



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Projeto de Graduação

Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: Modelagem de Relés no *Simulink*

Heitor Thomaz

VITÓRIA – ES

JULHO/2018

Heitor Thomaz

Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: Modelagem de Relés no *Simulink*

Parte manuscrita de Projeto de Graduação do aluno Heitor Thomaz, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. D. Sc. Oureste Elias Batista

VITÓRIA – ES

JULHO/2018

Heitor Thomaz

Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: Modelagem de Relés no *Simulink*

Parte manuscrita de Projeto de Graduação do aluno Heitor Thomaz, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 04 de julho de 2018

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. D. Sc. Oureste Elias Batista
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Dr. Augusto César Rueda Medina
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dedico este trabalho ao meu irmão Arthur.

Agradecimentos

Em primeiro gostaria de agradecer a Deus por me dar forças e iluminar minha jornada. Um agradecimento especial para a minha família, que me acolheu durante os desafios da graduação, e me deu forças nos momentos mais difíceis. Ao meu orientador Oureste Batista, pelo incentivo, dicas e paciência. Aos professores do departamento de elétrica pelo conhecimento compartilhado. Por fim gostaria de agradecer aos meus amigos e parceiros de graduação, que sempre me incentivaram e disseram que era possível.

*“It was wise enough to know itself, and brave enough to BE itself, and wild enough to
change itself while somehow staying altogether true.”
(Patrick Rothfuss, The Slow Regard of Silent Things)*

Resumo

Esse trabalho apresenta um estudo sobre proteção digital de sistemas elétricos, e propõe modelos computacionais para os relés digitais de sobrecorrente, distância e proteção diferencial. O estudo de proteção é um assunto complexo e importante que envolve a segurança dos sistemas elétricos, prevenindo falhas, acidentes e perdas econômicas. Sendo assim, o entendimento em relação aos conceitos e ajustes dos relés é fundamental para atender aos requisitos de proteção. Portanto, uma ferramenta computacional pode ser uma adição importante para o estudo de proteção elétrica, permitindo um olhar prático dos conceitos apresentados nas principais bibliografias. Pretende-se nesse trabalho desenvolver blocos computacionais que permitam ao usuário entender e aplicar os princípios de proteção, além de servir como base para o desenvolvimento de sistemas mais complexos.

Palavras-chave: Sistemas de proteção, relé digital, modelagem computacional.

Abstract

This paper presents a study on electric digital protection systems and proposes computational models for digital relays, in particular overcurrent, distance and differential relays. The protection systems is a complex and important discipline since it ensures the security of power systems, preventing failures, accidents and economic losses. Therefore, the acquaintance of relay concepts and settings is fundamental to attend the protection requirements. Thus, a computational tool can be of great help to this discipline study, allowing a more practical view over the concepts introduced in class. The goal for this project is to develop computational blocks that allow users to understand and apply protection principles, and also be a start point to the develop of more complex protection systems.

Keywords: Protection systems, digital relays, computational models.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura básica relé digital	30
Figura 2 – Componentes principais relé digital	31
Figura 3 – Processos bloco de aquisição de dados	31
Figura 4 – Processos bloco de aquisição de dados	32
Figura 5 – Filtro passa-baixa.	33
Figura 6 – Sinal amostrado	34
Figura 7 – Codificação do sinal amostrado	35
Figura 8 – Componentes ortogonais	37
Figura 9 – Resposta a frequência	38
Figura 10 – Zona de proteção linha radial	39
Figura 11 – Curva de atuação instantânea	40
Figura 12 – Curva de atuação instantânea	40
Figura 13 – Característica do elemento mho	42
Figura 14 – Implementação do elemento mho	43
Figura 15 – Coordenação de relés de distância	44
Figura 16 – Coordenação de relés de distância	45
Figura 17 – Falta externa	46
Figura 18 – Falta interna	46
Figura 19 – Curva relé diferencial porcentual	46
Figura 20 – Correntes de <i>inrush</i>	47
Figura 21 – Harmônicos da corrente de excitação	48
Figura 22 – Modelo bloco aquisição de dados	49
Figura 23 – Janela de opções bloco de aquisição de dados	50
Figura 24 – Modelo bloco de medição	50
Figura 25 – Janela de opções bloco de medição	51
Figura 26 – Bloco processamento de sinais	51
Figura 27 – Modelo relé de sobrecorrente	52
Figura 28 – Comparador de magnitude	53
Figura 29 – Janela de opções proteção sobrecorrente	53
Figura 30 – Modelo relé de distância	54
Figura 31 – Modulo falta bifásica	55
Figura 32 – Cálculo da impedância	55
Figura 33 – Implementação bloco de zona	56
Figura 34 – Janela de opções relé de distância	56
Figura 35 – Modelo relé diferencial	57
Figura 36 – Bloco processamento de sinais relé diferencial	58

Figura 37 – Bloco tomada de decisão do relé diferencial	59
Figura 38 – Janela de opções do relé diferencial	59
Figura 39 – Simulação bloco de aquisição de dados	61
Figura 40 – Simulação bloco de aquisição de dados	62
Figura 41 – Saída conversor A/D	62
Figura 42 – Simulação bloco de medição	63
Figura 43 – Saída bloco de medição	63
Figura 44 – Sistema elétrico relé de sobrecorrente	64
Figura 45 – Correntes de carga e de curto circuito	65
Figura 46 – Curto circuito linha dois	66
Figura 47 – Proteção de backup	66
Figura 48 – Sistema de transmissão não radial	67
Figura 49 – Isolamento da falta	68
Figura 50 – Correntes nos TCs 1 e 6	69
Figura 51 – Backup zona dois	69
Figura 52 – Corrente no TC 1	70
Figura 53 – Sistema de proteção diferencial	71
Figura 54 – Correntes e trip para falta interna	71
Figura 55 – Correntes e trip para falta externa	72
Figura 56 – Correntes de <i>inrush</i> e trip	73
Figura 57 – Componente fundamental x segundo harmônico	73
Figura 58 – Correntes do primário, secundário e trip	74
Figura 59 – Componente fundamental x quinto harmônico	75

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Coeficientes curva de tempo inverso	41
Tabela 2	–	Conexões de ligação relé de distância	45

Lista de abreviaturas e siglas

TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial
A/D	Analógico digital
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>

Lista de símbolos

X	Amplitude do fasor
ψ	Ângulo de fase do fasor
I_p	Corrente de pick-up
I_{OP}	Corrente de operação
I_{RT}	Corrente de restrição
Z	Impedância medida
Z_r	Impedância de ajuste

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Motivação	25
1.2	Objetivos	26
1.2.1	Objetivos gerais	26
1.2.2	Objetivos principais	26
1.3	Estrutura do trabalho	27
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	29
2.1	Relé digital	29
2.1.1	Estrutura geral	29
2.1.2	Bloco de aquisição de dados	31
2.1.2.1	Filtro analógico	32
2.1.2.2	Conversor analógico digital	34
2.1.2.3	Janela de dados	36
2.1.3	Bloco de medição	36
2.1.3.1	Algoritmo de Fourier	37
2.1.4	Bloco de decisão	38
2.2	Relé de sobrecorrente	38
2.3	Relé de distância	41
2.3.1	Relé de impedância mho	42
2.3.2	Coordenação e temporização	44
2.3.2.1	Conexões do relé de distância	44
2.4	Relé diferencial	45
2.4.1	Operação com restrição percentual	46
2.4.2	Bloqueios de energização e sobre-excitação	47
3	METODOLOGIA	49
3.1	Modelo bloco de aquisição de dados	49
3.2	Modelo bloco de medição	49
3.3	Modelo relé de sobrecorrente	51
3.4	Modelo relé de distância	54
3.5	Modelo relé diferencial	57
4	RESULTADOS	61
4.1	Simulação do bloco de aquisição de dados	62
4.2	Simulação do bloco de medição	63

4.3	Proteção de sobrecorrente em linhas de transmissão	64
4.3.1	Teste curto circuito	65
4.3.2	Teste proteção de backup	66
4.4	Proteção de distância em linhas de transmissão	67
4.4.1	Isolamento de falta	68
4.4.2	Backup da zona dois	69
4.5	Proteção diferencial de transformadores	70
4.5.1	Falta interna	70
4.5.2	Falta Externa	72
4.5.3	Bloqueio por correntes de <i>inrush</i>	72
4.5.4	Bloqueio por sobre-excitação	74
5	CONCLUSÃO	77
5.1	Conclusões	77
5.2	Trabalhos futuros	78
	REFERÊNCIAS	79

1 Introdução

Faltas em sistemas elétricos de potência provocam mudanças significativas nos parâmetros do sistema, podendo levar a danos permanentes de cabos alimentadores, máquinas e equipamentos. A mudança mais comum durante uma falta é a da corrente, porém mudanças em tensão, frequência, ângulo de fase, fluxo de potência, pressão e até contaminação da isolação podem ser observadas.

A proteção de sistemas elétricos abrange o uso desses parâmetros para identificar faltas no sistema, e extinguir a causa, ou isolar a área afetada. Proteção inclui uma série de lógicas e filosofias para garantir que o sistema não opere durante condições prejudiciais, e para que não aconteça interrupção durante situação normal.

Sistemas de proteção são compostos por elementos de interrupção, tais como disjuntores, fusíveis e contadores, e elementos de tomada de decisão, tais como relés. Relés são definidos como dispositivos eletrônicos que são projetados para interpretar condições de entrada de uma maneira definida, e, após, caso condições específicas sejam alcançadas, responde a mudanças bruscas em circuitos elétricos associados ao mesmo (JAY; GOETZ, 1988). Especificamente, relés de proteção são aqueles cuja função é detectar linhas ou aparatos defeituosos, condições anormais ou de natureza perigosa e iniciar um controle de circuito apropriado.

Os relés digitais são os mais utilizados atualmente devido a sua alta capacidade de processamento, e sua capacidade de implementar diferentes lógicas de proteção em um só dispositivo, tornando-o a peça chave em sistemas de proteção. Diante disso, escolheu-se então para esse projeto, realizar o estudo dos módulos de processamento que compõem um relé digital, desde sua captura de dados, passando pelo seu processamento na forma de fasores, até a saída de trips para os demais equipamentos do sistema de proteção. Serão desenvolvidos modelos computacionais para relés digitais de sobrecorrente, distância e diferencial, e seu funcionamento será validado através da inserção em sistemas elétricos em situações de falta.

1.1 Motivação

Como foi visto anteriormente, sistemas de proteção são de extrema importância para garantir a segurança e vida útil dos equipamentos associados aos sistemas de potência, sendo que quanto mais caros os elementos do sistema, maior é o interesse econômico em protegê-los de danos causados por curto circuitos ou sobreaquecimentos.

Os relés são os principais elementos em redes de proteção, sendo estes os responsáveis

por todas a coordenação do sistema, recebendo informações do estado atual do sistema através da tensão e corrente, processando os dados, e aplicando logicas de proteção de forma a acionar trips para os elementos de interrupção (disjuntores por exemplo) quando necessário. Sabendo que nos últimos anos os relés digitais vêm dominando as aplicações de proteção, é essencial para aqueles que procuram se tornar projetistas de proteção entender o funcionamento dos mesmos. Dessa forma, é importante promover o melhor entendimento de como o relé processa as informações analógicas de tensão e corrente que ele recebe, e transforma em sinais digitais para acionamento de equipamentos de proteção.

Além disso, uma das principais motivações desse trabalho é permitir aos alunos da disciplina de proteção uma experiência pratica dos conceitos apresentados em sala de aula. Não somente um modelo pronto, espera-se que esse projeto sirva como um ponto inicial para que aplicações e sistemas mais complexos de proteção sejam analisados e desenvolvidos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

O foco desse trabalho consiste na identificação e análise das partes componentes de um relé de proteção digital, assim como o desenvolvimento de modelos computacionais capazes de simular o funcionamento dos relés. Aqui considera-se os processos de aquisição de dados, filtragem de harmônicos, conversão analógica digital, estimação de fasores e aplicação de logicas de proteção.

Além disso espera-se definir e apresentar as principais filosofias de proteção, incluindo suas características de seletividade e coordenação. Posteriormente foram feitos sistemas elétricos testes em Matlab, de forma a simular o comportamento dos modelos propostos para os relés de cada uma das funções escolhidas. Ao final, o objetivo é que tanto os modelos de relés propostos, como os sistemas de testes possam funcionar como um meio prático para aplicação dos conceitos desenvolvidos nas aula de proteção.

1.2.2 Objetivos principais

O principal objetivo desse projeto é a modelagem computacional de relés digitais e simulação de aplicações de logicas de proteção. Esse objetivo posso ser subdividido através dos módulos que compõem um relé e das funções de proteção a serem simuladas, sendo eles:

- a) Elementos que aquisição de dados, sendo eles:
 - Filtros analógicos de baixa frequência de forma a evitar o fenômeno de aliasing em componentes de alta frequência;

- Filtros para separação de harmônicos;
- Conversor analógico digital, de forma a converter as ondas de tensão e corrente em sinais digitais;
- b) Modulo de estimação de fasores. Um algoritmo que estime amplitude e ângulos dos fasores através das formas de onda de tensão e corrente recebidas pelo relé.
- c) Módulos de lógica de proteção. Algoritmos que utilizem a leitura de fasores e lógicas de proteção para o cálculo do trip de acordo com as diferentes funções implementadas. As funções de proteção implementadas nesse trabalho são:
 - Proteção de sobrecorrente de linhas de transmissão;
 - Proteção diferencial de transformadores;
 - Proteção distância de linhas de transmissão;

1.3 Estrutura do trabalho

Esse trabalho foi dividido em 4 capítulos, sendo eles embasamento teórico, metodologia, resultado e conclusões. No primeiro capítulo faz-se o estudo dos principais elementos de um relé digital, assim como das técnicas utilizadas para processamento de sinal e estimação de fasores. Além disso, são apresentadas as filosofias de proteção por sobrecorrente, distância e diferencial.

No segundo capítulo são apresentados os modelos computacionais propostos para os componentes do relé digital. No capítulo seguinte são mostrados os resultados das simulações do projeto, comparando o que foi encontrado com o que era esperado para cada um dos relés. Para isso os relés foram inseridos em sistemas de potência com presença de faltas. As conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros são expostas no último capítulo.

2 Embasamento Teórico

2.1 Relé digital

Os relés de proteção podem ser simplificados como elementos de comparação que emitem comandos de trip de acordo com os resultados encontrados. Relés analógicos utilizam réplicas transformadas dos sinais de tensão e corrente do elemento protegido para atuar sobre alguns elementos de comparação. Esses elementos são usualmente dispositivo mecânicos ou eletrônicos, tais como molas e eletroímãs, que se deformam de acordo com o torque gerado pelos sinais transformados de tensão e corrente. Através do nível de deformação é possível definir o acionamento do trip, e através das características mecânicas dos materiais de comparação é possível definir os níveis de corrente e tensão necessárias para acionamento.

Relés de proteção digital também funcionam como comparadores, porém nesse caso os sinais de corrente e tensão não são contínuos, mas amostras espaçadas no tempo. Com a utilização dos sinais discretos, é possível a utilização de microprocessadores para realizar os cálculos. O rele digital está programado para aplicar várias formas de algoritmos de processamento digital de sinais para observar as amostras e, baseado nos resultados computacionais, definir ou não o sinal de trip (ANDERSON, 1999).

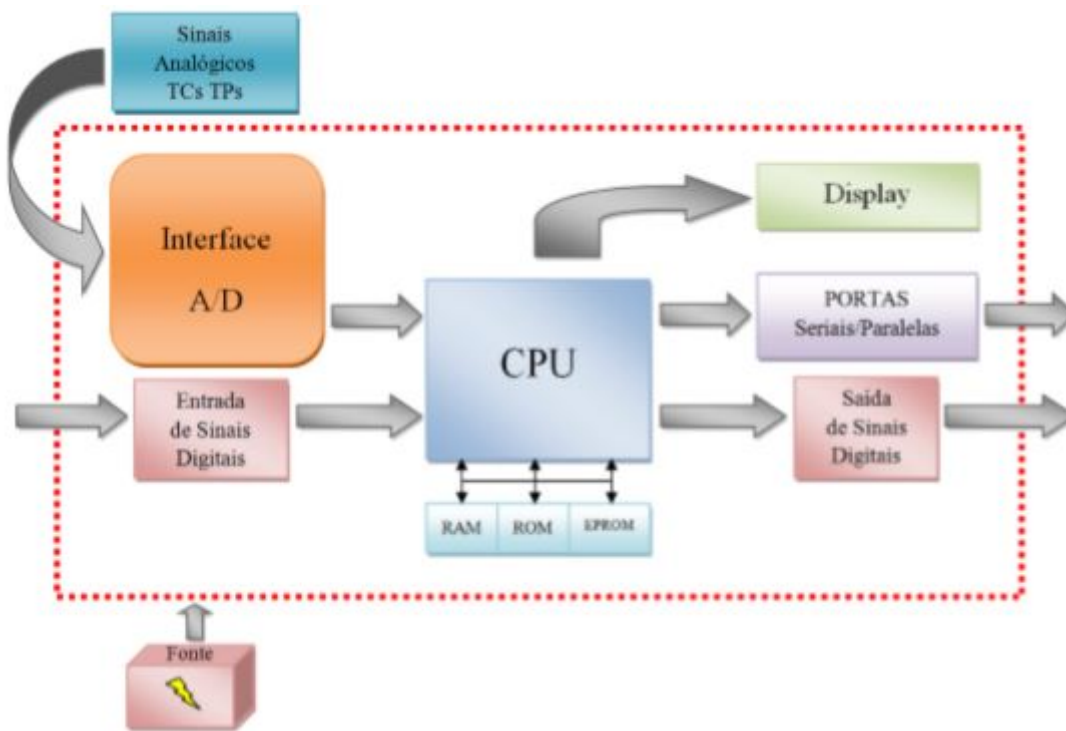
Antes de enumerar os principais componentes do relé digital, é importante citar algumas das suas vantagens em relação aos modelos analógicos. Por se tratar de dispositivos baseados em microprocessadores, eles possuem altas velocidades de resposta e integração com sistemas de controle e supervisão. Além de atuar na proteção, relés digitais podem ser usados como dispositivos de captura de dados, armazenando informações de tensão, corrente, potência e fator de potência. Por fim, relés digitais também são utilizados como dispositivos de manobra, acionando disjuntores e outros elementos através de comandos enviados pelo sistema de controle ao qual está conectado.

2.1.1 Estrutura geral

Uma das grandes vantagens dos relés numéricos em relação aos seus antecessores é a flexibilidade de utilizar o mesmo componente de *hardware* para diferentes funções de proteção. McLaren foi o primeiro a propor o conceito de *Open System Relaying*, onde diferentes funções de proteção podem ser obtidas modificando somente a programação do microprocessador (RUSH, 2002). Além disso, um mesmo relé pode ser usado para diferentes funções de proteção simultaneamente, retirando a necessidade de se obter diferentes relés para cada função implementada.

A estrutura geral de um relé consiste de alguns módulos de hardware e funções que são comuns a qualquer relé numérico moderno. Apenas com esses elementos é possível recriar o funcionamento da maioria dos aparelhos utilizados atualmente para proteção, em sua forma básica. A Figura 1 mostra o esquema geral da estrutura de um relé digital.

