

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LEANDRO OSADZUK DOS SANTOS

**SIMULAÇÕES E AJUSTES DE FUNÇÕES DE PROTEÇÃO PARA
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2012

LEANDRO OSADZUK DOS SANTOS

**SIMULAÇÕES E AJUSTES DE FUNÇÕES DE PROTEÇÃO PARA
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica–COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Moreto.

PATO BRANCO

2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me iluminado nessa jornada. Um agradecimento especial a minha família que sempre estiveram comigo nos momentos difíceis.

Ao professor orientador Miguel Moreto pelo incentivo e dedicação para a realização deste trabalho. Agradeço também aos meus amigos pelo convívio e amizade durante o curso.

RESUMO

DOS SANTOS, Leandro Osadzuk. Simulações e ajustes de funções de proteção para sistemas elétricos de potência. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2012.

Este trabalho apresenta um estudo das funções de proteção de sistemas elétricos de potência, visando à modelagem computacional das principais funções de proteção. É de grande importância que o sistema de proteção opere de maneira correta de modo que as proteções mantenham a devida coordenação e seletividade. Sendo assim, é fundamental que o ajuste das mesmas seja feito de maneira adequada a atender esses requisitos do sistema. Nesse sentido, uma ferramenta computacional pode ser de grande utilidade para análise da operação da proteção. Pretende-se no presente trabalho apresentar modelos computacionais de algumas funções de proteção de tal forma que o usuário possa ajustá-las e verificar os desempenhos obtidos a partir dos dados de simulação ou registrados no sistema elétrico. Este trabalho também poderá ser utilizado como uma ferramenta educacional para os estudos sobre funções de proteção.

Palavras-chave: Sistemas de proteção, relé e sistemas elétricos de potência.

ABSTRACT

DOS SANTOS, Leandro Osadzuk. Simulações e ajustes de funções de proteção para sistemas elétricos de potência. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2012.

This work presents a study of electrical power systems protective functions, focusing on computer modeling of each of functions discussed on the course of the work. It is very important that the protection system operates correctly in order to keep the coordination and selectivity. Therefore, it is essential that the setting of a protection functions is done properly to meet these system requirements. Thus, a computational tool can be very useful for analysis of protection operation. It's intended in this work to present some computational models of protection functions such that the user can adjust them and check the performance obtained from simulated or recorded data from the electrical system. This work may also be used as an educational tool for studies on protection functions.

Keywords: Systems of protection, relay and power system.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos de um dispositivo de proteção funcional.	7
Figura 2 - Sistema Radial de Proteção.....	12
Figura 3 - Magnitude da corrente de falta em função da localização da falta.	13
Figura 4 - Curva tempo inverso do relé de sobrecorrente.	14
Figura 5 - Curva típica de um relé de sobrecorrente comercial.....	15
Figura 6 - Representação do relé de distância.....	17
Figura 7 - Caracterização do relé de distância.	18
Figura 8–Exemplo de uso do relé de impedância.	18
Figura 9 - Diagrama $R+jX$ do relé de admitância.	19
Figura 10 - Valor real de ajuste do relé de admitância.	20
Figura 11 - Regulagem dos de atuação do relé de admitância.	21
Figura 12- Diagrama de Atuação do Relé de Reatância.	21
Figura 13 - Lugar geométrico das impedâncias de operação do Relé de Reatância.	22
Figura 14 – Conexão típica de um relé diferencial.	23
Figura 15 – Relé diferencial Percentual.	23
Figura 16 - Operação Característica do relé percentual diferencial.	24
Figura 17 - Diagrama de blocos do relé digital diferencial.....	27
Figura 18 - Discretização das correntes I_1 e I_2	28
Figura 19 - Cálculo das correntes de operação e restrição.....	29
Figura 20–Verificação das condições para atuação do relé diferencial.....	30
Figura 21 - Interface Gráfica do relé diferencial.	31
Figura 22 - Parâmetros para ajuste do relé diferencial.....	31
Figura 24 - Diagrama de blocos do relé de sobrecorrente.	32
Figura 24 - Função do tempo de atuação do relé de sobrecorrente.....	34
Figura 25 - Atraso da atuação do relé.	34
Figura 26 - Interface gráfica do relé de sobrecorrente.	35
Figura 27 - Parâmetros do relé de sobrecorrente.....	35
Figura 28 - Aba <i>initialization</i> do relé de sobrecorrente.	36
Figura 29 - Relé de distância.....	37
Figura 30 - Processamento dos Sinais de Tensão e Corrente.....	37

Figura 31 - Comparação entre impedância medida e impedâncias das zonas de proteção.	38
Figura 32 - Regulagem e temporização.	39
Figura 33 - Interface gráfica do relé de distância.	40
Figura 34 - Parâmetros do relé de distância.....	41
Figura 35 - Interface gráfica do bloco <i>Three-Phase Fault</i> com os respectivos dados definidos.....	42
Figura 36 - Sistema com a proteção do relé diferencial com curto circuito no lado de baixa tensão do transformador de potência.	43
Figura 37 - Corrente medida no lado de alta tensão do transformador trifásico.....	44
Figura 38 - Corrente medida no lado de baixa tensão do transformador trifásico.	44
Figura 39 - Teste de atuação do relé diferencial.	46
Figura 40 - Sistema com a proteção do relé diferencial com curto circuito no lado de alta tensão do transformador de potência	47
Figura 41 - <i>Trip</i> para o curto circuito localizado no lado de alta tensão do transformador.....	48
Figura 42-Sistema com a proteção do relé diferencial com curto circuito fora da região de proteção.	48
Figura 43 - Teste de atuação do relé para falta fora da região de proteção.....	49
Figura 44 - Sistema elétrico com relé de sobrecorrente.....	50
Figura 45 - Teste no sistema com uma falta na barra B1.....	50
Figura 46 - Forma de onda da corrente do sistema com curto circuito.	51
Figura 47 - <i>Trip</i> para um curto circuito na Barra B1.	52
Figura 48 - Teste no sistema com uma falta na linha entre as barras B1 e B2.	53
Figura 50 - Forma de onda da corrente com curto circuito na linha de transmissão.	53
Figura 50 - <i>Trip</i> para o curto circuito localizado na linha de transmissão.....	54
Figura 51 - Sistema elétrico com relé de distância.....	55
Figura 52 - Forma de onda da corrente para curto circuito.	56
Figura 53 - Simulação de curto circuito na primeira linha de transmissão em 49 km.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes da Expressão 2.3.....	16
Tabela 2 - Parâmetros da linha de transmissão.....	55
Tabela 3 - Impedância primária das três linhas de transmissão.....	57
Tabela 4 - Testes de curto circuito em diferentes posições da linha de transmissão.	58

LISTAS DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SEP	Sistema Elétrico de Potência
LT	Linhas de Transmissão
IEC	<i>Internacional Electrotechnical Comission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Enginners</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1 MOTIVAÇÕES	9
1.2 OBJETIVOS	9
1.2.1 Objetivo Geral	9
1.2.2 Objetivos Específicos	9
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	9
2. PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	11
2.1 RELÉ DE SOBRECORRENTE	12
2.2 RELÉ DE DISTÂNCIA	17
2.2.1 Relé de Impedância	18
2.2.2 Relé de Admitância	19
2.2.3 Relé de Reatância.....	21
2.3 RELÉ DIFERENCIAL	22
2.4 ESTIMAÇÃO DE FASORES PARA SISTEMAS DE PROTEÇÃO	24
2.4.1 ALgoritmo de fourier.....	25
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	25
3. MODELAGEM DOS RELÉS DE PROTEÇÃO	27
3.1 MODELO DO RELÉ DE DIFERENCIAL.....	27
3.2 MODELO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE.....	32
3.3 MODELO DO RELÉ DE DISTÂNCIA	36
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	41
4. RESULTADOS	42
4.1 SISTEMA COM A PROTEÇÃO DO RELÉ DIFERENCIAL.....	43
4.1.1 Teste de curto circuito no lado de baixa tensão do transformador	43
4.1.2 Teste de curto circuito no lado de alta tensão do transformador.....	47
4.1.3 Teste de curto circuito fora da região de proteção	48

4.2	SISTEMA COM A PROTEÇÃO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE.....	49
4.2.1	Teste de curto circuito na Barra B1	50
4.2.2	Teste de curto circuito na linha de transmissão	53
4.3	SISTEMA COM A PROTEÇÃO DO RELÉ DE DISTÂNCIA	54
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	59
5.	CONCLUSÕES.....	61
5.1	TRABALHOS FUTUROS	62
6.	REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

O investimento envolvido no sistema de energia tanto para geração, transmissão e distribuição é elevado, fazendo com que as precauções apropriadas sejam tomadas para que o equipamento opere adequadamente bem como esteja protegido contra possíveis acidentes. A maior parte dos condutores nos geradores, transformadores ou linhas de transmissão (LT) são feitos de cobre (ou alumínio) e isolados para a passagem da corrente elétrica. O isolamento pode ser danificado pela temperatura, tempo ou algum acidente físico (curto circuito). Quando esses problemas ocorrem podem acarretar grandes danos devido às elevadas correntes de curto circuito, além dos prejuízos devido à queda de tensão que podem resultar em interrupções do fornecimento de energia elétrica (Warrington, 1968).

Dispositivos de proteção consistem de vários elementos que tem a finalidade de verificar as condições atuais em que o sistema está operando, analisar a normalidade dos parâmetros observados e tomar as medidas cabíveis. Esses elementos são representados na Figura 1 (Anderson, 1999).

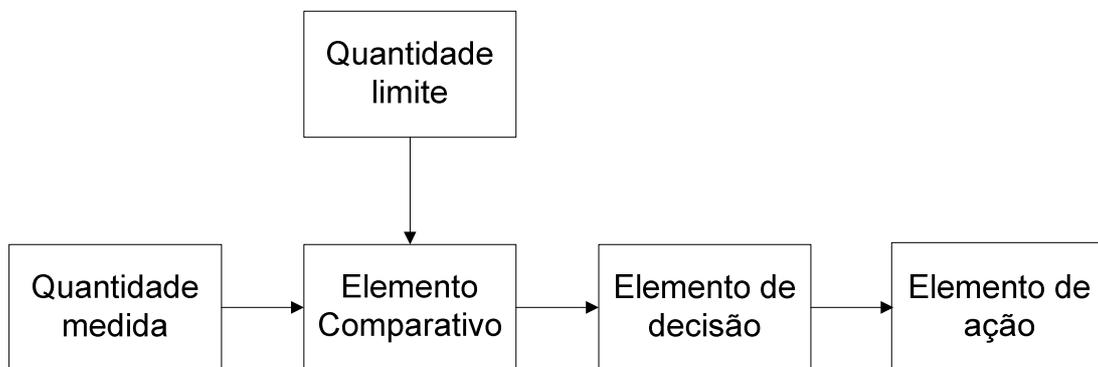


Figura 1 - Elementos de um dispositivo de proteção funcional.

Fonte: Anderson (1999).

O sistema de proteção realiza medidas no Sistema Elétrico de Potência (SEP), tais como de tensão e corrente e as compara com valores limites que são calculados pelos engenheiros de proteção. Essas comparações podem envolver valores de tempo, para determinar a permanência da condição bem como exigir outras verificações no sistema em outros pontos da rede. Finalmente, se todas as verificações são satisfeitas, uma determinada ação é executada, o que resulta na maioria das vezes, na abertura de um disjuntor para isolar uma parte da rede (Anderson, 1999).

A finalidade de relés proteção é operar os disjuntores de forma correta, para que desligue apenas o equipamento defeituoso do sistema o mais rápido possível. O ideal seria que o relé pudesse antecipar as falhas, no entanto, isso não ocorre, exceto quando a causa da falha cria um efeito que pode operar um relé de proteção. (Warrington, 1968). No entanto, há um exemplo de relé se enquadra nessa categoria, o relé detector de gás, utilizado para proteção de transformadores, no qual a acumulação dos gases gerados no óleo isolante provoca a indicação de um defeito. (Warrington, 1968).

Os projetos de um SEP são feitos para que condições anormais que possam danificar uma parte do sistema sejam detectadas e corrigidas. Geralmente, essas condições anormais são em decorrência de correntes de curto circuito. Com isso, é de grande importância que a proteção consiga localizar o ponto em que está ocorrendo o problema e em seguida desligar o equipamento danificado. (Tahan, et al., 2005).

