação fornecem uma

importante fundamentação técnica para a especificação, parametrização, coordenação e análise do desempenho dos sistemas de proteção, contribuindo para o aumento da confiabilidade, da segurança e da continuidade do fornecimento de energia elétrica (Oliveira; et al., 2021).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo é desenvolver modelos computacionais de relés digitais aplicados a sistemas elétricos de potência, abrangendo as principais funções aplicadas atualmente em sistemas de proteção. Entre elas estão as funções de sobrecorrente, direcional, distância, diferencial e frequência, estudadas com detalhes neste trabalho. Para isso, busca-se o estudo dos principais blocos que compõem um relé digital, incluindo as etapas de aquisição de dados, condicionamento de sinal, conversão analógica-digital, bloco de medição e o processo de tomada de decisão.

Além disso, pretende-se realizar simulações computacionais que possibilitem analisar o funcionamento dos algoritmos de proteção, permitindo a compreensão dos princípios de operação de cada tipo de relé, os quais serão testados via software *Matlab/Simulink*. Dessa forma, o trabalho visa contribuir para o aprendizado dos conceitos fundamentais da proteção digital de sistemas elétricos, proporcionando uma abordagem prática que complemente os conhecimentos teóricos apresentados na literatura.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, além de referências bibliográficas e anexos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução e os objetivos do trabalho, destacando a importância da proteção de sistemas elétricos e dos relés de proteção digital.

O Capítulo 2 contempla a fundamentação teórica, reunindo os principais conceitos que embasam o desenvolvimento do trabalho. De maneira geral, são apresentados os processos de aquisição de dados e condicionamento de sinal. Em seguida, são descritos os principais tipos de relés de proteção utilizados em sistemas elétricos, incluindo o relé de sobrecorrente e suas curvas características, além dos relés direcional de sobrecorrente, distância, diferencial e de frequência.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho, descrevendo a modelagem dos principais blocos que compõem um relé digital de proteção. São

detalhados o modelo de aquisição e condicionamento de sinal, o bloco de medição e a implementação dos algoritmos dos relés estudados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio das simulações realizadas para cada uma das etapas desenvolvidas. Inicialmente, são analisados os resultados do condicionamento de sinal e do bloco de medição. Em seguida, são apresentados e discutidos os resultados das simulações dos modelos dos relés, avaliando o desempenho de cada algoritmo nas condições propostas.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho, reunindo as principais contribuições, os resultados alcançados e as considerações finais da pesquisa. Em seguida, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas durante o estudo, e os Anexos A e B, que reúnem materiais complementares que auxiliam na compreensão das informações e análises apresentadas nos capítulos anteriores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A proteção do sistema elétrico de potência (SEP) é composta por esquemas de proteção majoritariamente comandadas por relés de proteção. Relés de proteção são dispositivos cuja finalidade é a de identificar perturbações, condições anormais ou defeitos no sistema, e atuar de forma a isolar o problema, mantendo o restante do sistema em operação normal (Mamede Filho; Mamede, 2013).

Os relés constituem elementos fundamentais dos sistemas de proteção, pois monitoram continuamente as condições de operação do sistema elétrico (Caminha, 1977). No caso de alguma condição anormal ou perigosa, como um curto-circuito, a corrente de falta deve sensibilizar o relé, que opera enviando um sinal para a abertura do disjuntor (*trip*). Com a abertura do disjuntor, o trecho defeituoso é desconectado e isolado, de forma a não interferir na operação do restante do sistema.

Os relés podem ser eletromecânicos, eletrônicos ou digitais. No início todos os relés de proteção eram do tipo eletromecânicos, como o exemplo apresentado na **Figura 1**. O primeiro relé de proteção foi desenvolvido em 1901, sendo este o relé eletromecânico de indução capaz de proteger o sistema elétrico contra sobrecorrentes. Com a evolução da tecnologia, na década de 1930 foram introduzidos relés eletrônicos, usando componentes eletrônicos discretos, que foram pouco populares no mercado devido ao fato de que seu antecessor atendia as necessidades de projetos. Por volta de 1980, relés digitais ou relés numéricos, começaram a substituir os relés eletromecânicos e os relés eletrônicos, porque, além de apresentar as funções de seus antecessores, os relés digitais têm maior velocidade, melhor sensibilidade e interface com o usuário, possibilitando o acesso remoto e armazenamento das informações (Oliveira; et al., 2021).

Os relés digitais apresentam as funções de proteção, que atuam rapidamente durante falhas, funções de medição, supervisionando as grandezas elétricas do sistema, e a função preditiva, já que realiza medições cumulativas e registram dados como a tensão, corrente, frequência, entradas binárias, entre outros. A **Figura 2** apresenta um relé digital do fabricante SEL (*Schweitzer Engineering Laboratories*).

Figura 1 – Relé eletromecânico



Fonte: (Global Power Inc., 2026).

Além destas vantagens apresentadas, o relé digital possui consumo de energia reduzido, e, devido ao seu sistema de auto supervisão, são extremamente confiáveis. Eles também fornecem ampla faixa de ajuste de proteção e dos parâmetros de controle, além de alta precisão e fácil visualização das medidas devido ao seu *display* (Oliveira; et al., 2021).

Figura 2 – Relé digital

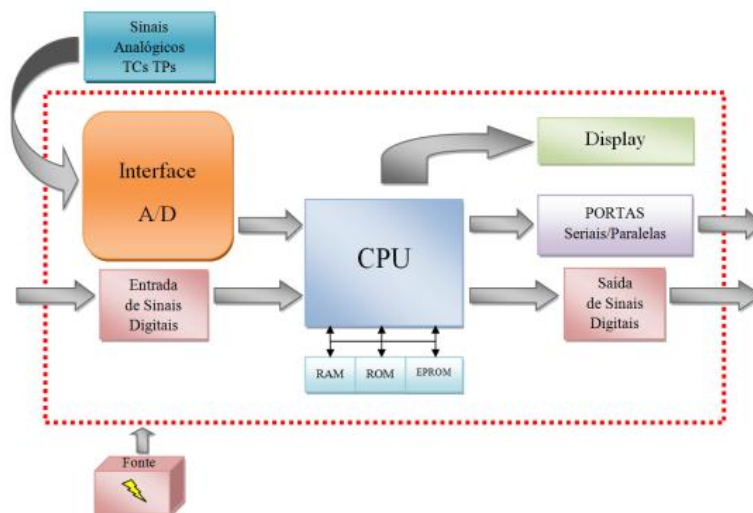


Fonte: (Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2026).

Na **Figura 3** apresenta-se a arquitetura de um relé digital. Observa-se que o dispositivo conta com entradas de sinais digitais (recebendo sinais como o estado de chaves, disjuntores e supervisões diversas), entradas de sinais analógicos (provenientes dos transdutores de corrente e tensão), interface analógica-digital (ADC – na qual digitaliza o sinal analógico) e uma unidade

central de processamento (CPU), que conta com memórias do tipo RAM (*Random Access Memory*), ROM (*Read Only Memory*) e EPROM (*Erasable Programmable Read-Only Memory*) (Kezunovic; Ren; Lotfifard, 2016). Memórias RAM são consideradas voláteis devido a perda do seu conteúdo quando o equipamento é desligado, que em relés digitais é aplicado principalmente para funções de cálculo. A memória ROM, por outro lado, é uma memória não volátil, projetada para armazenar dados permanentes que não devem ser alterados durante o uso normal do dispositivo, como algoritmos patenteados. Já a EPROM é um tipo de memória que pode ser programada pelo usuário e posteriormente apagada, neste caso atribuída para armazenamento de variáveis, como ajustes de funções de proteção. O *display* fornece ao usuário a possibilidade de acessar dados de leitura de corrente, tensão e parâmetros de ajuste. Dispõe também de portas seriais e paralelas para comunicação com outros equipamentos e, por fim, a saída de sinais digitais, onde comumente são atribuídos os sinais de disparo (*trip*).

Figura 3 – Diagrama de blocos de um relé digital



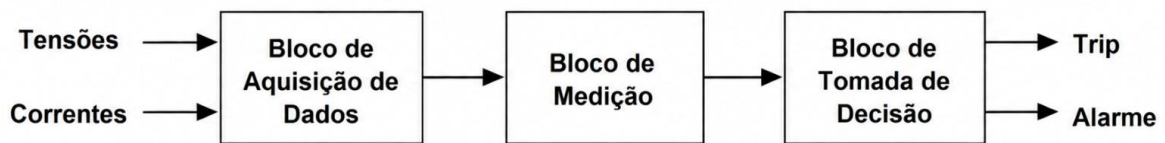
Fonte: (Kezunovic; Ren; Lotfifard, 2016).

De maneira mais simplificada, pode-se representar a estrutura de um relé digital conforme apresentado na **Figura 4**, onde os três seguimentos principais referem-se ao bloco de aquisição de dados, o de medição e o de tomada de decisão.

O primeiro segmento corresponde ao bloco de aquisição de dados, responsável por conectar as entradas analógicas à interface de processamento digital, realizando a filtragem e conversão dos sinais analógicos em sinais digitais. O bloco de medição realiza a estimativa de parâmetros relevantes dos sinais de entrada, tais como magnitude e ângulo de fase das medições de tensão e corrente, potências ativas e reativas, entre outros. Esses valores são essenciais para

subsidiar o processo de decisão de disparo. Por fim, o bloco de tomada de decisão aplica os princípios de operação do relé, aplicando os algoritmos de decisão utilizando os valores condicionados pelos processos anteriores. Este bloco também incorpora atrasos temporais e funções lógicas diversas, de modo a complementar as funções de proteção.

Figura 4 – Simplificação do diagrama do relé digital



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Considerando a parte frontal de um relé digital, o bloco de aquisição de dados, é constituída de quatro elementos, sendo eles o transdutor de entrada, condicionador de sinal, filtro analógico *anti-aliasing* e conversor analógico-digital (ADC).

Figura 5 – Diagrama do bloco de aquisição de dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

O transdutor de entrada tem a função de adaptar os sinais elétricos para que possam ser utilizados corretamente pelos relés de proteção. Ele recebe tensões e correntes secundárias provenientes dos transformadores de instrumentação (TP e TC) e ajusta esses valores para o nível adequado de processamento interno do relé. Além disso, o transdutor garante o isolamento galvânico entre o circuito interno do relé e a fiação secundária dos equipamentos primários, proporcionando maior segurança e confiabilidade operativa (Kezunovic; Ren; Lotfifard, 2016). A etapa de condicionamento de sinal tem a função de ajustar os sinais elétricos para que fiquem dentro da faixa adequada de entrada dos próximos elementos de processamento. Em seguida, o

filtro analógico realiza a chamada filtragem *anti-aliasing*, incorporando um filtro passa-baixas. Isso significa que ele permite a passagem apenas dos componentes do sinal de que são importantes para o algoritmo de proteção, atenuando os demais que são considerados ruído. Em seguida, o elemento de amostragem e retenção (*Sample and Hold*) coleta o sinal em intervalos regulares de tempo, mantendo o valor obtido até a próxima amostragem. Por fim, o conversor analógico-digital (ADC) transforma essas amostras em uma representação digital que pode ser processada pelo relé de proteção.

2.2 CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL

Em processamento de sinais, o conversor analógico-digital (ADC), é utilizado para converter um sinal analógico para um sinal em tempo discreto (amostrado), permitindo que este seja processado por computadores, microcontroladores, sistemas embarcados e equipamentos eletrônicos em geral.

O ADC é implementado através da digitalização das amostras do sinal contínuo, provenientes do circuito de amostragem e retenção. A conversão é realizada em duas etapas principais: a etapa de amostragem e a quantização. A amostragem transforma um sinal contínuo em uma sequência de valores discretos no tempo, enquanto a quantização converte cada amostra em um número binário (Oppenheim; Willsky, 2010).

Durante o processo de amostragem, segundo o teorema de *Nyquist-Shannon*, para que não haja perda de informação é necessário que a taxa de amostragem f_s do novo sinal deve ser igual ou maior que ao dobro da maior frequência que presente no sinal f_{max} .

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (1)$$

Após o sinal ser amostrado, este deve passar pelo processo de quantização. Enquanto a amostragem discretiza o sinal no eixo do tempo, o processo de quantização realiza a discretização no eixo da amplitude. Dado que uma amplitude analógica pode assumir infinitos valores reais dentro de uma determinada faixa dinâmica, é impossível representá-los em um sistema digital com memória finita sem realizar uma aproximação para um número discreto de níveis. O quantizador mapeia a tensão de entrada em um dos M níveis discretos de representação, associando cada nível a um código binário de N bits, onde $M = 2^N$. A diferença de potencial entre dois níveis adjacentes de quantização é chamada de passo de quantização (Δ), o qual define a resolução do conversor. Considerando que o sinal digital varie

discretamente de 0 a $2^N - 1$, então o passo mínimo Δ que define a sensibilidade do conversor à menor variação de entrada será (Kezunovic; Ren; Lotfifard, 2016),

$$\Delta = \frac{M - m}{2^N - 1} \quad (2)$$

Onde M e m representam os limites superior e inferior da faixa de fundo de escala, respectivamente. Dessa forma, um maior número de bits de resolução N reduz o tamanho de cada passo de quantização, tornando o conversor mais sensível a pequenas variações analógicas de entrada.

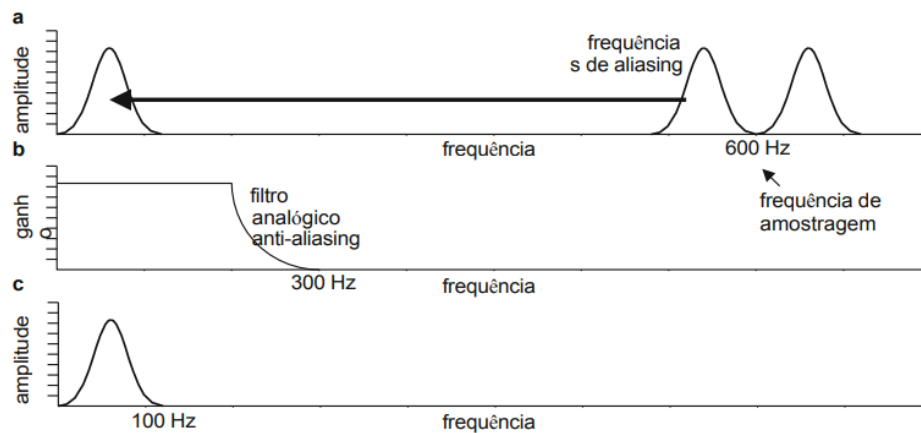
A última etapa do processo de conversão ADC seria a codificação, na qual os níveis de amplitude discretizados pelo quantizador são associados a um código binário normalizado para uso do processamento digital.

2.3 EFEITO DE ALIASING

Quando a frequência de amostragem não é suficientemente alta, ocorre a sobreposição do espectro do sinal. Esse fenômeno é conhecido como *aliasing* e, quando ocorre, as altas frequências do sinal original aparecem em regiões de mais baixa frequência, resultado em um sinal recuperado diferente do sinal original (Oppenheim; Willsky, 2010). Esse fenômeno pode levar ao mau funcionamento de um relé digital. Por exemplo, sinais das frequências 540, 660, 1140, 1260Hz, entre outros, amostrados a 600Hz, serão vistos em sua forma amostrada como um componente falso de 60Hz como apresentado na **Figura 6**. Caso o relé use o componente de 60Hz para sua decisão de disparo, as frequências de *aliasing* serão vistas como um componente fantasma de 60Hz e introduzirão uma informação falsa no relé.

Para evitar que isto ocorra, geralmente são utilizados filtros analógicos passa-baixas, chamados de filtros *anti-aliasing*. Este filtro é responsável por limitar a máxima frequência presente no sinal analógico em metade da frequência de amostragem, auxiliando também na eliminação de componentes de frequência que não são utilizadas pelo relé.

A ordem típica dos filtros *anti-aliasing* variam entre 2 e 4, utilizando formas padrões, como Butterworth, Chebyshev e Bessel. É importante destacar que quanto mais próxima a frequência de corte estiver da frequência de operação, maior será o atraso de fase introduzido pelo filtro, no qual limita o fluxo de informação, podendo impactar no tempo de atuação.

Figura 6 – Fenômeno de *aliasing*

Fonte: (Kezunovic; Ren; Lotfifard, 2016).

2.4 FILTRO DIGITAL

Os sinais de entrada dos relés de proteção contêm componentes indesejáveis que devem ser rejeitados de modo a reter somente o sinal de interesse. Dessa forma, os algoritmos responsáveis pela filtragem são de fundamental importância para o correto funcionamento do relé digital. Os sinais de corrente resultantes de uma falta ou de um distúrbio no sistema elétrico de potência podem conter uma componente unidirecional que decai exponencialmente no tempo, juntamente com as componentes senoidais. A componente DC exerce influência direta na exatidão e na velocidade de convergência dos algoritmos utilizados para estimar os fasores (Machado et al., 2011).

A escolha do filtro digital deve considerar uma resposta de banda passante em torno da frequência do sistema, devido a outras frequências não serem de interesse. Também devem ser capazes de remover a componente DC presente em transitórios de faltas, atenuar harmônicos múltiplos da fundamental e possuir largura de banda razoável para resposta rápida. Filtros FIR (*Finite Impulse Response*) são geralmente escolhidos por utilizar uma janela de dados finita, além de possuírem zeros naturais em sua resposta em frequência, com a possibilidade de alocá-los para rejeitar a componente DC e harmônicos (Schweitzer; Hou, 1992).

É importante identificar a melhor situação de uso do filtro. Por exemplo, isolar a componente fundamental dos sinais de corrente e tensão para um relé de sobrecorrente pode ser mais interessante do que em um relé diferencial, no qual utiliza das componentes harmônicas como bloqueio de sua função em casos específicos.

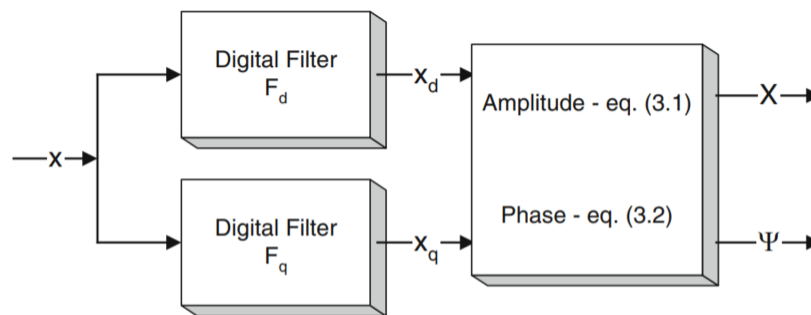
2.5 ESTIMAÇÃO DE FASORES

Um sinal senoidal de frequência única pode ser representado pelas suas componentes de magnitude e de fase. Este conjunto de magnitude e fase é conhecido como fasor, que é expresso matematicamente por um número complexo. Cálculos dos parâmetros de decisão de *trip*, como a impedância em relé de distância, utilizam da informação dos fasores de tensão e corrente para determinar se existe uma falta dentro da zona de atuação da proteção.

Como relés digitais utilizam da informação dos fasores, sua estimação deve ser feita com a maior velocidade possível. Por outro lado, o algoritmo deve atenuar todas as outras frequências, o que não ocorre na prática, pois quanto mais rápido for a resposta do estimador, mais sensível ele será a outras frequências fora da fundamental. Existem diversos algoritmos digitais para estimar fasores. Alguns exemplos levam como base filtros de Fourier de um ciclo, filtros cossenoidais e Transformadas Discretas de Fourier (TDF) (Machado et al., 2011).

A **Figura 7** apresenta o esquema de blocos geral para a estimação fasorial. O método aplica uma filtragem ortogonal no sinal de entrada x para obter suas componentes ortogonais x_d e x_q que por sua vez são usadas para calcular o módulo e ângulo de um sinal senoidal.