Figura 1 – Estrutura básica relé digital



Fonte: (SOARES, 2009, p.52)

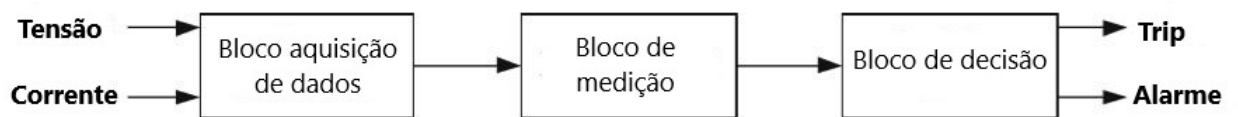
A CPU (unidade central de processamento) é a parte responsável pelo processamento dos sinais. Aqui é onde são executados os cálculos de estimação de fasores, os programas de proteção e a comunicação com os demais dispositivos conectados com o relé. A CPU utiliza três tipos de memórias diferentes: RAM, ROM e EPROM. A memória RAM (*Random Access Memory*) é uma memória volátil, utilizada principalmente para realizar cálculos. A memória ROM (*Read Only Memory*) é somente para leitura, e é onde os programas são armazenados de forma permanente. A memória EPROM (*Electrically Programmable Read Only memory*) serve para armazenamento de variáveis que não são modificadas com frequência, como por exemplo parâmetros de ajustes de proteção, ou parâmetros de comunicação.

A entrada de sinais digitais é utilizada para comunicação com o relé, alterar a programação ou ajustar parâmetros. O display exibe as informações do dispositivo, tais como corrente, tensão, estado de funcionamento, etc. A saída de sinais digitais é por onde o relé se comunica com os dispositivos de proteção, através de envio de trips ou sinais de

alarme. As portas seriais e paralelas é o meio pelo qual o dispositivo se comunica com os sistemas ao qual ele está conectado, enviando informações relevantes como valores de tensão e corrente, registros de acionamentos, alarmes e etc.

O foco desse trabalho é na modelagem das funções de captação de sinais analógicos, conversão analógica digital, filtragem, estimação de fasores e aplicação de logicas de proteção. Devido a isso, um modelo geral simplificado do relé digital será utilizado. Esse modelo pode ser dividido em três blocos principais, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Componentes principais relé digital



Fonte: Elaborada pelo autor

O bloco de aquisição de dados é onde ocorrem os processos de filtragem e conversão dos sinais analógicos em sinais digitais. O bloco de medição é responsável por realizar a estimação de fasores e calcular parâmetros como magnitude do sinal, ângulo de fase, reatância, resistência e potências ativa e reativa. Essas informações são utilizadas pelo bloco de tomada de decisão, que irá implementar logicas de proteção para definir o sinal de bloqueio. Cada um desses blocos será explicado com mais detalhes nas próximas seções.

2.1.2 Bloco de aquisição de dados

Os processos pelos quais os sinais de entrada de corrente e tensão são submetidos no bloco de aquisição de dados podem ser vistos na Figura 3 abaixo.

Figura 3 – Processos bloco de aquisição de dados



Fonte: Elaborada pelo autor

O TC (transformador de corrente) e TP (transformador de potencial) reduzem os sinais a níveis aceitáveis para o relé. O condicionamento de sinal escala novamente a

amplitude dos sinais para corresponder aos níveis utilizados pelos elementos de processamento subsequentes. Nesse trabalho, considera-se que esses níveis são os mesmos daqueles recebidos pelos transformadores de instrumentação, logo o condicionamento de sinal será unitário.

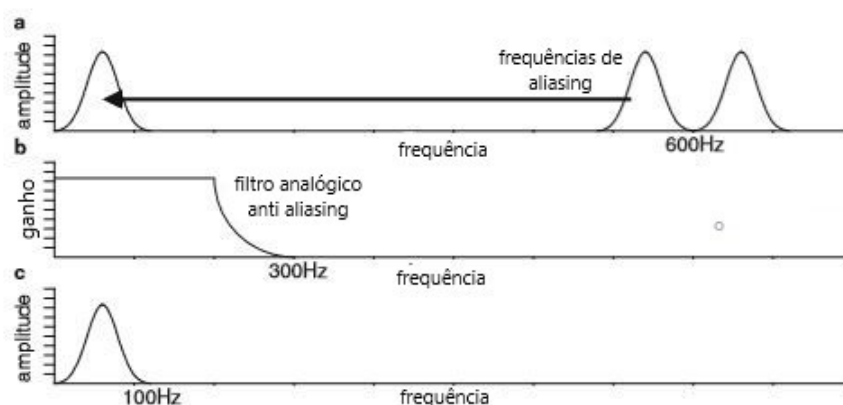
O filtro analógico é utilizado para filtrar os componentes de frequência que serão utilizados pelo relé, e eliminar os componentes considerados como ruídos. Usualmente são utilizados filtros passa baixa. Como microprocessadores não utilizam sinais contínuos, o sinal analógico é então convertido em sinal digital através do processo de amostragem no conversor A/D. Por fim, é formada uma janela de dados deslizante, utilizada posteriormente para a estimação de fasores.

2.1.2.1 Filtro analógico

Após o condicionamento dos sinais de tensão e corrente para níveis adequados ao relé, estes devem ser aplicados a filtros analógicos. O processo de filtragem é necessário por dois motivos básicos. Primeiro ele elimina as altas frequências, permitindo o uso de menores frequências de amostragem no conversor A/D. Essa limitação em frequência previne o acontecimento do fenômeno de *aliasing*.

O fenômeno de *aliasing* é o efeito produzido quando um sinal é reconstruído de forma incorreta a partir do sinal original. Isso ocorre quando a frequência de amostragem não é alta o suficiente para recriar o sinal original de forma precisa. Segundo teorema da amostragem, ou teorema de Nyquist, a frequência de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a maior frequência do sinal a ser amostrado (OPPENHEIM, 2010). Esse conceito será explicado com mais detalhes na seção referente ao conversor A/D. A utilização do filtro analógico como uma medida de *anti-aliasing* pode ser visto na Figura 4 abaixo.

Figura 4 – Processos bloco de aquisição de dados



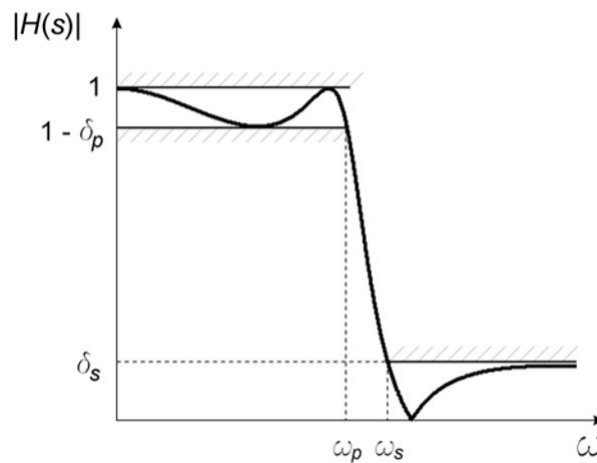
Fonte: (KEZUNOVIC; REN; LOTFIFARD, 2016). Modificada pelo autor.

Na figura cima, as componentes de alta frequência que possuírem frequência igual a $n \times fs \pm f1$, onde fs é a frequência de amostragem, $f1$ é a frequência fundamental, e n é um número inteiro maior que 0, irão aparecer no sinal amostrado como componentes fantasmas da frequência fundamental. Ao se aplicar um filtro analógico de forma anterior ao processo de amostragem, é possível rejeitar as frequências que causariam o fenômeno de *aliasing*.

O segundo motivo para o uso do filtro analógico é a rejeição de componentes de frequência que não serão utilizadas pelo relé. Essas componentes são os ruídos de alta frequências, e principalmente os harmônicos que não serão considerados pela lógica de proteção. Logo, a natureza do relé irá determinar quais componentes devem ser filtradas. Por exemplo, relés de sobrecorrente e distância utilizam somente a frequência fundamental, logo o filtro analógico deve rejeitar o máximo possível as frequências fora da faixa de 60Hz. Já os relés de proteção diferencial de transformadores levam em consideração o segundo e quinto harmônicos. Nesse caso, componentes de frequência até 300Hz devem ser consideradas.

Usualmente utiliza-se filtros passa baixa, e para garantir boas propriedades de filtragem, tem-se preferência por utilizar filtros digitais. Filtros passa baixa são projetados para passar frequências, de zero a frequência ω_p com um ganho aproximadamente unitário (SACHDEV et al., 1988). Essa faixa de frequência é chamada de banda passante, e possui uma margem de tolerância δ_p . Para frequências altas, acima de ω_s , o sinal deve ser atenuado e apresentar ganhos próximos de zero, com uma margem de tolerância δ_s . A Figura 5 abaixo exemplifica a curva de ganhos para um filtro passa-baixa genérico.

Figura 5 – Filtro passa-baixa.



Fonte: (GIANNY; PEREZ, 2006).

Existem diferentes filtros já padronizados que podem ser utilizados, como os filtros Butterworth, Chebyshev, Bessel e Elípticos. A ordem do filtro varia de acordo

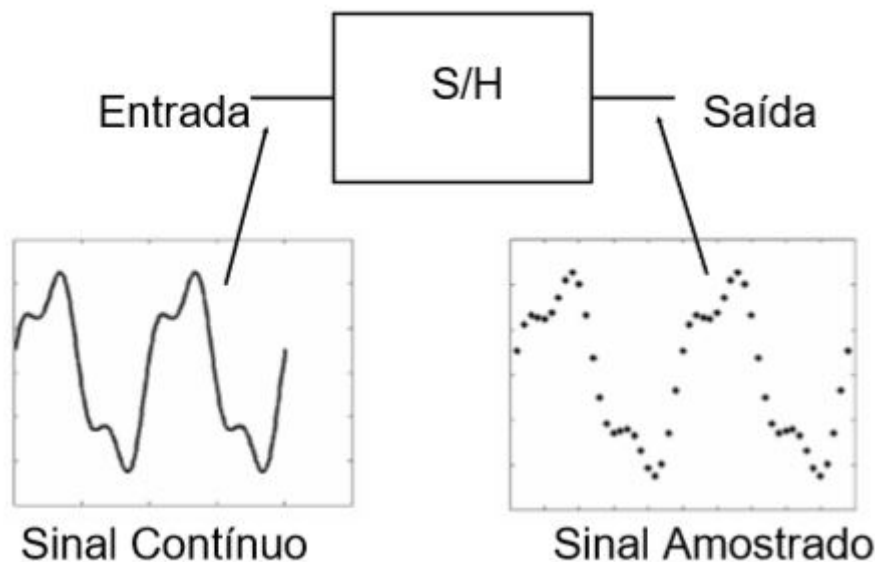
com o resultado necessário, porém quanto maior a ordem do filtro, mais difícil é a sua implementação. Também é importante levar em consideração que quanto mais exigente for a filtragem, ou seja, quantos mais próximo a frequência de corte estiver da faixa de operação, maior será o desvio de fase entre a entrada e a saída do filtro. Portanto, deve-se levar em conta o delay introduzido pelo processo de filtragem.

2.1.2.2 Conversor analógico digital

O conversor analógico digital é utilizado para converter o sinal contínuo de tensão e corrente proveniente do filtro analógico em sinais digitais. O sinal digitalizado pode então ser manipulado pelo microprocessador. As tensões de saída para um conversor A/D variam tipicamente entre 0 e +5 ou 0 e +10 volts para operações unipolares, e -5 e +5 ou -10 ou +10 para operações bipolares (JAEGER, 1982).

Para que o sinal contínuo no tempo possa ser digitalizado, é necessário realizar uma amostragem periódica do sinal. O elemento responsável por realizar a amostragem é o circuito chamado *Sample and Hold*. O que ele faz é capturar a magnitude do sinal analógico a cada intervalo de tempo predefinido. Esse intervalo de tempo é definido como a taxa de amostragem. A Figura 6 abaixo demonstra um exemplo de um sinal amostrado através de um *Sample and Hold*.

Figura 6 – Sinal amostrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

O teorema da amostragem afirma que para que o sinal amostrado possa ser reconstruído a frequência de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a frequência do sinal. Quando maior for a frequência de amostragem, melhor será a representação do sinal

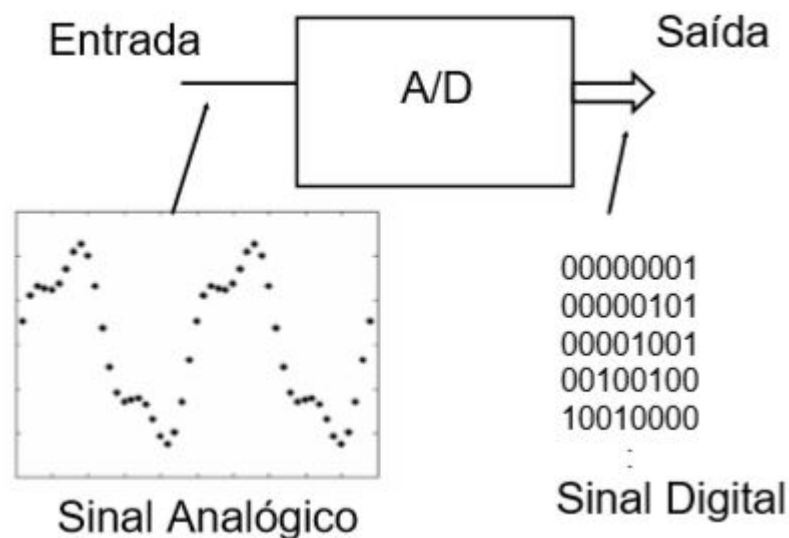
digital em relação ao sinal original. Usualmente especifica-se a taxa de amostragem relés digitais como o número de amostras por ciclo de onda fundamental. Logo, relés que usam somente a componente fundamental de 60Hz, teoricamente precisam de uma taxa mínima de 2 amostras por ciclo, ou 120Hz. Na prática, taxas entre 20 a 32 amostras por ciclo são utilizadas.

O sinal amostrado deve então ser codificado em bits para que o microprocessador possa realizar suas operações. Isso porque enquanto o sinal analógico é contínuo e pode assumir infinitos valores, o sinal digital deve ser quantizado dentro de um número finito de valores inteiros. A quantidade de valores que o sinal discreto pode assumir irá depender da resolução do conversor em bits. Assumindo que o conversor irá cobrir sinais com valores máximos de $-X$ até X , e que a resolução seja de N bits, a quantidade de valores possíveis para representar o sinal será de 2^N . Logo, a distância entre valores será de:

$$\Delta X = 2X/2^N \quad (2.1)$$

Isso implica que caso o sinal amostrado se encontre entre dois valores possíveis, este será arredondado para aquele que estiver mais próximo. Logo, pode-se inferir que o erro médio para a quantificação de sinais contínuos será de $\Delta X/2$. Em relé digitais, usualmente utiliza-se resolução de 12 bits para os sinais de tensão, e resolução de 16 bits para os sinais de corrente (KEZUNOVIC; REN; LOTFIFARD, 2016). Isso porque os níveis de corrente possuem uma variação de valor maior durante as faltas. A Figura 7 abaixo demonstra o processo de quantificação e codificação de sinais amostrado em bits.

Figura 7 – Codificação do sinal amostrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.2.3 Janela de dados

Muitos dos métodos propostos para os relés digitais utilizam o conceito de uma janela deslizante de dados (PHADKE; THORP, 2009). A janela dados é um vetor que armazena o valor atual da amostra, e os últimos $k - 1$ valores amostrados. Com isso, a saída do bloco de aquisição de dados pode ser definida pela equação:

$$saída = [y(n), y(n - 1), y(n - 2), \dots, y(n - k + 1)] \quad (2.2)$$

Onde:

k é o tamanho da janela de dados;

n é o índice da amostra atual;

y é a saída do conversor A/D.

O tamanho da janela de dados é um fator que influencia no funcionamento do relé. Para janela de dados maiores, é possível obter maiores informações, principalmente durante o período antes e após as faltas. Porém janela de dados maiores requisitam mais tempo de processamento, o que torna a resposta do relé mais lenta. Enquanto isso janela de faltas menores não oferecem muita informação, porém possibilitam tomadas de decisões mais rápidas. Fica a critério do projetista do sistema de proteção qual deve ser a estratégia a ser utilizada.

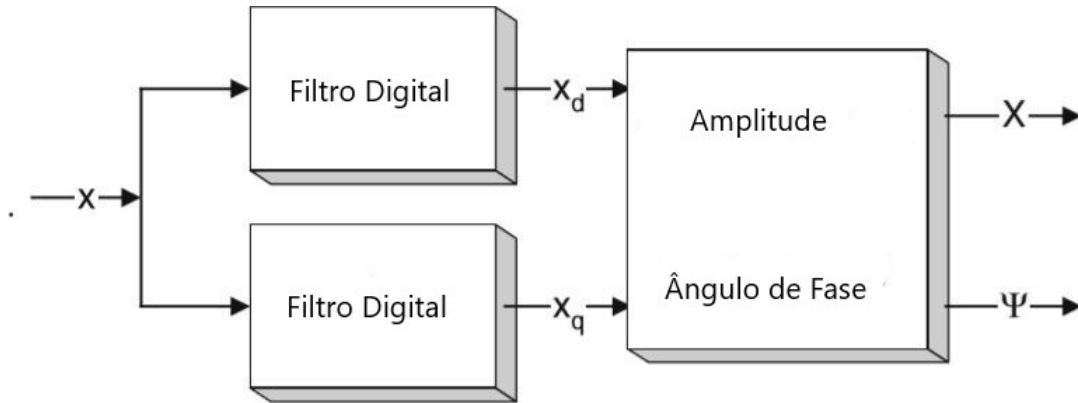
2.1.3 Bloco de medição

A maior parte dos relés digitais utilizam o conceito de fasores para realizar os cálculos e logics de proteção. Um fasor é um número complexo que contém as informações de amplitude e ângulo de fase de uma função senoidal (NILSSON; RIEDEL, 2008). O bloco de medição é responsável pela filtragem digital do sinal, e estimação dos fasores de tensão e corrente.

A entrada desse bloco é um sinal x que será dividido em duas componentes ortogonais, X_d e X_q , por meio de filtros digitais. Através das componentes ortogonais é possível estimar o valor da amplitude e ângulo de fase do sinal através de simples equações matemáticas. A amplitude será definida como $X = \sqrt{X_d^2 + X_q^2}$ e o ângulo de fase como $\Psi = \arctan(X_q/X_d)$. Esse processo pode ser visto na Figura 8 abaixo.

Diferentes técnicas de filtragem digital podem ser aplicadas para determinar as componentes ortogonais de um dado sinal, tais como filtros de Walsh, Fourier, Mann e Morrison, Miki e Mikano, dentre outros. Nesse trabalho será aplicado o algoritmo de Fourier para determinação das componentes ortogonais dos sinais. Este tem sido o método mais utilizado para estimação de fasores em relés digitais (SIDHU, 2006).