As simulações são utilizadas atualmente para cálculos que demonstram a resposta para determinado tipo de proteção. Com isso, pode-se fazer o dimensionamento da proteção em relação a uma situação de curto circuito, e verificar as causas e consequências através de uma análise dos dados do equipamento de proteção.

Pode-se fazer uma análise da proteção utilizando um *software* de simulação. Nestes sistemas simulados, as funções de proteção são representadas como componentes específicos na forma de “blocos”. Para que a simulação possa ser realizada, a base de dados deve especificar todas as características técnicas dos relés. Portanto, para cada função há determinados tipos de parâmetros que se relacionam com o funcionamento do relé (Tahan, et al., 2005).

A maioria das funções de proteção utiliza como grandeza de entrada os fasores de frequência fundamental que representam as correntes e tensões nos pontos de medição onde estão instalados os transdutores, como transformadores de corrente e de potencial. Sendo assim, a estimação de fasores é parte fundamental para a simulação dos relés (Lenz, 2009). Alguns dos métodos que podem ser utilizados são os algoritmos de Fourier e o método dos mínimos quadrados que podem fornecer o módulo e o ângulo de uma determinada grandeza.

1.1 MOTIVAÇÕES

A motivação para realizar este trabalho se deve ao fato de que muitas vezes não há disponibilidade de equipamentos e condições para realizações de testes de ajustes em sistemas de proteção. Assim com este trabalho espera-se obter uma forma mais simples para verificar os ajustes e realizar análises das funções de proteção. Deve-se ressaltar ainda a questão educacional e didática, em que os modelos computacionais podem ser disponibilizados aos estudantes para aprimorar o aprendizado de sistemas de proteção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Elaboração de modelos computacionais de funções de proteção baseados em fasores das componentes fundamentais de correntes e tensões e sua aplicação em um programa de simulação de curtos-circuitos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar as funções de proteção propostas;
- Criar modelos na forma de “blocos” representando as funções de proteção;
- Definir uma forma de entrada de dados de ajuste;
- Testar os modelos em um programa de simulação de curto circuito.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 aborda as funções de proteção a serem estudadas no decorrer do trabalho. São apresentadas as características, as formas de ajustes para que os relés possam atuar de maneira que possam detectar o problema rapidamente não

causando danos a um elemento do sistema. No capítulo 3 será demonstrada como foi a modelagem computacional de cada uma das funções de proteção. A seguir, no capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações do projeto, fazendo a apresentação das características de cada um dos relés, além de demonstrar os ajustes dos relés. As conclusões e propostas para trabalhos futuros são apresentados no capítulo 5.

2. PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Os sistemas de proteção têm evoluído ao longo dos anos, a partir de dispositivos relativamente simples com capacidade limitada para sistemas que envolvem um grau de complexidade de *hardware* maior. Atualmente sistemas de proteção são mais seletivos para detecção e operação, e muitas vezes requerem um enfoque analítico maior para aplicação (Anderson, 1999).

As funções de proteção em sistemas de potência geralmente são feitas a partir de relés. Segundo Caminha (2009), a associação brasileira de normas técnicas (ABNT) define um relé como um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento ou do circuito em que ele está ligado, ou em outro equipamento ou circuito associado (Caminha, 2009).

Os relés podem ser convencionais ou digitais. Os relés convencionais têm um sistema de monitoramento que permite mostrar as ações dos relés para o operador encarregado. Este tipo de relé tem as medidas convertidas em sinais similares de baixa tensão que são então comparados diretamente com valores de referência para proceder a uma saída desejada. Já os relés digitais podem ser interligados ao sistema de supervisão e controle por intermédio de comunicação de dados, permitindo fazer novas operações, além de receber e armazenar dados para análise posterior. Outra característica é que suas medidas são manipuladas de forma analógica e subsequentemente convertidas em sinais binários (Silva M. S., 2002).

Os relés a serem estudados neste trabalho são:

- Relé de sobrecorrente;
- Relé de distância;
- Relé diferencial.

A seguir, essas funções de proteção são apresentadas em detalhes.

2.1 RELÉ DE SOBRECORRENTE

A ocorrência de uma falta no sistema elétrico de potência tem, em geral, como característica a ocorrência de uma corrente de curto circuito, também conhecida como corrente de falta. A corrente de falta é, em geral, maior que a corrente pré-falta. Sendo assim, um princípio simples de atuação do relé é o que utiliza a magnitude da corrente para indicar a falta. 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).

Um exemplo de proteção é a aplicação do relé de sobrecorrente para proteção de uma linha de transmissão radial. Segundo (Phadke & Thorp, 2009) para que se caracterize a ocorrência de uma falta dentro da zona de proteção do relé de sobrecorrente (região tracejada da Figura 2), a mínima corrente de falta dentro da zona de proteção deve ser maior que a máxima corrente possível de carga. Nota-se, na proteção de sistemas radiais, que a proteção é feita apenas em um lado da linha, no sentido da corrente de carga.

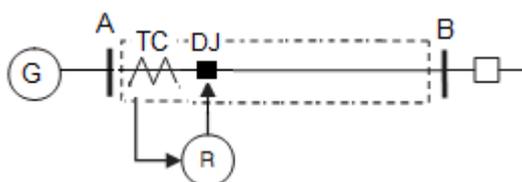


Figura 2 - Sistema Radial de Proteção.

Fonte: PHADKE e THORP (2009).

Se a corrente de falta mínima possível dentro da zona de proteção é maior do que a corrente de carga possível, pode-se definir o funcionamento do relé da seguinte forma:

Corrente de falta na zona de proteção, *trip*:

$$|I| \geq I_p \quad (2.1)$$

Indica-se que está ocorrendo uma falha na zona de proteção do relé, necessitando a abertura do disjuntor (*trip*). Sem corrente de falta na zona de proteção, não há *trip*:

Sem corrente de falta:

$$|I| < I_p \quad (2.2)$$

Onde I é a corrente medida pelo relé, ou seja, a corrente de defeito e I_p é a corrente de ajuste do relé, também conhecida como corrente de *pick-up*. É importante ressaltar que a magnitude da corrente deve ser derivada de uma forma de onda AC que podem incluir uma componente de decaimento exponencial, cuja magnitude depende do instante da ocorrência da falta. A Figura 3 apresenta um esboço dessa componente que é superposta a corrente AC de falta (conhecida como a componente simétrica da corrente de falta) em função da localização da falta. A característica do relé dada pela equação 2.1 é definida em termos da corrente de falta simétrica.



Figura 3 - Magnitude da corrente de falta em função da localização da falta.

Fonte: PHADKE e THORP.

Os dois tipos mais comuns de relés de sobrecorrente são o temporizado e o instantâneo (Lenz, 2009). A proteção de sobrecorrente instantânea é baseada em um valor limite de corrente acima da nominal. Se este valor violar o limite pré-estabelecido, a proteção vai atuar instantaneamente, enviando um sinal para o desligamento do disjuntor (Lenz, 2009). Diferente do relé instantâneo, o temporizado usa a característica de temporização no momento de atuação, criando um atraso de tempo. Dentre os relés de sobrecorrente temporizados, o mais utilizado é o relé de tempo inverso. Para realizar o ajuste de tempo do relé de sobrecorrente de tempo inverso, não se escolhe o tempo de atuação, mas sim a curva de atuação. Esta escolha depende de como é realizada a coordenação dos relés. A coordenação depende de uma cadeia de tempo diferente para a mesma corrente de curto circuito. Isso garante a seletividade de operação dos disjuntores de modo a desligar o menor número possível de elementos do SEP (Kindermann, 1999).

A Figura 4 apresenta uma curva de operação de relé de sobrecorrente de tempo inverso. A corrente no eixo das abscissas é expressa em termos de múltiplos da corrente de ajuste.

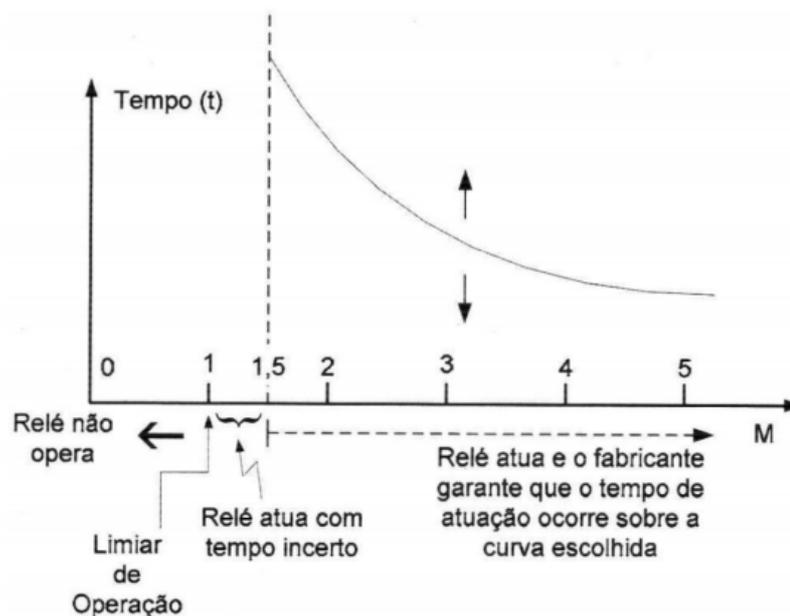


Figura 4 - Curva tempo inverso do relé de sobrecorrente.

Fonte: Kindermann (2009).

O limiar de operação deste relé é em $M=1$, ou seja, corresponde a uma corrente de operação igual à corrente do seu ajuste (nos relés eletromecânicos esse ajuste é feito através da escolha de *taps* na bobina de operação do relé). Assim, entre 0 e 1 o relé não opera. Entre o múltiplo 1 e 1,5 o relé opera com um pequeno torque (termo oriundo dos relés eletromecânicos), não sendo garantido seu tempo de atuação. Para valores a partir do múltiplo 1,5 o relé irá atuar e o fabricante garante que o tempo de atuação ocorre sobre a curva escolhida (Kindermann, 1999).

Um exemplo de um conjunto de curvas de Tempo x Corrente de um relé comercial é mostrado na Figura 5. Como se trata de um relé eletromecânico, as curvas receberam ao longo do tempo normalizações de acordo com suas inclinações. Estas normalizações foram feitas e introduzidas em diversos países. Deste modo possibilitou-se enquadrar as curvas de atuação dos relés mesmo que fossem de fabricantes diferentes (Kindermann, 1999).

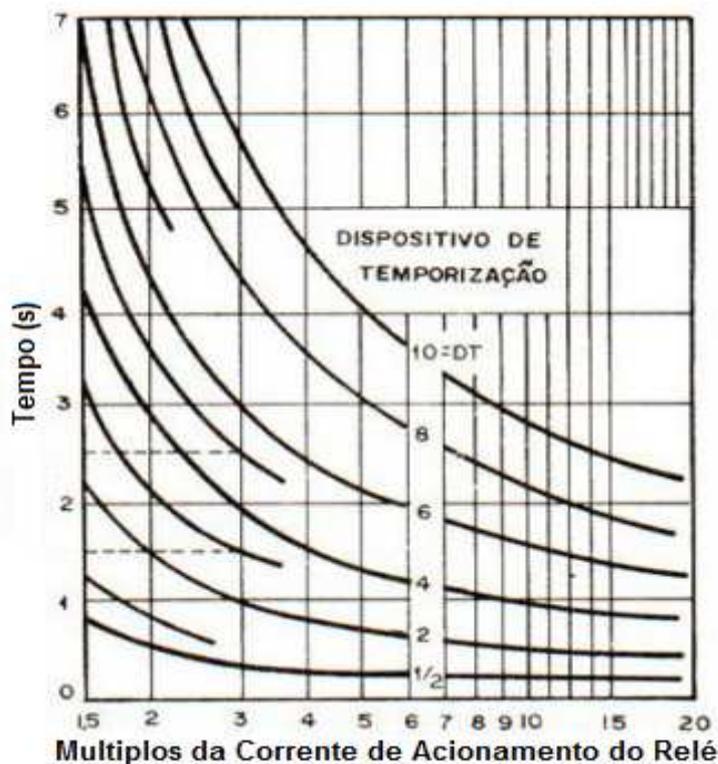


Figura 5 - Curva típica de um relé de sobrecorrente comercial.