Figura 7 – Diagrama de blocos componentes ortogonais



$$X = \sqrt{x_d^2 + x_q^2} \quad \psi = \arctan\left(\frac{x_q}{x_d}\right)$$

Fonte: (Kezunovic; Ren; Lotfifard, 2016).

O bloco de medição utilizado para o cálculo dos fasores se baseia no filtro de Fourier, que aplica a transformada discreta de Fourier utilizando as relações entre o seno e cosseno em uma janela de dados de N amostras equivalente a um ciclo de onda. Devido a isso, este tipo de filtro é chamado de filtro de Fourier de um ciclo e é um dos algoritmos mais utilizados por relés digitais na atualidade. As componentes ortogonais calculadas pelo filtro possuem a forma como

mostrado nas equações abaixo, onde N é o número de amostras por ciclo, n é a harmônica de 60Hz a se calcular, e $x[k]$ é a k -ésima amostra do sinal a ser filtrado. Observa-se que se $n = 1$, o algoritmo calcula a harmônica fundamental do sinal (Machado et al., 2011).

$$x_d = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \quad (3)$$

$$x_q = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \quad (4)$$

2.6 BLOCO DE DECISÃO

O bloco de decisão tem como função implementar as lógicas e os algoritmos de proteção. Este bloco apresenta maior dinamismo entre diferentes relés digitais, visto que cada um possui algoritmos distintos. Como entrada, esse bloco recebe os fasores obtidos no bloco de medição, onde após o processamento de lógica é gerado uma saída correspondente ao sinal de *trip* ou bloqueio. É no bloco de decisão que ficam armazenados os programas previamente instalados no relé, bem como os parâmetros de proteção configurados pelo operador. A sua construção técnica e algoritmos dependem do fabricante e do tipo de proteção.

2.7 RELÉ DE SOBRECORRENTE

Um relé de sobrecorrente, correspondente aos códigos 50/51 da tabela ANSI, monitora o valor de corrente que flui sobre um equipamento que se deseja proteger. Quando a corrente medida pelo relé ultrapassa um valor predeterminado, o mesmo deve ser capaz de identificar e isolar o trecho com defeito (Oliveira; et al., 2021). O tempo de operação do relé é proporcional ao valor de corrente lido, de modo a operar mais rapidamente quanto mais crítico for a ocorrência.

De modo geral, todos equipamentos que se deseja proteger em um sistema elétrico dispõe deste relé. Entre os equipamentos protegidos, pode-se citar alimentadores de média tensão, linhas de transmissão, geradores, motores, transformadores, reatores, capacitores, entre outros.

O relé de sobrecorrente pode ser dividido em duas operações distintas, uma instantânea e outra temporizada. O relé de sobrecorrente instantâneo (50) tem uma atuação imediata quando

a corrente ultrapassa um valor ajustado. Este é comumente utilizado para proteção contra curtos-circuitos severos onde a rapidez é essencial (Duarte, 2018).

O relé de sobrecorrente temporizado (51) também pode ser dividido entre dois tipos, o de tempo definido ou de tempo inverso. A possibilidade da introdução de uma temporização intencional permite a coordenação entre diferentes tipos de elementos protegidos (Caminha, 1977). O de tempo definido possui característica de atuação correspondente a um tempo fixo pré-estabelecido, desde que o valor de corrente medido ultrapasse um mínimo também ajustável (*pick-up* ou corrente de ajuste). Já o de tempo inverso introduz uma curva característica de tempo que varia conforme o valor da corrente, de forma que quanto mais elevada mais rápido ocorre a sua atuação.

As curvas de tempo definido são padronizadas pelas normas ANSI e IEC e serão apresentadas no próximo tópico.

2.8 CURVAS DE TEMPO INVERSO

2.8.1 Curvas de tempo inverso IEC 60255-3

As curvas da norma IEC (*International Electrotechnical Commission*) são divididas em quatro diferentes tipos: normalmente inversa, muita inversa, extremamente inversa e inversa de tempo longo, onde podem serem visualizadas no **Anexo A**. Estas curvas são construídas através da **Equação 5**, que apresenta o tempo de operação para essas curvas, de acordo com os valores das constantes α e β adotadas para cada tipo de curva, conforme a **Tabela 1**.

$$t = k \cdot \left(\frac{\beta}{M^\alpha - 1} \right) \quad (5)$$

Onde, t equivale ao tempo de operação (s), M corresponde a relação entre a corrente medida e a de ajuste (I/I_P) e k equivale ao multiplicador de tempo (*TDM*, *dial* ou *delay*).

Tabela 1 – Valor das constantes para curvas IEC

Tipo de curva	α	β
Normalmente Inversa	0,02	0,14
Muito Inversa	1,0	13,5
Extremamente Inversa	2,0	80,0
Inversa de Tempo Longo	1,0	120,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.8.2 Curvas de tempo inverso ANSI (IEEE C37.112)

As curvas da norma ANSI (*American National Standards Institute*) são divididas em três diferentes tipos: normalmente inversa, muita inversa e extremamente inversa, onde podem ser visualizadas no **Anexo B**. A **Equação 6** mostra a forma de cálculo de seus tempos de operação para uma das curvas.

$$t = k \cdot \left(\frac{A}{M^P - 1} + B \right) \quad (6)$$

Onde, t equivale ao tempo de operação (s), M corresponde a relação entre a corrente medida e a de ajuste (I/I_P), k equivale ao multiplicador de tempo e A , B e P são constantes que variam conforme o tipo de curva, conforme a **Tabela 2**.

Tabela 2 – Valor das constantes para curvas ANSI

Tipo de curva	A	B	P
Normalmente Inversa	6,407	0,0250	2,0
Muito Inversa	2,855	0,0712	2,0
Extremamente Inversa	0,0086	0,0185	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.9 RELÉ DE DISTÂNCIA

Conhecido pela tabela ANSI como relé 21, o relé de distância é amplamente utilizado para proteção de linhas de transmissão. Ele é utilizado em conjunto com relés de sobrecorrente para compor o esquema de proteção de linhas, mas analisa tanto corrente quanto tensão para

calcular a impedância (Caminha, 1977). Uma vez que o relé calcula a impedância no momento de uma falta, o mesmo deve operar caso esse defeito estiver dentro de sua zona de proteção, isto é, a própria linha de transmissão.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (7)$$

Como o relé obtém as medições dos TCs e TPs, a relação entre a impedância secundária vista pelo relé e a impedância refletida no primário será,

$$Z_S = Z_P \frac{RTC}{RTP} \quad (8)$$

Onde Z_S é a impedância secundária medida pelo relé, Z_P é a impedância primária, RTC é a relação de transformação do TC e RTP a relação do TP.

Como a impedância é proporcional ao comprimento da linha, é possível estimar a distância entre o ponto onde o relé está instalado até onde ocorreu a falta. O motivo do nome “relé de distância” é devido ao fato dele conseguir identificar a distância até o ponto de falta (Oliveira; et al., 2021).

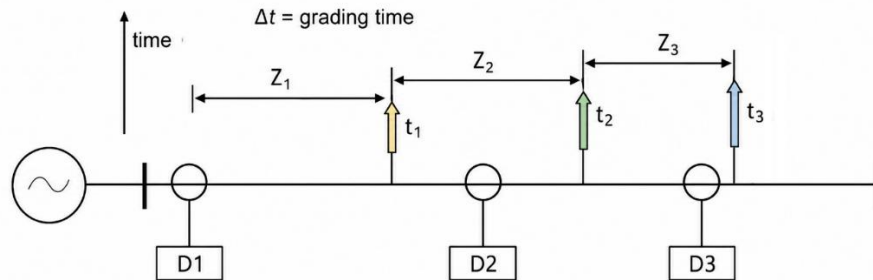
Na ocorrência de um curto-circuito existirá a elevação do valor de corrente e afundamento da tensão medida, o que fará com que a impedância medida pelo relé diminua consideravelmente. Se o valor da impedância calculado estiver abaixo do valor pré-configurado, chamado de alcance, o relé opera e envia *trip* ao disjuntor da linha de transmissão.

A utilização de um relé de distância deve considerar as zonas de proteção para garantir que a área que delimita a linha de transmissão está sendo devidamente protegida, ao mesmo tempo que assegura seletividade e coordenação. As zonas de proteção são limites de atuações programadas para diferentes impedâncias vistas pelo relé. A **Figura 8** apresenta diferentes zonas configuráveis em um relé de distância.

Cada zona do relé de distância possui alcances e tempos de operação distintos. A zona 1 geralmente é parametrizada para alcançar até 80% do comprimento da linha, sem temporização adicional de operação (Rush, 2011). Parametrizar a zona 1 para subalcançar a linha é uma atribuição de segurança contra erros intrínsecos dos equipamentos de medição. A zona 2 é parametrizada para pelo menos 120% do comprimento da linha, cobrindo o restante da zona 1. O tempo de atuação neste caso deve levar em conta um atraso para garantir

seletividade e coordenação. As zonas 2 e 3 também agem como retaguarda da zona 1. Já o alcance da zona 3 deve ser maior que pelo menos o alcance da zona 2, geralmente em 150%, cuja temporização também deverá ser maior.

Figura 8 – Zonas de atuação do relé de distância



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um relé de distância determina a localização de uma falta analisando a impedância vista a partir do ponto onde está instalado. Os relés modernos calculam diretamente essa impedância e verificam se ela está dentro de uma região de operação definida no plano R/X . A atuação do relé ocorre quando a impedância calculada ou estimada indica que a falta está dentro da zona protegida.

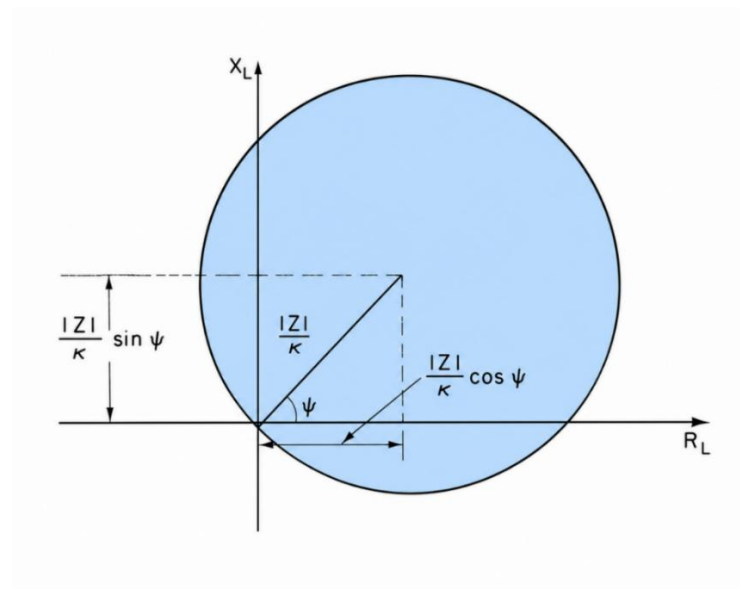
O diagrama R/X é uma representação gráfica para identificar a posição da impedância de falta vista pelo relé. Nesse diagrama, o eixo horizontal representa a resistência R e o eixo vertical representa a reatância X . A partir dos valores calculados de tensão e corrente, o relé determina um ponto nesse plano e verifica se ele está dentro da sua região de atuação previamente ajustada, conforme ilustrado pela **Figura 9**. Por se tratar de uma circunferência, é possível equacionar sua característica como sendo,

$$\left(R_L - \frac{|Z|}{k} \cos \psi\right)^2 + \left(X_L - \frac{|Z|}{k} \sin \psi\right)^2 \leq \frac{|Z|^2}{k^2} \quad (9)$$

Tradicionalmente, as zonas de proteção de relés tradicionais formam círculos no plano RX , devido a facilidade de implementação no sistema eletromecânico. Esta característica é chamada de *Mho*. Relés digitais contam com características quadrilaterais, além da *Mho* para livre configuração e modificação da característica. A característica *Mho* em relés tradicionais proporcionavam bom comportamento para faltas à frente ou atrás da linha, porém para defeitos

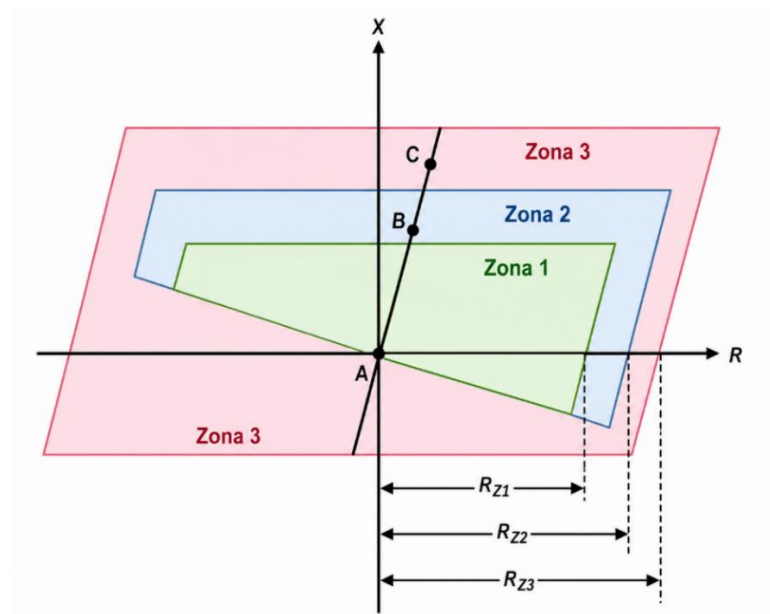
de alta impedância (muito resistivas), poderiam sair do círculo característico. A forma quadrilateral é a mais comum em relés digitais, pois sua vantagem se dá pela possibilidade de ajustar independentemente os alcances resistivos e reativos, conforme a necessidade, proporcionando melhor cobertura para faltas com elevada resistência, especialmente faltas à terra, evidenciado pela **Figura 10**.

Figura 9 – Diagrama R/X com característica Mho



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Característica quadrilateral



Fonte: Elaborado pelo autor.

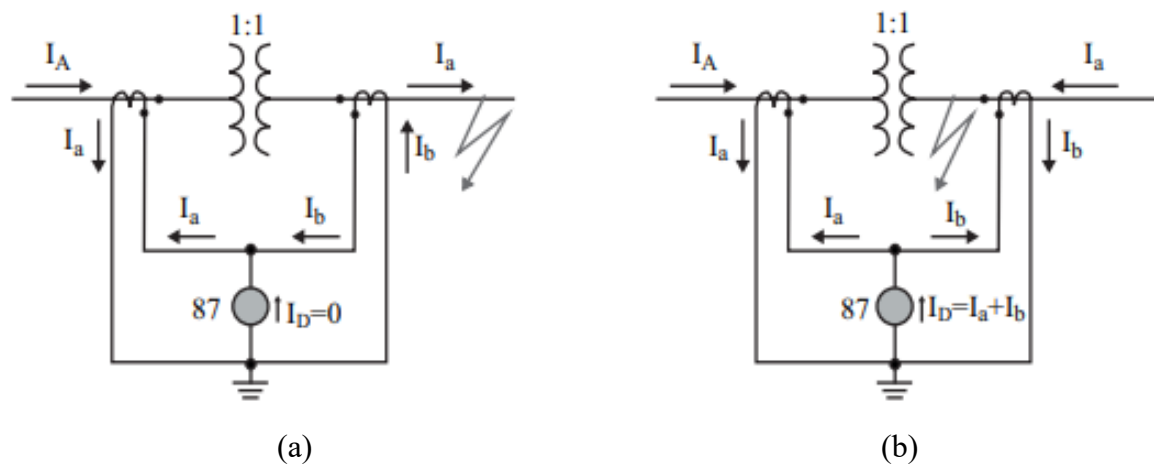
2.10 RELÉ DIFERENCIAL

A proteção diferencial, ANSI 87, constitui uma das soluções de maior relevância, rapidez e seletividade para garantir que um defeito interno a um elemento protegido seja eliminado de forma precisa. O relé diferencial, permanece em constante verificação de faltas dentro de sua região de operação e atua a depender da diferença entre os valores que entram e saem do trecho protegido. Essa função é comumente aplicada em transformadores, reatores, geradores, barramentos e linhas de transmissão.

A atuação da função diferencial em reatores e transformadores indicam que o defeito já ocorreu internamente ao equipamento. Isto pode ser acarretado por conta de faltas no enrolamento, entre espiras, faltas no núcleo, falhas de isolamento para massa, entre outros.

A zona de proteção do relé diferencial é delimitada pelos TCs que são posicionados em cada terminal do elemento a ser protegido. Faltas que ocorrem fora desse limite são denominadas faltas externas e devem ser ignoradas pelo relé. Defeitos que ocorrem dentro desta região caracterizam faltas internas e demandam atuação imediata e bloqueio.

Figura 11 – Operação do relé diferencial: (a) Falta fora da zona de proteção, (b) Falta dentro da zona de proteção



Fonte: (Duarte, 2018).

O funcionamento do relé diferencial consiste na medição das correntes que entram e saem da região protegida. Em situação normal do sistema, ambas devem se anular ou serem próximas de zero. Um ajuste mínimo de *pick-up* para função é comumente ajustado, levando em conta erros de medição. Caso a soma vetorial das correntes for maior que determinado valor

ajustado, existe um indício de que o equipamento apresenta defeito e que parte da corrente circula para dentro dele (Duarte, 2018).

Durante faltas externas, o grande valor de corrente passante no equipamento pode acabar gerando um corrente diferencial devido a saturação do TC de proteção e erros de medição, podendo causar *trip* de maneira indevida. Para assegurar estabilidade em faltas externas, mantendo a sensibilidade para faltas internas, um elemento de restrição foi incluído na função, de forma a restringir a região de operação do relé diferencial.

Portanto, a corrente de operação (I_{OP}) ou corrente diferencial (I_{DIFF}) pode ser calculada como sendo a soma fasorial das correntes que entram e saem do elemento protegido. Considerando um transformador de dois enrolamentos, cujas correntes no primário e secundário são, respectivamente, I_P e I_S , a corrente de operação pode ser calculada como,

$$I_{OP} = |\vec{I}_P + \vec{I}_S| \quad (10)$$

Existem diversos métodos de cálculo da corrente de restrição I_{REST} , variando conforme o fabricante. Considerando K variando entre 0,5 e 1, entre algumas delas estão,

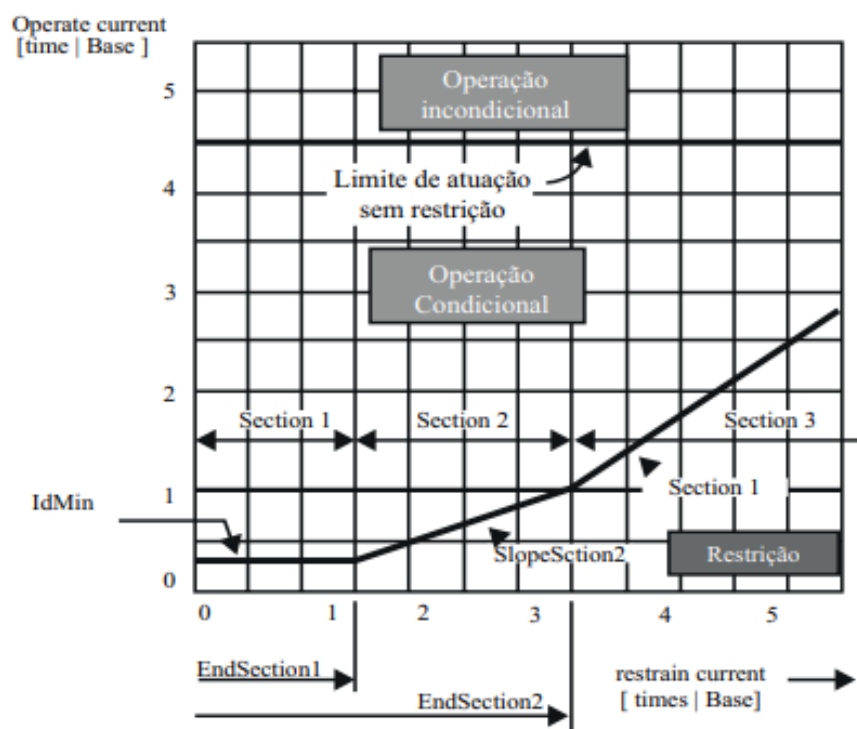
$$\begin{aligned} I_{REST} &= K \cdot |\vec{I}_P + \vec{I}_S| \\ I_{REST} &= K \cdot (|\vec{I}_P| + |\vec{I}_S|) \\ I_{REST} &= \max(|\vec{I}_P| + |\vec{I}_S|) \end{aligned} \quad (11)$$

Dessa forma, para que o elemento diferencial atue, é necessário que a corrente diferencial calculada seja maior que um valor mínimo e maior que uma porcentagem do valor de restrição. Essa porcentagem do valor da corrente de restrição é comumente chamada de *slope* do relé diferencial e é ela quem restringe a atuação da função para determinadas características de falta, como mostrado na **Figura 12**. Relés digitais modernos incluem mais de um *slope* na região de característica do elemento diferencial, de forma a aumentar ainda mais a confiabilidade e seletividade da função. Elementos sem restrição também são utilizados, de forma a garantir atuação de faltas cujas correntes diferenciais são extremamente grandes, sem olhar para a corrente de restrição.