Figura 8 – Componentes ortogonais



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.3.1 Algoritmo de Fourier

O algoritmo de Fourier permite analisar as formas de onda baseadas em sinais senoidais, e extrair as componentes fundamentais da onda. Para isso, é feita a convolução entre o sinal e duas componentes ortogonais, no período de um ciclo da componente fundamental do sinal. As componentes ortogonais utilizadas são a função seno e cosseno. Para uma janela de um ciclo com N amostras, a teoria da Transformada de Fourier demonstra que, para o instante k -ésimo tem-se (SILVA; SOUZA; NEVES,):

$$X_d = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos(k\theta) \quad (2.3)$$

$$X_q = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin(k\theta) \quad (2.4)$$

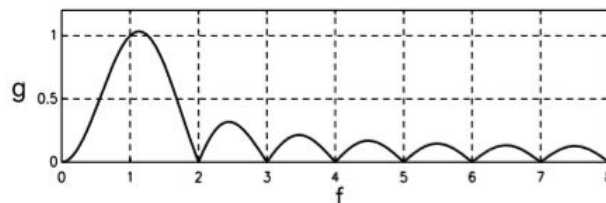
Onde $\theta = \frac{2\pi n}{N}$. Para $n = 1, 2, 3, \dots$

As equações (2.3) e (2.4) mostram que a componente fundamental de uma forma de onda de tensão ou corrente pode ser extraída simplesmente fazendo $n = 1$. Para os relés que utilizam análises de harmônicos, muda-se o valor de n para extrair as componentes harmônicas.

As amostras utilizadas para realizar o algoritmo de Fourier podem cobrir um ciclo inteiro da frequência fundamental, ou somente meio ciclo. Uma vantagem do algoritmo de um ciclo é que ele não é sensível aos harmônicos de frequência, nem a algum componente CC. Por outro lado, apesar de ser sensível a harmônicos, o algoritmo de meio ciclo é mais rápido, já que possui tempo de reação de meio ciclo de onda.

A Figura 9 abaixo mostra a resposta a frequência do filtro de ciclo completo. É possível observar que tanto a componente de frequência zero, ou componente CC, como as componentes harmônicas múltiplas da componente fundamental, são rejeitadas pelo filtro. Como a componente de corrente contínua foi rejeitada pelo filtro, não é necessário uso de circuito mimico ou filtro digital mimico do relé (SALLES et al., 2007).

Figura 9 – Resposta a frequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.4 Bloco de decisão

De todos os blocos apresentados, o bloco de decisão é o mais dinâmico, e com maior variação entre diferentes relés digitais. Ele é o responsável por implementar as lógicas e algoritmos de proteção. A sua variável de entrada são os fasores que foram calculados no bloco de medição, e a variável de saída é o sinal de bloqueio, ou trip de saída do relé.

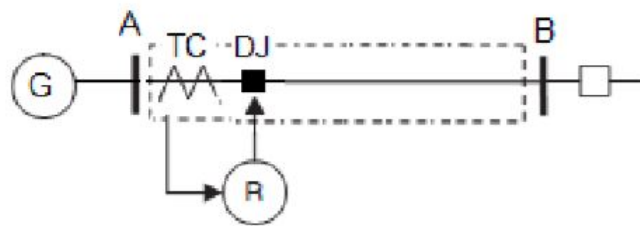
Os algoritmos e técnicas implantadas nesse bloco variam de acordo com o fabricante, e principalmente com qual com as funções de proteção que o relé pode implementar. No bloco de decisão ficam salvos os programas previamente instalados no relé, e os parâmetros de proteção definidos pelo operador. Nesse trabalho serão exploradas as lógicas de proteção para os relés de proteção por sobrecorrente, distância e diferencial.

2.2 Relé de sobrecorrente

Em geral, uma das principais características durante a ocorrência de uma falta em um sistema elétrico de potência é a presença de uma corrente de curto circuito, também conhecida como corrente de falta. A corrente de falta por via de regra é maior que a corrente nominal do circuito, ou corrente de pré-falta. Logo, um dos princípios básicos para proteção contra faltas é observar o valor da magnitude da corrente no sistema. Valores muito altos podem indicar uma falta no sistema. Os relés que utilizam esse princípio são conhecidos como relés de sobrecorrente e podem ser usados para proteger a maioria dos elementos do sistema, ou seja, linhas de transmissão, transformadores, geradores ou motores (PHADKE; THORP, 2009).

Nesse trabalho iremos considerar a proteção de sobrecorrente para linhas de transmissão radiais. Linhas radiais são aquelas com somente uma fonte de sequência positiva, ou seja, com somente uma fonte geradora. Para que se caracterize a falta dentro da zona de proteção do relé de sobrecorrente, a mínima corrente de falta na zona protegida pelo relé deve ser maior que a máxima corrente de carga. A Figura 10 abaixo é um exemplo de linha radial, onde a linha tracejada representa a zona de proteção do relé.

Figura 10 – Zona de proteção linha radial



Fonte: (PHADKE; THORP, 2009).

Deve-se então definir uma corrente de ajuste do relé que seja maior que a máxima corrente possível de carga. Essa corrente de ajuste é chamada de corrente de pick-up, ou I_p . A lógica do relé de sobrecorrente funciona de forma que caso a corrente medida I seja maior que I_p , ou $|I| \geq I_p$, isso indica que existe uma falta na zona de proteção, e um comando de trip deve ser acionado. Caso a corrente medida seja menor, ou $|I| < I_p$, não há uma falha na zona, logo o comando de trip não deve ser acionado.

Os relés de sobrecorrente podem ser instantâneos, ou eles podem ter uma temporização intencional para uso como proteção de backup. A proteção de sobrecorrente instantânea é baseada em um valor limite de corrente acima da nominal. Se este valor violar o limite preestabelecido, a proteção vai atuar instantaneamente, enviando um sinal para o desligamento do disjuntor (LENZ et al., 2009). A Figura 11 representa a atuação de um relé de tempo instantâneo. Nesse caso não há temporização intencional, e o tempo de atuação t_{ins} se encontra entre 0,5 e 1,5 ciclos de onda.

Já o relé temporizado cria um atraso no momento de atuação. Existem dois tipos de relés de sobrecorrente temporizados. Nos relés de tempo definido, o tempo de operação é fixo. Nos relés de tempo-inverso, o tempo de operação diminui à medida que a corrente do relé aumenta. Essa relação entre tempo de atuação e magnitude da corrente é chamada de curva de atuação. A escolha da curva de atuação depende de como será feita a coordenação dos relés, ou seja, de qual será a cadeia de tempo para cada elemento de proteção do sistema. Isso garante a seletividade de operação dos disjuntores de modo a desligar o menor número possível de elementos do sistema de potência (KINDERMANN, 1999).

A Figura 12 abaixo apresenta uma típica curva de atuação de tempo inverso. No

Antes da introdução dos relés numéricos, as curvas de tempo inverso dos relés eletromecânicos dependiam dos materiais dos quais eles eram feitos. Dessa forma cada fabricante tinha que fornecer as curvas de tempo inverso dos seus relés, e estas eram diferentes de fabricante para fabricante. Como os relés digitais utilizam microprocessadores, as curvas de atuação puderam ser associadas as funções matemáticas. Órgãos como o IEC (*Internacional Electrotechnical Commission*), o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e o ANSI (*American National Standards Institute*) padronizaram as curvas de atuação através da expressão matemática da equação 2.5 abaixo. Nesse trabalho utilizou-se somente as curvas do IEC, e os valores adotados pelo órgão podem ser vistos na Tabela 1.

$$t_{op} = \frac{\beta D}{M^\alpha - 1} + LD \quad (2.5)$$

Onde:

t_{op} = Tempo de operação do relé em segundos.

D = Dial de tempo.

β = Coeficiente (vide Tabela 1).

$M = \frac{I}{I_p}$

α = Coeficiente (vide Tabela 1).

L = Coeficiente (vide Tabela 1).

Tabela 1 – Coeficientes curva de tempo inverso

Norma	Tipo de Curva	α	L	β
IEC	Inversa	0.02	0	0.14
	Moderadamente Inversa	1	0	13.5
	Muito Inversa	2	0	80
	Extremamente Inversa	1	0	120

Fonte: (SALLES et al., 2007)

2.3 Relé de distância

A proteção de distância é muito utilizada para proteger linhas de transmissão e circuitos de subtransmissão graças a sua simplicidade de aplicação, confiabilidade e baixos custos para aplicação. Além disso, é uma filosofia que permite obter alta seletividade, característica necessária para linhas de transmissão que alimentam grandes cargas.

Os relés de distância operam com base no conceito de impedância medida. O princípio básico é a comparação entre a tensão V e a corrente I medidas pelos TP e TC para obter a razão entre as duas grandezas. Dessa relação, obtém-se a impedância $Z = V/I$ vista pelo relé, ou a admitância $Y = I/V$. Os parâmetros medidos e calculados pelo relé

dependem diretamente da posição da falta na linha de transmissão, e por esse motivo eles são chamados de relés de distância (CAMINHA, 1977).

A determinação da ocorrência de falta é feita através de impedância medida pelo relé. O valor encontrado é comparado com uma impedância predeterminada, chamado de alcance do relé. Durante operação normal, a impedância vista pelo relé deve ser maior que o alcance do relé, e, portanto, não deve ocorrer sinal de trip. Entretanto, durante a ocorrência de uma falta a impedância medida deve ser menor que o alcance do relé, e o trip de bloqueio deve ser acionado.

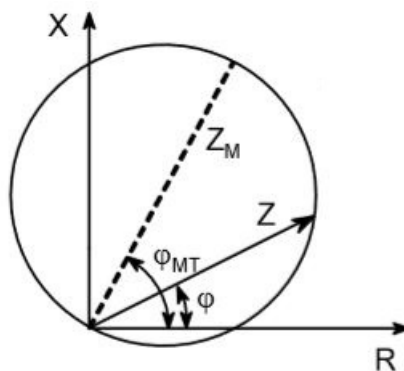
A seletividade em relés de distância é alcançada usando diferentes valores de impedância de alcance em conjunto com diferentes tempos de acionamento (RUSH, 2002). Usualmente, define-se o valor de alcance dos relés de acordo com os valores de impedância do trecho de linha a ser protegido. Esses trechos de linha formam as chamadas zonas de proteção. Dessa forma, é possível proteger segmentos das linhas de transmissão sem prejudicar o fornecimento de energia dos demais ramos do sistema de potência.

Os relés de distância podem ser divididos em três categorias de acordo com o modo de operação de cada uma. São eles os relés de impedância, relés de reatância e relés do tipo mho. Nesse trabalho será desenvolvido um relé de característica mho, já que este é um dos mais utilizados em sistemas não radiais, graças a sua característica direcional de proteção.

2.3.1 Relé de impedância mho

A Figura 13 e a equação 2.6 mostram a característica de operação de um elemento de distância mho. A circunferência descrita representa o lugar geométrico de todos os valores de impedância aparente para os quais o elemento do relé está no limite da operação. Isso significa que a zona de operação do relé, ou zona de trip, está localizada dentro do círculo, e a zona de restrição é a região fora do círculo.

Figura 13 – Característica do elemento mho



Fonte: Elaborado pelo autor.

O relé opera quando:

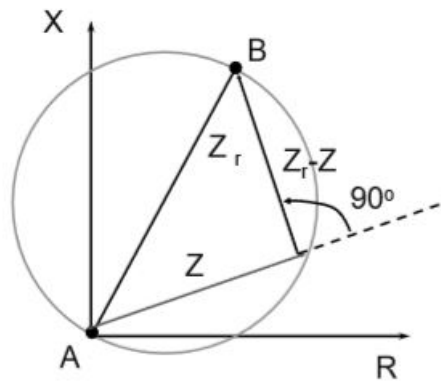
$$Z \leq Z_M \cos(\varphi - \varphi_{MT}) \quad (2.6)$$

Normalmente são utilizados dois ajustes no elemento mho: o diâmetro da característica da linha protegido Z_M , e o ângulo desse diâmetro em relação ao eixo R, φ_{MT} . Para simplificar o uso, nesse trabalho o ajuste será feito informando a impedância da linha protegida, através da sua resistência R e reatância X.

A característica mho é um círculo que passa pela origem do plano de impedância. Esse círculo é orientado para o primeiro quadrante, o que significa que ele enxerga as faltas que acontecem na direção à frente de onde os relés estão localizados. Para faltas atrás, a impedância seria vista no terceiro quadrante. Essas características indicam a direcionalidade do elemento mho. Entretanto deve-se ficar atento para faltas com alto valor de resistência, pois pode ser que o valor de impedância visto pelo relé se encontra fora do círculo de atuação.

A implementação do relé de mho é feita comparando-se as grandezas de fases de corrente e tensão de forma a obter o comportamento adequado. Nesse trabalho, a implementação será feita através do cálculo da impedância vista pelo relé, e verificando se está se encontra dentro da área de atuação. As equação 2.7 expressa como decidir se determinada impedância calculada se encontra dentro do círculo formado pela impedância de controle Z_r . A Figura 14 demonstra como se chegou a esse resultado.

Figura 14 – Implementação do elemento mho



Fonte: Elaborado pelo autor.

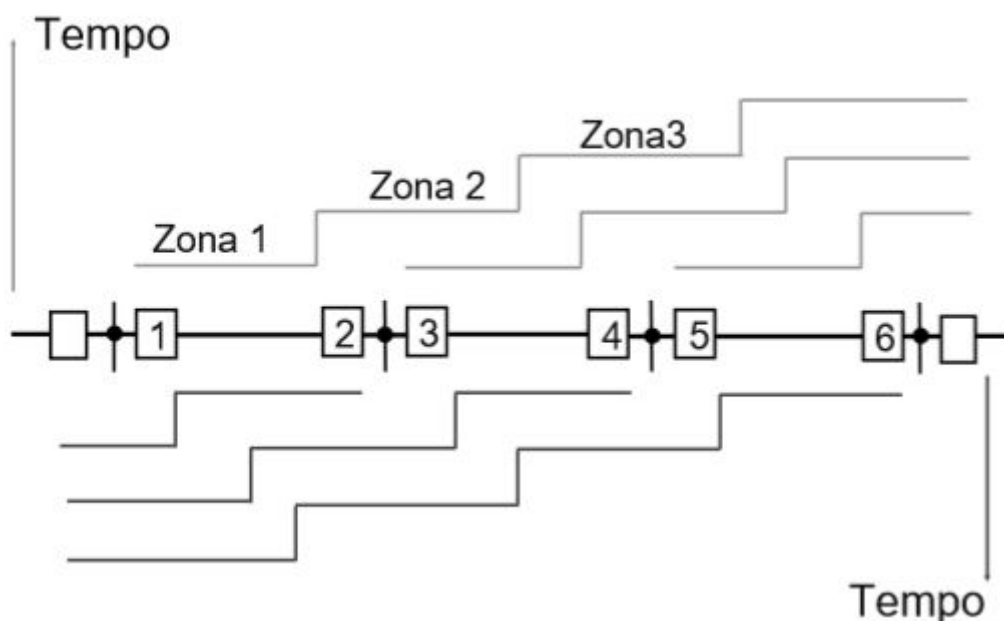
A impedância medida Z se encontra dentro da área de atuação quando:

$$-90 > \arg\left(\frac{\vec{Z}_r - \vec{Z}}{\vec{Z}}\right) < 90 \quad (2.7)$$

2.3.2 Coordenação e temporização

Os elementos direcionais de proteção são coordenados para atuar instantaneamente para faltas na sua zona de proteção, e atuar de forma temporizada nas zonas de proteção adjacentes. Esse tipo de proteção temporizada é chamado de proteção de back-up. Assim garante-se a isolamento das zonas adjacentes mesmo se acontecer alguma falha nos equipamentos de proteção daquela zona. Dessa forma é possível garantir maior segurança e seletividade aos sistemas de proteção. A Figura 15 mostra um esquema comum de coordenação de relés de distância em sistemas não radiais de três zonas.

Figura 15 – Coordenação de relés de distância



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.2.1 Conexões do relé de distância

Os relés de distância utilizam a relação entre a tensão e corrente de fase para determinar a impedância, porém essa relação nem sempre é feita através da divisão direta entre os dois. Somente as faltas trifásicas possuem essa característica. Para as faltas bifásicas e monofásicas, a relação entre a tensão e a corrente de fase medida pelo relé não resultara na verdadeira impedância da linha. Logo, é necessário definir como calcular a impedância para diferentes tipos de falta. A Tabela 2 demonstra como o cálculo é feito de acordo com cada falta.

Os relés utilizam mecanismos de detecção de tipo de falta, geralmente através de cálculo de componentes simétricos, e dessa forma é possível saber qual a relação a ser adotada para o cálculo da impedância. Por motivo de simplificação, nesse trabalho

Tabela 2 – Conexões de ligação relé de distância

Relés	V	I
Relés de Fase	A-B $V_a - V_b$	$I_a - I_b$
	B-C $V_b - V_c$	$I_b - I_c$
	C-A $V_c - V_a$	$I_c - I_a$
Relés de terra	A V_a	$I_a + K_o I_{res}$
	B V_b	$I_b + K_o I_{res}$
	C V_c	$I_c + K_o I_{res}$

Fonte: (PEREZ, 2006)

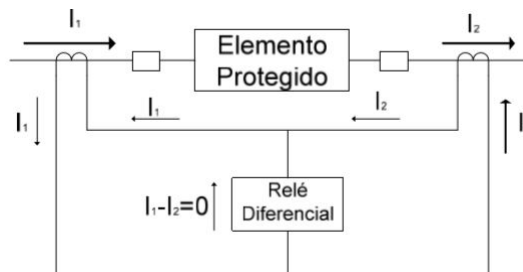
Nota: K_o é chamado de fator de compensação. $K_o = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}$

será definido previamente na configuração do relé de distância qual a falta que deve ser considerada para o cálculo.

2.4 Relé diferencial

A proteção diferencial é muito utilizada para proteção de transformadores, motores elétricos e outros equipamentos. O seu funcionamento baseia-se na comparação entre duas correntes medidas, uma que entra no equipamento, e outra que sai. A proteção diferencial aciona o trip de bloqueio quando há uma diferença entre as duas correntes medidas. Um ponto interessante dos relés diferenciais é que estes possuem maior sensibilidade para faltas do que outros tipos de relé, já que ele opera com base somente na diferença e não na corrente total que está circulando no circuito. A Figura 16 mostra um exemplo de conexão para esse tipo de proteção.

Figura 16 – Coordenação de relés de distância

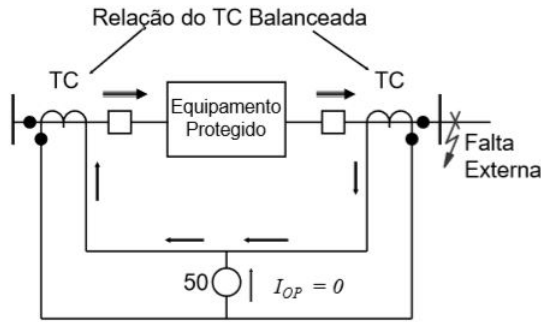


Fonte: (ANDERSON, 1999)

A zona de proteção dos relés diferenciais são definidas pela localização dos TCs, fazendo com que o relé seja altamente seletivo, e possa atuar com tempos de atuação elevados. Para faltas externas a zona de proteção as correntes primárias e secundárias de

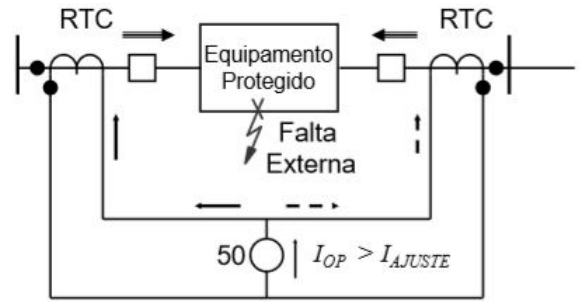
ambos os lados do equipamento protegido serão iguais, e, portanto, não ocorrerá o sinal de trip. Por outro lado, para faltas internas as correntes primárias irão levar as correntes secundárias a produzir uma corrente diferencial. Se a corrente diferencial, ou corrente de operação I_{OP} for maior que um determinado valor de ajuste, o sinal de trip é acionado. A Figura 17 e Figura 18 demonstram ambos os casos respectivamente.