Fonte: Kindermann (2009).

Conforme o ajuste da corrente e o valor da corrente medida pelo relé a função contagem de tempo é iniciada gerando o comando *trip* da unidade após o tempo conforme a curva selecionada. A contagem de tempo obedece a uma função inversamente proporcional entre o tempo e a corrente, ou seja, quanto menor for o valor da corrente maior será o tempo de atuação do relé e para valores mais altos de correntes o tempo será menor (Lenz, 2009).

No relé digital, não é necessário as curvas de tempo em papel, pois o relé digital opera associando a curva a uma função matemática. A equação 2.3 expressa as curva tempo em relação aos múltiplos dos relés eletromecânicos, estabelecida pela IEC (*Internacional Electrotechnical Comission*) e IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*) (Kindermann, 1999).

$$t_{\text{atuacao do rele}} = \frac{\beta \cdot D}{M^{\alpha} - \beta} + L \cdot D \quad (2.3)$$

Onde:

D : múltiplo de tempo das curvas de tempo do relé eletromecânico.

$t_{\text{atuacao do rele}}$: tempo de atuação do relé em segundos (tempo de *trip*)

$$M = \frac{I(t)}{I_{\text{ajuste}}}: \text{m\u00faltiplo do rel\u00e9}$$

$I(t)$: corrente medida pelo rel\u00e9

I_{ajuste} : corrente de ajuste do rel\u00e9

K, α , β e L: coeficientes da equa\u00e7\u00e3o 2.3 fornecidos pela Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes da Express\u00e3o 2.3

Fonte: (Kindermann, 1999) e (Salles, 2007).

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
IEEE	Moderadamente Inversa	0.02	1.14	1
	Muito Inversa	2	4.91	1
	Extremamente Inversa	2	1.217	1
ANSI	Inversa	0.02	0.0226	0.0104
	Moderadamente Inversa	2	0.180	5.95
	Muito Inversa	2	0.0963	3.88
	Extremamente Inversa	2	0.0352	5.67

Lembrando, que $M(t)=I(t)/I_{\text{ajuste}}$ \u00e9 o m\u00faltiplo da corrente de ajuste do rel\u00e9. A corrente $I(t)$ \u00e9 a magnitude do fasor da corrente estimada a partir das medidas.

Para que o rel\u00e9 de sobrecorrente opere de forma segura e adequada, \u00e9 necess\u00e1rio fazer o ajuste da corrente do rel\u00e9 de tal forma que atenda a seguinte inequa\u00e7\u00e3o (Kindermann, 1999):

$$(1,4 \text{ a } 1,5) \frac{I_{\text{nominal de carga}}}{RTC} \leq I_{\text{ajuste do rel\u00e9}} \leq \frac{I_{\text{curto m\u00ednimo no final do circuito protegido}}}{(1,4 \text{ a } 1,5) \times RTC} \quad (2.4)$$

Onde:

$$a = \begin{cases} 1,1 & \text{para rel\u00e9 digital} \\ 1,5 & \text{para rel\u00e9 eletromec\u00e2nico} \end{cases}$$

RTC : Relação de transformação do transformador de corrente

$I_{\text{nominal de carga}}$: Corrente de carga

$I_{\text{ajuste do relé}}$: Corrente de ajuste do relé

$I_{\text{curto mínimo no final do circuito protegido}}$: Corrente de curto circuito mínima

A equação 2.4 descreve a faixa de proteção do relé de sobrecorrente, ou seja, o relé deve operar para uma corrente qualquer que está na faixa protegida. No momento de ajustar o relé deve-se escolher a corrente de ajuste do relé o mais próximo possível da limitação inferior. Desse modo o relé terá maior sensibilidade, e terá um alcance além do final do trecho protegido (Kindermann, 1999).

2.2 RELÉ DE DISTÂNCIA

O princípio básico de operação do relé de distância é baseado na comparação da tensão (V) com a corrente (I) para a obtenção de uma razão entre essas duas grandezas. Da relação entre V e I resulta a impedância $Z=V/I$ ou então admitância que pode ser calculada por $Y=I/V$ e a reatância ($I_m(Z)$). Esses parâmetros medidos e calculados pelo relé dependem diretamente da posição da falta na linha de transmissão. Em função disto, esses relés são chamados de relés de distância (Caminha, 2009).

A representação do relé de distância (código ANSI 21) é mostrada na Figura 6. Verifica-se que o relé utiliza um TC para fazer as medidas de corrente e um TP para medir a tensão.

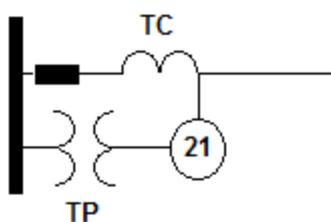


Figura 6 - Representação do relé de distância.

Fonte: Kindermann (2009).

2.2.1 Relé de Impedância

A característica de operação do relé de distância pode ser representada no diagrama fasorial R-X como mostra a Figura 7, que ilustra uma região de atuação de um relé de impedância. A equação 2.4 define a resistência (R) que é representada no eixo real e a reatância (X) no eixo imaginário (Kindermann, 1999).

$$Z = R + j \cdot X \quad (2.4)$$

Quando o parâmetro medido estiver dentro da região que é limitada pelo limiar de operação, o relé vai atuar. O limiar de operação é um círculo que representa a característica do relé definida a partir do módulo do valor da impedância dada pela equação 2.4.



Figura 7 - Caracterização do relé de distância.

Fonte: Kindermann (2009).

A proteção por distância funciona com base em um valor de impedância limite, ou seja, o valor de impedância calculada determina uma zona de proteção. Usualmente, para proteção das linhas de transmissão (LT), o relé possui duas a três zonas de atuação, um exemplo pode ser analisado na Figura 8. A primeira zona de proteção protege cerca de 80 a 85% da LT que corresponde ao raio do círculo da primeira zona. A zona dois tem um ajuste de 100% da LT mais 50 a 60% da LT seguinte. E por último a terceira zona, protege 100% da primeira LT mais 100% da LT seguinte e mais 20 a 30% da próxima LT (Kindermann, 1999).



Figura 8—Exemplo de uso do relé de impedância.

Fonte: Kindermann (2009).

O relé de impedância é conectado ao secundário do TC e TP. Com isso, o valor da impedância vista pelo relé segue a seguinte relação (Kindermann, 1999):

$$Z_{\text{secundario}} = \frac{V_{\text{secundario}}}{I_{\text{secundario}}} \quad (2.5)$$

A tensão e a corrente do secundário do TC e TP são expressas pelas equações 2.6 e 2.7:

$$V_{\text{secundario}} = \frac{V_{\text{primario}}}{RTP} \quad (2.6)$$

$$I_{\text{secundario}} = \frac{I_{\text{primario}}}{RTC} \quad (2.7)$$

Substituindo as equações 2.6 e 2.7 na equação 2.5, tem-se:

$$Z_{\text{secundario}} = \frac{V_{\text{primario}}}{I_{\text{primario}}} \cdot \frac{RTC}{RTP}$$

$$Z_{\text{secundario}} = Z_{\text{primario}} \cdot \frac{RTC}{RTP} \quad (2.8)$$

Onde:

Z_{primario} : Impedância real no primário.

$Z_{\text{secundario}}$: Impedância vista pelo de relé de impedância.

RTC: Relação de transformação do TC.

RTP: Relação de transformação do TP.

2.2.2 Relé de Admitância

O relé de admitância também conhecido como relé MHO, segue a mesma filosofia do relé de impedância, mas com uma característica diferente, dada pela Figura 9



Figura 9 - Diagrama $R+jX$ do relé de admitância.

Fonte: Kindermann (2009).

A circunferência da figura 9 tem as seguintes características:

- Passa pela origem;
- Seu diâmetro vale $Z_{m\acute{a}x} = \frac{K_d}{K_v}$.

Nota-se pela própria circunferência que o relé de admitância é direcional. Isso faz com que o relé atue no defeito cuja impedância esteja dentro do círculo e na frente do ponto de instalação do relé.

O relé de admitância em geral possui três zonas de atuação, e há necessidade de fazer três ajustes. O ajuste é realizado utilizando as mesmas regras que no relé de impedância. Porém, o ajuste do relé deve ser corrigido, pois o ângulo r do relé pode não coincidir com o ângulo da impedância da linha protegida, conforme a Figura 10.

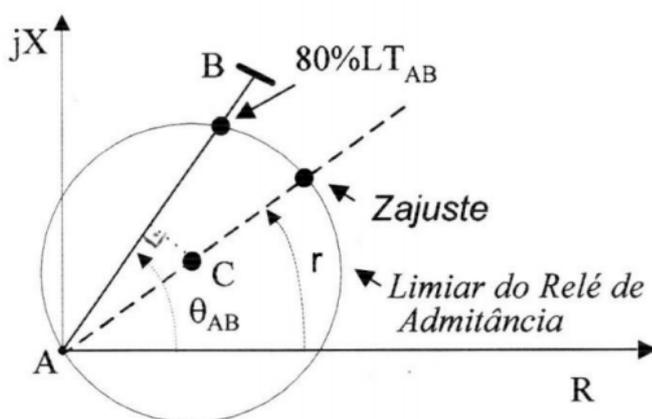


Figura 10 - Valor real de ajuste do relé de admitância.

Fonte: Kindermann (2009).

Para todo defeito na LT_{AB} , a impedância vista pelo relé tem ângulo θ_{AB} . No defeito, se o valor do módulo de impedância for menor que 80% da LT_{AB} o relé atua dentro da 1ª zona. O ajuste do relé é realizado utilizando um fator de correção dado pela equação 2.16 aplicado ao fasor de impedância de ajuste Z_{ajuste} .

$$Z_{ajuste} = \frac{Z_{80\%LTAB}}{\cos(\theta_{AB} - r)} \quad (2.9)$$

Para a segunda e terceira zonas de proteção, a correção do ajuste. A Figura 11 apresenta de forma gráfica os ajustes corrigidos.

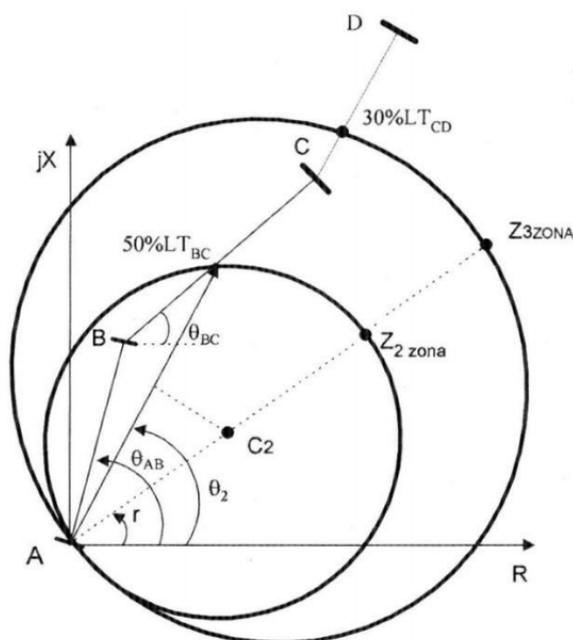


Figura 11 - Regulação dos de atuação do relé de admitância.

Fonte: Kindermann (1999).

2.2.3 Relé de Reatância

O relé de reatância tem a característica de operar com sensibilidade a reatância medida a partir das grandezas obtidas pelos transformadores de potencial e de corrente. A Figura 12 ilustra a característica de atuação do relé de admitância.

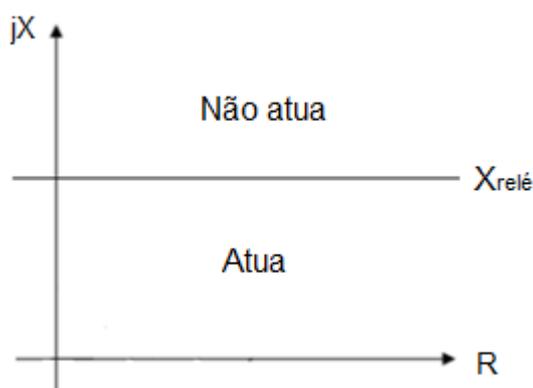


Figura 12- Diagrama de Atuação do Relé de Reatância.