Bloqueios da função devido ao fenômeno de energização do transformador (*inrush*) e sobre-excitação são levadas em conta na característica de restrição. Estes, porém, também participam da lógica de bloqueio do relé diferencial para situações em que um defeito interno

seria visto de forma errônea. Durante a energização do transformador, componentes DC surgem em conjunto com harmônicas de 2 ordem. A combinação dos dois efeitos pode causar atuação indevida do relé diferencial. Devido a isso, é comum relés digitais incluírem a medição de harmônicos de ordem 2, para bloquear durante a energização, e de ordem 5, associadas ao fenômeno de sobre-excitação do transformador, quando ele opera em uma tensão maior que a tensão nominal. Ambos as características não indicam falha dentro do elemento protegido e, portanto, não podem gerar *trip*.

Figura 12 – Característica de operação do relé diferencial percentual



Fonte: (Duarte, 2018).

2.11 RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL

O relé de sobrecorrente direcional, ANSI 67, se diferencia do relé de sobrecorrente convencional apenas pelo elemento direcional. Ela permite identificar o sentido do fluxo de corrente de um circuito em falta, indicando se o defeito ocorre antes ou depois do elemento protegido.

O elemento direcional identifica o sentido através da medição do ângulo da corrente de falta, comparando com o ângulo de uma grandeza de polarização (referência). A maioria das

aplicações envolvendo relés direcionais utiliza as fases sãs de tensão como polarização, em conjunto com a corrente de operação, conforme mostrado pela **Tabela 3**.

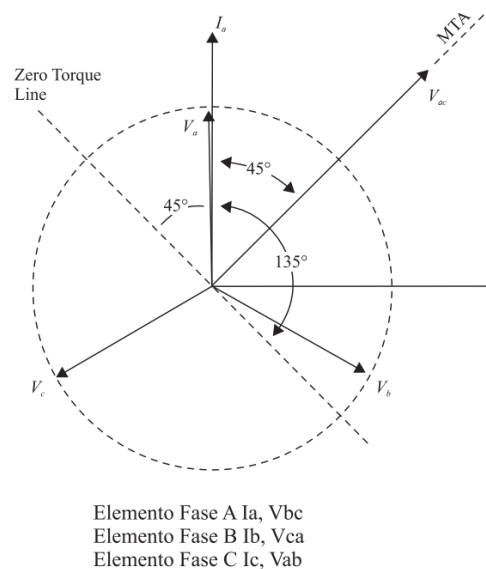
Tabela 3 – Sinais de polarização e operação do relé direcional

Corrente de operação	Tensão de polarização
I_A	V_{BC}
I_B	V_{CA}
I_C	V_{AB}

Fonte: Elaborado pelo autor.

A técnica normalmente empregada para determinação da direcionalidade envolve a conexão em quadratura (ou 90°). A **Figura 13** mostra o diagrama fasorial do esquema de conexão em quadratura de um relé direcional, onde o ângulo máximo torque equivale a 45° . Neste caso, o relé da fase *A* é alimentado pela corrente I_A e pela tensão V_{BC} defasada de 45° (ângulo de máximo torque) e a região de operação do relé se encontra entre $+45^\circ$ e -135° .

Figura 13 – Diagrama conexão em quadratura do relé direcional



Fonte: (Duarte, 2018).

O relé direcional é comumente utilizado em sistemas não radiais, os quais a direção da contribuição da corrente de falta pode variar. Já em sistemas radiais, independentemente do

local do curto-circuito, o sentido da corrente sempre estará no mesmo que o fluxo de carga normal, não havendo necessidade de incluir o elemento direcional.

Relés digitais contam com ajustes de corrente de operação e ângulo de máximo torque ajustados em software.

2.12 RELÉ DE FREQUÊNCIA

O relé de frequência, número 81 da ANSI, possui o objetivo de gerar uma operação quando o valor da frequência medida for superior ou inferior a um número ajustado. Relés digitais possuem vários blocos de proteção de frequência, sendo possível parametrizar cada elemento com um valor de *pick-up* e temporizações distintas.

Instabilidades de frequência começam quando uma grande diferença entre demanda e consumo, ou contingências severas, ocorrem no SEP. Na geração, como a potência mecânica produzida por uma turbina é transferida ao eixo do gerador, ocorre a conversão de potência mecânica P_M para potência elétrica P_E . Enquanto o torque mecânico T_M é produzido pela turbina devido à passagem de água ou vapor, o torque elétrico T_E é resultado do comportamento da carga do sistema elétrico. A diferença entre essas grandezas causa variações na velocidade do gerador, resultando em mudanças na frequência da rede. A relação entre a variação de frequência e potência pode ser expressa pela **Equação 12**, onde f_n é a frequência do sistema, ΔP é a diferença entre P_M e P_E , e H é a constante de inércia normalizada (AMAN et al., 2012).

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_n}{2H} \cdot \Delta P \quad (12)$$

Observa-se que a diferenças entre carga e geração promovem variação da frequência. O aumento da geração ou diminuição das cargas faz com que a taxa de variação de frequência seja positiva, indicando o aumento da frequência. Por sua vez, na situação em que a carga supera a geração, o aumento da potência elétrica faz com que a taxa de variação fique negativa, indicando diminuição da frequência do sistema.

Como a frequência do sistema é controlada e deve ser mantida em níveis estáveis, relés de sobre e subfrequência são distribuídos ao longo do SEP para prevenir ou agir contra situações de variações de frequência. *Blackouts*, perda de estabilidade e aceleração da máquina síncrona são alguns dos efeitos dessa variação no sistema elétrico.

Um procedimento adotado contra a variação da frequência do sistema são os cortes de carga. Subfrequências ocorrem em função da perda de geração ou aumento súbito de carga. Essas subfrequências normalmente ocorrem em casos de formação de ilhas, nas quais a geração resultante é inferior à carga ilhada. Não havendo o controle automático de geração, o controle da frequência deverá ser feito pelo corte de cargas, o qual é dividido em estágios. Cada estágio age para eliminar blocos de cargas a depender da criticidade da subfrequência, de maneira a evitar o colapso do sistema elétrico de potência.

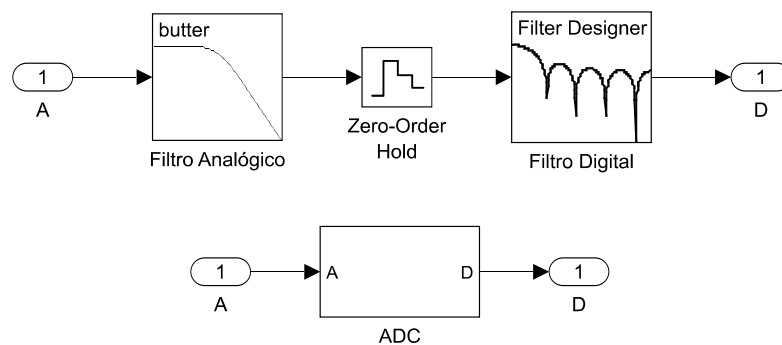
3 METODOLOGIA

O processo de conversão analógico-digital e os modelos de relés de proteção percorridos anteriormente foram desenvolvidos a partir do software *Matlab/Simulink*. Para cada modelo, serão apresentados seus respectivos diagramas de blocos, os quais foram construídos utilizando de bibliotecas disponíveis no software.

3.1 MODELO CONDICIONAMENTO DE SINAL

A **Figura 14** apresenta o diagrama do bloco de condicionamento de sinal, utilizado para realizar a conversão analógico-digital.

Figura 14 – Modelo do bloco de condicionamento de sinal

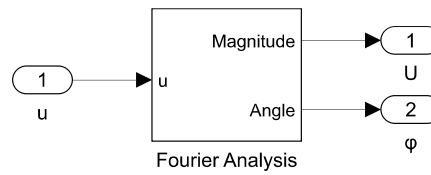


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a medição de corrente e tensão pelos transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC), os sinais são filtrados e quantizados pelo bloco ADC para posterior processamento digital. O filtro analógico é configurado como passa-baixas para prevenir o fenômeno de *anti-aliasing*. O bloco *Zero-Order Hold* é responsável pela amostragem do sinal filtrado e o filtro digital FIR passa-bandas cria uma janela de dados digital.

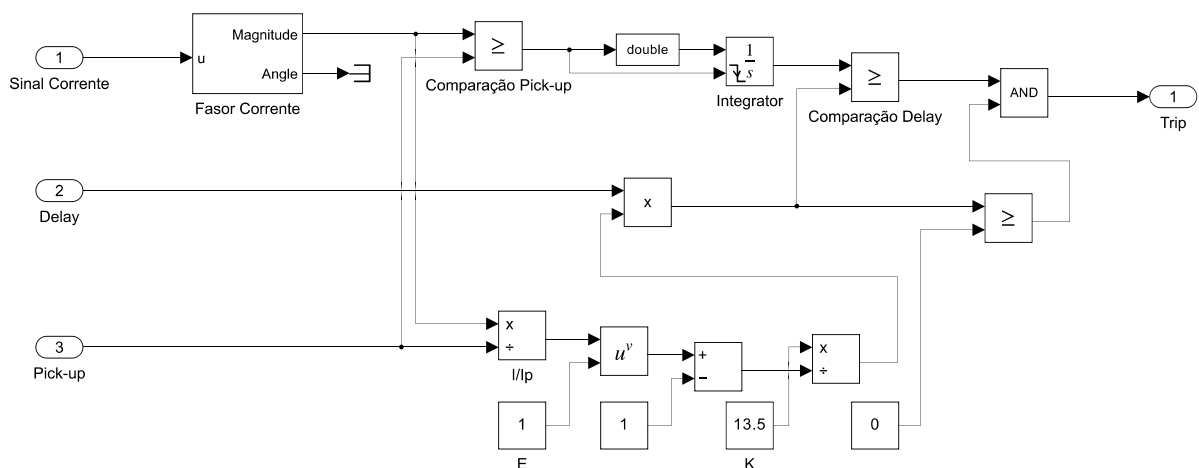
3.2 MODELO BLOCO DE MEDIÇÃO

O modelo que realizará a medição dos sinais digitais é mostrado na **Figura 15**. O bloco é capaz de realizar uma análise de Fourier do sinal de entrada, retornando como saída os valores de módulo e ângulo do sinal digital. Também é possível definir qual múltiplo da frequência fundamental será analisada.

Figura 15 – Bloco de medição**Fonte:** Elaborado pelo autor.

3.3 MODELO RELÉ DE SOBRECORRENTE

A **Figura 16** apresenta o modelo monofásico do relé de sobrecorrente temporizado. Os sinais de entrada correspondem à corrente previamente tratada, ao multiplicador de tempo (*delay*) e a corrente de ajuste (*pick-up*). O bloco de medição é configurado para obter a magnitude do sinal de corrente para a frequência fundamental. Caso o valor de corrente lido for maior que o ajustado, o bloco integrador irá atuar como temporizador e, no momento que a saída deste bloco for igual ou maior que o valor de tempo de operação calculado, o sinal de *trip* será enviado para abertura do disjuntor.

Figura 16 – Modelo do relé de sobrecorrente**Fonte:** Elaborado pelo autor.

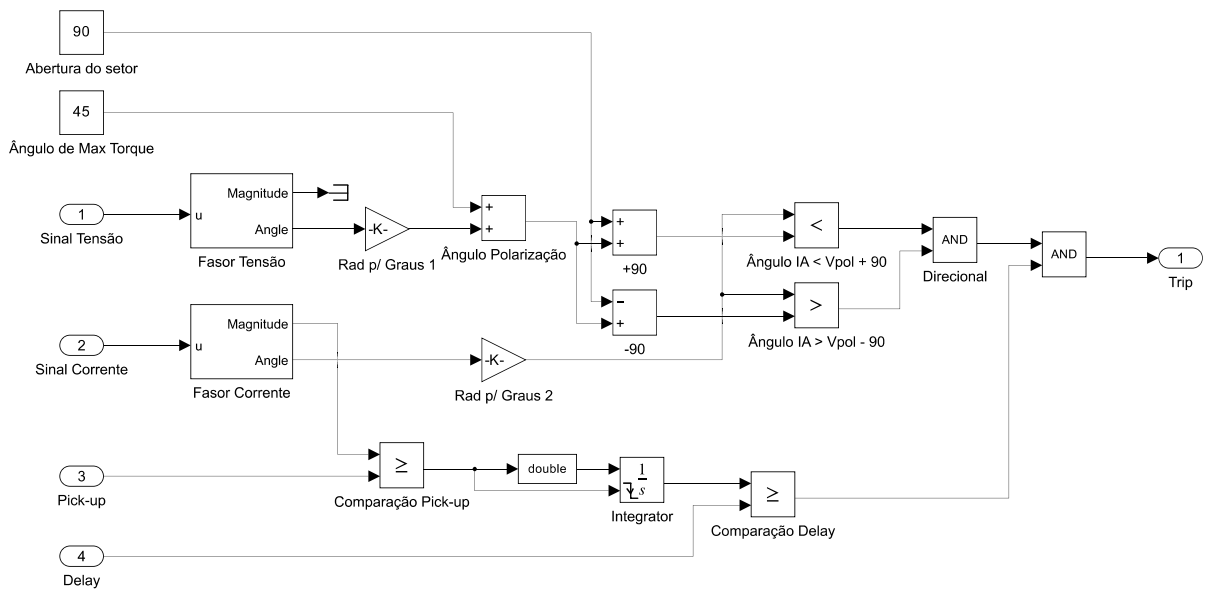
Neste modelo implementou-se a curva de tempo muito inverso definida pela IEC, porém é possível utilizar este mesmo modelo para implementação de diferentes tipos de curvas, apenas alterando os valores das constantes. Além disso, nota-se que se o valor do multiplicador de

tempo for nulo, o modelo do relé de sobrecorrente temporizado (51) se transforma em um instantâneo (50).

3.4 MODELO RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL

O modelo desenvolvido do relé de sobrecorrente direcional identifica se a leitura de corrente corresponde ao ajustado, ao mesmo tempo que inclui uma característica temporizada ou instantânea de atuação. A lógica do elemento direcional utiliza o ângulo das tensões de fase para definir se o fasor de corrente medido durante uma falta está ou não na região de operação configurada, indicando se o defeito ocorre antes ou depois do elemento protegido. A **Figura 17** ilustra o modelo monofásico do relé de sobrecorrente direcional implementado, no qual utiliza apenas a frequência fundamental dos sinais de tensão e corrente.

Figura 17 – Modelo do relé de sobrecorrente direcional



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada fase, são utilizadas tensões de polarização distintas. Considerando o sistema operando em sequência ABC, uma corrente de falta na fase *A* utilizará a tensão V_{BC} como polarização. Já para uma corrente na fase *B*, a tensão V_{CA} é considerada. Por fim, para uma corrente de falta na fase *C*, a tensão correspondente será V_{AB} .

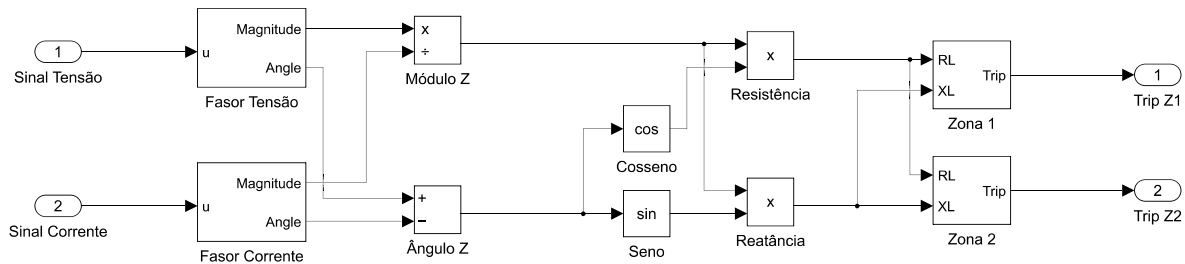
O modelo em questão foi combinado à característica de tempo definido, onde é possível ajustar uma corrente de operação e uma temporização intencional. Além disso, a lógica considera que o ângulo de máximo torque (ou ângulo do elemento característico) é de 45 graus,

enquanto a abertura do setor que define a região de operação é de 180 graus (± 90 graus). Apesar disso, estes valores podem ser configurados livremente conforme a necessidade.

3.5 MODELO RELÉ DE DISTÂNCIA

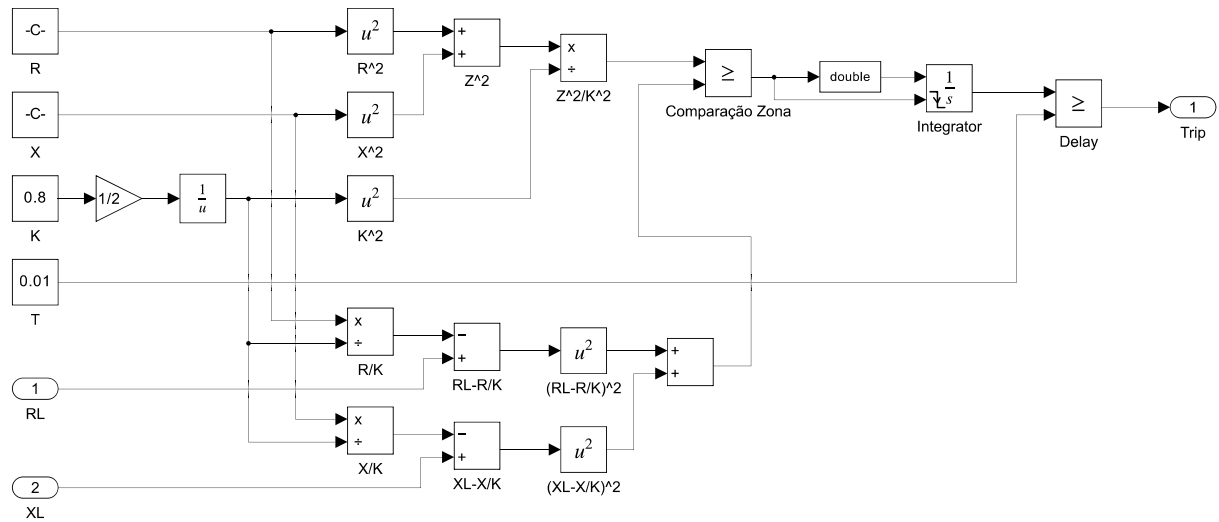
O modelo monofásico do relé de distância apresentado na **Figura 18** também considera apenas a frequência fundamental dos sinais de corrente e tensão para o cálculo da impedância vista pelo relé. Os valores de resistência (R_L) e reatância (X_L) são obtidos a partir da impedância previamente calculada, onde posteriormente entram no bloco de detecção de zona, o qual determina se a falta está dentro ou fora da zona de operação.