Figura 17 – Falta externa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Falta interna

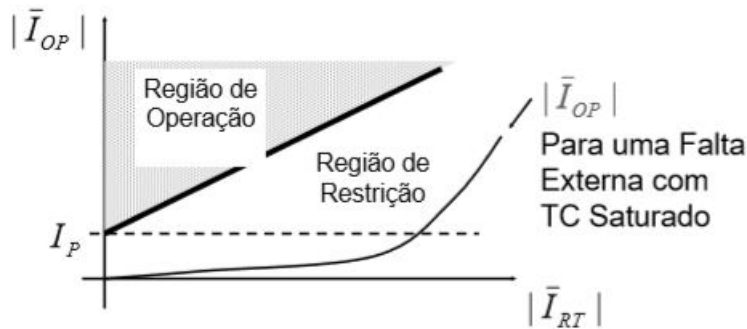


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.1 Operação com restrição percentual

É comum na proteção diferencial utilizar uma restrição percentual. Nesse caso, a corrente de operação é comparada com uma corrente de restrição. A Figura 19 mostra um caso típico de curva de operação com restrição percentual. A condição para que o relé opere é expressa pela equação 2.8. Os ajustes do relé são o coeficiente de inclinação k e o ajuste de pick-up mínimo I_p .

Figura 19 – Curva relé diferencial percentual



Fonte: Elaborado pelo autor.

O relé opera quando:

$$|\vec{I}_{OP}| > I_P + k|\vec{I}_{RT}| \quad (2.8)$$

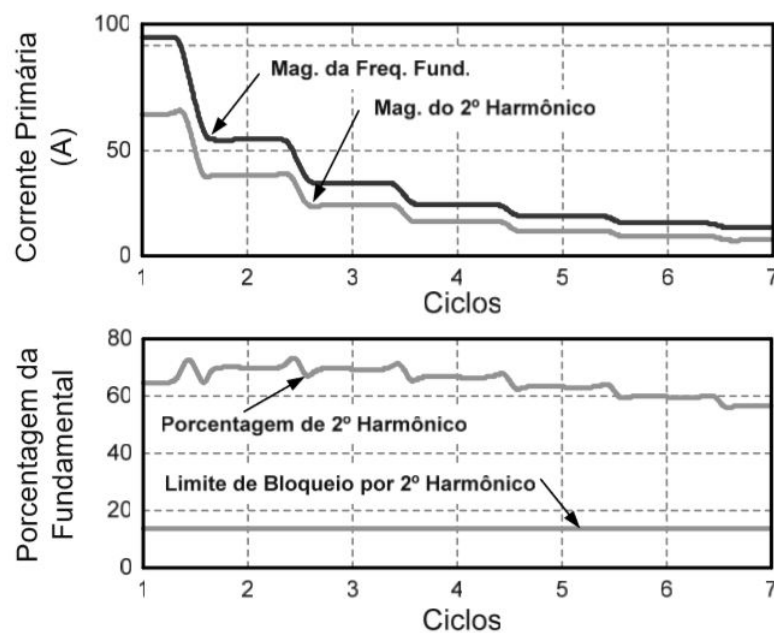
Onde a corrente de restrição I_{RT} é a média das correntes primária e secundária.

2.4.2 Bloqueios de energização e sobre-excitação

Quando a excitação de um transformador é removida, a corrente de magnetização decai para zero, porém algum fluxo residual ainda pode existir. Se o transformador for religado pode ser que ocorram transitórios que levem a correntes de *Inrush*. A magnitude dessas correntes podem ser várias vezes o valor nominal de carga, e podem ser observadas principalmente no segundo harmônico de frequência.

Durante a energização do transformador as correntes de *Inrush* geram um valor diferencial nas correntes primária e secundárias, o que leva ao acionamento do relé. Para evitar esse acionamento indevido, utiliza-se uma técnica de bloqueio com base no valor do segundo harmônico de corrente primária. Caso a magnitude do segundo harmônico esteja acima de um limite de bloqueio estipulado, o acionamento do relé é bloqueado. Esse limite geralmente é uma porcentagem da magnitude da corrente de frequência fundamental. A Figura 20 demonstra a relação entre as correntes de segundo harmônico e fundamental durante a energização de um transformador.

Figura 20 – Correntes de *inrush*

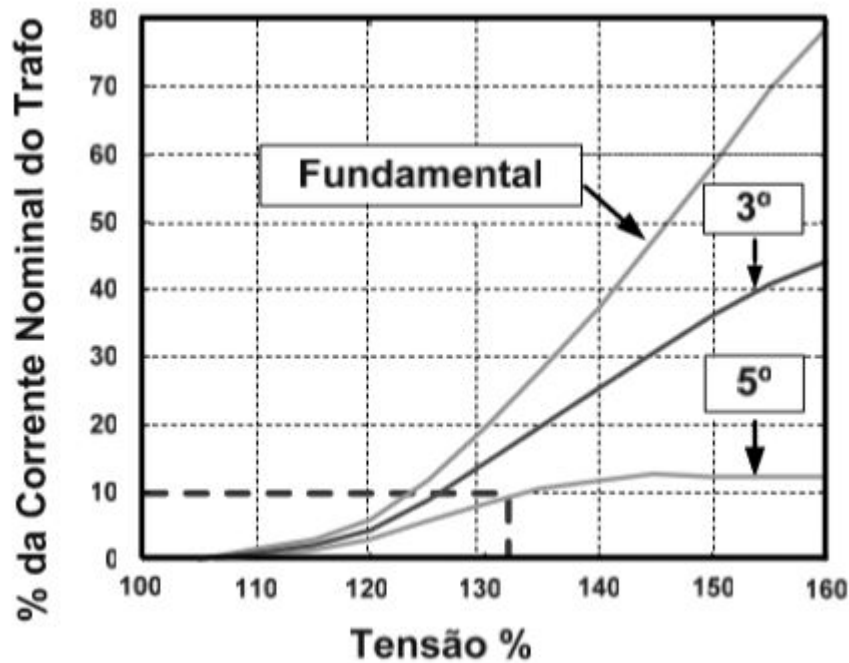


Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro fator que pode gerar correntes diferenciais de forma a induzir o acionamento do relé de forma inadequada é a sobre-excitação do transformador. Em casos de sobre-excitação, existe uma distorção na corrente primária dos transformadores, com predominante presença de harmônicos ímpares. Como muitas vezes o terceiro harmônico é eliminado pela conexão delta do TC, o quinto harmônico é utilizado para identificar casos de sobre-excitação.

Assim como no caso de excitação citado anteriormente, utiliza-se um bloqueio do relé diferencial com base na magnitude do quinto harmônico da corrente primária. Caso o valor do quinto harmônico esteja acima de um limite predeterminado, o acionamento do relé é bloqueado. A Figura 21 mostra a relação entre a magnitude das corrente de frequência fundamental e de terceiro e quinto harmônico.

Figura 21 – Harmônicos da corrente de excitação



Fonte: Elaborado pelo autor.

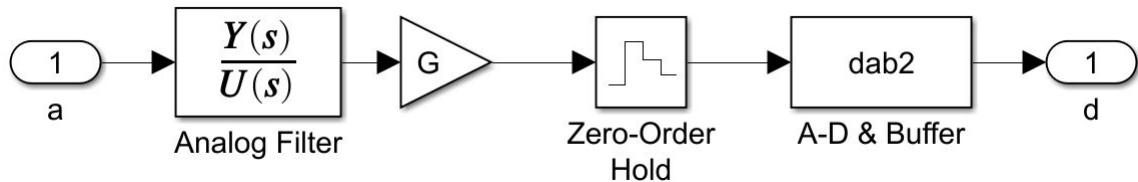
3 Metodologia

Nesse capítulo serão apresentados e explicados os modelos computacionais dos relés de proteção introduzidos anteriormente. Todos os modelos foram desenvolvidos utilizando o software *Simulink/Matlab*.

3.1 Modelo bloco de aquisição de dados

O diagrama do bloco de aquisição de dados é mostrado na Figura 22 abaixo.

Figura 22 – Modelo bloco aquisição de dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

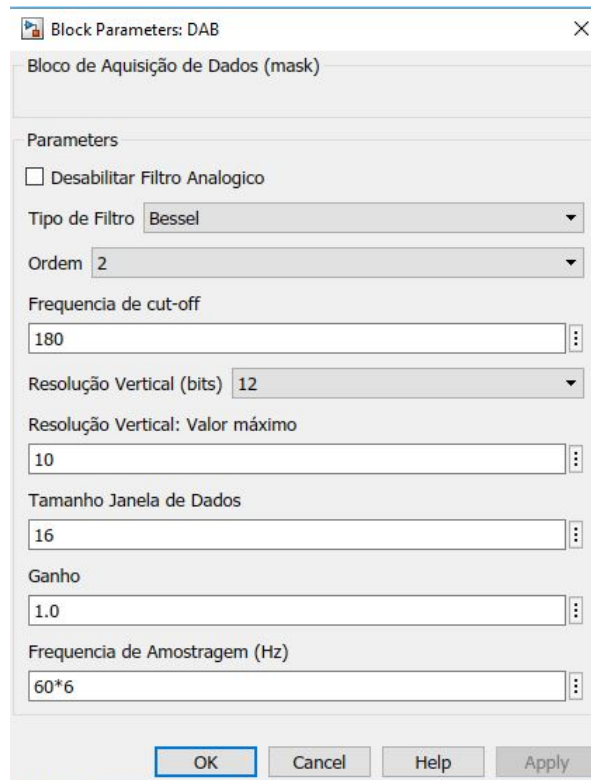
O bloco é formado pela parte que trata o sinal de tensão e corrente de entrada do relé, no caso o filtro analógico e o ganho G . A conversão analógica digital é feita juntamente pelo bloco de amostragem (*Zero-Order Hold*) e pelo *buffer*, que é responsável por implementar a função que armazena os últimos valores em janela de dados deslizante. As opções de configuração para esse bloco podem ser vistos na Figura 23.

O tipo de filtro analógico pode ser selecionado. As opções são: Bessel, Tschebycheff ou Butterworth. Os filtros podem ser de segunda, terceira ou quarta ordem. A frequência de corte do filtro analógico também deve ser especificada, assim como o ganho. É possível também desabilitar o filtro analógico. Em relação as opções do conversor A/D, deve-se especificar a resolução vertical em bits, o tamanho da janela de dados deslizante e a frequência de amostragem.

3.2 Modelo bloco de medição

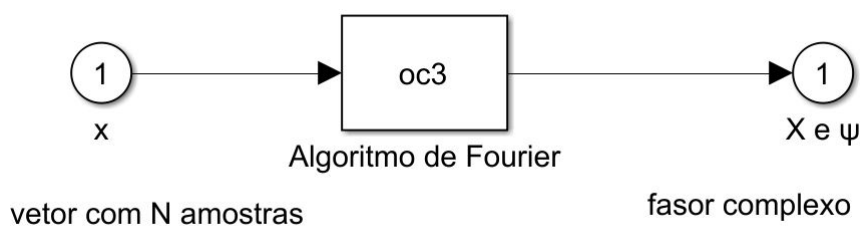
O modelo do bloco de medição é mostrado na Figura 24. O bloco é composto pelo vetor de entrada de N valores (de acordo com o tamanho da janela de dados selecionada), pelo bloco de código que implementa o algoritmo de Fourier descrito anteriormente, e pela saída que é um fasor complexo com magnitude e ângulo de fase.

Figura 23 – Janela de opções bloco de aquisição de dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

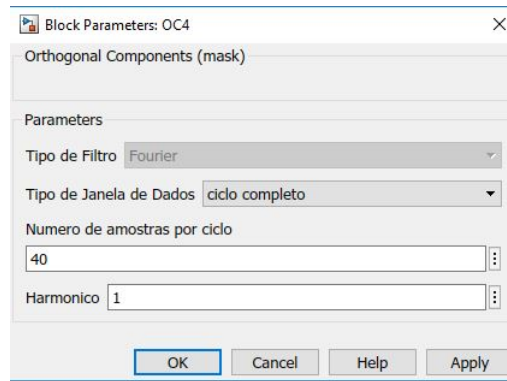
Figura 24 – Modelo bloco de medição



Fonte: Elaborado pelo autor.

As opções de configuração para essa bloco podem ser vistos na Figura 25. O filtro utilizado nesse trabalho é o filtro de Fourier. É possível escolher o tipo de janela de dados usada, se será de meio ciclo ou de ciclo completo, o número de amostras por ciclo, que deve ser igual ao valor da janela de dados. E por fim é possível escolher qual o múltiplo da frequência fundamental que deve ser analisado.

Figura 25 – Janela de opções bloco de medição

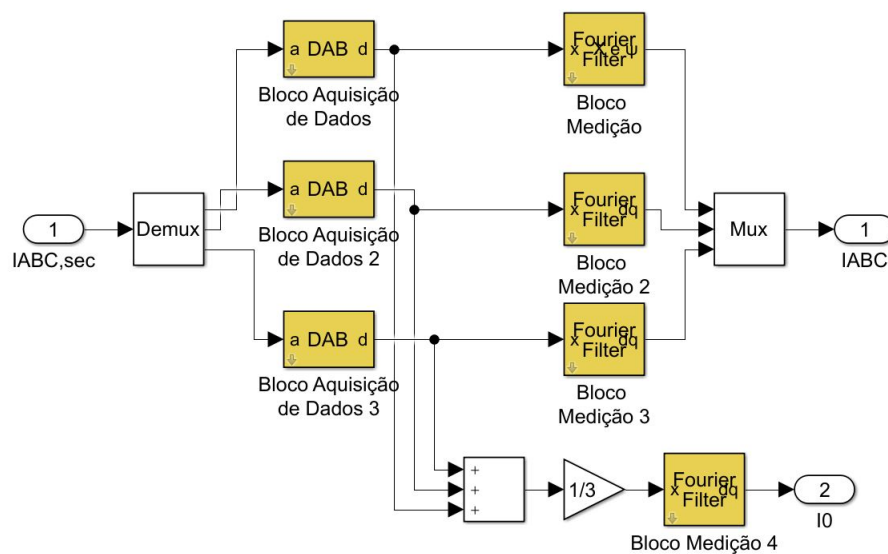


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Modelo relé de sobrecorrente

O modelo do relé de sobrecorrente foi dividido em dois blocos. O primeiro bloco é de processamento de sinal, que é composto pelos blocos de aquisição de dados e de medição. A entrada desse bloco são os sinais oriundos do TC e TP, e sua saída são os fasores de corrente de cada fase. Como a proteção de sobrecorrente só utilizada a componente fundamental da frequência, somente um bloco de medição é necessário por fase. A Figura 26 mostra o modelo do bloco de processamento de sinais.

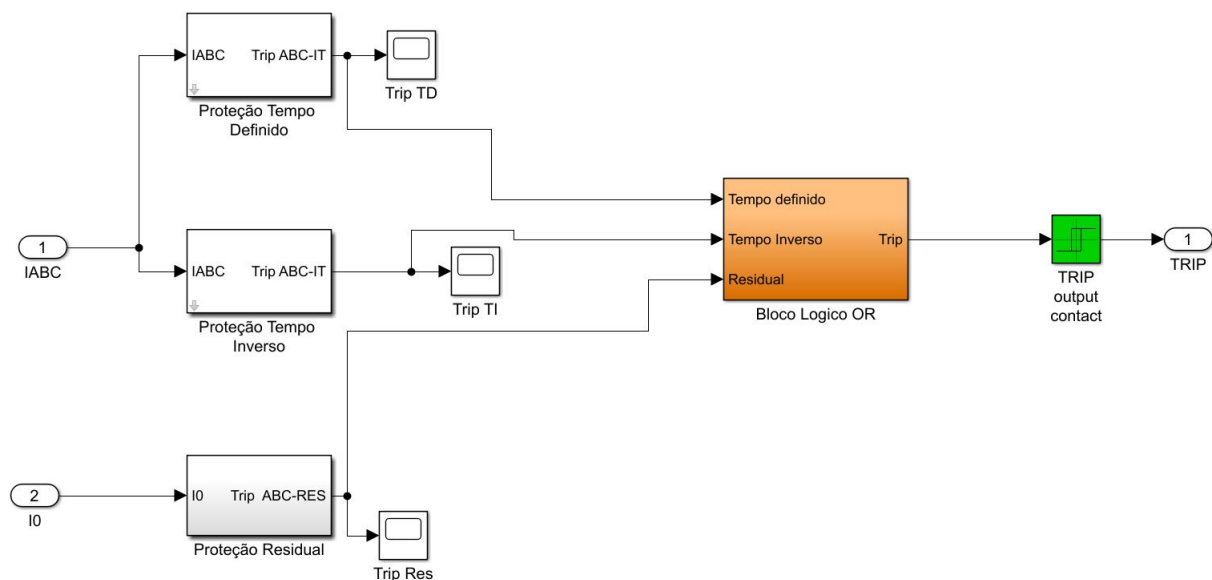
Figura 26 – Bloco processamento de sinais



Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo é o bloco de tomada de decisão, ou bloco de logica. O modelo é apresentado na Figura 27 abaixo. O bloco de proteção de tempo definido permite configurar a proteção instantânea por magnitude de corrente, enquanto o bloco de proteção por tempo inverso realiza a proteção temporizada para atuar como backup. Também é feita a proteção de sobrecorrente para o valor da corrente residual, ou corrente de neutro. Geralmente a corrente de pick-up é uma porcentagem da corrente de carga, variando de acordo com o sistema a ser protegido. O sinal de trip do relé é formado pela associação logica OU da saída dos três blocos de proteção. Um simulador de histerese foi adicionado ao final para manter o sinal de trip acionado.

Figura 27 – Modelo relé de sobrecorrente

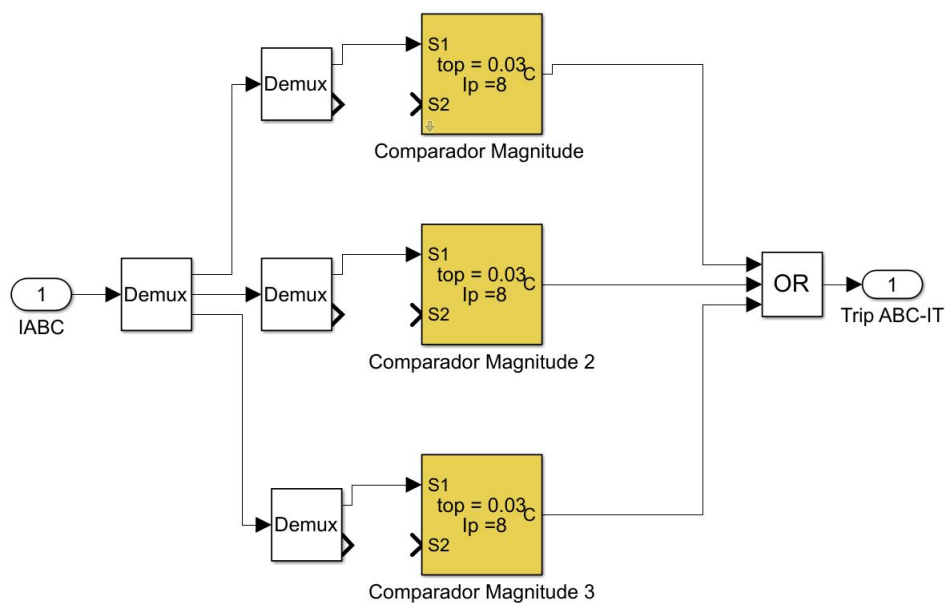


Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo interno dos blocos de proteção para sobrecorrente são mostrados na Figura 28 abaixo. Através do bloco Demux a magnitude da corrente é extraída, e serve como parâmetro de entrada para o bloco de comparação. O bloco de comparação recebe a magnitude do sinal de entrada e compara com as funções de restrição que foram configuradas nele. As funções de restrição podem ser de tempo definido, ou curvas de tempo inverso padrão IEC. Caso a magnitude da corrente permanece em valor e tempo suficiente para atingir os valores de bloqueio, a lógica do bloco ira ser 1, acionando o trip do relé de sobrecorrente.