Fonte: Kindermann (2009).

O relé de reatância é útil para proteger o sistema da influência do deslocamento da impedância ocasionado por um arco elétrico. No entanto, o relé de reatância é sensível com a parte imaginária da impedância, isso pode ocasionar erros quando a carga estiver um fator de potência capacitivo. Por este motivo o relé

de reatância deve operar em conjunto com um relé de admitância ajustado em apenas uma zona (Kindermann, 1999), conforme a Figura 13.

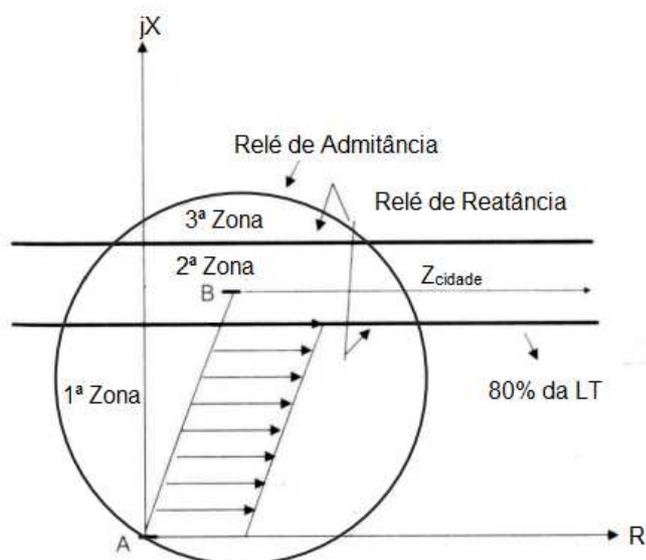


Figura 13 - Lugar geométrico das impedâncias de operação do Relé de Reatância.

Fonte: Kindermann (2009).

2.3 RELÉ DIFERENCIAL

O princípio de funcionamento do relé diferencial consiste em medir a corrente em dois pontos do componente que está sendo protegido. É baseado também na premissa de que a corrente que entra em um nó deve ser igual a que sai deste nó, considerando o elemento protegido como um nó. Ao medir as duas correntes, o relé faz uma verificação se há uma diferença considerável entre os pontos medidos. Caso exista uma diferença grande entre as correntes medidas, há a indicação da existência de uma falta interna entre os pontos medidos fazendo com que a uma corrente de fuga esteja circulando entre fases ou entre fase e terra. Nestes casos a proteção deve atuar de modo a isolar o elemento defeituoso (Lenz, 2009).

Uma conexão comum é mostrada na Figura 14 Desde que não exista nenhuma falha no elemento protegido, a corrente que está entrando (I_1) é exatamente a mesma que sai do elemento (I_2), portanto a diferença entre as correntes é zero. O elemento de proteção pode ser uma linha de transmissão curta

ou um equipamento que possua terminais em que a corrente de entrada e saída possam ser medidos, como transformadores e geradores. Caso houver uma ocorrência de falta no elemento protegido, o relé diferencial irá detectar a diferença entre as correntes (Anderson, 1999).

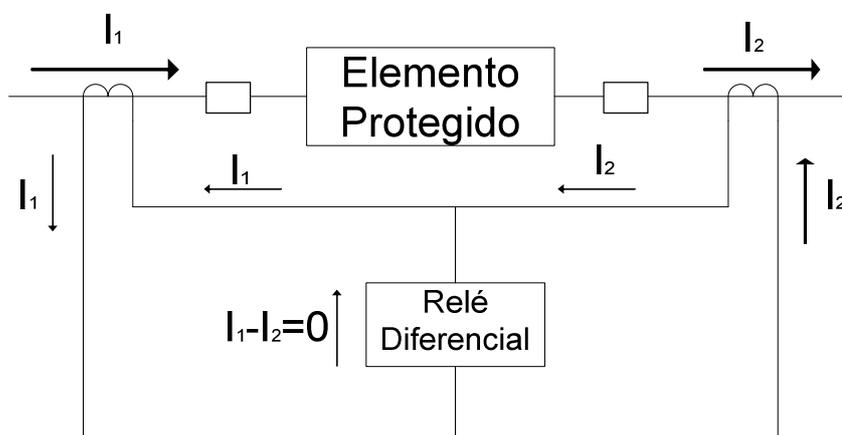


Figura 14 – Conexão típica de um relé diferencial.

Fonte: Anderson (1999).

O esquema de proteção diferencial percentual é o mais utilizado. Seu equivalente eletromecânico é mostrado na Figura 15. O funcionamento é baseado na interação dos torques em uma haste ou disco, gerados por duas bobinas, chamadas de restrição e operação.

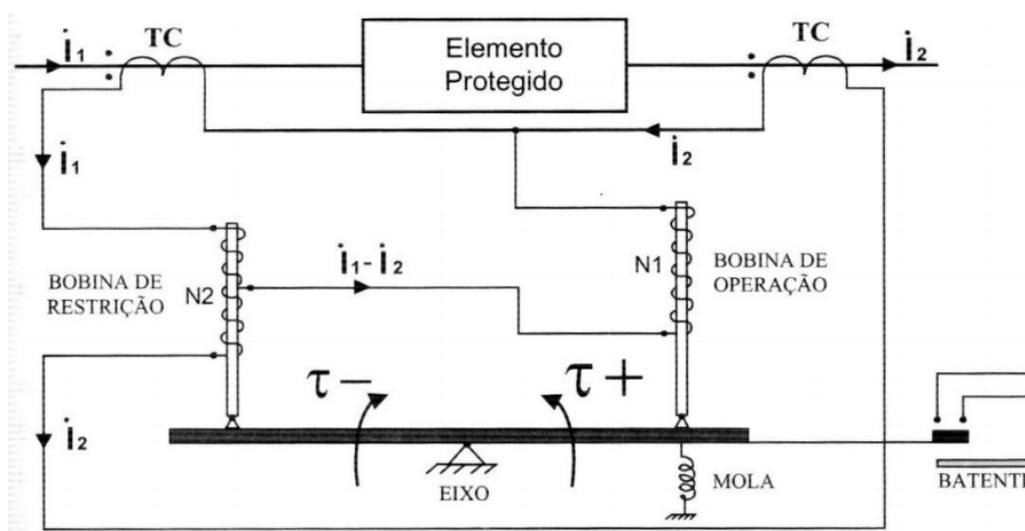


Figura 15 – Relé diferencial Percentual.

Fonte: Kindermann (2009).

Quando opera normalmente, as correntes I_1 e I_2 são iguais, produzindo um campo magnético que atrai o êmbolo da bobina de restrição, criando um torque negativo. Já na bobina de operação, a corrente resultante é $I_1 - I_2 = 0$, ou seja, o torque

é nulo. Com isso, em operação normal (sem falta interna), o torque gerado pela bobina de restrição vai garantir a não operação do relé diferencial (Kindermann, 1999).

Já para o caso de um curto circuito interno, as correntes I_1 e I_2 mudam para a direção em que está ocorrendo o curto circuito. O campo magnético gerado pela corrente I_2 , na metade da bobina de restrição, tem o sentido contrário do campo magnético gerado pela corrente I_1 . Com isso, o campo magnético de restrição é nulo. Já a corrente resultante é dada por $I_1+I_2=2.I_1$ e faz com que a bobina de operação crie um torque positivo fazendo com que o relé diferencial atue. A Figura 16 descreve a operação do relé diferencial percentual (Kindermann, 1999).

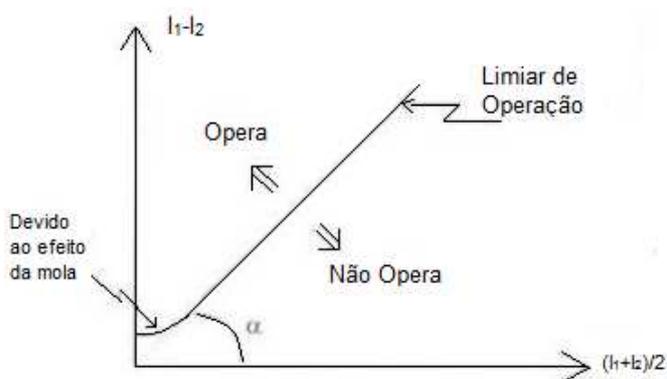


Figura 16 - Operação Característica do relé percentual diferencial.

Fonte: Kindermann (2009).

A relação entre as correntes de restrição e operação é dada pela equação 2.9 (Kindermann, 1999).

$$(I_1 - I_2) = a \times \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right) \quad (2.9)$$

A equação 2.9 é a equação da reta que descreve a operação do relé percentual.

2.4 ESTIMAÇÃO DE FASORES PARA SISTEMAS DE PROTEÇÃO

Para se fazer a estimação de fasores utilizando técnicas de processamento digital de sinais. Em relés de proteção, o método mais conhecido é algoritmo de Fourier.

2.4.1 ALGORITMO DE FOURIER

O algoritmo de Fourier de ciclo completo analisa de forma geral as formas de onda que representam a tensão e a corrente, extraindo a componente fundamental através da convolução entre o sinal e duas funções ortogonais, a função seno e a função cosseno, no período de um ciclo da componente fundamental. Para uma janela de um ciclo de N amostra pode ser demonstrada pela teoria da Transformada de Fourier, que para o instante k-ésimo tem-se (Silva, Souza, & Neves):

$$I_c = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=1}^N I_k \cdot \cos(k \cdot \theta) \quad (2.10)$$

$$I_s = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=1}^N I_k \cdot \sin(k \cdot \theta) \quad (2.11)$$

Sendo $\theta = \frac{2 \cdot \pi}{N}$.

A variável Θ representa o ângulo entre as amostras na frequência fundamental. A função Fourier é a expressão do fasor, cujas componentes ortogonais são I_c e I_s . O módulo e ângulo do fasor correspondente são dados a seguir:

$$|I^{(i)}| = \sqrt{(I_c^{(i)})^2 + (I_s^{(i)})^2} \quad (2.12)$$

$$\varphi^{(i)} = \tan^{-1} \left[\frac{I_s^{(i)}}{I_c^{(i)}} \right] - i \cdot \theta \quad (2.13)$$

Este algoritmo possui uma característica de filtragem, e o sinal de saída é dado de forma precisa mesmo para sinais distorcidos (Silva, Souza, & Neves).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as funções de proteção que serão simuladas. É apresentada também a forma de ajuste de cada uma das funções de proteção, para que se possa fazer a modelagem dos relés a partir das equações

desenvolvidas. Também foi citada a forma de estimar os fasores para calcular o módulo e fase dos sinais de tensão e corrente.

3. MODELAGEM DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os relés de proteção e como a modelagem foi realizada. Os modelos foram desenvolvidos utilizando o *software Simulink/Matlab*.

3.1 MODELO DO RELÉ DE DIFERENCIAL

O diagrama de blocos para o relé diferencial é mostrado na Figura 17.