Figura 18 – Modelo do relé de distância



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso foram implementadas duas zonas que podem ser configuradas considerando a característica Mho , conforme mostra a **Figura 19**. As constantes R e X referem-se aos parâmetros de resistência e reatâncias conhecidos da linha de transmissão, enquanto K e T são configuráveis e indicam o alcance da zona e a temporização intencional, respectivamente.

Figura 19 – Modelo de detecção de zona

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por simplificação, o modelo desenvolvido utiliza das correntes e tensões por fase para o cálculo da impedância no momento de uma falta. Relés de distância modernos utilizam de algoritmos que identificam cada tipo de falta (monofásica, bifásica ou trifásica), geralmente através do cálculo de componentes de sequência, e calculam a impedância considerando relações entre tensões e correntes para cada tipo de falta. A **Tabela 4** resume essas relações, onde $K = \frac{Z_{L0}-Z_{L1}}{Z_{L1}}$ é chamado de fator de compensação.

Tabela 4 – Unidades de medida para diferentes tipos de falta

	Tipo de falta	Tensão	Corrente
Monofásica	AN	V_A	$I_A + K \cdot I_0$
	BN	V_B	$I_B + K \cdot I_0$
	CN	V_C	$I_C + K \cdot I_0$
Bifásica	AB	$V_A - V_B$	$I_A - I_B$
	BC	$V_B - V_C$	$I_B - I_C$
	CA	$V_C - V_A$	$I_C - I_A$

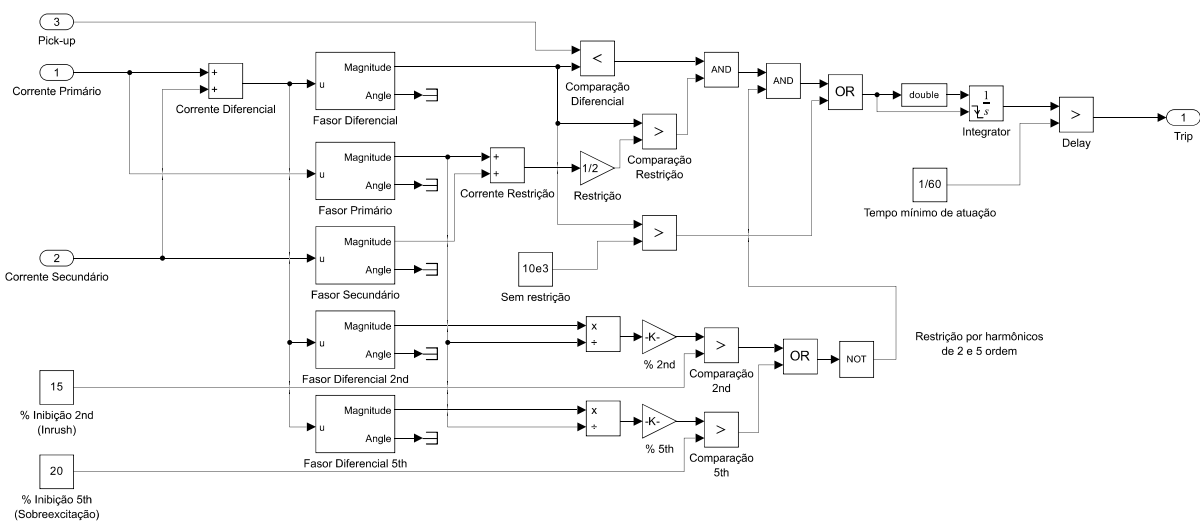
Fonte: (Duarte, 2018).

3.6 MODELO RELÉ DIFERENCIAL

O modelo monofásico do relé diferencial é apresentado pela **Figura 20**. Neste caso, o relé diferencial utiliza os sinais das correntes primárias e secundárias do equipamento a ser protegido. A corrente diferencial (I_{DIFF}) ou corrente de operação (I_{OP}) é obtida a partir da soma vetorial das correntes do primário e secundário. A corrente de restrição (I_{REST}) pode ser obtida utilizando diversos métodos, porém a utilizada neste modelo será a média da soma escalar das correntes do primário e secundário. Tanto I_{DIFF} quanto I_{REST} são calculadas pela frequência fundamental das correntes. A saída da lógica diferencial ocorrerá quando a magnitude de I_{DIFF} for maior que um valor pré-estabelecido e superior a I_{REST} . Um elemento sem restrição também foi incluído no modelo, de modo a causar a operação do relé quando I_{DIFF} ultrapassar determinado ajuste configurável, independente dos elementos restritivos. Além disso, um tempo mínimo foi adicionado na lógica para evitar *trip* devido a transitórios iniciais da simulação do *Matlab/Simulink*.

Toda a lógica de atuação do relé diferencial pode ser bloqueada devido a presença de harmônicos de segunda (*inrush*) e quinta ordem (sobre-excitação). As magnitudes das correntes diferenciais de segunda e quinta harmônicas são comparadas a da frequência fundamental do primário e caso haja superação de determinado valor percentual ajustável (neste caso expresso por 15% de segunda e 20% de quinta harmônica), haverá o bloqueio do relé diferencial.

Figura 20 – Modelo do relé diferencial



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 MODELO RELÉ DE FREQUÊNCIA

O modelo do relé de frequência mostrado pela **Figura 21** utiliza da componente fundamental do sinal de tensão para medir a frequência calculando a variação do ângulo de fase do sinal, isto é,

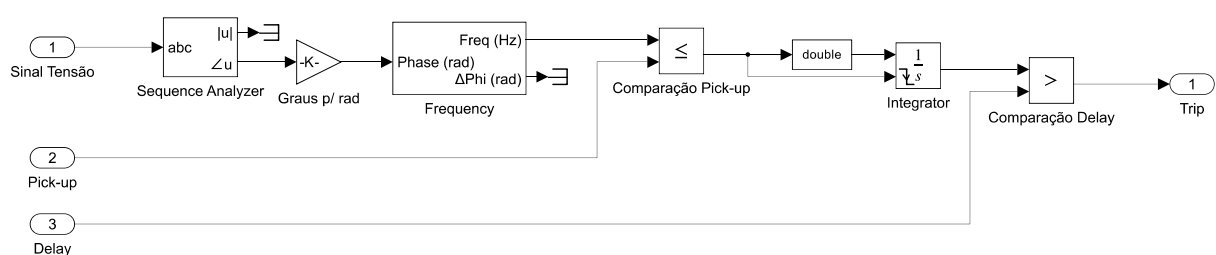
$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{dt} \quad (13)$$

O modelo inclui uma temporização intencional e um elemento de comparação, no qual gera uma saída de *trip* caso a frequência medida for menor que o ajustado. Este relé é chamado de relé de subfrequência (81U). Apenas alterando o comparador é possível incluir o relé de sobrefrequência (81O), atuando quando a frequência medida for maior que o ajustado.

Relés digitais modernos utilizam algoritmos que chaveiam o sinal utilizado para o cálculo da frequência do sistema, utilizando tanto tensão quanto corrente para tal. Um ajuste mínimo de tensão/corrente também é comumente incluso, de forma a prevenir atuação indevida.

Variações de frequência são causadas por desbalanço entre a potência ativa gerada e a consumida. Sobrefrequência é associada ao excesso de geração (ou *déficit* de cargas), enquanto subfrequência ocorre devido ao excesso de cargas (ou *déficit* de geração).

Figura 21 – Modelo do relé de frequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

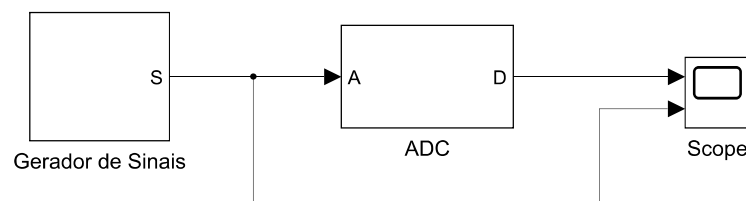
4 RESULTADOS

A fim de validar os modelos desenvolvidos anteriormente, neste capítulo serão apresentadas as simulações computacionais realizadas no software *Matlab/Simulink*. O objetivo destas simulações é verificar se os modelos apresentados se comportam conforme o esperado pela fundamentação teórica. Todos os relés de proteção serão simulados em modelos de sistemas elétricos disponíveis pela biblioteca *SimPower Systems*. Nas simulações, os transformadores de potencial e de corrente serão implementados com o objetivo de serem apenas medidores, não incorporando seu funcionamento real.

4.1 SIMULAÇÃO CONDICIONAMENTO DE SINAL

A **Figura 22** apresenta a simulação para verificar o comportamento do bloco de condicionamento de sinal (ADC). O gerador de sinais foi configurado para criar um sinal analógico composto por frequências de até 3kHz, incluindo a fundamental de 60Hz. Em primeiro momento, o sinal gerado passa pelo filtro analógico passa-baixas *anti-aliasing*, ajustado como Butterworth de segunda ordem, com frequência de corte em 1200Hz. Após a filtragem, o sinal é amostrado em uma frequência de 1920Hz (32 amostras por ciclo) pelo bloco *Zero-Order Hold*. Por fim, o sinal é filtrado mais uma vez, passando pelo filtro digital passa-bandas de ordem 8, com frequências de corte em 30Hz e 90Hz.

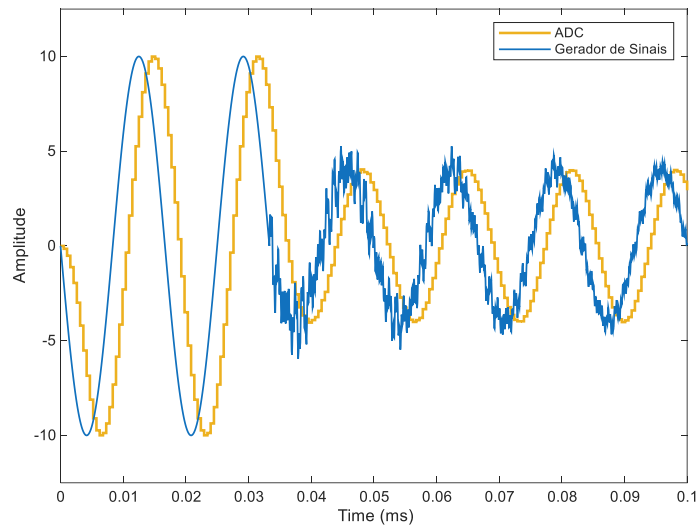
Figura 22 – Simulação do bloco de condicionamento de sinal



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível comparar a saída do bloco ADC com o sinal original na **Figura 23**. Observa-se que o sinal foi amostrado e filtrado conforme o esperado, onde as frequências de maior magnitude foram completamente eliminadas. Observa-se que existe um atraso no sinal amostrado, o qual se deve pelos filtros analógicos e digitais inseridos.

Figura 23 – Comparação entre o sinal original e o condicionado



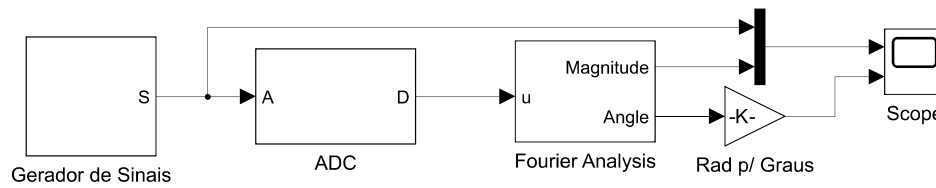
Fonte: Elaborado pelo autor.

O filtro analógico introduz um defasamento angular que decai conforme o aumento da frequência de corte. Já o filtro digital, por se tratar de um FIR (*Finite Impulse Response*) de ordem 8, introduz um atraso de grupo de 4 amostras. Relés digitais possuem filtros digitais patenteados que são projetados especificamente para rejeitar componentes DC e distorções de baixa frequência, sem amplificar ruídos de alta frequência, garantindo, ao mesmo tempo, velocidade e precisão de filtragem (GE Grid Solutions, 2023). Devido à complexidade, este trabalho não contempla o projeto destes filtros, porém é importante salientar que eles desempenham um papel fundamental no processo de condicionamento de sinal.

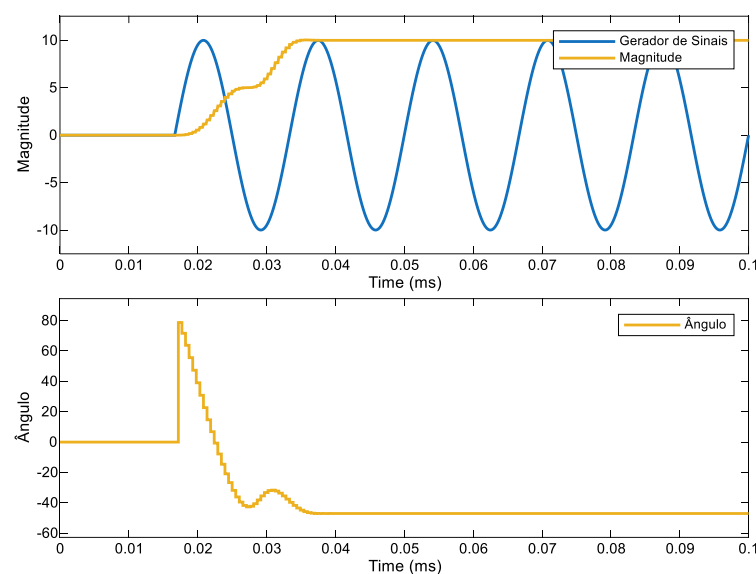
4.2 SIMULAÇÃO BLOCO DE MEDIÇÃO

A fim de verificar o desempenho do bloco de medição frente à capacidade de estimar magnitude e ângulo, um sinal senoidal foi gerado de forma semelhante à simulação anterior. O esquema montado da **Figura 24** demonstra que o sinal é condicionado antes de entrar no bloco de medição.

Pela **Figura 25** observa-se que o bloco foi capaz de estimar tanto a magnitude quanto a fase de um sinal senoidal. A simulação também mostra que o bloco em questão leva um tempo para estimar os valores, visto que o algoritmo utiliza um ciclo completo para determinar os valores de magnitude e ângulo de um sinal.

Figura 24 – Simulação do bloco de medição

Fonte: Elaborado pelo autor.

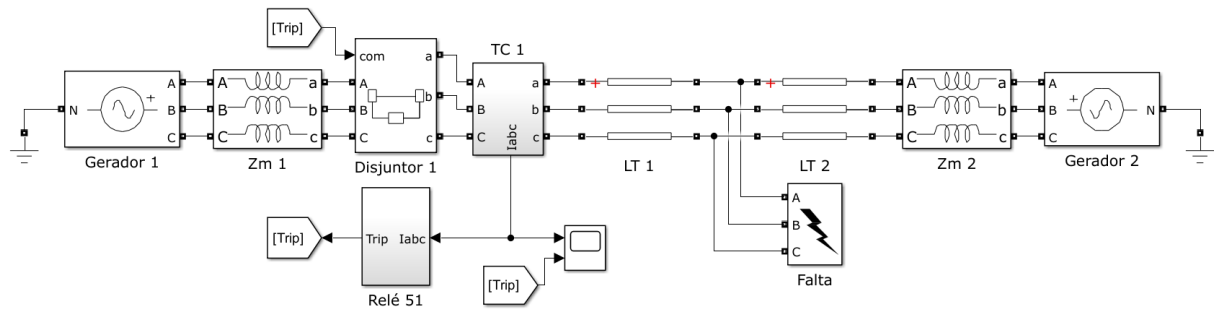
Figura 25 – Medição de magnitude e ângulo do sinal

Fonte: Elaborado pelo autor.

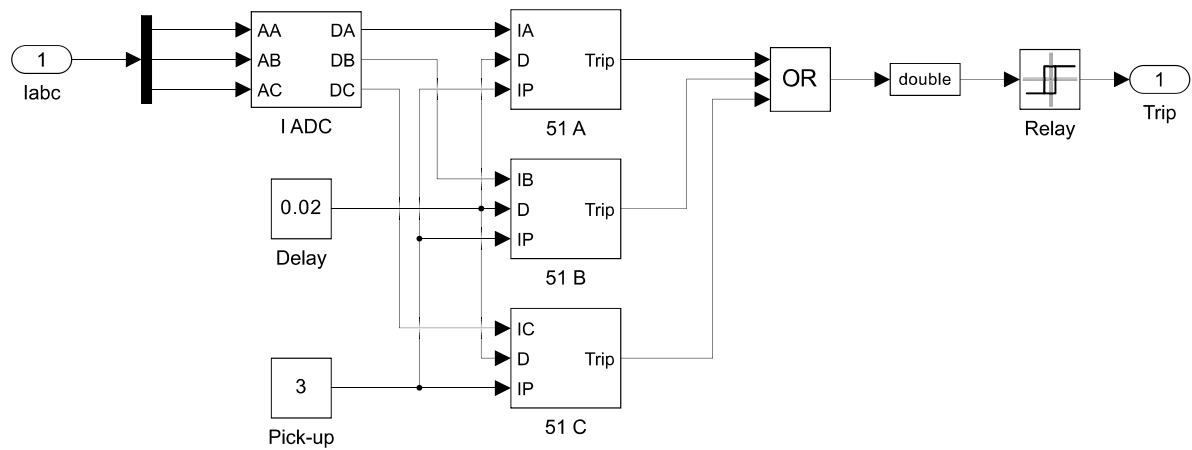
4.3 SIMULAÇÃO RELÉ DE SOBRECORRENTE

Para verificar o modelo do relé de sobrecorrente utilizou-se o sistema trifásico da **Figura 26**. O sistema inclui dois geradores de 345kV em 60Hz, onde o gerador 1 possui defasagem angular de 15 graus e o gerador 2 possui defasagem de 0 graus. Estes geradores estão interconectados por uma linha de transmissão de 100 km de extensão, onde sua impedância mútua vista pelos geradores também foi incluída. A **Figura 27** mostra o bloco do relé de sobrecorrente implementado na simulação, onde foram incluídos três elementos que utilizam a leitura de corrente proveniente de um TC posicionado após o disjuntor, o qual está configurado para realizar um comando de abertura quando do recebimento do sinal de *trip*.

Em situação normal de carga, a leitura de corrente no secundário do TC de relação 400 é de 2,74A. Por sua vez, na ocorrência de uma falta trifásica localizada a 90 km da linha de transmissão, a corrente de curto-circuito é de 12,3A após o transitório, conforme a **Figura 28**.