A janela de opções para os blocos de proteção pode ser vista na Figura 29. As opções são o tipo de curva a ser configurada, o valor da corrente de pick-up e a constante de tempo. Para o bloco de tempo definido a opção de curva é limitada a de tempo definida,

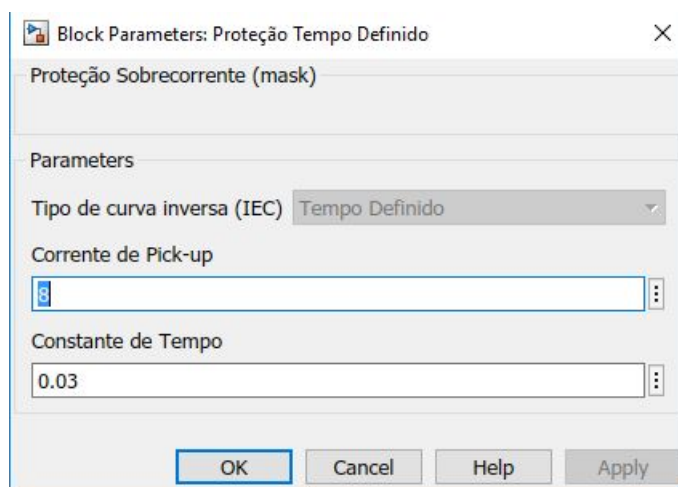
Figura 28 – Comparador de magnitude



Fonte: Elaborado pelo autor.

enquanto para a proteção de tempo inverso as curvas padrão do IEC apresentadas na Tabela 1 são disponíveis.

Figura 29 – Janela de opções proteção sobrecorrente



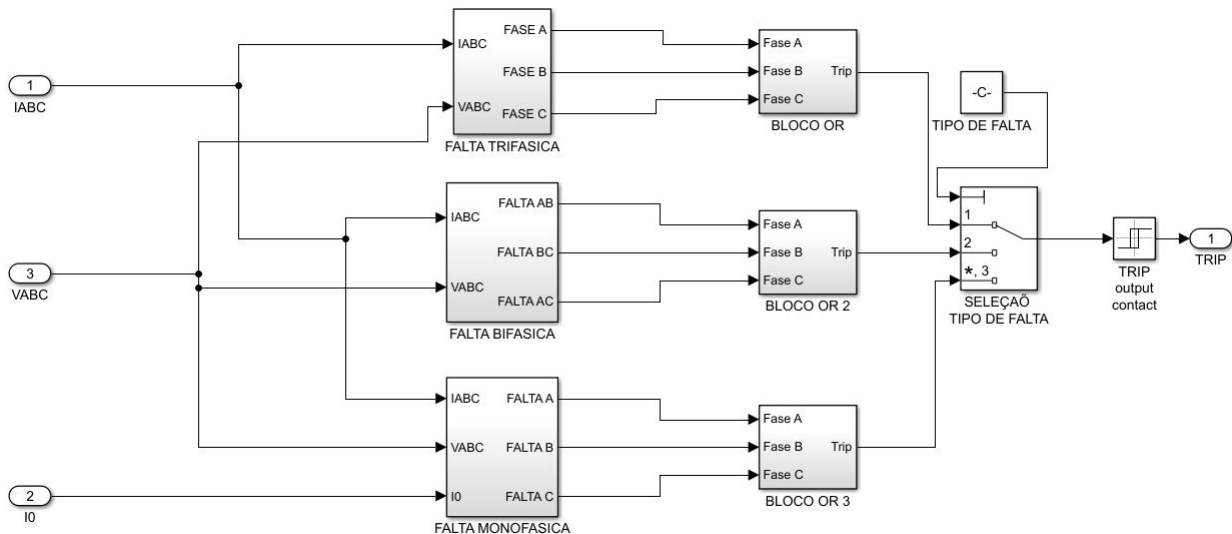
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Modelo relé de distância

O modelo do relé de distância também foi dividido em dois blocos, o de processamento de sinais e o de tomada de decisão. Assim como o relé de sobrecorrente, o relé de distância só utiliza a componente de frequência fundamental para definir o trip. Entretanto, nesse caso é necessário calcular o valor de impedância visto pelo relé, logo os sinais de tensão de fase também devem ser processados e disponibilizados para o bloco de decisão. Os processos envolvidos no tratamento do sinal de tensão são idênticos aos utilizados para os sinais de corrente.

A modelagem do bloco de decisão do relé de distância pode ser vista na Figura 30 abaixo. Como foi explicado na Tabela 2, faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas utilizam relações diferentes entre tensão e corrente de fase para o cálculo da impedância. Devido a isso, foram desenvolvidos três blocos que computam o valor de impedância, e realizam o acionamento do trip de forma independente um do outro. Para garantir a seleção correta do tipo de falta um *switch* determina qual dos sinais de entrada deve ser usado, de acordo com o tipo de falta para qual o relé foi configurado.

Figura 30 – Modelo relé de distância

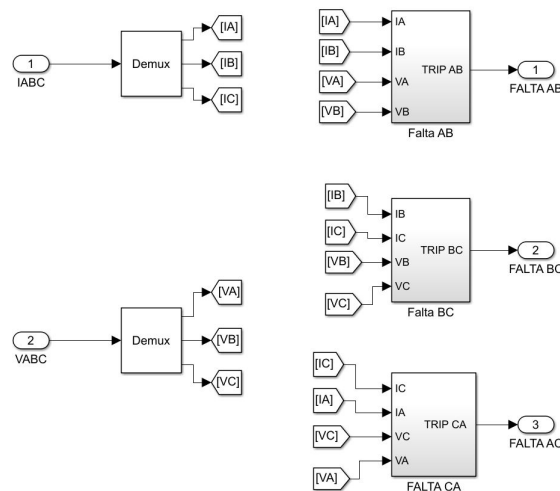


Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada um dos módulos de falta na Figura 30 implementa a análise para faltas nas fases individuais, ou duas a duas no caso de faltas bifásicas. A Figura 31 abaixo exemplifica o modelo do módulo de faltas bifásicas. Os módulos para faltas trifásicas e monofásicas foram implementados de forma análoga.

O modelo do bloco da falta AB mostrado na Figura 31 pode ser visto na Figura 32. Os parâmetros de entrada nesse caso são as correntes IA e IB, e as tensões VA e VB. Os

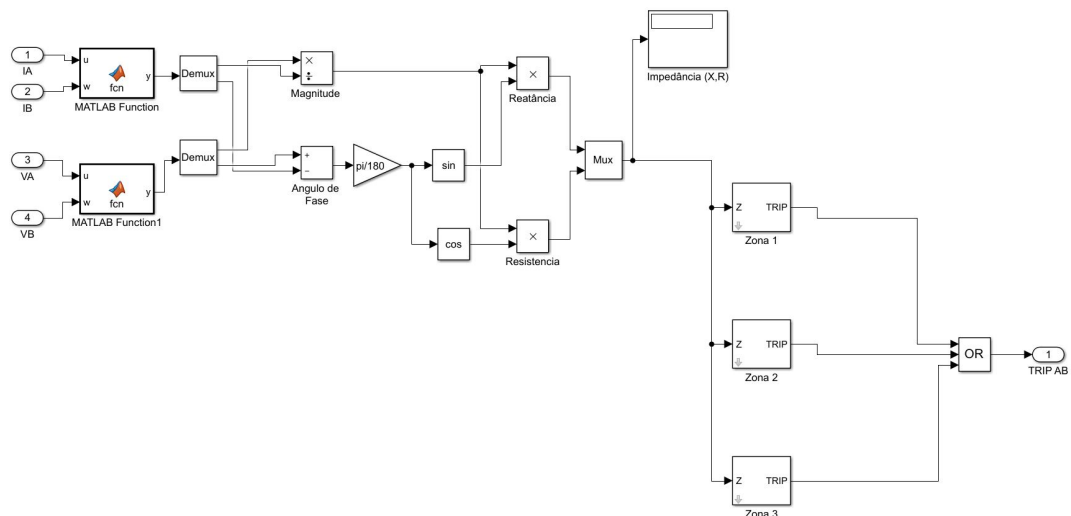
Figura 31 – Modulo falta bifásica



Fonte: Elaborado pelo autor.

blocos de função do Matlab realizam as operações previstas na Tabela 2, e tem como saída os fasores de tensão e corrente necessários para calcular a impedância enxergada pelo relé. Esse valor é calculado com base na formula de Euler, que permite encontrar os valores de reatância e resistência, que constituem a parte imaginaria e real da impedância respectivamente. Os valores encontrados são então analisados pelos blocos de zona, que emitem um sinal de trip ativo caso a impedância esteja dentro da zona de atuação configurada.

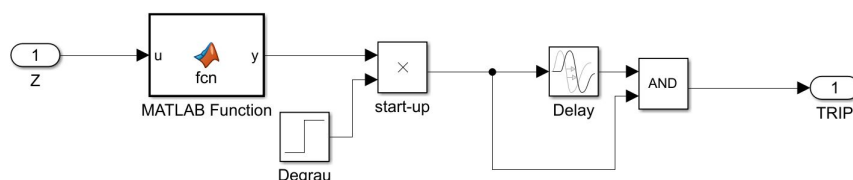
Figura 32 – Cálculo da impedância



Fonte: Elaborado pelo autor.

A implementação do bloco de zona é mostrada na Figura 33. O valor de impedância Z serve como parâmetro de entrada para o bloco de função do Matlab. Esse bloco executa a condição de atuação prevista na equação 2.7, e caso ela seja satisfeita, fornece saída com valor lógico 1. O módulo de *start-up* compara o valor lógico de saída com um degrau unitário que se inicia em um tempo de 0.02 segundos. Isso foi feito para evitar acionamento de trips durante os transitórios iniciais da simulação causados pelo Matlab. É aplicado então um *delay* de tempo no sinal de saída da função, para simular o tempo de acionamento configurado no relé, e garantir que o valor lógico do sinal permaneça com o valor lógico 1 durante um tempo mínimo antes de acionar o sinal de bloqueio.

Figura 33 – Implementação bloco de zona



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 mostra a janela de opções para o relé de distância. Aqui é possível configurar a resistência e reatância das três zonas de proteção, assim como o tempo de delay de cada uma. Assim é possível implementar as zonas circulares de operação, além de garantir a coordenação dos relés através da temporização de cada zona. Além disso, deve ser informado os parâmetros da linha protegida, sendo estes a reatância, resistência e comprimento. Assume-se aqui, que cada segmento de linha possui as mesmas características. Por fim, deve-se escolher com o tipo de falta que será simulado.

Figura 34 – Janela de opções relé de distância

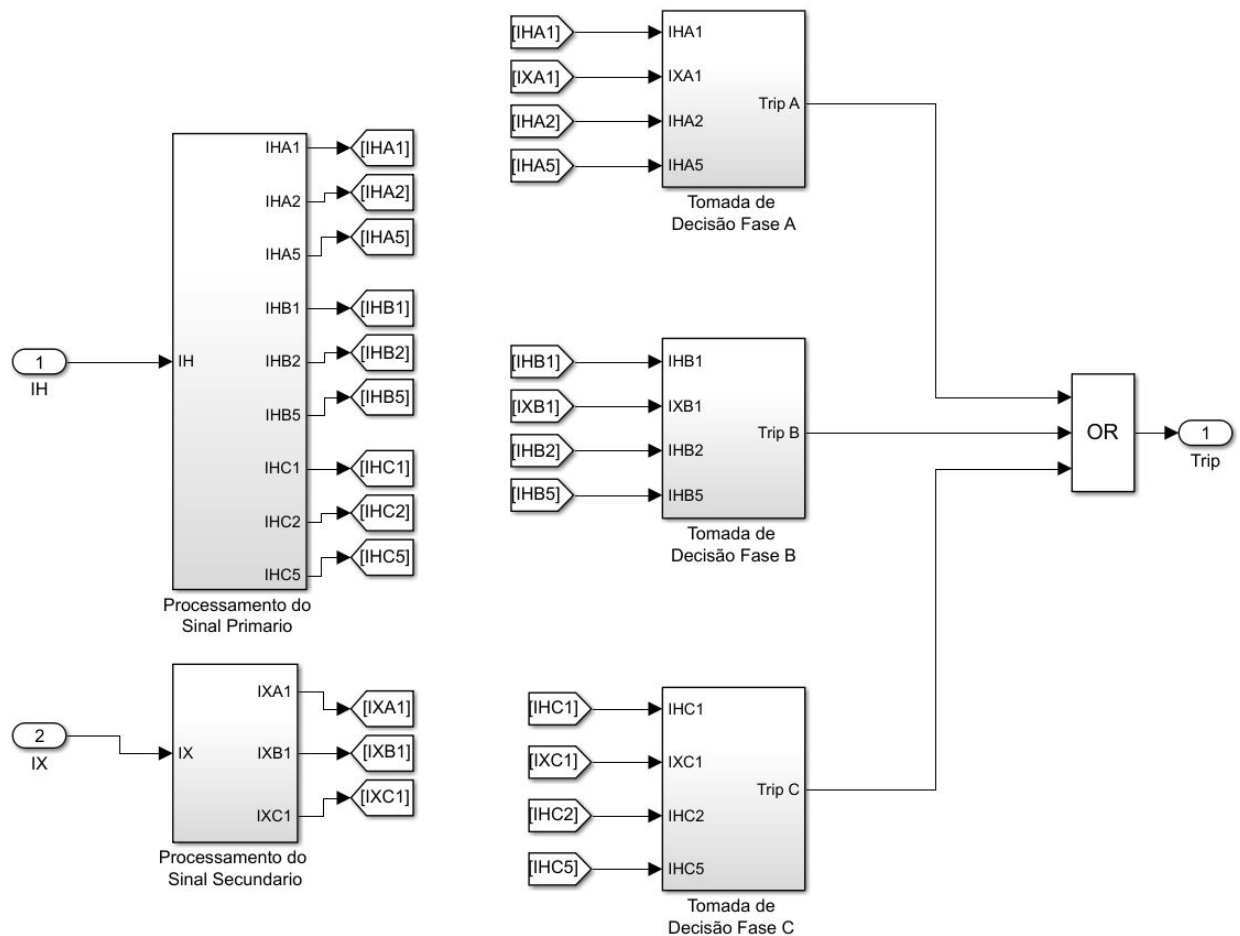


Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.5 Modelo relé diferencial

Assim como os dois modelos anteriores, o relé diferencial foi dividido em bloco de processamento de sinais, e bloco de tomada de decisão. A Figura 35 apresenta a configuração do relé diferencial proposta. Para a proteção diferencial, é necessário capturar o sinal da corrente primária e secundário do equipamento a ser protegido, logo, dois blocos de processamento de sinal foram utilizados. Os blocos de tomada de decisão são os responsáveis por emitir o sinal de trip. A lógica OR é aplicada as saídas dos três blocos.

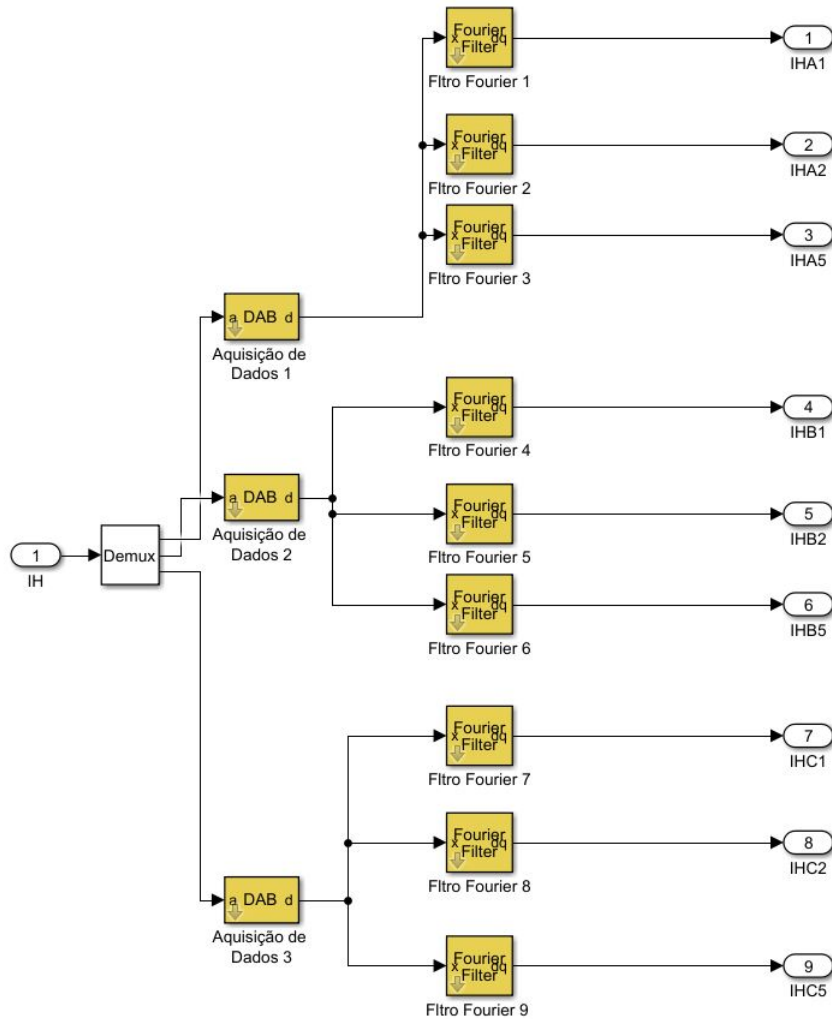
Figura 35 – Modelo relé diferencial



Fonte: Elaborado pelo autor.

A proteção diferencial de transformadores utiliza a segunda e quinta componente harmônica da corrente primária na sua lógica, além da componente fundamental. Sendo assim, foram utilizados três filtros digitais de Fourier para cada corrente de fase primária. Dessa forma foi possível filtrar a magnitude e fase de cada componente separadamente. A Figura 36 apresenta como ficou a configuração do bloco de processamento de sinais para a corrente primária.