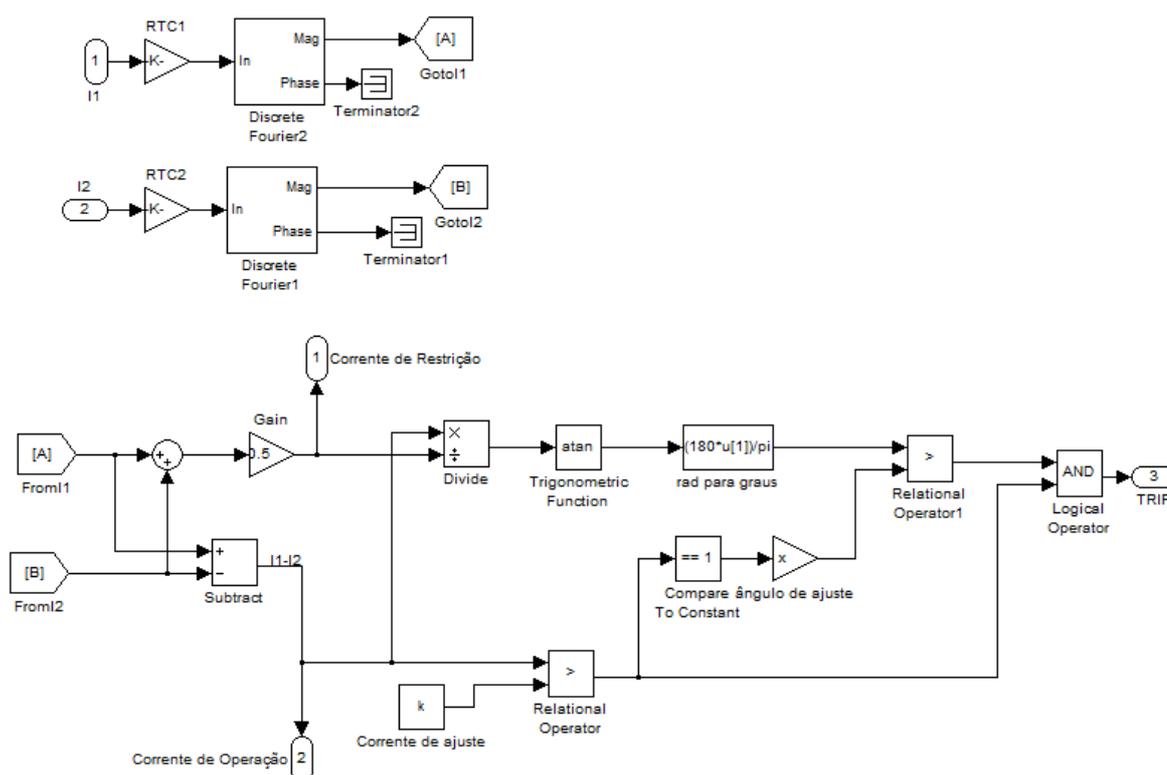


Figura 17 - Diagrama de blocos do relé digital diferencial.

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 18 apresenta a primeira parte do diagrama de blocos do relé diferencial. Nesta parte as correntes medidas do sistema são discretizadas. As correntes (I_1 e I_2) dos circuitos primários são reduzidas ao valor secundário, através dos blocos que representam os transformadores de corrente, RTC1 e RTC2. O ganho dos respectivos blocos é dado pela divisão do produto da relação de

transformação do transformador de corrente RTC com $\sqrt{2}$, por exemplo a corrente I_1 que passa pelo TC1, vai ser calculada da seguinte maneira, $I_1/(\sqrt{2} \cdot RTC1)$. Com esse ganho, será possível estabelecer o valor eficaz da magnitude do fasor de corrente. Em seguida o sinal passa pelo bloco *Discrete Fourier*, e a forma de onda da corrente é discretizada através da aplicação do algoritmo discreto de Fourier. Com isso, é obtida a magnitude e a fase da corrente I_1 e I_2 . Porém, somente o valor da magnitude será utilizado no relé diferencial.

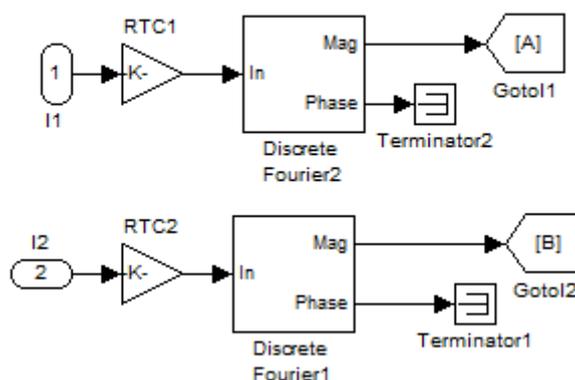


Figura 18 - Discretização das correntes I_1 e I_2 .

Fonte: Autoria própria.

A partir deste ponto, ambas as correntes I_1 e I_2 serão utilizadas para a realização do cálculo das correntes de operação e restrição. Esta etapa é apresentada na Figura 19. O valor da corrente de operação é dado pelo bloco *Subtract*, obtendo o valor $I_1 - I_2$. A corrente de restrição é dada pela soma das correntes I_1 e I_2 multiplicado pelo ganho da constante 0.5, ou seja, $(I_1 + I_2)/2$. A partir do cálculo das correntes de restrição e operação, inicia-se o cálculo que define se o relé vai atuar. A operação é definida utilizando a equação da reta mostrada na Figura 16, ou seja, é necessário calcular o ângulo da reta e realizar uma comparação entre o valor da corrente de operação ($I_1 - I_2$) e o valor da corrente de ajuste.

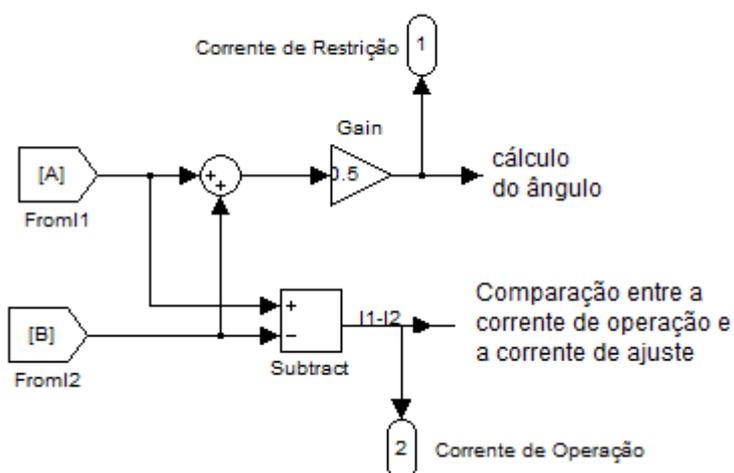


Figura 19 - Cálculo das correntes de operação e restrição.

Fonte: Autoria própria.

O diagrama de blocos da etapa dessa tomada de decisão é mostrado na Figura 20. A comparação da corrente de operação e a de ajuste é realizada pelo bloco *Relational Operator*. A saída deste bloco está na forma *Booleana*, ou seja, se o valor da corrente de operação for maior que o corrente de ajuste, o bloco vai resultar em uma saída igual a 1. Caso contrário, será 0 indicando que a corrente de operação é menor que a corrente de ajuste. Para o caso do valor da saída ser igual a 1, será realizada uma nova comparação com o bloco *Compare to Constant*, a comparação é feita com uma constante igual a 1. A razão desta comparação é para o fato de que a primeira condição da atuação do relé foi satisfeita, ou seja, o valor da corrente de operação foi maior que a corrente de ajuste indicando um nível alto (um), se for zero a primeira condição não foi satisfeita e o relé não vai atuar. Portanto, caso a corrente seja maior que o ajuste, o valor nível alto (um) é submetido a um bloco de ganho. Este ganho é o valor do ângulo de ajuste indicado pelo usuário que será multiplicado com o valor da saída do bloco *Compare to Constant*. Com isso, será dado início do processo da segunda condição para atuação do relé, onde serão comparados os valores do ângulo calculado e do ajuste referenciado pelo usuário. Esta comparação é feita pelo bloco *Relational Operator1*. Este bloco possui duas entradas, uma delas é o ângulo de ajuste e a outra provém da divisão das correntes de operação e restrição. O arco tangente do valor da divisão entre as correntes oferece o valor em radianos do ângulo da reta de ajuste do relé. Para transformar o valor de radianos em graus utiliza-se o bloco *Fcn*. Este bloco utiliza a seguinte equação:

$$\text{Graus} = \frac{180 \cdot \text{rad}}{\pi} \quad (3.1)$$

Feito o cálculo, o valor em graus passa para a outra entrada do bloco *Relational Operator1*. Caso o valor da comparação seja nível alto, pode-se afirmar que o ângulo calculado é maior que o ângulo de ajuste. No entanto, se ocorrer de o ângulo de ajuste for maior o bloco vai ter uma saída em nível baixo. Com isso, a segunda condição para atuação do relé é obtida.

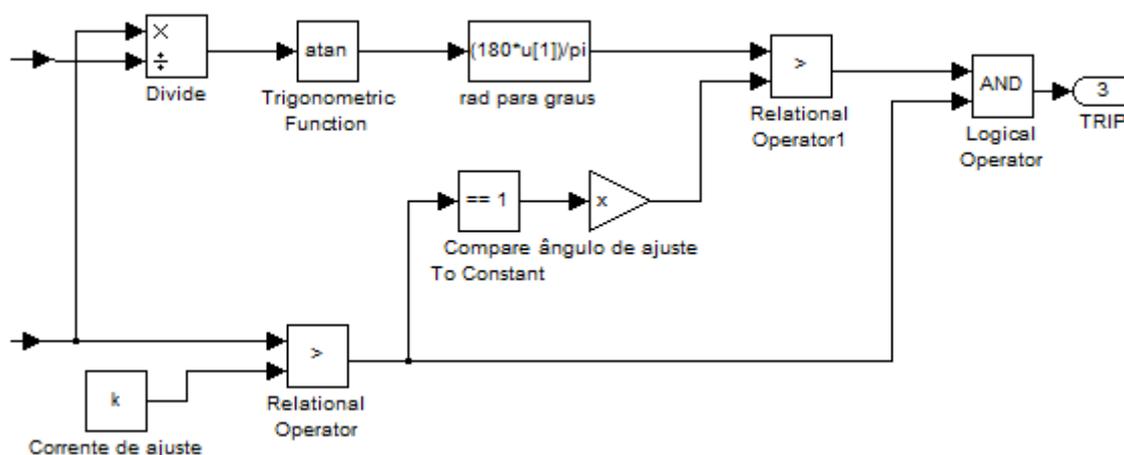


Figura 20–Verificação das condições para atuação do relé diferencial.

Fonte: Autoria própria.

Portanto, as duas condições que devem ser satisfeitas para atuação do relé são:

- Corrente de operação calculada > Corrente de ajuste indicada pelo usuário;
- Ângulo Calculado > Ângulo de ajuste indicado pelo usuário.

Com as duas condições para atuação do relé calculadas, os seus respectivos valores, sendo eles em nível alto ou baixo, são passados para o bloco *Logical Operator*. Este bloco representa uma porta AND, indicando que somente se as duas condições citadas acima forem em nível alto o relé irá operar.

Para facilitar a mudança dos ajustes do relé, criou-se uma interface gráfica que permite ao usuário definir os valores dos ajustes, como mostrado na Figura 21. Os ajustes que podem ser feitos são os valores das relações de transformação dos TCs, além do ângulo de ajuste (graus) e da corrente de ajuste.

Relé Diferencial (mask)

Parameters

Ângulo Limiar de Operação
10

Corrente Inicial de ajuste
1

RTC1
80

RTC2
40

OK Cancel Help Apply

Figura 21 - Interface Gráfica do relé diferencial.

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 22 mostra a caixa de diálogo do editor da interface gráfica, bem como os parâmetros utilizados para o ajuste do relé.

Icon Parameters Initialization Documentation

Dialog parameters

Prompt	Variable	Type	Evaluate	Tunable
Ângulo Limiar de Operação	x	edit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Corrente Inicial de ajuste	k	edit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
RTC1	TC1	edit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
RTC2	TC2	edit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Options for selected parameter

Popups (one per line): In dialog: Show parameter Enable parameter

Dialog callback:

Unmask OK Cancel Help Apply

Figura 22 - Parâmetros para ajuste do relé diferencial.

Fonte: Autoria Própria.

3.2 MODELO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE

O diagrama de blocos implementado no *Simulink/Matlab* do relé de sobrecorrente é apresentado na Figura 24.