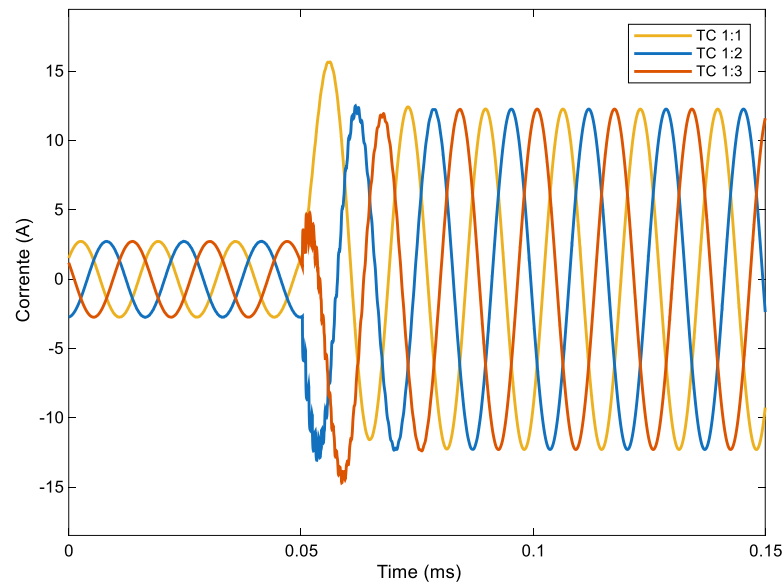
Figura 26 – Sistema do relé de sobrecorrente simulado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Bloco do relé de sobrecorrente simulado

Fonte: Elaborado pelo autor.

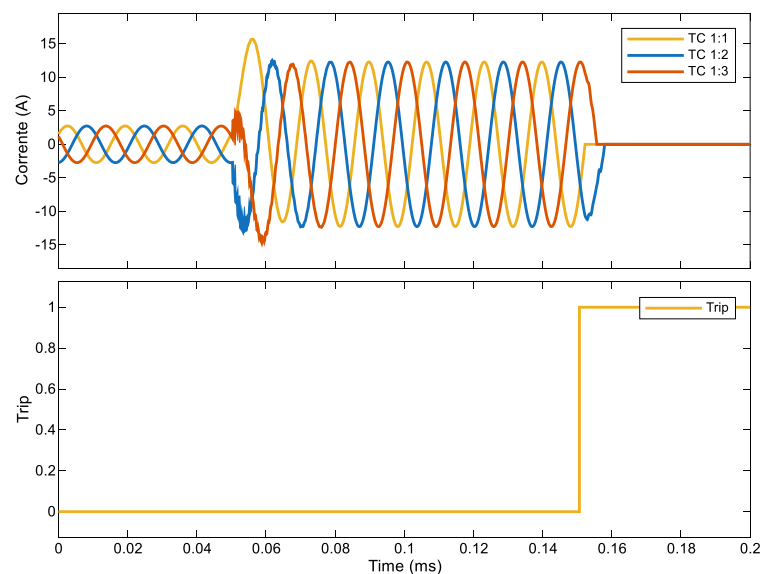
Figura 28 – Correntes de carga e de curto-circuito para o relé de sobrecorrente



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir destas medições, o relé de sobrecorrente foi ajustado com um multiplicador de tempo de 0,02 e corrente de *pick-up* de 3A. Dessa forma, considerando a curva IEC muito inversa, o tempo de atuação do relé teoricamente será de 90ms após a ocorrência da falta. A **Figura 29** apresenta as formas de onda de correntes secundárias do TC, em conjunto com o sinal de *trip*.

Figura 29 – Disparo do relé de sobrecorrente



Fonte: Elaborado pelo autor.

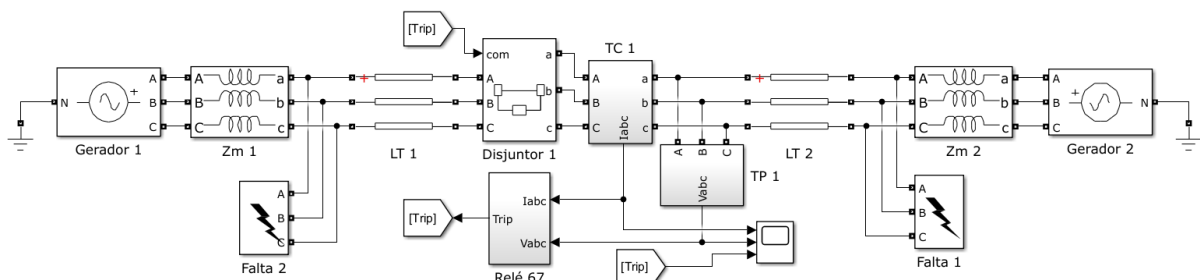
Conforme o esperado, após a atuação do relé de sobrecorrente houve abertura do disjuntor, cessando a corrente de falta introduzida no sistema. O tempo entre a ocorrência da falta e do sinal de *trip* foi medido e possui o valor de 100ms. Esta diferença ocorre devido ao atraso introduzido pelo processo de condicionamento do sinal, conforme discutido anteriormente.

Relés de sobrecorrente são utilizados nas mais diversas aplicações, como *backup* na proteção de linhas de transmissão, como complemento na proteção de unidades transformadoras de potência, de reatores, bancos de capacitores, entre outros. Em linhas de transmissão de energia, devido ao relé utilizar apenas da medição de corrente para gerar um sinal de *trip*, o mesmo é mantido bloqueado até que ocorra a perda da medição de tensão, devido a falhas no circuito do TP. Como relés de distância e direcionais utilizam do sinal de tensão para polarização das funções, o relé de sobrecorrente será utilizado no caso da perda de ambos. Relés digitais utilizam de lógicas de detecção de perda de potencial (falha fusível) para realização do bloqueio ou desbloqueio da unidade de sobrecorrente de *backup*.

4.4 SIMULAÇÃO RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL

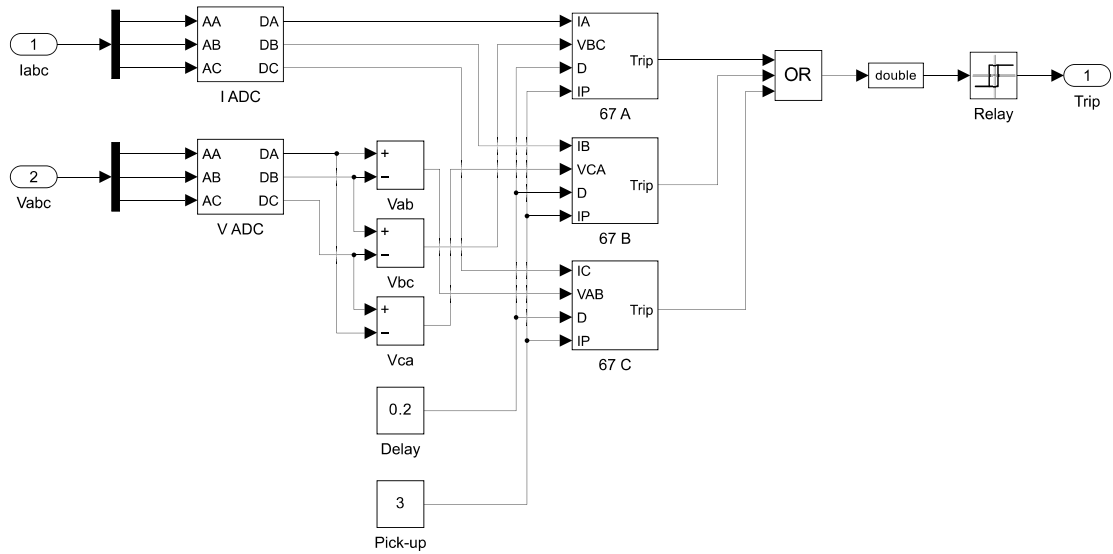
A validação do modelo do relé de sobrecorrente direcional foi realizada a partir do sistema mostrado pela **Figura 30**. O sistema utiliza os mesmos geradores e linha de transmissão do modelo anterior, com a diferença de que agora o relé foi instalado no meio da linha de transmissão. A **Figura 31** mostra o bloco do relé direcional implementado na simulação. Neste caso, um TP de relação 3000 também foi adicionado ao modelo, visto que o elemento direcional utiliza das tensões de fase como polarização.

Figura 30 – Sistema do relé de sobrecorrente direcional simulado



Fonte: Elaborado pelo autor.

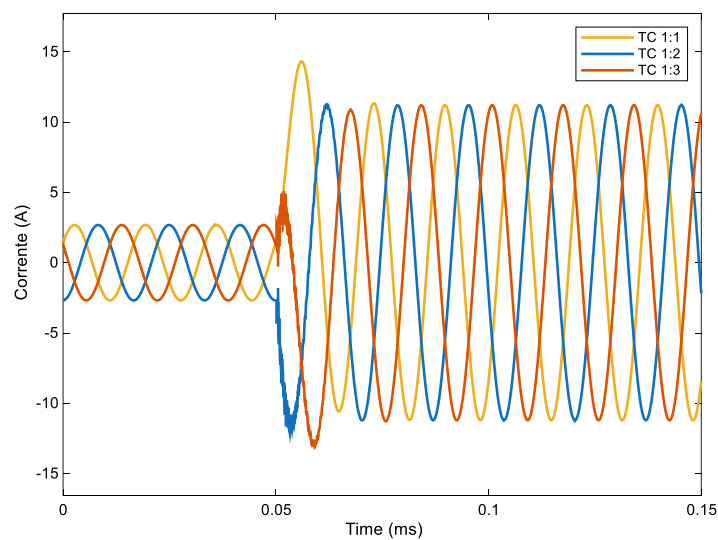
Figura 31 – Bloco do relé de sobrecorrente direcional simulado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em situação de carga normal, a leitura de corrente no secundário do TC é de 2,68A. Por sua vez, na ocorrência de faltas trifásicas localizadas no início e no fim da linha de transmissão, a corrente de curto-circuito é de 11,2A após o transitório, conforme a **Figura 32**.

Figura 32 – Correntes de carga e de curto-circuito para o relé direcional



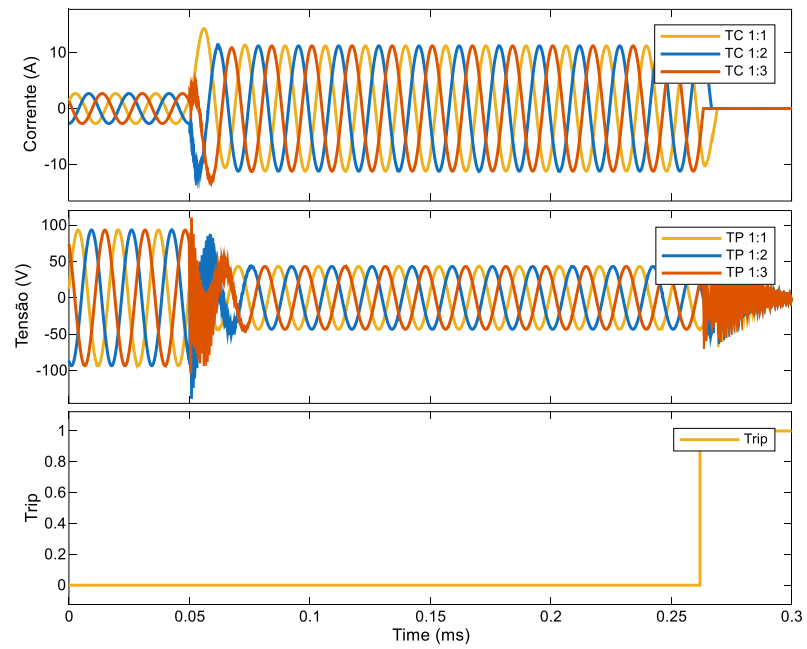
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, o relé de sobrecorrente direcional foi ajustado com uma corrente de *pick-up* de 3A, com uma temporização definida de 200ms.

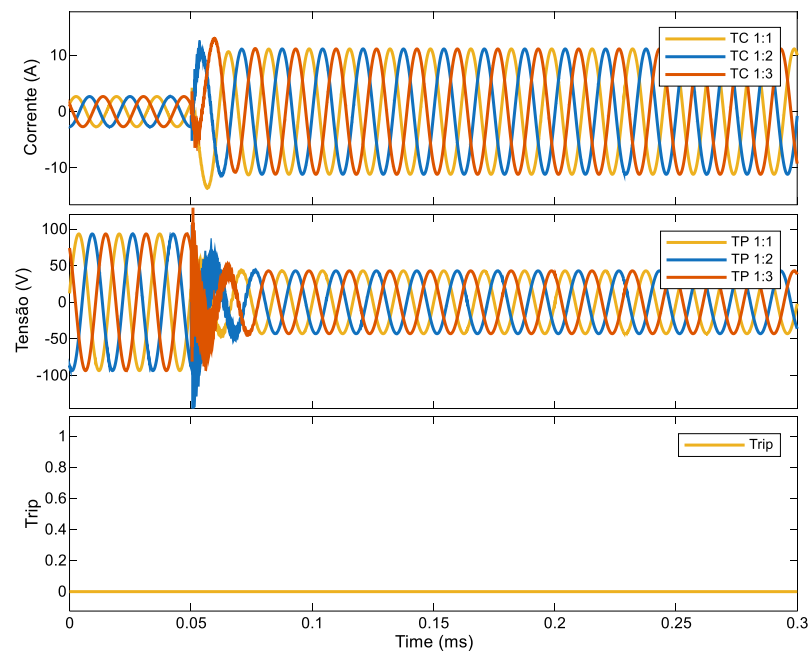
Devido ao posicionamento da polaridade do TC e do ajuste do ângulo de máximo torque do bloco direcional, o relé deverá ser capaz de identificar e atuar para uma falta localizada no fim da linha de transmissão, visto que enxergará um curto-circuito à frente dele. Porém, uma falta no início da linha de transmissão fará com que o relé direcional enxergue um defeito para trás e não poderá disparar o sinal de abertura do disjuntor. A **Figura 33** apresenta as formas de onda de correntes e tensões secundárias, em conjunto com o sinal de *trip*, para uma falta localizada no fim da linha de transmissão. Por sua vez, a **Figura 34** apresenta os mesmos sinais para uma falta localizada no início da linha de transmissão.

Conforme o esperado, o relé de sobrecorrente direcional foi capaz de operar de forma seletiva para o trecho da linha de transmissão protegida, enviando o comando de abertura de disjuntor para eliminar a corrente de curto-circuito. O tempo entre a falta e o sinal de *trip* foi medido e possui o valor de 210ms, cujo atraso também é justificado pelo condicionamento de sinal.

Relés direcionais de sobrecorrente são frequentemente utilizados como complemento na proteção de linhas de transmissão. Faltas de alta impedância podem não ser vistos pelos relés de distância e o elemento direcional supre essa necessidade garantindo uma atuação seletiva ao trecho protegido. Relés digitais possuem um ajuste mínimo de corrente e tensão para determinar a direcionalidade, de forma a garantir que a função não opere de forma indevida na ocorrência de uma manobra de disjuntor. Além disso, contam com algoritmos de memória de tensão para o caso de faltas muito próximas ao TP, no qual armazena a tensão de polarização em um momento antes de seu colapso.

Figura 33 – Disparo do relé de sobrecorrente direcional

Fonte: Elaborado pelo autor.

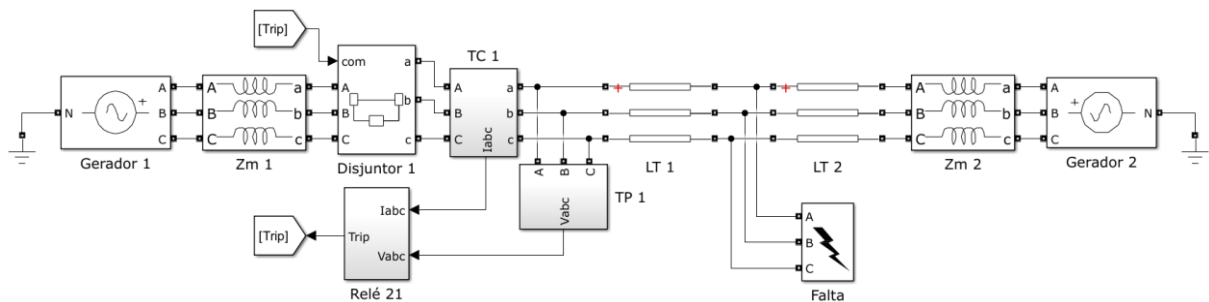
Figura 34 – Bloqueio do relé de sobrecorrente direcional

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 SIMULAÇÃO RELÉ DE DISTÂNCIA

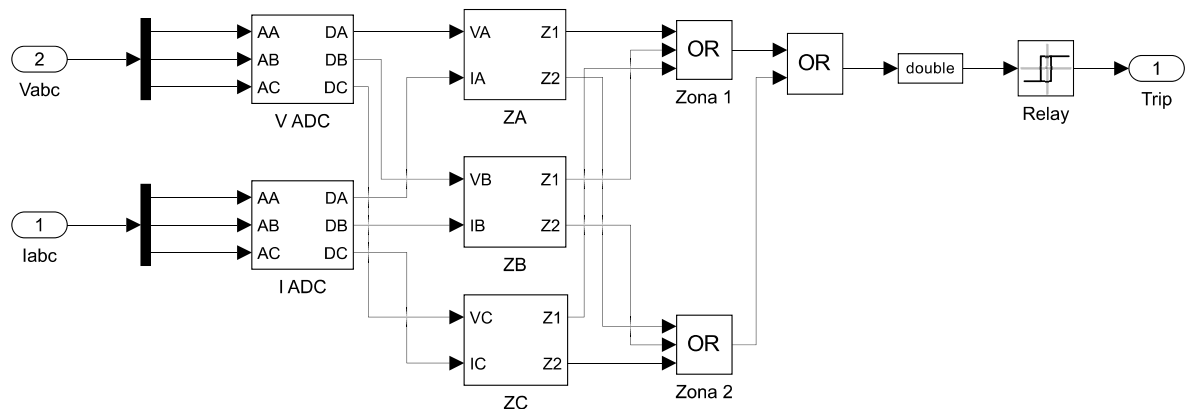
O sistema utilizado para simulação do relé de distância é mostrado pela **Figura 35**. O sistema utiliza os mesmos parâmetros e blocos dos modelos anteriores, com a adição do relé de distância posicionado no início da linha de transmissão. A **Figura 36** apresenta o bloco do relé de distância implementado na simulação.

Figura 35 – Sistema do relé de distância simulado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Bloco do relé de distância simulado



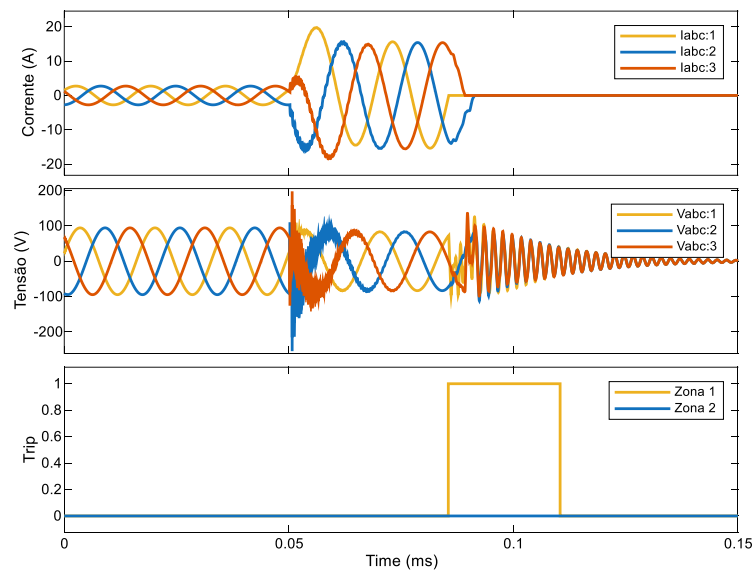
Fonte: Elaborado pelo autor.

O relé de distância possui duas zonas coordenadas. A primeira zona é ajustada para proteger o equivalente a 80% da linha de transmissão, sem temporização adicional. A segunda zona está parametrizada para proteger até 120% do comprimento da linha, com uma temporização de 200ms.