Figura 36 – Bloco processamento de sinais relé diferencial

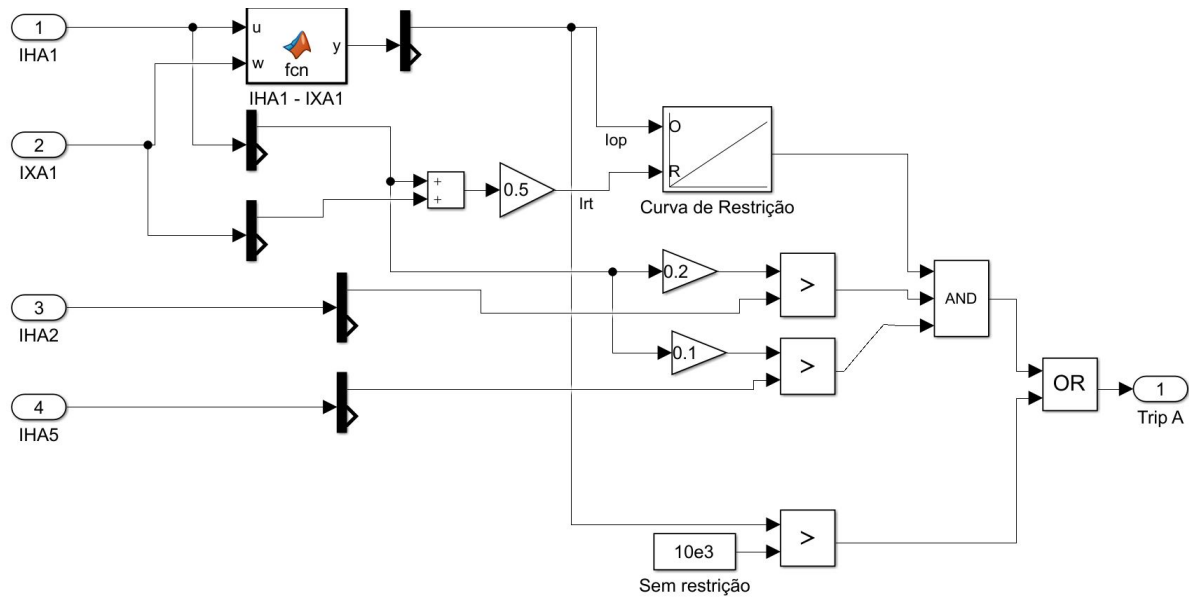


Fonte: Elaborado pelo autor.

A implementação do bloco de decisão pode ser vista na Figura 37. A corrente primária (IHA1) é comparada com corrente secundária (IXA1) no bloco de função Matlab. A saída do bloco é a diferença entre as duas, chamada de corrente de operação. A corrente de restrição é então calculada como a média das correntes primárias e secundárias. As duas correntes são comparadas no bloco curva de restrição. Esse bloco irá gerar uma curva configurável, como a da Figura 19, e caso o ponto que correlaciona I_{OP} e I_{RT} esteja na região de operação, o sinal de trip é acionado.

Além disso, a magnitude das correntes de segundo e quinto harmônicos são comparadas com a magnitude da corrente de frequência fundamental. Caso o valor seja maior que certa porcentagem previamente configurada, acontecerá o bloqueio do sinal de trip proveniente do bloco de curva de restrição. Para implementar essa função, utilizou-se a função logica AND. Por último, pode-se acionar o trip caso o valor da corrente de

Figura 37 – Bloco tomada de decisão do relé diferencial

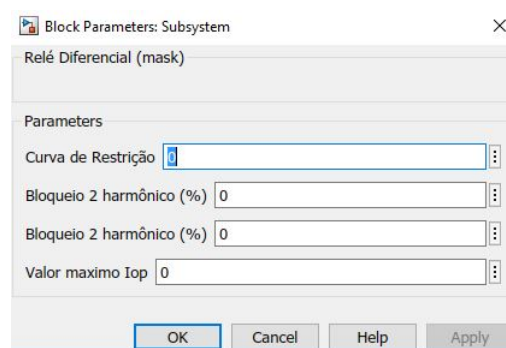


Fonte: Elaborado pelo autor.

operação I_{OP} seja maior que um valor determinado, sem que haja necessidade de atender as condições de bloqueio por harmônicos.

A janela de opções para relé diferencial pode ser vista na Figura 38. É possível configurar a curva de restrição, e para isso utiliza-se um vetor de pontos. Também se define a porcentagem para as condições de bloqueio por segundo e quinto harmônico. E por fim é possível determinar um valor para a corrente diferencial o qual o sinal de trip é acionado sem restrições.

Figura 38 – Janela de opções do relé diferencial



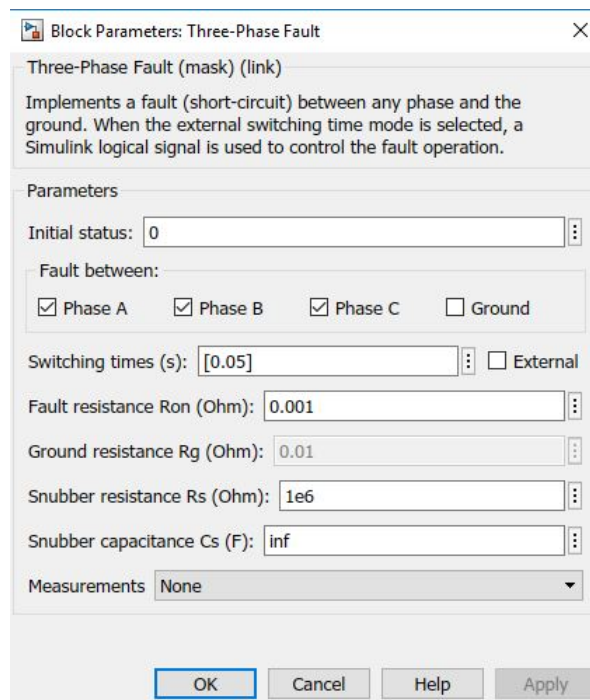
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 Resultados

Os modelos apresentados anteriormente serão validos nesse capítulo através de simulações computacionais. O objetivo das simulações é verificar se os parâmetros de saída dos blocos projetados comportam-se de acordo com o esperado pelo embasamento teórico. Primeiro serão testados os blocos de aquisição de dados e medição, analisando as saídas e a resposta a frequência quando necessário. Depois, os relés de proteção serão simulados utilizando modelos de sistemas elétricos disponíveis pelo *Simulink*. É importante ressaltar que os transformadores de corrente e potencial implementados nesse trabalho servem apenas como medidores, e não foram modelados de acordo com seu comportamento real.

Todas as faltas foram simuladas utilizando o bloco *Three-Phase Fault* do *Simulink*. Esse bloco está presente na biblioteca *SimPower Systems*, e é capaz de implementar curto circuitos quando conectado a outro elemento de potência. Todas as configurações da falta foram mantidas para todos os testes, e podem ser vistas pela janela de opções desse bloco na Figura 39 .

Figura 39 – Simulação bloco de aquisição de dados

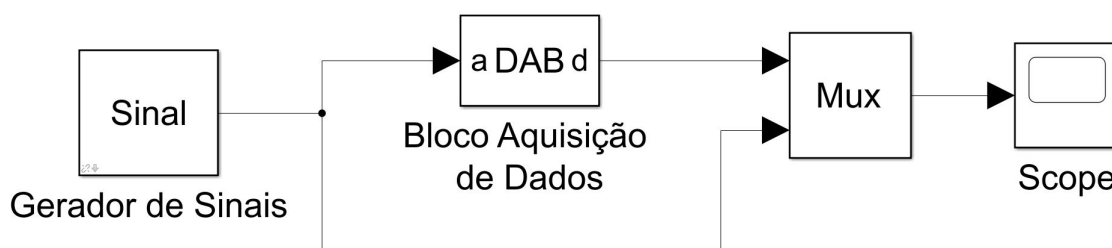


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Simulação do bloco de aquisição de dados

O esquema mostrado na Figura 40 foi utilizado para simular o comportamento do bloco de aquisição de dados. O gerador de sinais vai gerar um sinal senoidal analógico com frequência fundamental de 60Hz misturados com frequências maiores de até 8kHz. O sinal então será filtrado e amostrado a uma taxa de 20 vezes por ciclo, com taxa de resolução de 12 bits. Utilizou-se um filtro Butterworth de segunda ordem, com frequência de corte de 180Hz.

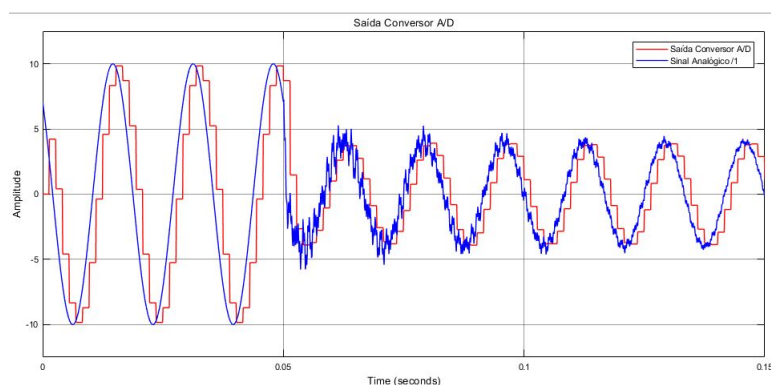
Figura 40 – Simulação bloco de aquisição de dados



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A comparação entre o sinal analógico e a saída do bloco de aquisição de dados pode ser vista na Figura 41. É possível perceber que o sinal foi amostrado de acordo com o esperado, e que as frequências acima de 180Hz que causam as oscilações a partir de 0,05s não influenciam na saída do conversor A/D. Isso significa que o filtro analógico serviu ao seu papel de eliminar as componentes de frequência indesejadas. Além disso, é interessante observar o deslocamento de fase entre o sinal de saída e o sinal analógico. Isso ocorre devido ao atraso inserido pelo filtro analógico, como esperado.

Figura 41 – Saída conversor A/D

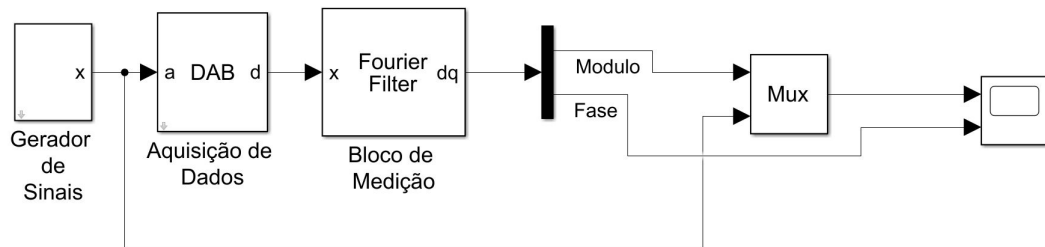


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Simulação do bloco de medição

O bloco de medição foi validado de acordo com a sua capacidade de estimar corretamente a magnitude e a fase de um fasor, a partir do sinal discreto recebido pelo conversor A/D. Para isso utilizou-se o esquema da Figura 42. O gerador de sinais gera uma onda senoidal analógica de amplitude unitária. O sinal é então amostrado pelo bloco de aquisição de dados, e alimentado até o filtro de Fourier. Utilizou-se o filtro de ciclo completo, e uma janela de dados de 20 amostras.

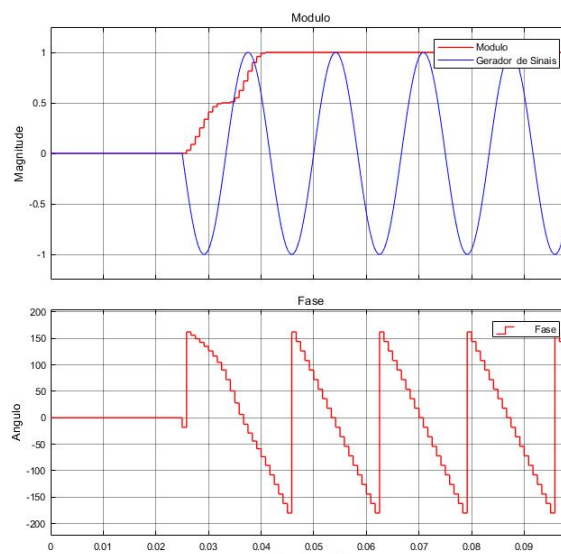
Figura 42 – Simulação bloco de medição



Fonte: Elaborado pelo autor.

A saída do filtro digital de Fourier é apresentada na Figura 43. É possível perceber que os valores de magnitude e corrente foram estimados de forma precisa. É interessante observar que existe um atraso na estimação do fasor. Isso aconteceu pois o algoritmo de Fourier utiliza um ciclo completo para determinar a magnitude e a ângulo.

Figura 43 – Saída bloco de medição

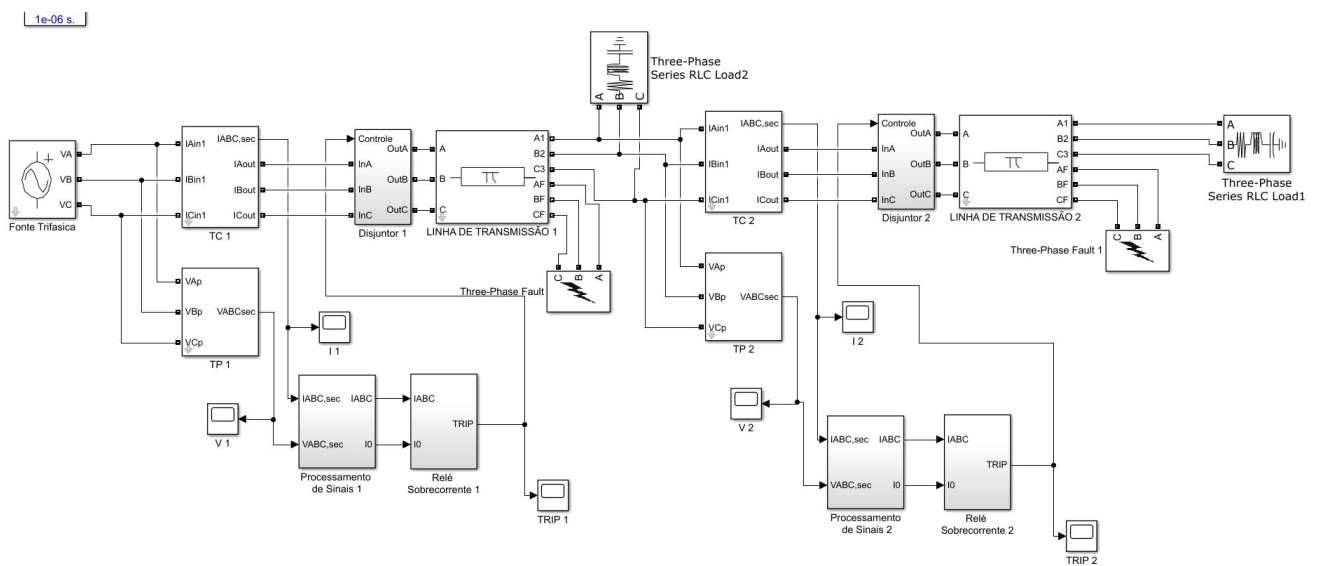


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Proteção de sobrecorrente em linhas de transmissão

Para validar o funcionamento do relé de sobrecorrente utilizou-se o sistema da Figura 44. Trata-se de um sistema trifásico com um gerador de 11kV conectado a duas cargas de 10kVA cada. As cargas estão separadas por linhas de transmissão de 100 km de extensão cada. Ambas as linhas possuem o mesmo valor de impedância de $2,67 + j72\Omega$.

Figura 44 – Sistema elétrico relé de sobrecorrente

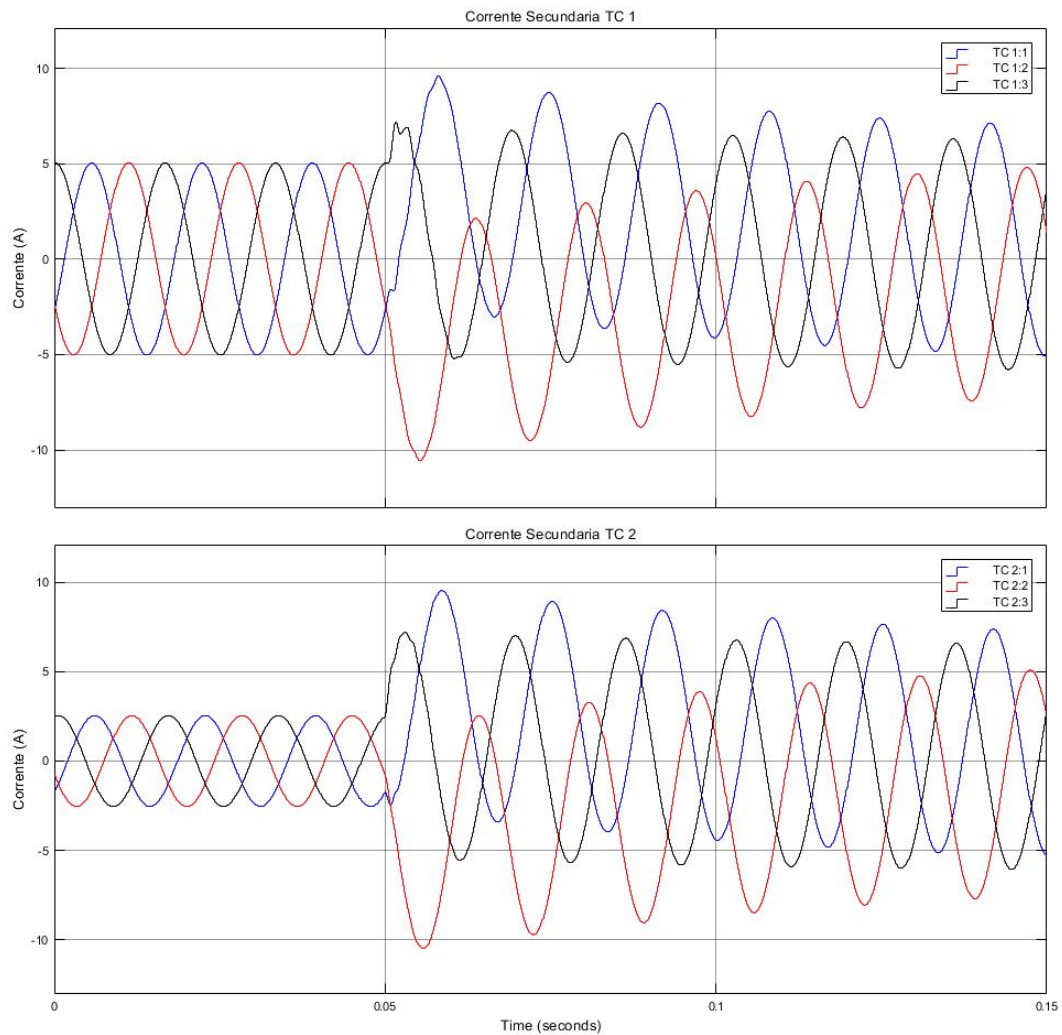


Fonte: Elaborado pelo autor.

A corrente média de carga medida no secundário do TC 1 é de aproximadamente 5A, enquanto a corrente média no secundário do TC 2 é 2,5A. Durante a ocorrência de uma falta no meio da linha de transmissão 2, a corrente de curto de circuito medido em ambos os secundários dos TCs é de aproximadamente 8A após a estabilização da falta. Isso pode ser visto na Figura 45. Foram simulados dois cenários diferentes. Primeiro foi a falta na linha de transmissão 2, com o funcionamento normal do relé de proteção 2. Em segundo, testou-se se o relé 1 iria fornecer a proteção de backup para o caso de não acionamento do relé 2 para a mesma falta.