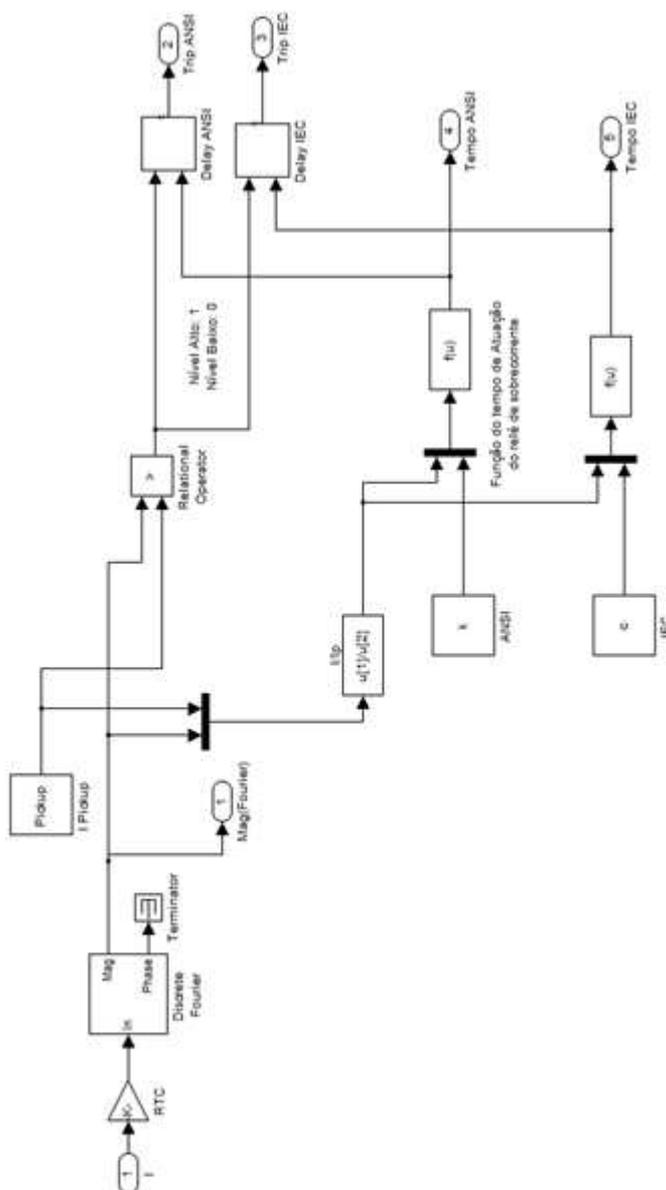


Figura 23 - Diagrama de blocos do relé de sobrecorrente.

Fonte: Autoria Própria.

A corrente I que provém do sistema passa pelo TC representado pelo bloco de ganho RTC, assim como no modelo do relé diferencial. Em seguida, a corrente passa pelo bloco *Discrete Fourier* o qual estima a fase e a magnitude da corrente. Para o cálculo de ajuste do relé de sobrecorrente somente a magnitude do fasor de

corrente será utilizada. O bloco *Pickup*, representa a corrente de ajuste que é fornecida pelo usuário. Esta corrente diz respeito ao valor máximo da corrente de ajuste. Caso o valor da magnitude do fasor da corrente que é medida no sistema seja maior que a corrente *Pickup* o relé irá atuar. Para obter uma comparação entre as duas correntes (Magnitude do fasor e *Pickup*) foi utilizado o bloco *Relational Operator*.

Nota-se que foi utilizado um bloco *Mux* de duas entradas e uma única saída em forma de um vetor de dois elementos. O primeiro elemento se trata da magnitude do fasor da corrente $I(t)$ e outro o valor da corrente *Pickup* I_p , sendo estes valores chamados de $u[1]$ e $u[2]$. Em seguida é possível obter o múltiplo da corrente $M(t)$ através da divisão entre os dois elementos do bloco $M=I(t)/I_p$. Com o valor do múltiplo é possível fazer o cálculo do tempo de atuação do relé de sobrecorrente dado pela equação 2.3 citado no capítulo anterior.

$$t_{\text{atuacao do relé}} = \frac{\beta \cdot D}{M^\alpha - \beta} + L \cdot D$$

Para definir os valores das constantes desta equação foram utilizadas duas normas, a IEC (*International Electrotechnical Commission*) e ANSI (*American National Standards Institute*). Cada uma destas normas define valores diferentes para constantes K , α , β e L , como pode ser visto na Tabela 1 na seção 2.1. Para conciliar os valores das constantes com a equação foi utilizado o bloco *Mux* com duas entradas. Uma das entradas refere-se ao valor do múltiplo M e a outra o valor da constante. Verifica-se que há duas constantes, uma constante k e a outra constante c . A constante k contém os valores da norma IEC e a constante c contém os valores da norma ANSI. A escolha da norma a ser utilizada ficará a critério do usuário na interface de entrada. A Figura 24 mostra a parte do circuito da Figura 24 referente à escolha da norma a ser utilizada para o cálculo do tempo de atuação do relé.

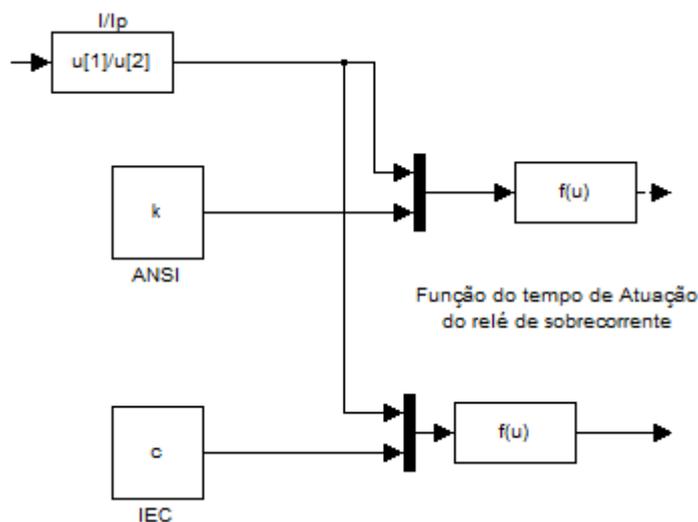


Figura 24 - Função do tempo de atuação do relé de sobrecorrente.

Fonte: Autoria Própria.

Vale ressaltar que a função do bloco $f(u)$ é a mesma, no entanto, um bloco recebe os valores da norma ANSI e outro da norma IEC. Isso foi feito para que seja possível fazer uma análise conjunta das curvas de atuação das duas normas, podendo-se verificar o tempo de atuação para valores diferentes. Após ser obtido o tempo de atuação do relé, o valor passa para o bloco *Delay*. Este bloco tem duas entradas, a primeira recebe o valor binário da atuação do relé, ou seja, se o relé estiver operando vai estar em nível alto caso contrário, nível baixo. A outra entrada é o tempo de atuação calculado. Com isso, a saída do bloco *Delay* será o valor em nível alto, com o atraso da atuação do relé. Na Figura 25 é possível ver a parte do circuito que faz o atraso na atuação do relé.

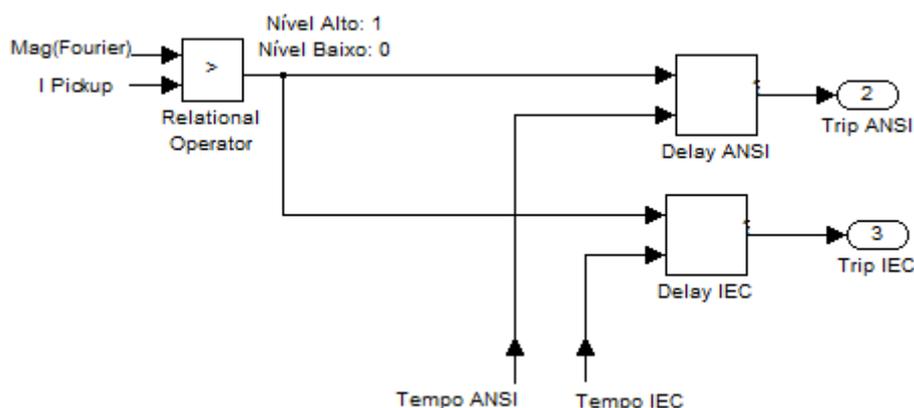


Figura 25 - Atraso da atuação do relé.

Fonte: Autoria própria.

Para que o usuário possa modificar os valores dos parâmetros de entrada do relé de sobrecorrente, foi criada uma interface gráfica como é mostrado na Figura 26. Nesta interface é possível modificar o valor da relação de transformação do transformador de corrente, o valor da corrente de ajuste (*Pickup*) e as curvas de atuação do relé assim como o ajuste da temporização (*Dial*).

Relé de Sobrecorrente (mask)

Parameters

RTC
50

Pickup (A)
9

Curva ANSI Nenhuma

Curva IEC Extremamente Inversa

Dial de Tempo
0.1

OK Cancel Help Apply

Figura 26 - Interface gráfica do relé de sobrecorrente.

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros disponíveis para o usuário bem como as variáveis para fazer a modelagem do relé podem ser vistos na Figura 27.

Icon Parameters Initialization Documentation

Dialog parameters

Prompt	Variable	Type	Evaluate	Tunable
RTC	RTC	edit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Pickup (A)	Pickup	edit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Curva ANSI	curvaANSI	popup	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Curva IEC	curvaIEC	popup	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Dial de Tempo	Dial	edit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Options for selected parameter

Popups (one per line): In dialog: Show parameter Enable parameter

Dialog callback:

Unmask OK Cancel Help Apply

Figura 27 - Parâmetros do relé de sobrecorrente.

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que as curvas do relé estão na forma de *popup*, isso torna possível que o usuário faça a escolha das curvas para valores pré-definidos. As variáveis destas curvas podem ser visualizadas na aba *Initialization*, como mostra a Figura 28. Verifica-se que há duas tabelas. A primeira recebe os valores da norma ANSI e a segunda os valores da norma IEC. A constante k recebe os valores da variável *tabela* assim como a constante c recebe os valores de *tabela2*. Os valores destas tabelas são utilizados para o cálculo do tempo de atuação do relé de sobrecorrente.

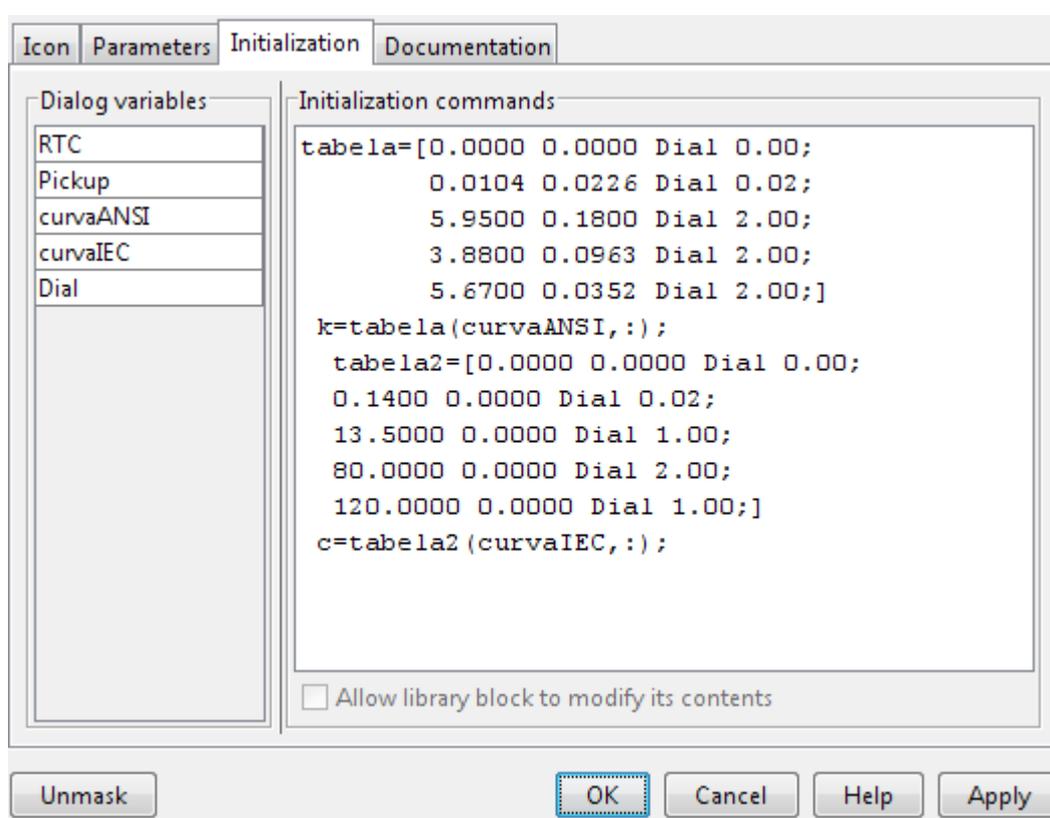


Figura 28 - Aba *initialization* do relé de sobrecorrente.