A fim de verificar o comportamento das zonas, simulou-se duas faltas trifásicas, sendo a primeira localizada a 70% da linha de transmissão, e a segunda a 90%. É de se esperar que haja atuação somente da zona 1 no primeiro caso simulado, onde o tempo de atuação deverá

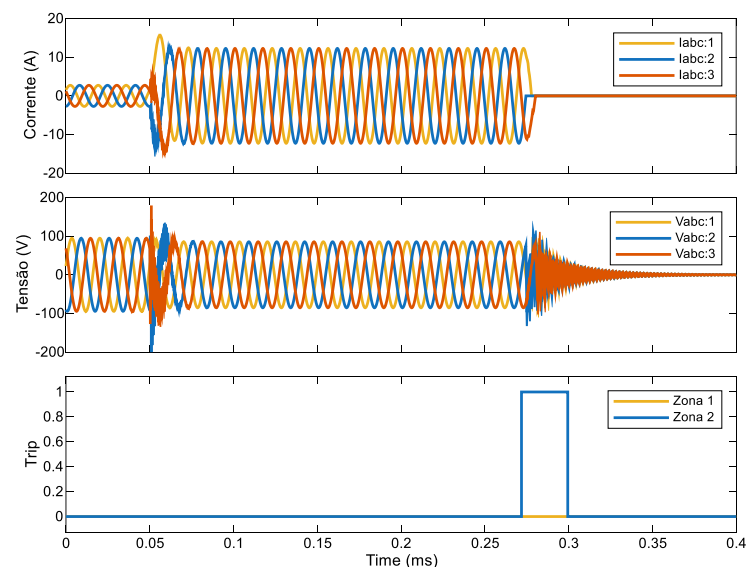
ser limitado apenas ao atraso de processamento do bloco. Entretanto, no segundo caso, somente a zona 2 deverá enviar o sinal de *trip* ao disjuntor, onde o tempo de operação da função deverá ser de 200ms, adicionado a um atraso intrínseco do relé. A **Figura 37** apresenta as formas de onda de correntes e tensões secundárias, em conjunto com o sinal de *trip*, para uma falta localizada a 70% da linha de transmissão. Na **Figura 38** apresenta os mesmos sinais para uma falta localizada a 90% da linha.

Figura 37 – Disparo da zona 1 do relé de distância



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 – Disparo da zona 2 do relé de distância



Fonte: Elaborado pelo autor.

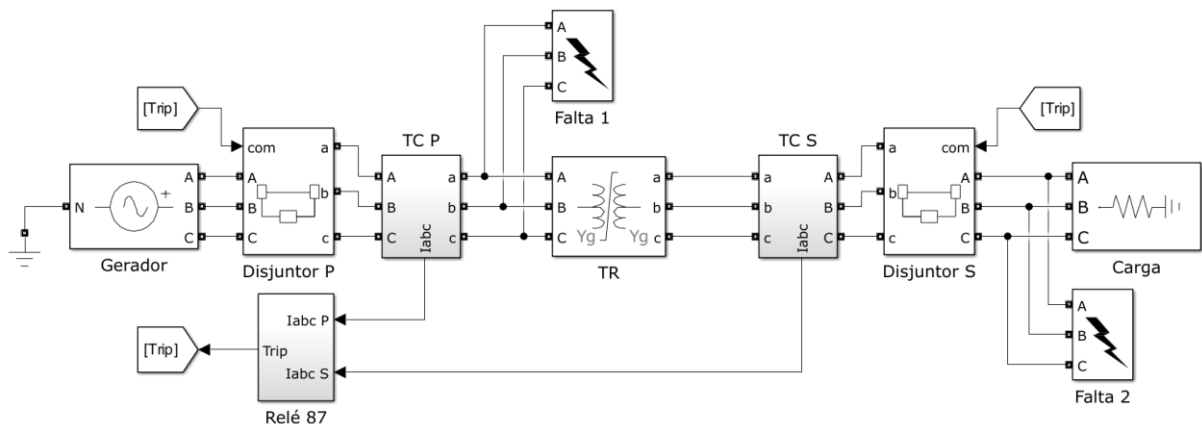
Conforme esperado, o primeiro caso simulado causou a atuação apenas da zona 1, devido ao curto-circuito situar-se abaixo do valor ajustado de até 80% do comprimento da linha, onde a diferença de tempo entre o início da falta e do sinal de *trip* vale 35ms. O segundo caso também gerou um resultado satisfatório, de modo que houve a atuação apenas da zona 2, devido ao defeito estar localizado fora da zona 1 e dentro da zona 2, ajustada em até 120% da linha. Neste caso o tempo entre o início da falta e da atuação do relé foi 220ms, muito próximo da temporização pré-estabelecida.

Apesar do modelo apresentado possuir apenas duas zonas configuráveis na característica *Mho*, relés digitais possuem diversas zonas disponíveis para utilização do usuário e incluem ambas as características *Mho* e quadrilateral, os quais podem ser livremente modificáveis conforme a necessidade da aplicação. Relés digitais dispõem de diferentes métodos para o cálculo da impedância vista no momento de uma falta, variando conforme o tipo de defeito, introduzindo compensações que reduzem erros devido a variação da resistência de falta. Lógicas de bloqueios também são associadas a essa função, onde as mais comuns são a de perda de potencial (falha fusível) e de região de carga (*Load Encroachment*). Esta última previne a atuação da função para situações em que a impedância vista pelo relé, devido a cargas na linha de transmissão, se aproxima ou adentram as zonas ajustadas.

4.6 SIMULAÇÃO RELÉ DIFERENCIAL

A fim de verificar o comportamento do relé diferencial, foi montado o sistema da **Figura 39**. O sistema é composto por um gerador de tensão nominal 13,8kV que conecta à uma carga de 20MVA através de um transformador elevador 13,8/138kV de potência nominal de 25MVA.

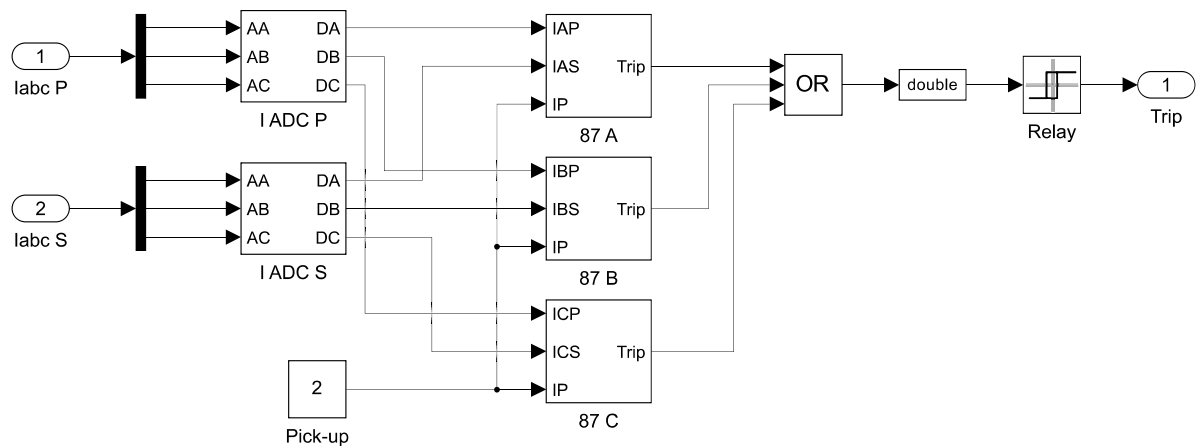
Figura 39 – Sistema do relé diferencial simulado



Fonte: Elaborado pelo autor.

O relé diferencial é conectado entre os TCs do transformador, onde o TC do primário possui relação de transformação de 200 e do secundário 20. O diagrama de blocos montado para este relé é apresentado na **Figura 40**.

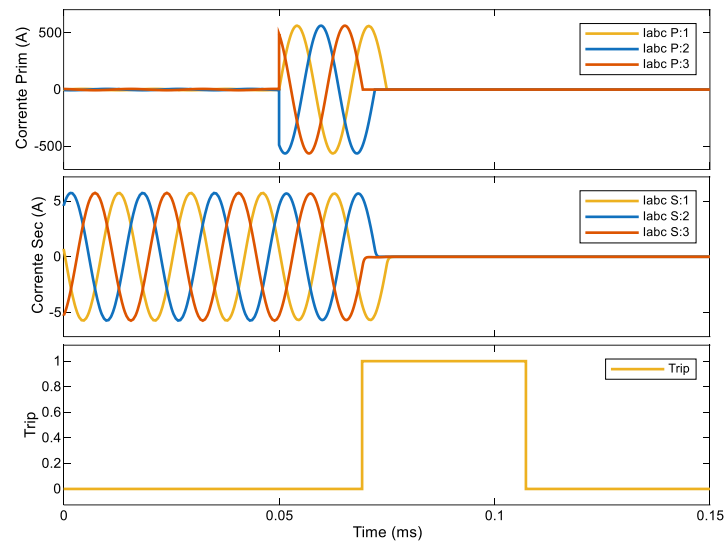
Figura 40 – Bloco do relé diferencial simulado



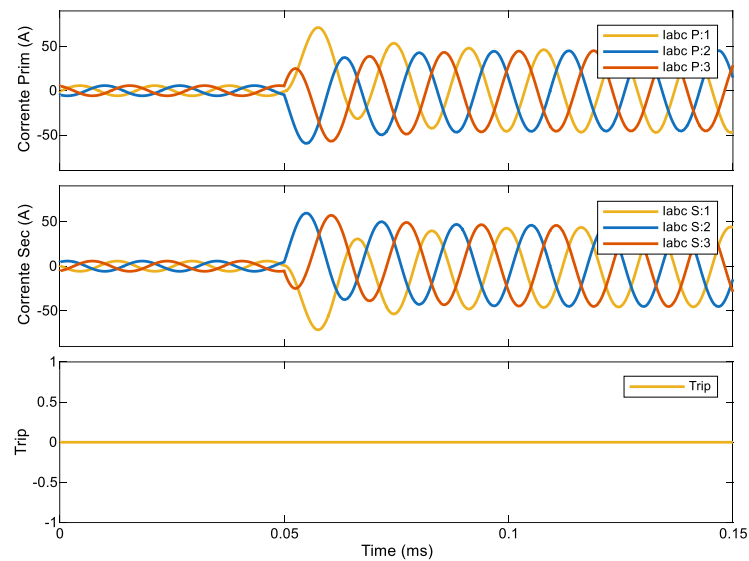
Fonte: Elaborado pelo autor.

O ajuste de *pick-up* da função diferencial foi ajustado para 2A secundários, enquanto o a corrente de restrição foi mantida como sendo a média da soma escalar das correntes do primário e secundário. Em primeiro momento foi realizado uma falta trifásica na zona de proteção diferencial, isto é, entre os TCs do transformador. A **Figura 41** apresenta o resultado desta simulação.

Como o esperado, houve *trip* devido à falta ser localizada dentro da região de proteção do relé diferencial, onde o tempo até o disparo ocorreu em aproximadamente um ciclo completo. Por sua vez, uma falta externa à região de proteção não poderá sensibilizar o relé diferencial, visto que é seletivo apenas à sua área de proteção delimitada entre os TCs. Este comportamento é evidenciado pela **Figura 42**, onde um defeito foi introduzido após o disjuntor do secundário e antes da carga do transformador.

Figura 41 – Disparo do relé diferencial para falta interna

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 – Bloqueio do relé diferencial para falta externa

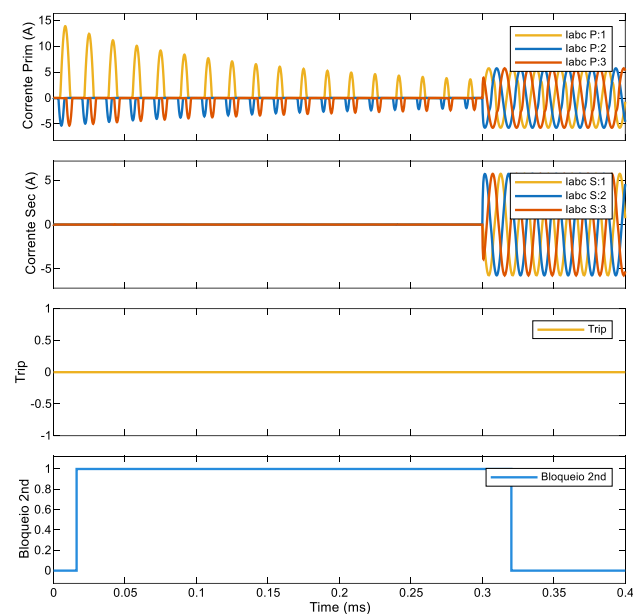
Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar das correntes de curto-circuito serem de magnitude considerável, não houve atuação do relé diferencial neste caso. Devido a isso, é comum a associação de relés de sobrecorrente para complementar a filosofia de proteção de uma unidade transformadora de potência.

Em seguida foi simulado a situação de energização do transformador para verificar o bloqueio por harmônicas de segunda ordem (*inrush*). A **Figura 43** mostra as formas de onda

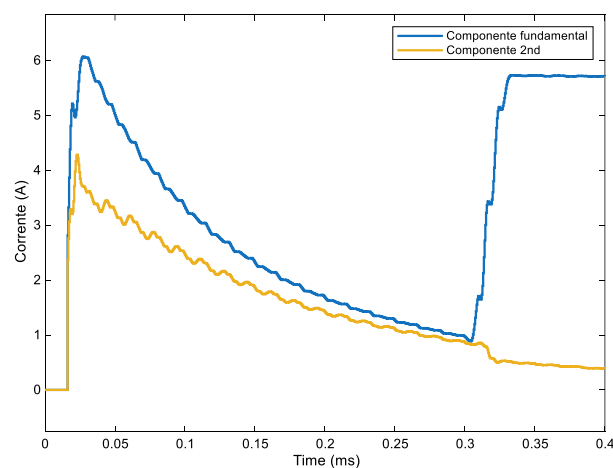
para este caso. Observa-se que no início da simulação o modelo identifica a presença harmônicas de ordem 2, gerando o sinal de bloqueio da função diferencial. Pela **Figura 44** verifica-se que durante todo o processo de *inrush* do transformador, a componente de segunda harmônica possui níveis comparáveis à fundamental (muito superior aos 15% ajustados), justificando o sinal de bloqueio de *trip* do relé diferencial. Somente após o fechamento do disjuntor do secundário, o processo de *inrush* é cessado, a componente de segunda harmônica começa a tender a zero e o bloqueio do relé diferencial é encerrado.

Figura 43 – Bloqueio do relé diferencial na energização



Fonte: Elaborado pelo autor.

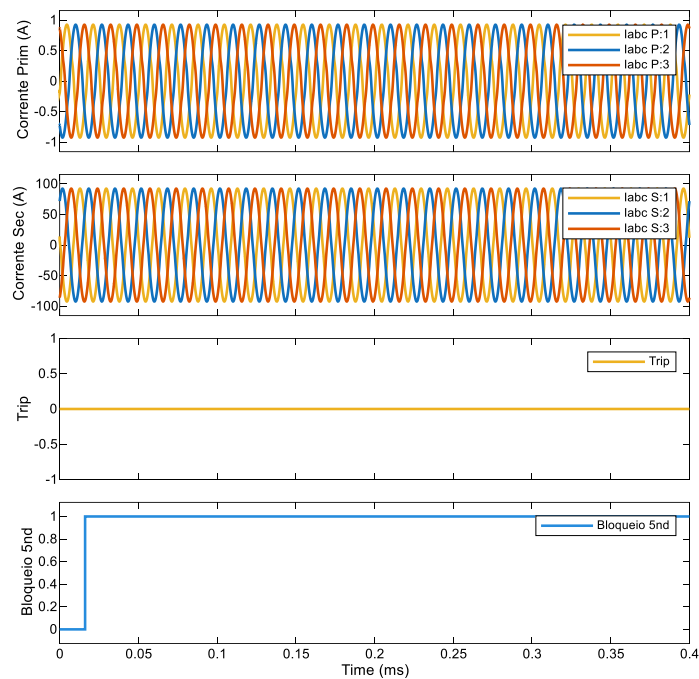
Figura 44 – Níveis da componente fundamental e 2º harmônico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, uma situação de sobre-excitação foi gerada no transformador, de modo a validar o bloqueio do relé diferencial pela componente de quinto harmônico. Para facilitar, a topologia do sistema foi alterada, onde o gerador passou a ter tensão nominal de 138kV e o transformador foi convertido para abaixador 138/13,8kV. A **Figura 45** apresenta as formas de onda para esta simulação, onde uma sobretensão de 179,4kV, 130% do valor nominal, foi aplicada ao gerador.

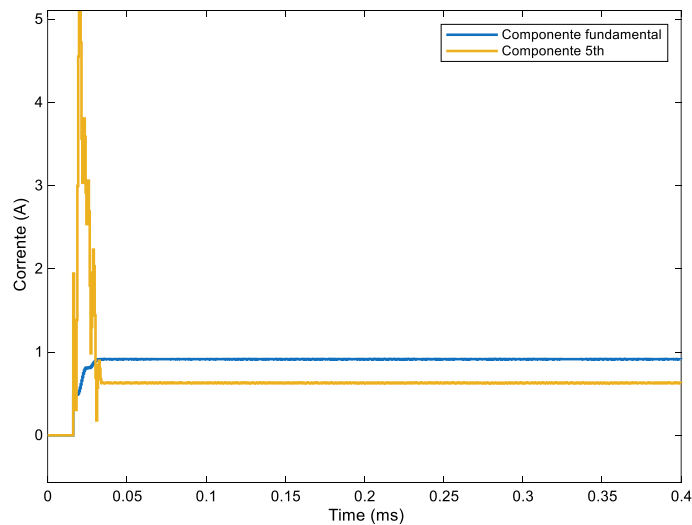
Figura 45 – Bloqueio do relé diferencial na sobre-excitação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo no início da simulação, o relé identifica a presença das harmônicas de quinta ordem e gera o sinal de bloqueio da função diferencial, o qual permanece ativo até o fim da simulação. A **Figura 46** mostra que o nível da harmônica de ordem 5 é superior ao valor ajustado de 20% da componente fundamental, justificando o sinal de bloqueio de *trip* do relé diferencial.

É importante salientar que, devido a necessidade deste relé utilizar das harmônicas de segunda e quinta ordem, o filtro digital passa-bandas foi alterado de modo a não atenuar tais frequências (120Hz e 300Hz).

Figura 46 – Bloqueio do relé diferencial na sobre-excitação

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao contrário do fenômeno de *inrush* que configura uma situação típica transitória do transformador, sobretensões no equipamento geralmente são associadas ao comportamento do sistema elétrico. Este comportamento não indica que o equipamento protegido está necessariamente em falta e por conta disso o relé diferencial não pode atuar. A sobre-excitação do núcleo acarreta processos térmicos danosos ao transformador e funções de sobretensão são utilizadas como complemento na filosofia de proteção.

O modelo apresentado possui elemento de restrição equivalente a uma curva (*slope*). Relés digitais permitem ao usuário a configuração de diversos *slopes*, promovendo compensações devido a magnetização do transformador, erros intrínsecos de medição, saturação do TC devido a faltas passantes, de forma a evitar a operação indevida do relé diferencial. Além disso, devido ao modelo de transformador utilizado ser estrela-estrela aterradas, não foi necessário realizar compensações de fase, visto que ambos os enrolamentos estão em fase. Relés digitais realizam a compensação de fase apenas inserindo a informação do grupo vetorial do transformador, sem a necessidade de ligar os TCs de maneira específica (delta ou estrela). A utilização de relés digitais também dispensa a direção da polaridade dos TCs, visto que é possível introduzir um “tombo” de 180° nos ajustes.

Além da aplicação na proteção de transformadores, relés diferenciais também são comumente utilizadas em outros equipamentos, como reatores, geradores, motores e linhas de transmissão.