Os relés foram configurados de forma a garantir a proteção e coordenação do sistema. O relé 2 foi configurado com uma corrente de pick-up de 3,5A, e proteção por tempo definido com temporização de 0,01 segundos. Já relé 1 possui corrente de pick-up de 5,5A e temporização de tempo definido de 0,03. Dessa forma é possível garantir a coordenação de tempo.

Figura 45 – Correntes de carga e de curto circuito



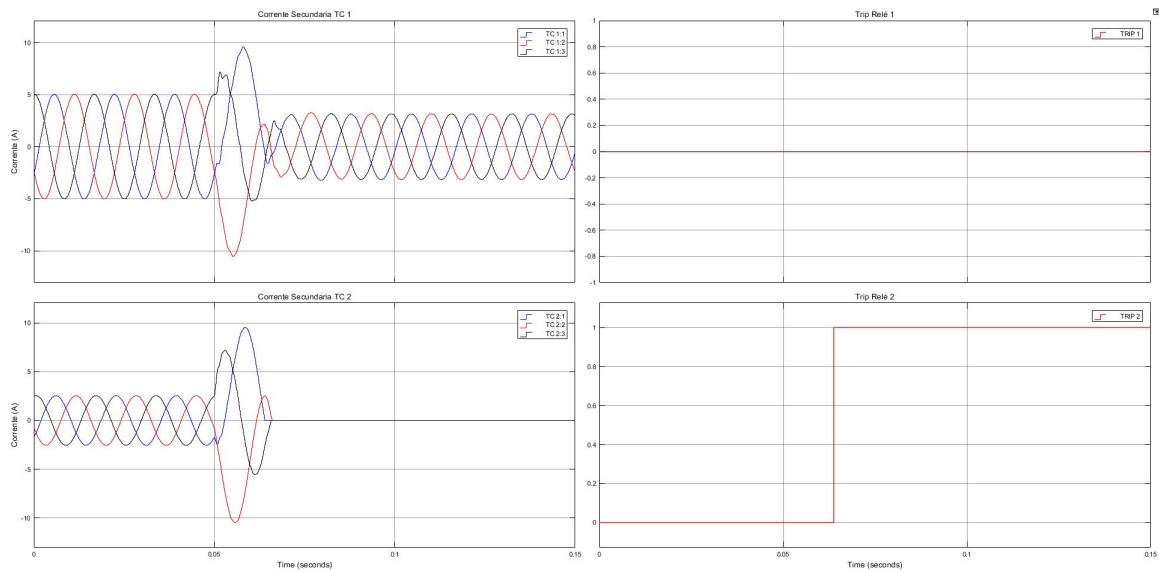
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.1 Teste curto circuito

Introduziu-se uma falta no meio da linha de transmissão 2 no instante de 0,05s. A Figura 46 mostra as formas de onda para as correntes secundarias dos TCs, assim como os sinais de trip de ambos os relés de proteção.

Assim como era esperado, 0,01 segundos após a falta o relé 2 envia o sinal de trip para o disjuntor conectado a linhas de transmissão 2, e a conexão da linha é aberta. Com isso, a corrente de curto circuito é eliminada do sistema, e a carga ao final do sistema perde a sua alimentação. É importante notar aqui, que a coordenação entre os relés permitiu que a carga no meio do sistema continua-se a ser alimentada, o que não aconteceria caso o relé de proteção 1 tivesse acionado do sinal de trip indevidamente.

Figura 46 – Curto circuito linha dois

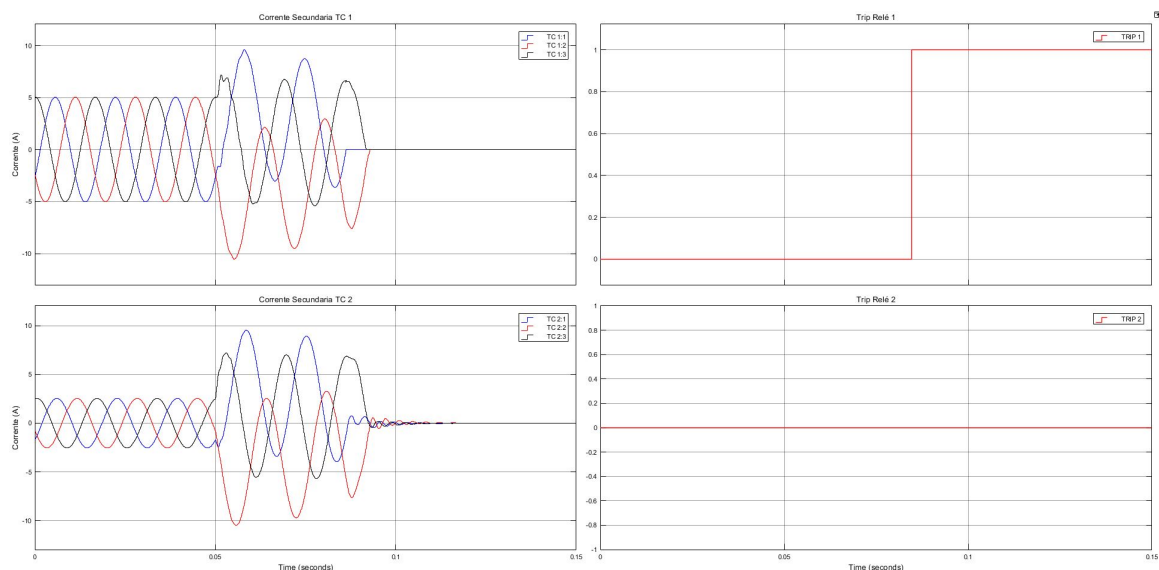


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Teste proteção de backup

Nesse teste, utilizou-se a mesma configuração do teste de curto circuito anterior, porém nesse caso será simulado o que acontece caso o relé 2 por algum motivo apresente falha em acionar o trip e extinguir a corrente de falta. Espera-se que o relé 1 atue como proteção de backup. O resultado pode ser visto da Figura 47.

Figura 47 – Proteção de backup



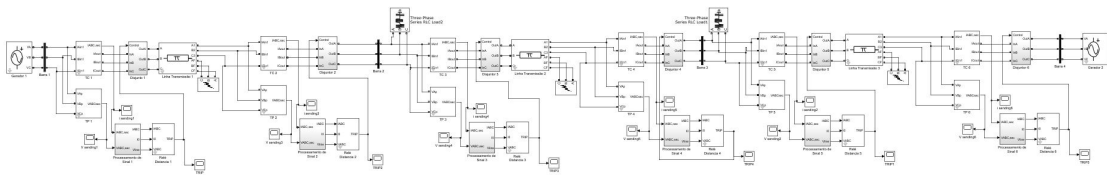
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o relé 2 não conseguiu acionar o trip antes da temporização do relé 1, 0,03 segundo após a falta o relé 1 aciona o sinal de bloqueio, e a corrente de curto circuito é extinta de todo o sistema. Dessa forma, verificou-se que a proteção de backup funcionou como o esperado. É interessante notar que devido a falha do relé 2, a carga presente no meio da linha ficou sem alimentação, apesar de não estar na área de falha.

4.4 Proteção de distância em linhas de transmissão

A validação do relé de distância foi feita utilizando o sistema da Figura 48. Trata-se de um sistema não radial de linhas de transmissão, com dois geradores e três linhas de transmissão. O gerador 1 possui tensão nominal de 10kV e defasagem angular de 0 graus, enquanto o gerador 2 possui 8kV e defasagem angular de -15 graus. As linhas de transmissão trifásicas possuem 100km de extensão cada e impedância de $2,67 + j72\Omega$. Além disso, cargas de 5kVA cada são conectadas aos barramentos 2 e 3.

Figura 48 – Sistema de transmissão não radial



Fonte: Elaborado pelo autor.

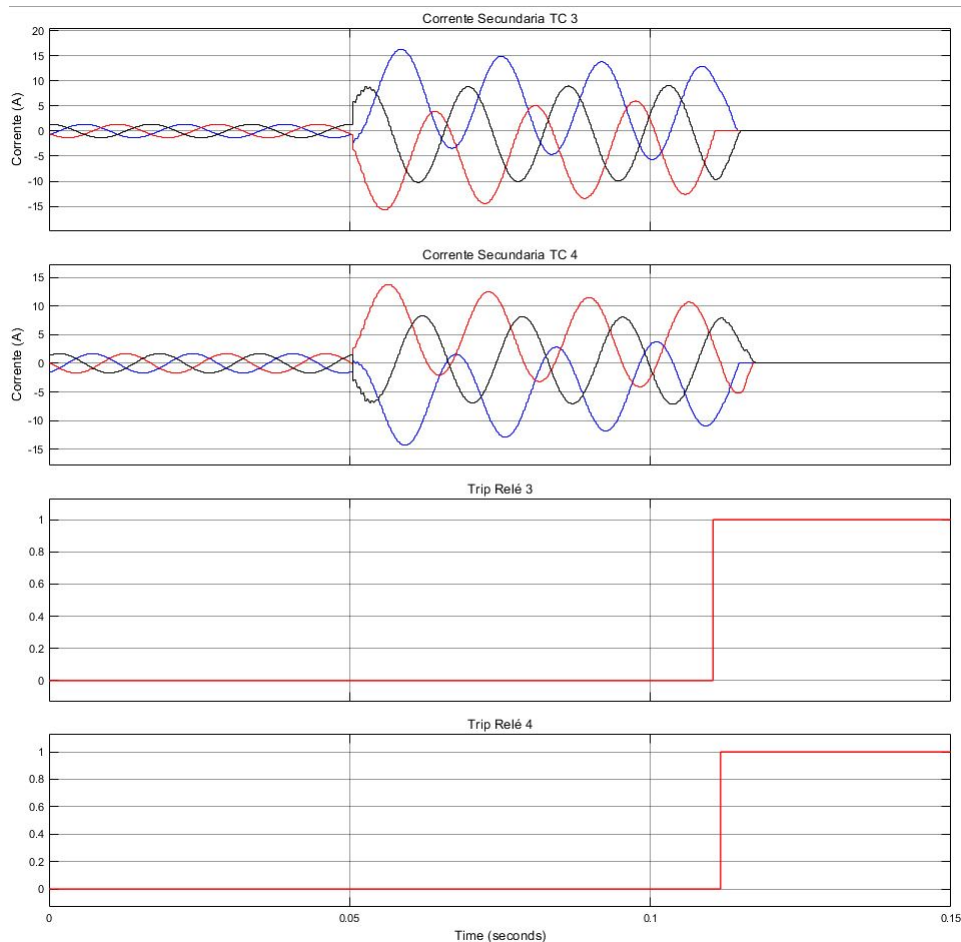
Os relés de distância possuem 3 zonas de proteção cada. As zonas foram configuradas de forma que a primeira zona represente 80% do valor de impedância da linha, a segunda zona 150% do valor, e a terceira 230%. Dessa forma, as zonas um, dois e três são determinadas por impedâncias de respectivamente $2,13 + j57\omega$, $4 + j108\Omega$ e $6,14 + j165\Omega$. A coordenação entre as zonas deve ser feita através da configuração do tempo de atuação para cada zona. O tempo de atuação determinado para as zonas foram de 0,05, 0,1 e 0,15 segundos respectivamente.

Foram feitos dois testes para validar o relé de distância. O primeiro teste envolve uma falta no meio da linha de transmissão dois. Aqui deve-se verificar a capacidade dos relés três e quatro de perceber a falta, e garantir o isolamento da linha dois antes que a proteção de backup dos demais relés atuem. O segundo teste envolve uma falta na linha três e a falha do relé cinco em isolar a linha. Nesse caso, espera-se que o relé três consiga realizar a proteção de backup percebendo a falta que acontece em sua zona dois de proteção.

4.4.1 Isolamento de falta

Foi induzida uma falta trifásica no meio da linha de transmissão dois no instante de 0,05 segundos. A Figura 49 mostra as formas de onda para as correntes secundarias dos transformadores de corrente três e quatro, assim como os sinais de trip dos relés de proteção três e quatro.

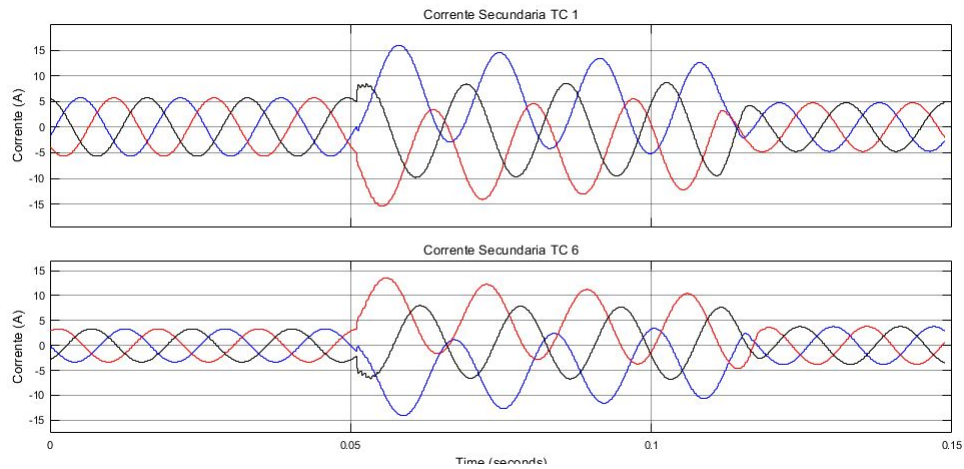
Figura 49 – Isolamento da falta



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como era esperado, os relés que atuavam na linha de transmissão dois como zona um conseguiram conter a falta dentro da temporização de 0,05 segundos determinada. A corrente de curto é eliminada, e os disjuntores atuam separando a linha com falha do resto do sistema elétrico. É importante notar que as cargas conectadas ao barramento continuaram a ser alimentadas, o que foi garantido graças a coordenação e seletividade do sistema de proteção. A Figura 50 mostra as correntes secundarias dos transformadores de corrente um e seis.

Figura 50 – Correntes nos TCs 1 e 6

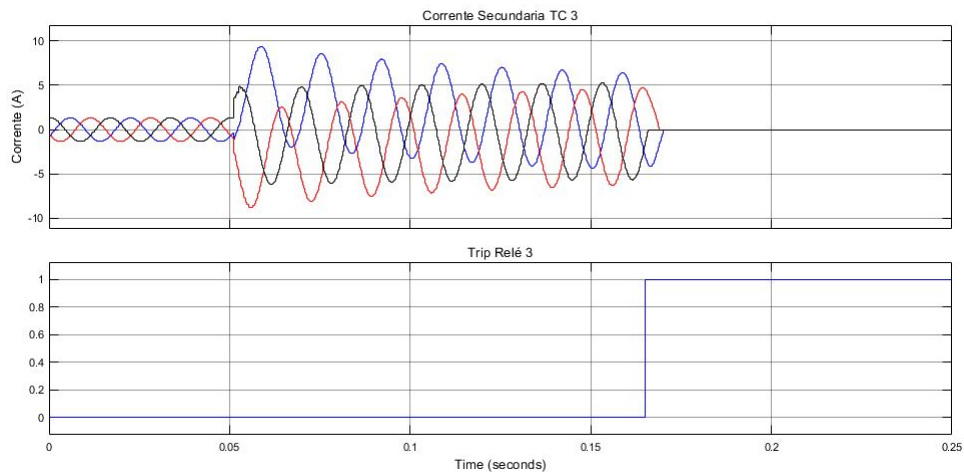


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Backup da zona dois

Foi induzida uma falta trifásica no meio da linha de transmissão três no instante de 0,05 segundos. Os relés de proteção cinco e seis foram desabilitados, de forma a testar a capacidade de proteção por backup dos outros relés. A Figura 51 apresenta a corrente secundária do TC três, e o sinal de trip do relé três.

Figura 51 – Backup zona dois

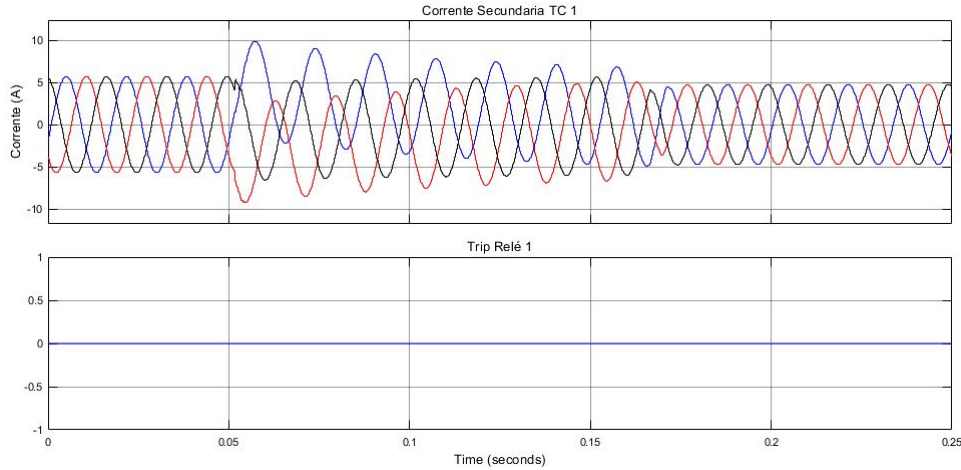


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que como a falta não foi extinguida pelos relés primários de proteção da linha três, o relé três identificou a falta como pertencente a zona 2, e após o período de temporização de 0,1 segundos emitiu um sinal de trip. A corrente de curto foi então extinta, e garantiu-se a capacidade do sistema em atuar em uma situação de backup.

Apesar de perder a alimentação na linha de transmissão dois, a linha um continua sendo energizada, como pode ser visto na Figura 52.

Figura 52 – Corrente no TC 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Proteção diferencial de transformadores

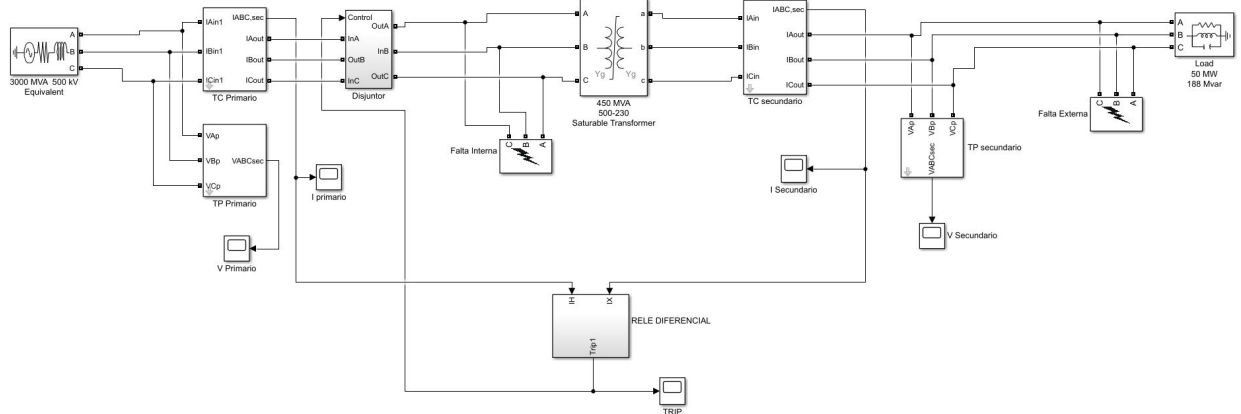
O teste de validação do relé diferencial foi feito através do sistema da Figura 53. O sistema possui um gerador conectado a uma carga através de um transformador em estrela-estrela. O gerador possui tensão nominal de 500kV e potência nominal de 3000MVA. O transformador irá abaixar a tensão de 500kV para 230kV, e possui potência nominal de 450 MVA. Por fim, uma carga de 50 MVA é conectada.