Fonte: Autoria própria.

3.3 MODELO DO RELÉ DE DISTÂNCIA

O diagrama de blocos do relé de distância de fase é mostrado na Figura 29, para uma representação com entradas monofásicas de corrente e tensão.



Figura 29 - Relé de distância.

Fonte: Autoria Própria.

O modelo foi dividido em três blocos. O primeiro bloco, “Processamento do Sinal” apresentado na Figura 30, recebe os valores de tensão e corrente primária, ou seja, os valores medidos do sistema em que o relé foi inserido. A constituição deste primeiro subsistema é dada por dois blocos *Discrete Fourier* estimando a magnitude e a fase dos fasores de tensão e corrente. Em seguida o sinal já discretizado entra nos blocos TC e TP, tornando os valores de corrente e tensão para o valor secundário. Com isso, a corrente e a tensão de saída deste bloco ficam em valores eficazes. Por fim calcula-se o valor de impedância secundária, no qual é feita pelo bloco *Divide*.

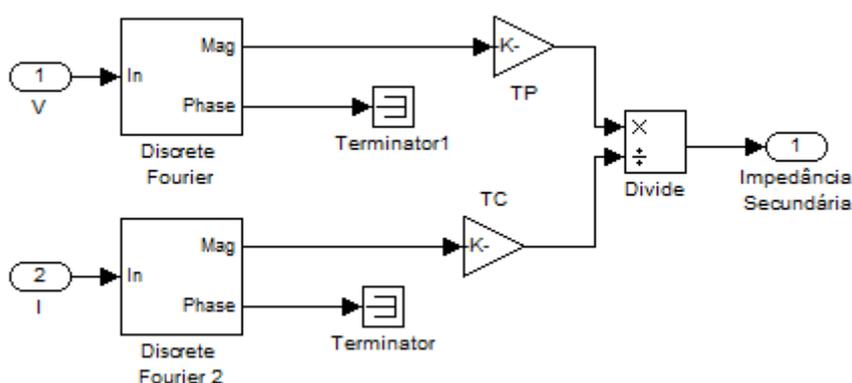


Figura 30 - Processamento dos Sinais de Tensão e Corrente.

Fonte: Autoria Própria.

Após determinar o valor do sinal de impedância secundária deve-se verificar se o valor de impedância aciona o relé. A Figura 31 apresenta o subsistema do bloco que faz esta comparação entre impedância medida e os valores das impedâncias de ajuste das zonas de proteção. A comparação segue o seguinte princípio que pode haver apenas quatro tipos de saída entre a comparação da impedância medida com os valores Z_1 , Z_2 e Z_3 . As saídas são (0,0,0) para uma impedância medida menor que a impedância de ajuste da primeira zona de proteção

Z1, (1,0,0) para o caso da impedância medida for maior que a impedância de ajuste da primeira zona de proteção e menor que a segunda e terceira, (1,1,0) para uma impedância maior que Z1 e Z2 mas menor que o valor da impedância da terceira zona de proteção Z3 e finalmente (1,1,1) para o caso em que a impedância medida for maior que todas as zonas de proteção.

Em seguida a saída da comparação entre impedância de ajuste e as impedâncias das zonas de proteção passa pelo um bloco somador. A função desse bloco é realizar a soma de cada componente de saída dos blocos Z1, Z2 e Z3, sendo nível alto 1 ou nível baixo 0. Portanto, os valores possíveis na saída do somador são: 0 para a saída (0,0,0); 1 para (1,0,0); 2 para (1,1,0) e 3 para (1,1,1).

Por fim é utilizado o bloco *Relational Operator* com o sinal de igualdade (==). Este bloco tem a função de fazer a comparação entre o valor de saída do somador com cada um dos valores dos três blocos *Constant* acionando apenas uma das zonas de proteção.

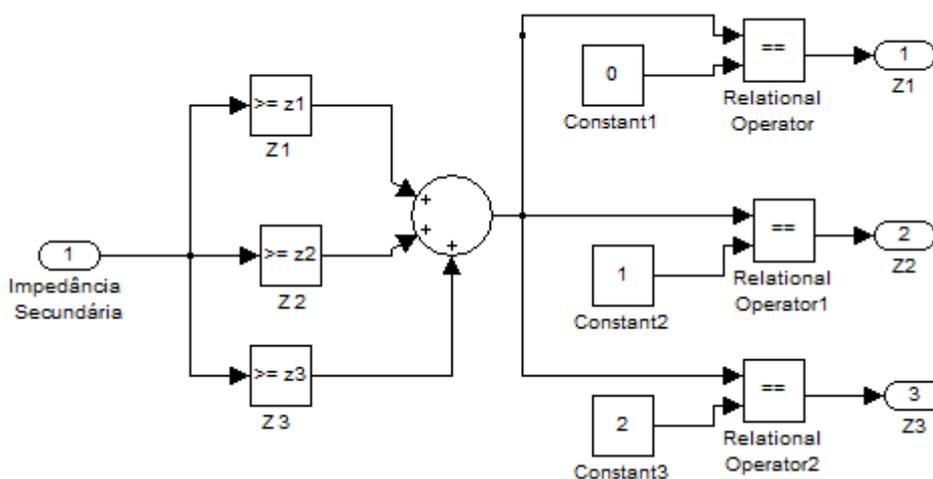


Figura 31 - Comparação entre impedância medida e impedâncias das zonas de proteção.

Fonte: Autoria Própria.

O próximo passo é realizar a temporização das zonas de proteção, como é demonstrado na Figura 32. A temporização deve ser feita para cada zona em separado. Pode-se ajustar o relé da seguinte forma, para a 1ª zona de proteção tem seu tempo de atuação instantâneo, ou seja, $T1=0$. Para 2ª zona de proteção há um intervalo de tempo $T2=0.25$ segundos e para a terceira Zona de proteção $T3=0.5$ segundos.

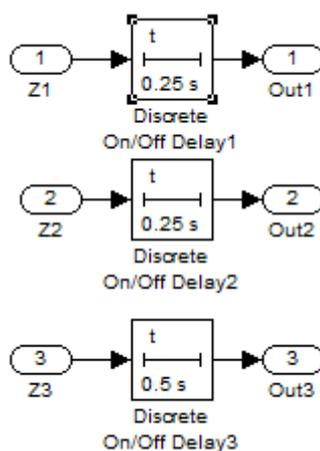


Figura 32 - Regulagem e temporização.

Fonte: Autoria própria.

Para que o usuário possa realizar os ajustes desejados, tanto para valores de impedâncias das zonas de proteção e quanto para ajustes de tempo foi criada uma interface gráfica para o relé de distância, apresentada na Figura 33. Além dos valores de impedância e tempo podem-se adicionar valores da relação de transformação do TC e TP. Deve-se lembrar que a impedância de ajuste das zonas de proteção deve ser o valor secundário, ou seja, o valor calculado utilizando a equação 2.8.

Relé de Distância (ANSI 51) (mask)

Zona de Atuação 1: 80% à 85% da LT1.
Tempo de Atuação 1: Instantâneo

Zona de Atuação 2: 100% LT1 + 50%LT2
Tempo de Atuação 2: 0.25s

Zona de Atuação 3: 100% LT1 + 100%LT2 + 30%LT3
Tempo de Atuação 3: 0.5s

Parameters

TP
3344.8

TC
80.4

Tempo de Atuação (Zona 1)
0

Tempo de Atuação (Zona 2)
0.25

Tempo de Atuação (Zona 3)
0.5

Impedância da Zona de Atuação 1
0.7074

Impedância da Zona de Atuação 2
1.32

Impedância da Zona de Atuação 3
2.03

OK Cancel Help Apply

Figura 33 - Interface gráfica do relé de distância.

Fonte: Autoria Própria.

Os parâmetros de entrada que o usuário pode preencher e as variáveis para realizar a modelagem do relé, estão disponíveis na aba *Parameters* sendo mostrada na Figura 34.

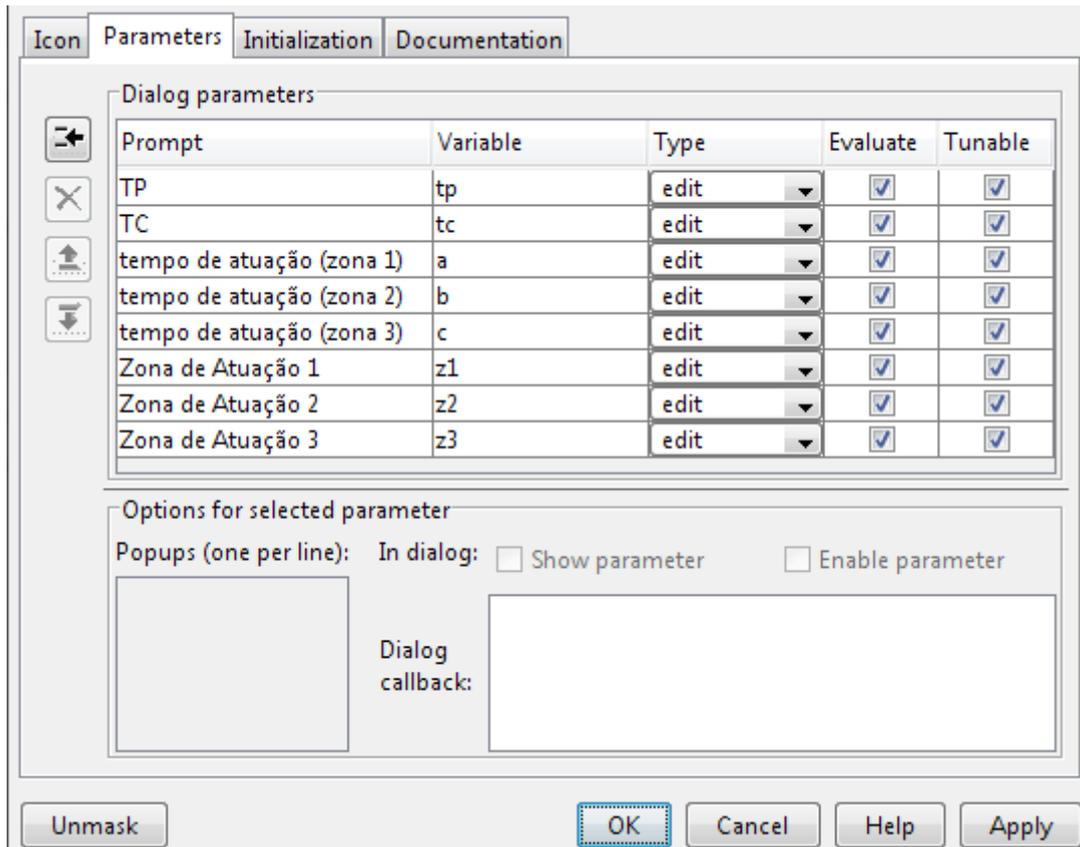


Figura 34 - Parâmetros do relé de distância.

Fonte: Autoria própria.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a forma em que o diagrama de blocos de cada uma das funções de proteção foi implementado no *Simulink/Matlab*. Os diagramas de blocos que descrevem as funções de proteção são baseados em fasores estimados a partir do algoritmo de Fourier cujo bloco está presente na biblioteca do *Simulink*. Foram desenvolvidas também as interfaces gráficas que permitem que o usuário faça os ajustes nos parâmetros dos relés.

4. RESULTADOS

Os modelos dos relés desenvolvidos são validados através de simulações computacionais, em que a função de proteção é inserida em um modelo de sistema elétrico. Estes testes têm por objetivo verificar se os parâmetros de saída de cada um dos relés estão de acordo com os valores teóricos esperados.

Cada um dos relés foi testado para um sistema que simula uma situação diferente de curto circuito. O bloco *Three-Phase Fault* presente na biblioteca *SimPower Systems* do *Simulink/Matlab* implementa o curto circuito. A interface gráfica de configuração do bloco é apresentada na Figura 35 com os dados que foram utilizados em todos os sistemas mantidos na representação da figura. O parâmetro variado de um sistema para outro foi o tempo de duração do curto circuito, dado pelos instantes do campo *Transition times*.