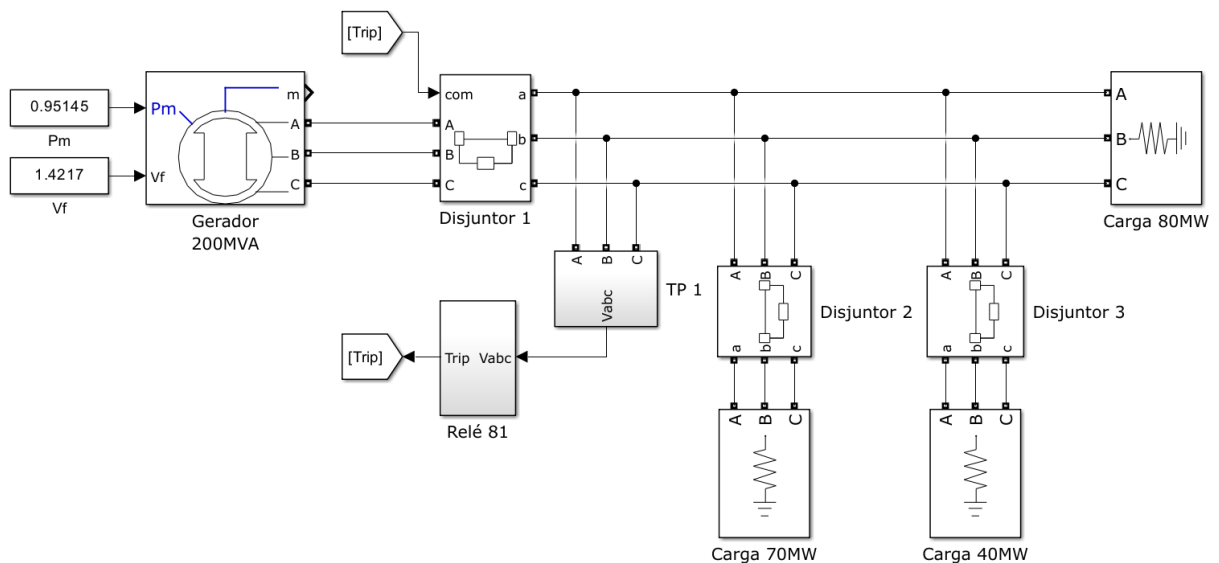
4.7 SIMULAÇÃO RELÉ DE FREQUÊNCIA

Na **Figura 47** é apresentado o sistema elétrico para teste dos relés de frequência. O sistema conta com um gerador de 200MVA com tensão nominal de 13,8kV em 60Hz que conecta três cargas com diferentes potências. O diagrama de blocos montado para este relé é apresentado na **Figura 48**.

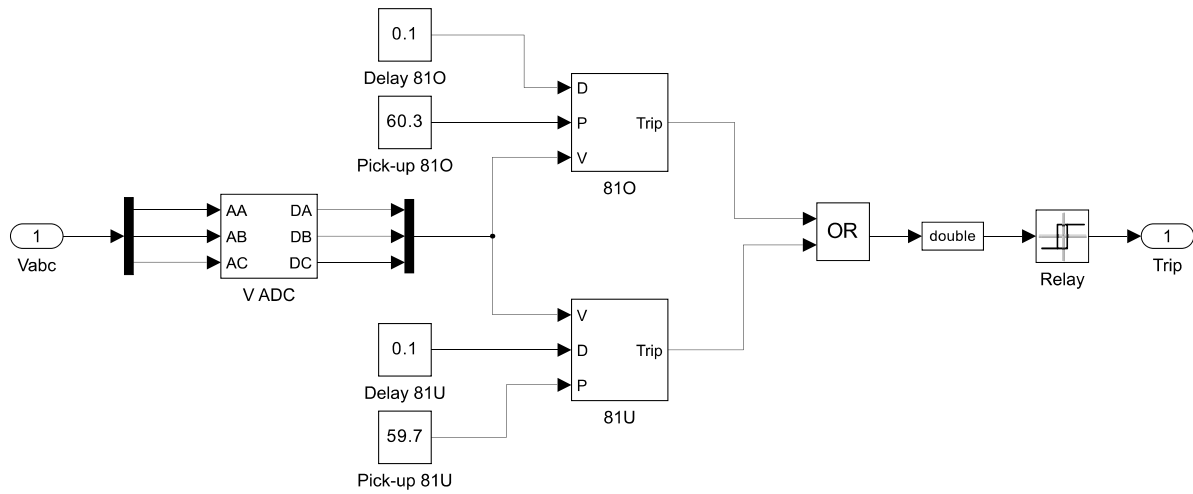
A fim de verificar o comportamento do relé de sobrefrequência, o sistema foi simulado com o gerador suprindo inicialmente uma carga de 190MW e após 500ms ocorre a desconexão do bloco de cargas de 40MW. O valor de ajuste da função foi colocado em 60,3Hz, com uma temporização de 100ms.

O comportamento do sistema pode ser observado pela **Figura 49**, onde são apresentados a corrente de carga e o instante em que ocorre o *trip*. Além disso, a **Figura 50** apresenta a variação da frequência elétrica quando ocorre a desconexão das cargas.

Figura 47 – Sistema do relé de frequência simulado

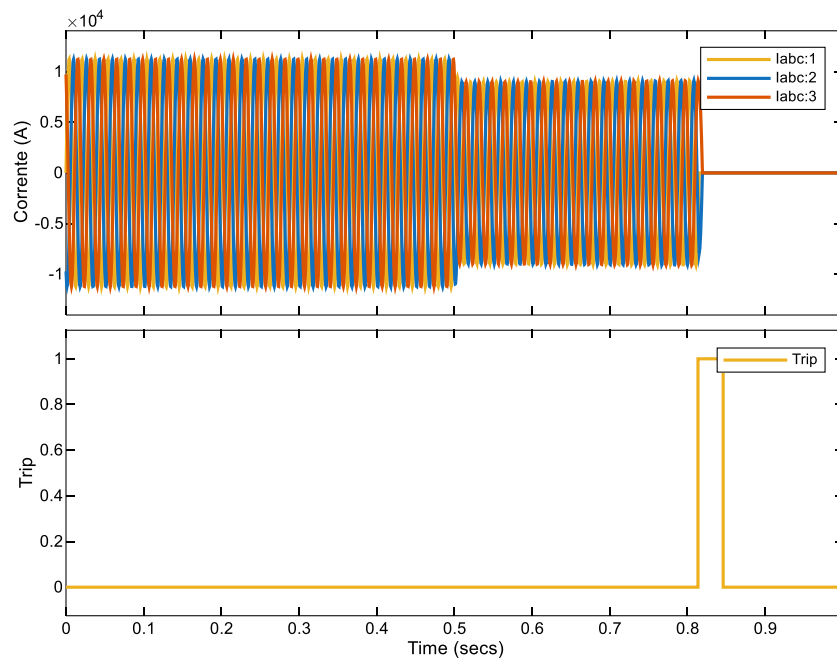


Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 – Bloco do relé de frequência simulado

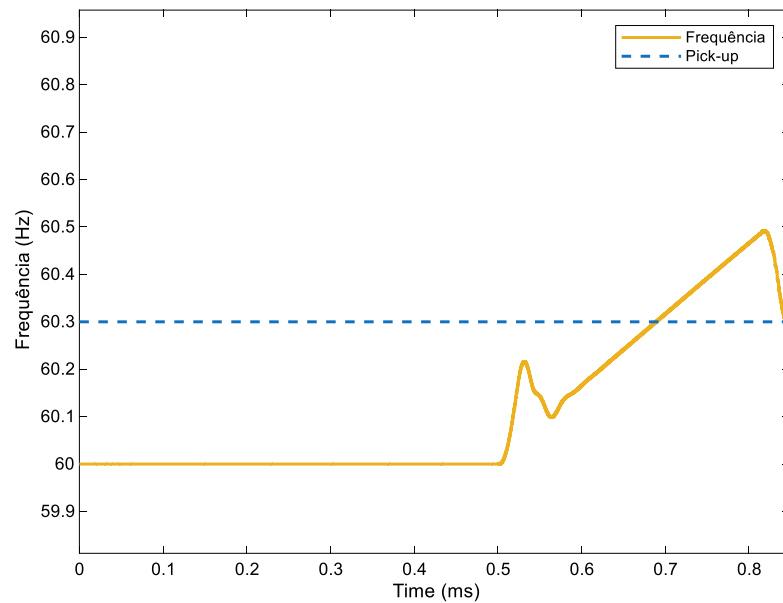
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o relé de subfrequência, o modelo simulado considera o gerador suprindo uma carga de 150MW e após 500ms ocorre a entrada de um bloco de cargas de 40MW. O valor de ajuste da função foi colocado em 59,7Hz, com uma temporização de 100ms.

Figura 49 – Correntes de carga e *trip* do relé de sobrefrequência

Fonte: Elaborado pelo autor.

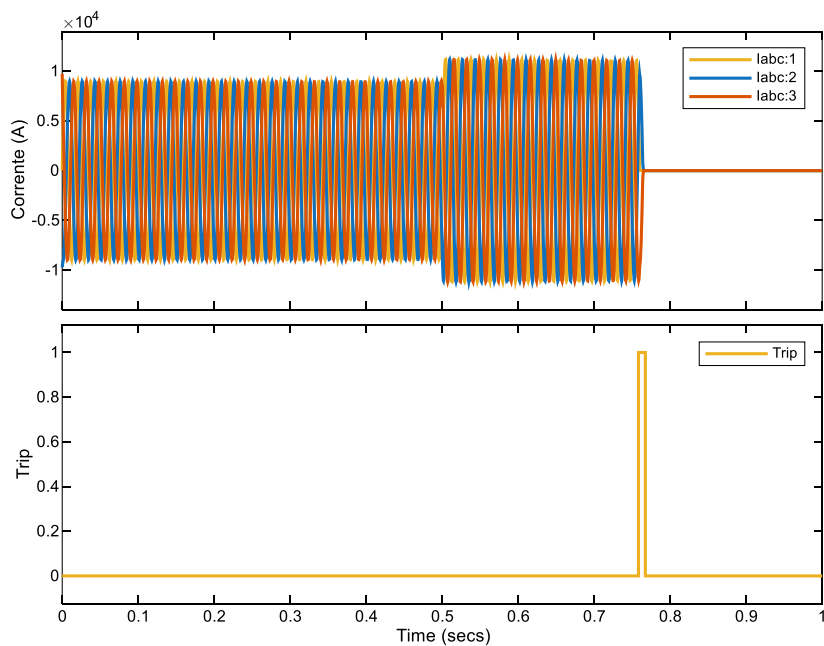
Figura 50 – Comportamento da frequência para o relé de sobrefrequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

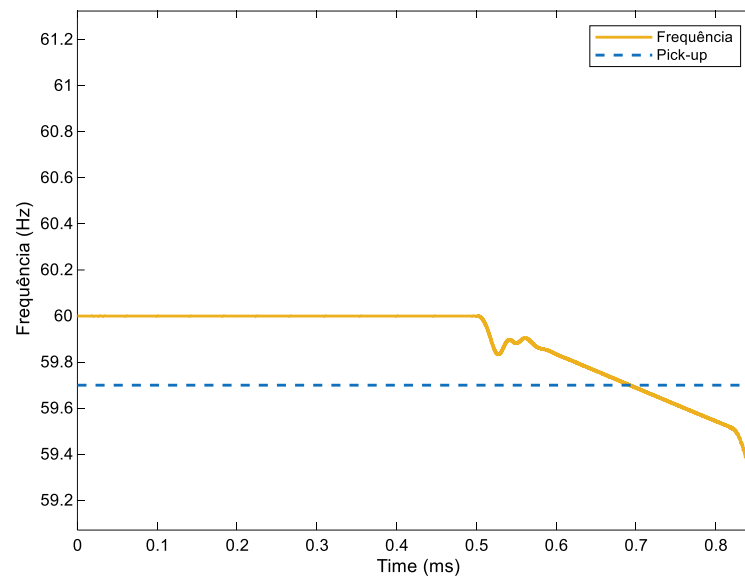
O comportamento do sistema pode ser observado pela **Figura 51**, onde são apresentados a corrente de carga e o instante em que ocorre o *trip*. Além disso, a **Figura 52** apresenta a variação da frequência elétrica quando ocorre a conexão das cargas.

Figura 51 – Correntes de carga e *trip* do relé de subfrequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 – Comportamento da frequência para o relé de subfrequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

A entrada de grandes blocos de cargas no sistema também causou desbalanço entre a potência gerada e consumida na rede, atuando o *trip* e causando a desconexão do gerador da rede. Desta vez, a diminuição da frequência elétrica está associada à desaceleração da máquina síncrona e a ação tomada se dá pelo corte de cargas no sistema.

Relés digitais possuem formas distintas de medição da frequência do sistema elétrico. Alguns métodos baseiam-se na medição da taxa de variação do ângulo de um fasor elétrico (corrente ou tensão) para estimar a frequência, como a implementada no modelo apresentado. Outros métodos envolvem a medição do período de um fasor elétrico através da detecção de dois zeros consecutivos. Uma série de fatores de segurança também são considerados, como um ajuste mínimo de corrente ou tensão para que a função não atue de maneira indevida por conta de fenômenos transitórios. Devido a isso, uma temporização mínima de atuação também é associada.

Relés de subfrequência geralmente são utilizados na composição do esquema especial de proteção ERAC (Esquema Regional de Alívio de Carga), onde através de vários estágios de seletivos cortes de carga, com diferentes níveis de subfrequência, aliviam a demanda da rede frente ao aumento da frequência elétrica, evitando instabilidades no sistema elétrico. A aplicação de relés de sobrefrequência também são diversas e incluem principalmente a detecção de sistemas ilhados.

5 CONCLUSÃO

O trabalho em questão teve como objetivo o estudo e a implementação de modelos de relés digitais em um ambiente computacional. Em um primeiro momento foi realizado uma breve discussão acerca dos relés eletromecânicos e digitais, demonstrando a evolução da tecnologia na proteção de sistemas elétricos. Os principais blocos que compõe um relé digital também foram apresentados, desde o processo de leitura dos sinais analógicos, o qual é condicionado, amostrado e quantificado para estimação dos fasores, até a característica e lógica de operação de cada relé. A plataforma *Matlab/Simulink* facilita o desenvolvimento, montagem e validação das diversas lógicas e funções de proteção em sistemas elétricos modelados.

No que diz respeito ao processo de conversão analógica-digital, foram levantados métodos de filtragem analógica, evidenciando seu papel fundamental na prevenção do fenômeno de *aliasing*. O processo de amostragem também possui seu lugar de importância, pois é ele quem irá definir a resolução e a máxima frequência no espectro. Filtros digitais são utilizados para rejeitar componentes DC e harmônicas indesejáveis, para que o sinal tratado possa ser usado para a estimação fasorial e consequentemente utilizado como tomada de decisão para atuação ou bloqueio das funções de proteção.

Um estudo foi realizado abrangendo os principais relés de proteção utilizados em sistemas elétricos de potência, como o de sobrecorrente, direcional, distância, diferencial e de frequência. Todos possuem características e modo de operação distintos, onde a compreensão destes processos possibilitou a criação de cada modelo em um ambiente computacional, para que pudessem ser introduzidos em situações reais de falta em um sistema elétrico simulado.

De maneira geral, todos os modelos implementados em software tiveram comportamento dentro do esperado. Relés de sobrecorrente atuaram conforme o tempo proveniente da sua curva. Relés direcionais foram capazes de distinguir o sentido do fluxo de corrente em uma situação de defeito. Relés de distância conseguiram mostrar a coordenação entre zonas na proteção de uma linha de transmissão. Relés diferenciais foram capazes de distinguir entre faltas internas e passantes em um transformador. Por fim, relés de frequência conseguiram identificar uma situação de instabilidade no sistema e agir conforme programado.

A pesquisa concretizada durante o desenvolvimento deste trabalho foi capaz de fornecer ao estudante uma visão aprofundada dos processos de uma proteção digital aplicada ao sistema elétrico de potência. Os modelos até então desenvolvidos poderão ser utilizados como estudo para alunos que tenham interesse na área de proteção de sistemas elétricos, além de serem passíveis de melhorias durante o processo de aprendizagem.

Como trabalhos futuros, sugere-se a criação de outros modelos de relés digitais, tais como sobretensão (59), subtensão (27), direcional de potência (32) e sobrecorrente de sequência negativa (46). Os relés de sobrecorrente e direcional apresentados neste trabalho são utilizados principalmente para detecção de faltas entre fases. Para faltas entre fase e terra, relés de sobrecorrente residual (50N e 51N) e direcional de sobrecorrente residual (67N) podem ser desenvolvidos através do cálculo da componente de sequência zero do sistema. O mesmo ocorre para o relé de distância, onde uma variação para faltas entre fase-terra (21N) pode ser explorada através da detecção dos *loops* de falta, para inclusão de compensações conforme a **Tabela 4**. Além disso, é possível implementar um sistema de comunicação entre relés para estudar o comportamento dos esquemas de teleproteção em linhas de transmissão, como transferência direta de disparo (TDD), POTT (*Permissive Overreaching Transfer Trip*), PUTT (*Permissive Underreaching Transfer Trip*), *Echo*, *Weak Infeed* e a proteção diferencial de linhas (87L).

REFERÊNCIAS

- ABB. REF610. **Technical Reference Manual. Finland:** ABB Oy, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: https://library.e.abb.com/public/2484661268d5b91fc12579f7002f0202/REF610_TRM_755535_ENe_ANSI.pdf. Acesso em: 06 Fevereiro 2026.
- AMAN, M. *et al.* Modeling and Simulation of Digital Frequency. **IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)**, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, 2012.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. Disponível em: <https://leitor.bvirtual.com.br>. Acesso em: 14 Janeiro 2026.
- COSTA, C. A. B. D. **Modelagem de um Relé de Distância em Simulador Digital em Tempo Real**. Campina Grande: Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/580>. Acesso em: 12 Março 2026.
- DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B. D.; NETTO, S. L. **Processamento Digital de Sinais: Projeto e Análise de Sistemas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582601242/>. Acesso em: 20 Março 2026.
- DUARTE, A. C. D. R. **Equipamentos de Geração e Transmissão: Conceitos e Critérios**. São Paulo: Artliber, 2018.
- ELIAS, F. G. D. M. **Sinais e sistemas uma introdução**. Curitiba: Intersaberes, 2020. Disponível em: <https://leitor.bvirtual.com.br>. Acesso em: 25 Março 2026.
- GLOBAL POWER INC. **Protective Relay Testing**. Disponível em: globalpowerinc.com/electrical-testing/protective-relays-gps. Acesso em: 10 Outubro 2025.
- OLIVEIRA, I. C. *et al.* **Proteção de Sistemas Elétricos**. Porto Alegre: SAGAH, v. 1, 2021. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556902104>. Acesso em: 06 Novembro 2025.
- KEZUNOVIC, M.; REN, J.; LOTFIFARD, S. **Desing, Modeling and Evaluation of Protective Relays for Power Systems**. [S.l.]: Springer, 2016.
- FRAZÃO, R. J. A. **Proteção do Sistema Elétrico de Potência**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2019.
- LYONS, R. G. **Understanding Digital Signal Processing**. New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- MACHADO, T. M. *et al.* **ANÁLISE DA RESPOSTA EM REGIME TRANSITÓRIO E PERMANENTE DE ALGORITMOS PARA FILTRAGEM DIGITAL UTILIZADOS**

EM RELÉS NUMÉRICOS: VELOCIDADE DE CONVERGÊNCIA, OVERSHOOT E SENSIBILIDADE EM RELAÇÃO A CONSTANTE DE TEMPO. Revista Controle & Automação, Campinas, v. 22, n. 1, p. 65-78, Kaneiro. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ca/a/q3gzbNgn83pWKN6vPQCR87G/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 Junho 2026.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Rio de Janeiro: LTC, 2013.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Processamento em tempo discreto de sinais.** São Paulo: Pearson, 2013. Disponível em: <https://leitor.bvirtual.com.br>. Acesso em: 19 Janeiro 2026.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Sinais e Sistemas.** 2. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

RUSH, P. **Proteção e Automação de redes: Conceito e aplicação.** São Paulo: Edgar Blucher, 2011.