Um relé diferencial foi conectado ao transformador para realizar as simulações. Foram realizados quatro testes para avaliar as funções de proteção diferencial. Primeiro, testou-se a capacidade do relé de extinguir uma falta interna a sua zona de proteção. Em segundo verificou-se a capacidade de não atuação para faltas externas. Em terceiro testou-se o sistema durante a energização com presença de correntes de *inrush*, e o bloqueio por segundo harmônico. E por fim o transformador foi exposto a sobre-excitação e verificou-se o bloqueio de trip por quinto harmônico.

4.5.1 Falta interna

Uma falta trifásica foi induzida na região interna de proteção do relé diferencial aos 0,05 segundos. Para o relé percentual, o ajuste de declividade para transformadores de potência varia de 5% a 45% (KINDERMANN, 1999). Nesse caso, será utilizado o limite inferior de 5%. A Figura 54 apresenta as correntes primárias e secundárias do transformador provenientes dos TCs, e o sinal de trip do relé diferencial.

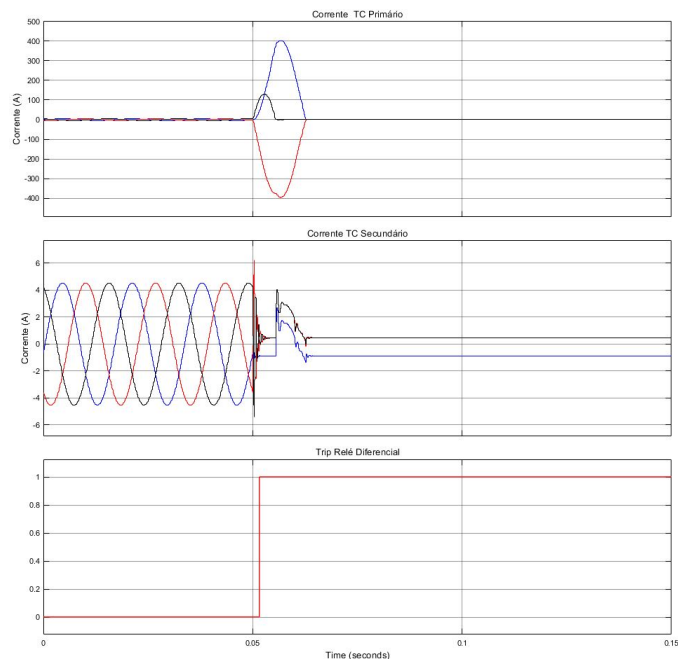
Figura 53 – Sistema de proteção diferencial



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível perceber que a falta foi reconhecida e o sinal de trip foi emitido logo após, com tempo de atuação de aproximadamente meio ciclo de onda. Essa rapidez na atuação é importante dado o alto valor da corrente de circuito nesse caso.

Figura 54 – Correntes e trip para falta interna

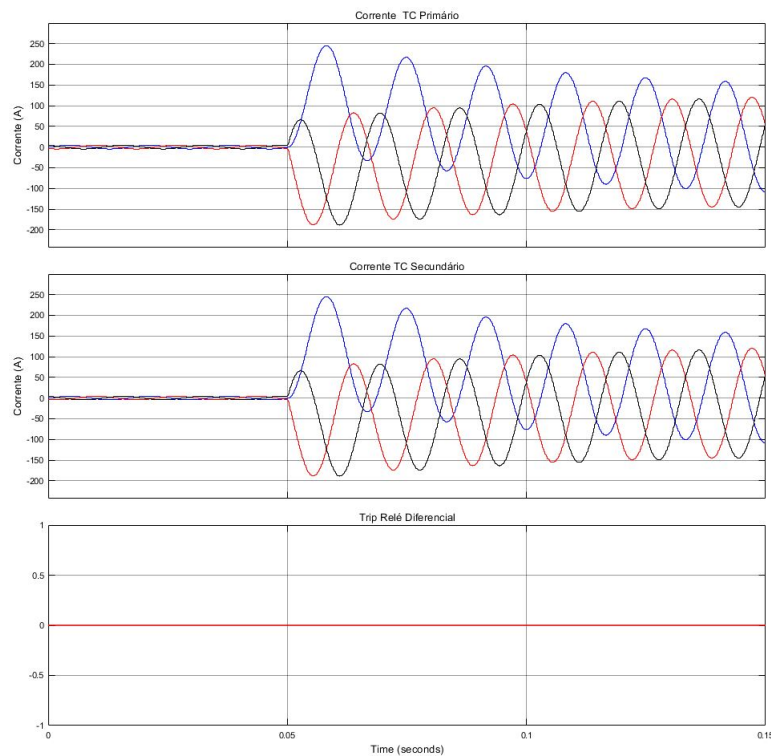


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2 Falta Externa

Uma falta trifásica foi induzida na região externa de proteção do relé diferencial aos 0,05 segundos. A Figura 55 apresenta as correntes primárias e secundárias do transformador provenientes dos TCs, assim como sinal de trip do relé diferencial.

Figura 55 – Correntes e trip para falta externa



Fonte: Elaborado pelo autor.

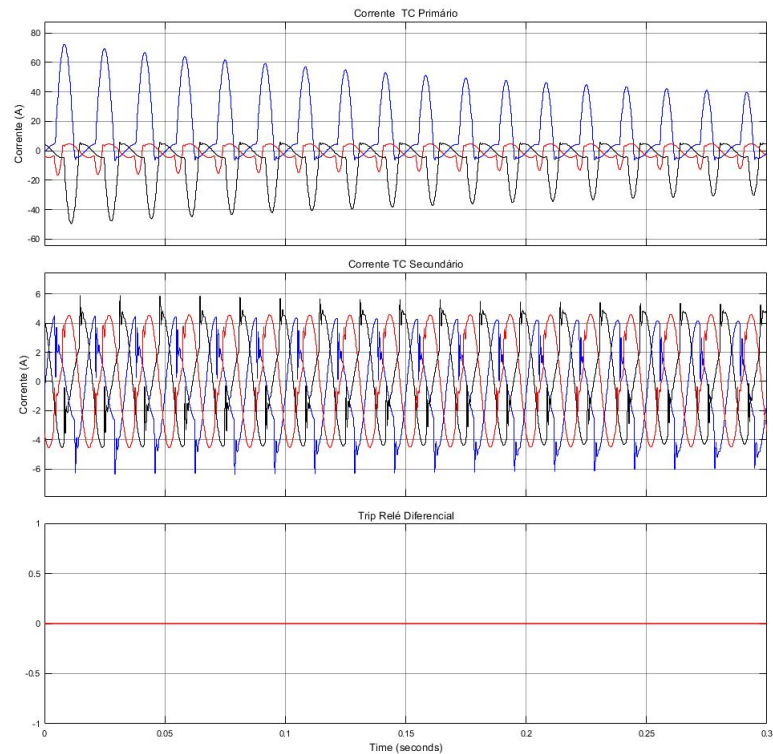
Como a falta aconteceu externamente a área de proteção, não ocorreu corrente diferencial significativa para acionar o sinal de bloqueio do relé. Isso é importante pois garante a seletividade do relé diferencial em relação ao local da falta. Entretanto, pode-se notar que a corrente de curto circuito possui elevado valor, o que pode causar danos ao transformador. Devido a isso, proteção de sobrecorrente costuma ser utilizado em conjunto com a proteção diferencial.

4.5.3 Bloqueio por correntes de *inrush*

Para esse teste induziu-se uma situação de energização com a presença de correntes de *inrush* para verificar o capacidade de bloqueio por segundo harmônico do relé diferencial. Utilizou-se um limite de 20% da componente fundamental, ou seja, enquanto a magnitude do segundo harmônico for maior que 20% da magnitude da componente fundamental, o sinal de trip por corrente diferencial está bloqueado. O resultado do teste pode ser visto

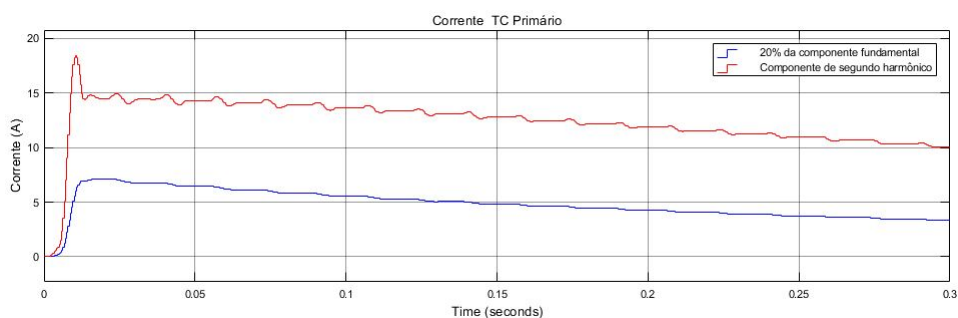
na Figura 56 e Figura 57. Na primeira temos as correntes do primário e secundário do transformador, além do sinal de trip. Na segunda, temos a comparação da magnitude da componente fundamental com a componente de segundo harmônico.

Figura 56 – Correntes de *inrush* e trip



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57 – Componente fundamental x segundo harmônico



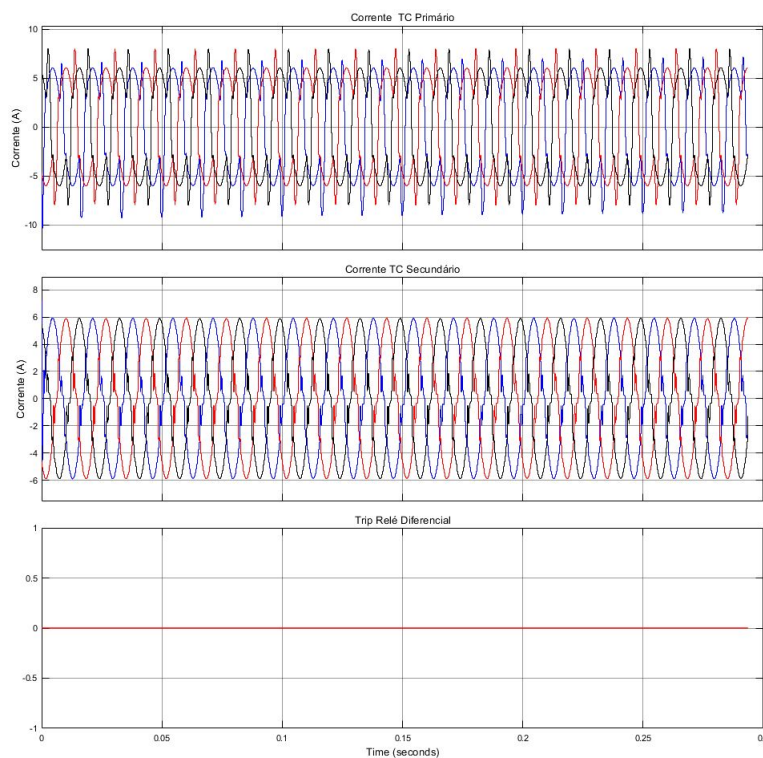
Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível perceber que o sinal de trip não foi acionado, apesar da diferença entre as correntes primarias e secundarias. Isso aconteceu, pois, a magnitude da corrente de segundo harmônico estava acima do limite de bloqueio. Logo, pode-se dizer que o bloqueio por correntes de *inrush* funcionou de forma esperada.

4.5.4 Bloqueio por sobre-excitação

Nesse teste, foi analisada uma situação de sobre-excitação do transformador, de forma a induzir correntes de quinto harmônico, e testar a capacidade do relé de bloqueio por sobre-excitação. Uma tensão de 650kV, ou seja, 130% da tensão nominal, foi aplicada ao primário do transformador. O resultado do teste pode ser visto nas Figura 58 e Figura 59. Na primeira temos as correntes do primário e secundário do transformador, além do sinal de trip. Na segunda, temos a comparação da magnitude da componente fundamental com a componente de quinto harmônico.

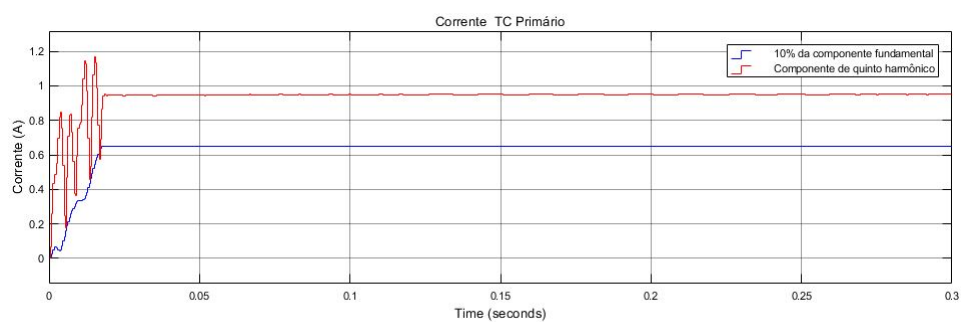
Figura 58 – Correntes do primário, secundário e trip



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como era esperado, o sinal de trip não foi acionado, já que a magnitude de componente de quinto harmônico estava acima do limite estipulado para bloqueio por sobre-excitação. Assim como o caso de faltas externas, a sobre-excitação pode causar danos ao transformador, logo, usualmente utiliza-se proteção de sobre tensão associada a proteção diferencial.

Figura 59 – Componente fundamental x quinto harmônico



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 Conclusão

5.1 Conclusões

Esse trabalho teve como foco principal a apresentação de modelos computacionais para relés digitais de proteção. Foi feito um estudo sobre a composição estrutural do relé digital, além das técnicas de processamento de sinal e estimação de fasores. Foi proposta a utilização da ferramenta *Simulink/Matlab* para a implementação desse projeto, com a criação de diagramas em blocos que permitissem simular a operação de um relé digital. No que diz respeito ao processamento de sinais, foi feito um estudo sobre as técnicas de filtragem analógica, de forma a prevenir o fenômeno de *aliasing*. Além disso, estudou-se como realizar a conversão A/D, assim como quais os cuidados que devem ser tomados em relação à taxa de amostragem. Para a estimação de fasores, optou-se pelo método baseado no algoritmo de Fourier. Além de ser utilizado para estimar os fasores, o método também funciona como um filtro digital, isolando a componente de frequência desejada.

Analisou-se então a aplicação de lógicas de proteção de sobrecorrente, distância e diferencial, apresentando seus conceitos e como modelar relés digitais para cada um desses casos. Entendendo quais são os mecanismos pelos quais a proteção é realizada, foi possível implementar um modelo para cada tipo de relé. Os modelos foram então inseridos em sistemas elétricos, de forma a simular o seu comportamento durante curtos circuitos. Foram verificadas as consequências do curto, e a atuação correta dos relés em relação à seletividade e coordenação.

Os testes realizados foram satisfatórios, no sentido que apresentaram os resultados que eram esperados. Para todos os casos o relé operou de acordo com o que era esperado pela teoria e no tempo configurado nos casos dos relés temporizados. Uma ressalva deve ser feita para o caso do relé de sobrecorrente, em que faltou verificar a atuação da curva de tempo inverso. O relé de distância apresentou um comportamento sólido quanto à sua coordenação por zonas. Por fim, o relé diferencial apresentou um resultado satisfatório em relação a todos os testes realizados no transformador de potência.

De uma forma geral, pode-se afirmar que os modelos desenvolvidos tanto para as funções de proteção, quanto para o processamento de sinais e estimação de fasores foram reproduzidos de forma verossímil ao embasamento teórico através de modelos computacionais. Deve-se ressaltar que o estudo realizado durante esse trabalho permitiu ao aluno um entendimento mais aprofundado sobre a matéria de proteção de sistemas elétricos. Além disso, através do material desenvolvido é possível que os alunos do curso de proteção possam aplicar e visualizar de forma prática os conceitos apresentados na sala

de aula, facilitando assim o ensino da matéria.

5.2 Trabalhos futuros

Algumas sugestões são apresentadas para o desenvolvimento futuro desse trabalho:

- a) Aplicacao de outros algoritmos de estimação de fasores, tais como Walsh, Miki e Mikano, dentre outros;
- b) Desenvolvimento de outros modelos de relé, como relés de sobre ou subtenção, frequência, etc.;
- c) Utilizar relés de proteção em conjunto, de forma a garantir diferentes níveis de proteção para o mesmo equipamento ou linha de transmissão;
- d) Desenvolver um sistema de comunicação entre os relés, de forma a implantar a teleproteção;
- e) Desenvolver outros sistemas para aplicar técnicas de proteção, como proteção a geradores, motores, sistemas complexos, etc.

Referências

- ANDERSON, P. M. Power system protection. McGraw-Hill New York, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 45.
- CAMINHA, A. C. *Introdução à proteção dos sistemas elétricos*. [S.l.]: E. Blucher, 1977. Citado na página 42.
- GIANNY, S.; PEREZ, A. Modeling relays for power system protection studies. *University of Saskatchewan*, 2006. Citado na página 33.
- JAEGER, R. C. Tutorial-analog data acquisition technology. 2. analog-to-digital conversion. *IEEE MICRO*, IEEE COMPUTER SOC 10662 LOS VAQUEROS CIRCLE, PO BOX 3014, LOS ALAMITOS, CA 90720-1314, v. 2, n. 3, p. 46–56, 1982. Citado na página 34.
- JAY, F.; GOETZ, J. Ieee standard dictionary of electrical and electronics terms. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. [S.l.], 1988. Citado na página 25.
- KEZUNOVIC, M.; REN, J.; LOTFIFARD, S. *Design, modeling and evaluation of protective relays for power systems*. [S.l.]: Springer, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 35.
- KINDERMANN, G. Proteção de sistemas elétricos de potência. *Florianópolis: UFSC*, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 70.
- LENZ, E. P. et al. Avaliação do desempenho de relés digitais de proteção de unidades geradoras utilizando registros de oscilografia e sequência de eventos. Florianópolis, SC, 2009. Citado na página 39.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. Circuitos elétricos, 8a. edição. *LTC–Livros Técnicos e Científicos Editora SA (Bibliografia Complementar)*, 2008. Citado na página 36.
- OPPENHEIM, A. V. *Sinais e sistemas*. [S.l.]: Prentice-Hall, 2010. Citado na página 32.
- PEREZ, S. G. A. *Modeling relays for power system protection studies*. Tese (Doutorado), 2006. Citado na página 45.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer relaying for power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 36, 38 e 39.
- RUSH, P. Network protection & automation guide. *Alstom T&D Energy Automation & Information*, p. 171–191, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 42.
- SACHDEV, M. et al. Microprocessor relays and protection systems. *IEEE tutorial course text*, v. 88, 1988. Citado na página 33.
- SALLES, N. J. d. et al. Modelagem e análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos. [sn], 2007. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 41.

SIDHU, T. Relay software models for use with electromagnetic transient analysis programs. *ELECTRA*, v. 1, n. 226, p. 48–54, 2006. Citado na página 36.

SILVA, K. M.; SOUZA, B. A.; NEVES, W. L. Um algoritmo de estimação de fasores para a proteção de distância de linhas de transmissão. Citado na página 37.

SOARES, A. H. M. *Metodologia computacional para coordenação automática de dispositivos de proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos industriais*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado na página 30.