SANTOS, G. Q. D.; CURIN, G.; MARCHESAN, G. **Ajustes do ERAC para assegurar a estabilidade do sistema elétrico em cenários de desequilíbrio de frequência.** Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/33741/Artigo%5B54%5D-Arquivo%20da%20vers%C3%A3o%20final%5B1%5D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 Junho 2026.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. **SEL-751 Feeder Protection Relay.** Disponível em: selinc.com/pt/products/751/. Acesso em: 10 Novembro 2025.

SCHWEITZER, E. O. I.; HOUDAQING, D. **Filtering for Protective Relays.** [S.l.]: 19 th ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE, 1992.

SIEMENS. **SIPROTEC 5, Transformer Differential Protection, Manual.** [S.l.]. 2026.

SILVA, Í. C. F. D. **Análise do desempenho de relé de distância para proteção de linhas de transmissão em alta tensão.** Ceará: TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/79160>. Acesso em: 12 Março 2026.

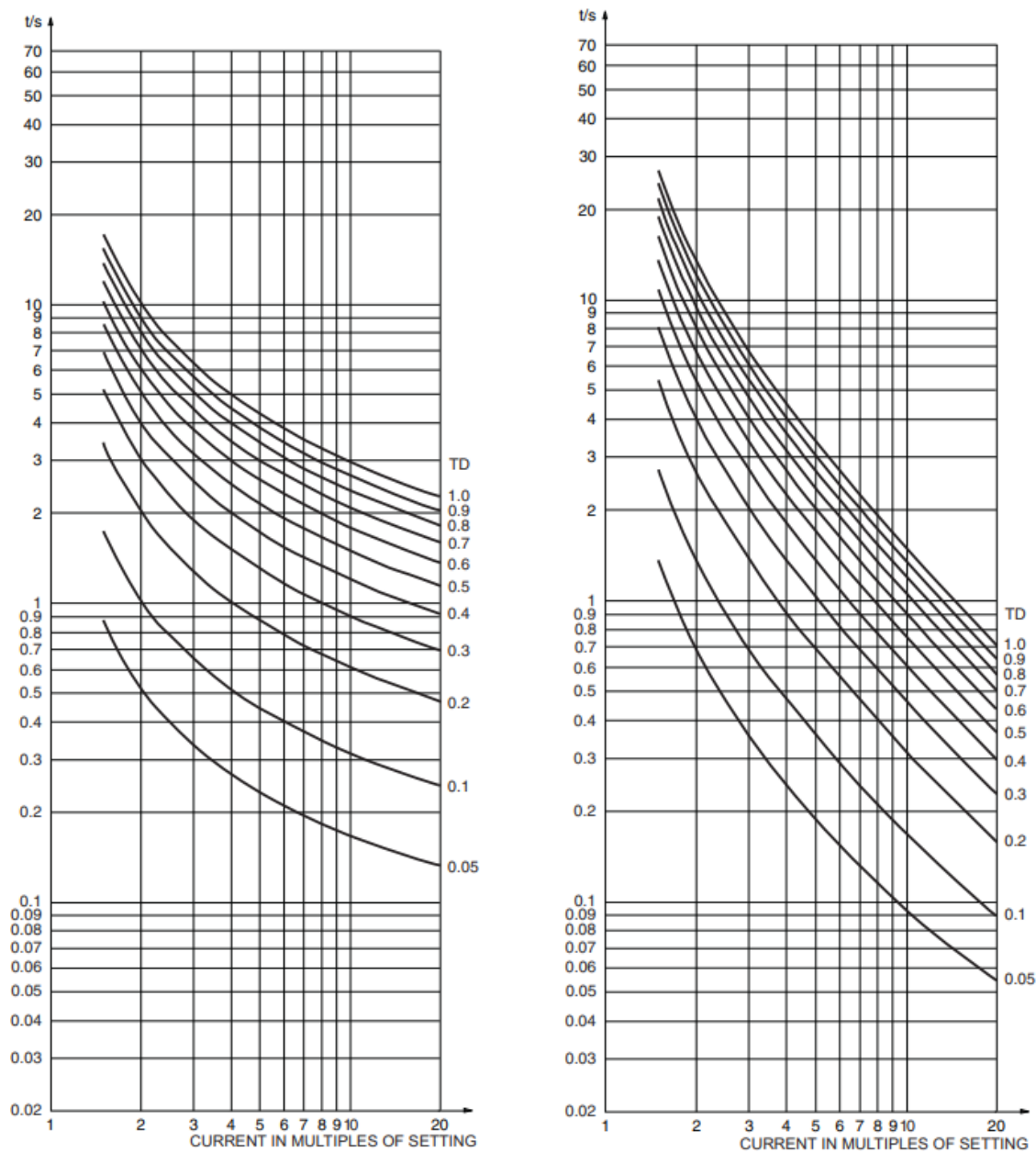
TABELA ANSI. **Schweitzer Engineering Laboratories, 2022.** Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/tables/ansi/>. Acesso em: 16 Janeiro 2026.

THOMAZ, H. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: Modelagem de Relés no Simulink.** Vitória: TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.

GE GRID SOLUTIONS. **Instruction Manual: Line Current Differential System L90.** [S.l.]. 2023.

ANEXO A

Figura 53 – Curvas IEC 1

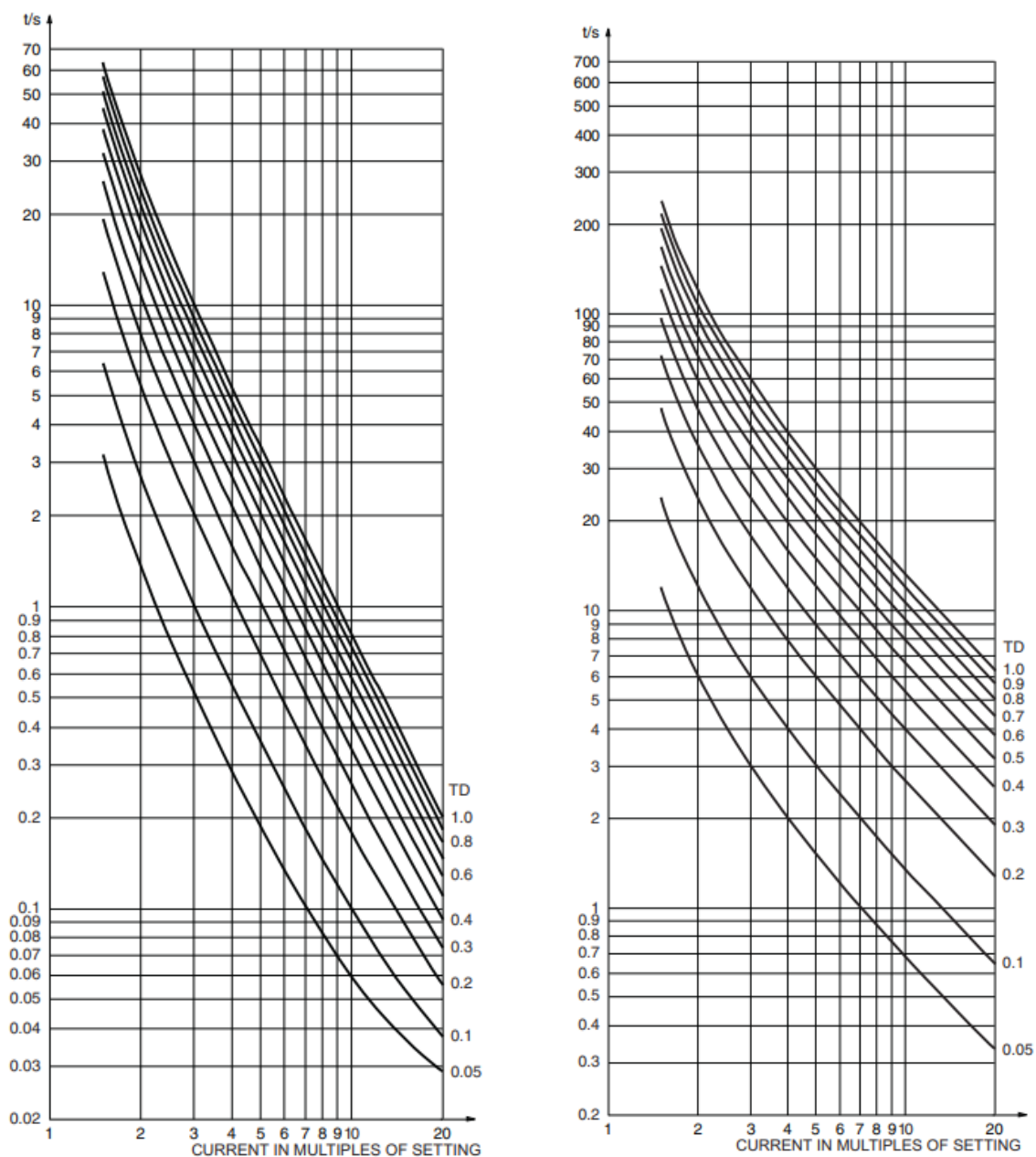


a) Normalmente inversa

b) Muito inversa

Fonte: (ABB, 2004).

Figura 54 – Curvas IEC 2



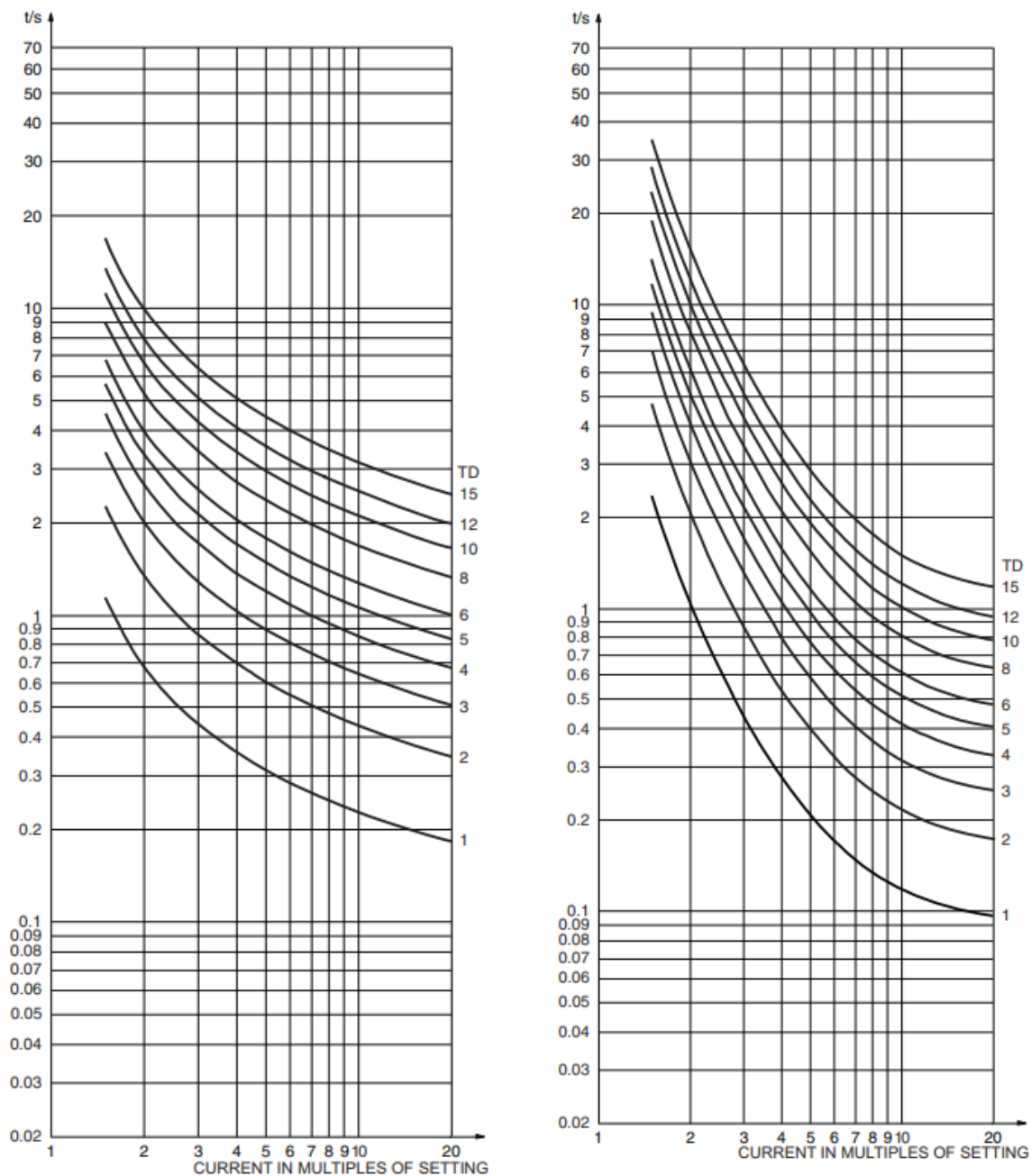
a) Extremamente inversa

b) Inversa de tempo longo

Fonte: (ABB, 2004).

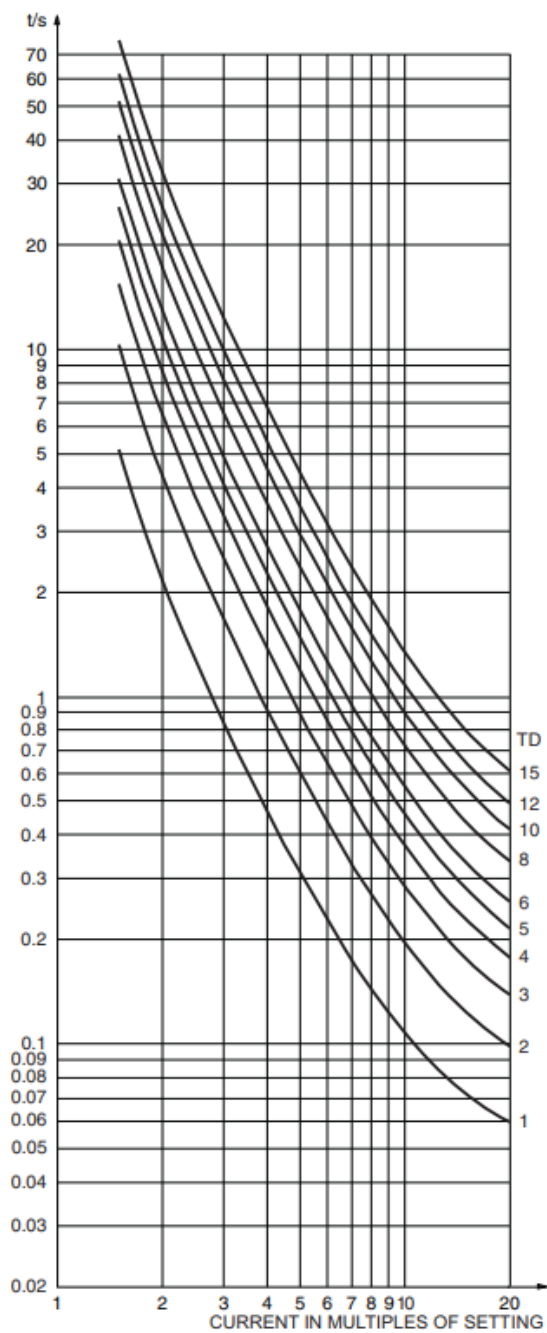
ANEXO B

Figura 55 – Curvas ANSI



Fonte: (ABB, 2004).

Figura 56 – Curva extremamente inversa ANSI



Fonte: (ABB, 2004).

ANEXO C

Tabela 5 – Tabela ANSI

1	Elemento Principal
2	Relé de partida ou fechamento temporizado
3	Relé de verificação ou interbloqueio
4	Contator principal
5	Dispositivo de interrupção
6	Disjuntor de partida
7	Relé de taxa de variação
8	Dispositivo de desligamento da energia de controle
9	Dispositivo de reversão
10	Chave comutadora de sequência das unidades
11	Dispositivo multifunção
12	Dispositivo de sobrevelocidade
13	Dispositivo de rotação síncrona
14	Dispositivo de subvelocidade
15	Dispositivo de ajuste ou comparação de velocidade e/ou frequência
16	Dispositivo de comunicação de dados
17	Chave de derivação ou descarga
18	Dispositivo de aceleração ou desaceleração
19	Contator de transição partida-marcha
20	Válvula operada eletricamente
21	Relé de distância
22	Disjuntor equalizador
23	Dispositivo de controle de temperatura
24	Relé de sobre-excitação ou Volts por Hertz
25	Relé de verificação de Sincronismo ou Sincronização
26	Dispositivo térmico do equipamento
27	Relé de subtensão
28	Detector de chama
29	Contator de isolamento
30	Relé anunciador
31	Dispositivo de excitação
32	Relé direcional de potência

33	Chave de posicionamento
34	Dispositivo master de sequência
35	Dispositivo para operação das escovas ou curto-circuitar anéis coletores
36	Dispositivo de polaridade ou polarização
37	Relé de subcorrente ou subpotência
38	Dispositivo de proteção de mancal
39	Monitor de condições mecânicas
40	Relé de perda de excitação ou relé de perda de campo
41	Disjuntor ou chave de campo
42	Disjuntor / chave de operação normal
43	Dispositivo de transferência ou seleção manual
44	Relé de sequência de partida
45	Monitor de condições atmosféricas
46	Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente
47	Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão
48	Relé de sequência incompleta / partida longa
49	Relé térmico
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
51	Relé de sobrecorrente temporizado
52	Disjuntor de corrente alternada
53	Relé para excitatriz ou gerador CC
54	Dispositivo de acoplamento
55	Relé de fator de potência
56	Relé de aplicação de campo
57	Dispositivo de aterramento ou curto-circuito
58	Relé de falha de retificação
59	Relé de sobretensão
60	Relé de balanço de corrente ou tensão
61	Sensor de densidade
62	Relé temporizador
63	Relé de pressão de gás (Buchholz)
64	Relé detetor de terra
65	Regulador
66	Relé de supervisão do número de partidas
67	Relé direcional de sobrecorrente

68	Relé de bloqueio por oscilação de potência
69	Dispositivo de controle permissivo
70	Reostato
71	Dispositivo de detecção de nível
72	Disjuntor de corrente contínua
73	Contator de resistência de carga
74	Relé de alarme
75	Mecanismo de mudança de posição
76	Relé de sobrecorrente CC
77	Dispositivo de telemedição
78	Relé de medição de ângulo de fase / proteção contra falta de sincronismo
79	Relé de religamento
80	Chave de fluxo
81	Relé de frequência (sub ou sobre)
82	Relé de religamento de carga de CC
83	Relé de seleção / transferência automática
84	Mecanismo de operação
85	Relé receptor de sinal de telecomunicação (teleproteção)
86	Relé auxiliar de bloqueio
87	Relé de proteção diferencial
88	Motor auxiliar ou motor gerador
89	Chave seccionadora
90	Dispositivo de regulação (regulador de tensão)
91	Relé direcional de tensão
92	Relé direcional de tensão e potência
93	Contator de variação de campo
94	Saídas digitais de alta velocidade para <i>trip</i>
95	Usado para aplicações específicas
96	Relé auxiliar de bloqueio de barra
97 à 99	Usado para aplicações específicas

Fonte: (Tabela ANSI, 2022).