Three-Phase Fault (mask) (link)

Use this block to program a fault (short-circuit) between any phase and the ground. You can define the fault timing directly from the dialog box or apply an external logical signal. If you check the 'External control' box, the external control input will appear.

Parameters

Phase A Fault

Phase B Fault

Phase C Fault

Fault resistances R_{on} (ohms) :

0.0001

Ground Fault

Ground resistance R_g (ohms) :

0.0001

External control of fault timing :

Transition status [1,0,1 ...]:

[1 0]

Transition times (s):

[0.3 0.6]

Snubbers resistance R_p (ohms) :

1e6

Snubbers Capacitance C_p (Farad)

inf

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

Figura 35 - Interface gráfica do bloco *Three-Phase Fault* com os respectivos dados definidos.

Fonte: *Simulink/Matlab*.

4.1 SISTEMA COM A PROTEÇÃO DO RELÉ DIFERENCIAL

O relé diferencial foi submetido a três testes, sendo que nos dois primeiros testes o curto circuito é aplicado dentro da região de proteção do relé diferencial. O terceiro teste simula um curto circuito fora da região de proteção.

4.1.1 Teste de curto circuito no lado de baixa tensão do transformador

A Figura 36 apresenta um sistema criado utilizando os elementos da biblioteca *SimPower Systems* no qual é simulado um sistema com uma fonte trifásica de potência nominal de 350 MVA e tensão de 500 kV. O gerador é conectado a um transformador de 1200 MVA rebaixando a tensão de 500 kV estrela aterrado para a tensão de 138 kV delta. Uma carga de 100 MW é conectada ao lado de baixa tensão do transformador.

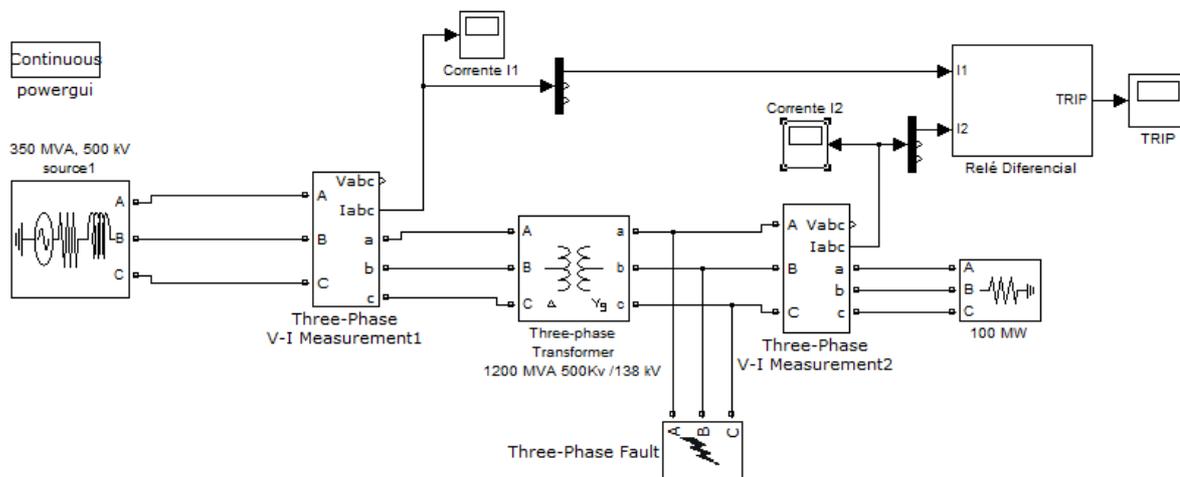


Figura 36 - Sistema com a proteção do relé diferencial com curto circuito no lado de baixa tensão do transformador de potência.

Fonte: *SimPower System™ User's Guide*.

O bloco *Three-Phase Fault* tem a função de simular o curto circuito que está localizado no lado de baixa tensão do transformador (138 kV). Foi estipulado que a falta durou 0,5 segundos. O relé diferencial está conectado no primário e secundário do transformador, medindo o valor das correntes I_1 e I_2 . A Figura 37 apresenta a forma de onda da fase a da corrente I_1 .

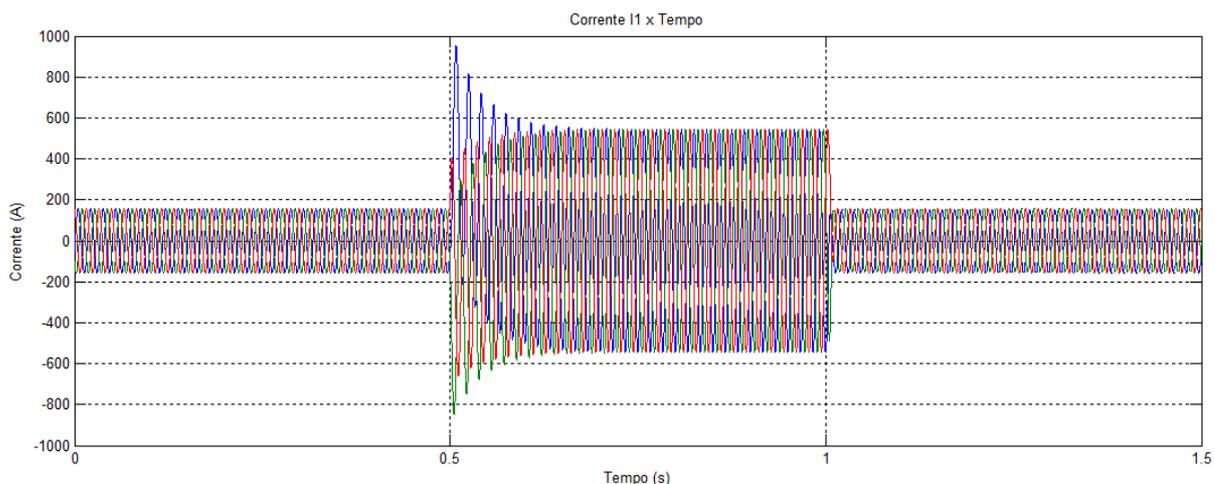


Figura 37 - Corrente medida no lado de alta tensão do transformador trifásico.

Fonte: Autoria própria.

A corrente I_1 antes e depois de ocorrer o curto circuito tem um valor aproximado de 156 A em regime permanente. Durante o curto circuito a corrente atinge, após estabilizar o valor de 570 A. Na Figura 38 é apresentada a forma de onda da corrente I_2 que sai do lado de baixa tensão do transformador.

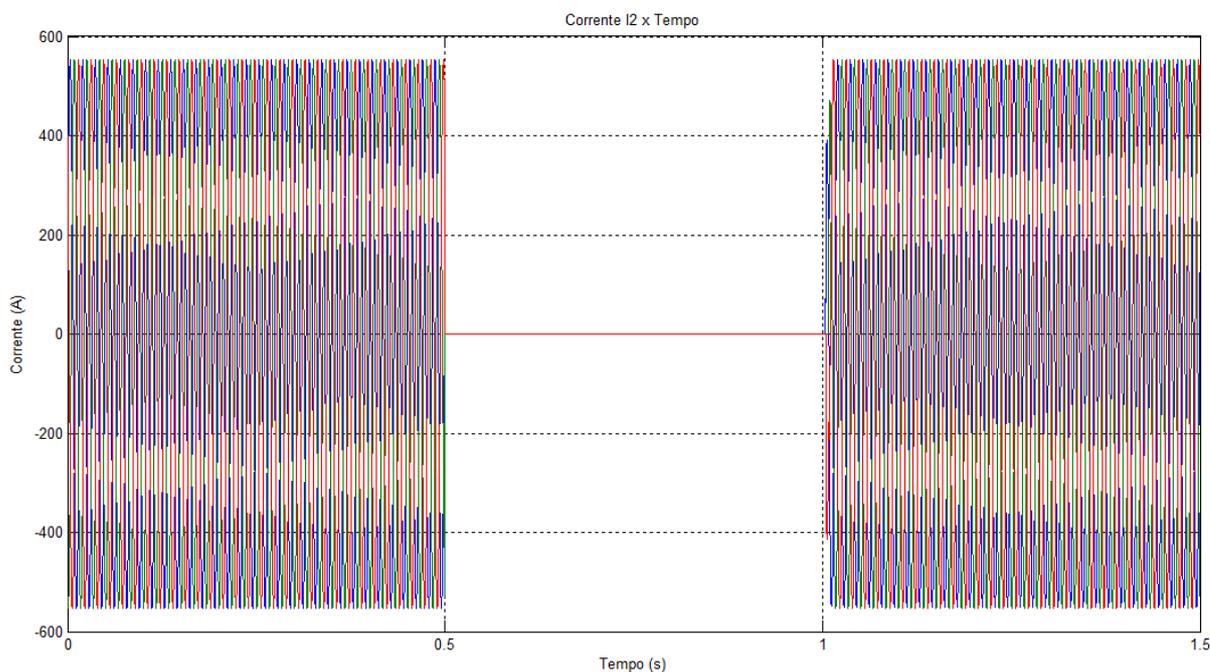


Figura 38 - Corrente medida no lado de baixa tensão do transformador trifásico.

Fonte: Autoria própria.

A corrente nominal possui um valor aproximado de 552 A. Quando ocorre o curto circuito a corrente cai para um valor de 0 A. O relé foi modelado para uma situação monofásica. Com os valores das correntes registradas pode-se fazer o ajuste do relé diferencial. Primeiramente dimensionam-se os dois transformadores

de corrente, utilizando os critérios de corrente nominal de carga e corrente de curto circuito.

- Dimensionamento do TC1 utilizando o critério de corrente nominal de carga: Corrente nominal I_1 , referente ao lado de 500 kV do transformador trifásico:

$$I_{nomAT} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3} \cdot V_{nomAT}} = \frac{1200 \text{ M}}{\sqrt{3} \cdot 500 \text{ K}} = 1385,6 \text{ A}$$

Relação de transformação do TC1:

$$RTC1 = \frac{1385,6}{5} = 277,12$$

A corrente no secundário do TC do lado de Δ do transformador:

$$I_{S(TCat)} = \frac{1385,6}{277,12} = 5 \text{ A}$$

O dimensionamento do TC2 segue os mesmos passos anteriores:

- Dimensionamento do TC2 utilizando o critério de corrente nominal de carga: Corrente nominal I_2 , referente ao lado de 138 kV do transformador trifásico:

$$I_{(\text{dentro do } \Delta)} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,89 \text{ A}$$

Portanto o TC ideal seria aquele que passa para o secundário 2,89 A, então a relação de transformação seria de:

$$I_{NomBT} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3} \cdot V_{nom}} = \frac{1200 \text{ M}}{\sqrt{3} \cdot 138 \text{ K}} = 5020,4 \text{ A}$$

Relação de transformação do TC2:

$$RTC = \frac{5020,4}{2,89} = 1737,2$$

O próximo passo para o ajuste do relé diferencial é fazer o cálculo do ângulo da reta de operação. Este cálculo é feito utilizando a equação 2.9:

$$(I_1 - I_2) = a \times \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right)$$

O valor $I_1 - I_2$ é referente a corrente de operação do relé diferencial e o valor $(I_1 + I_2)/2$ a corrente de restrição. A razão entre a corrente de operação e a corrente de restrição é dado por:

$$a = \frac{(I_1 - I_2)}{\left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right)}$$

Com isso, o valor do ângulo de operação é dado pelo arco tangente da razão a :

$$\theta = \tan^{-1}(a)$$

Para o relé diferencial percentual, segundo (Kindermann, 1999) o ajuste da declividade pode ser de:

- 5 a 25% para máquinas síncronas;
- 5 a 45% para transformadores de potência.

Portanto, se a declividade for 25%, o ângulo da inclinação da reta vai ser de $\theta = \arctan(0,25) = 14,04^\circ$. Ou seja, quanto maior for a declividade, menor a sensibilidade do relé diferencial. Com isso, escolheu-se um valor de 5% na declividade, limite inferior de ajuste recomendado para transformadores de potência:

$$\theta = \tan^{-1}(0.05) = 3,2^\circ$$

Por fim, resta adicionar ao relé qual a corrente de ajuste para a operação do relé. Este valor de corrente define qual a corrente limiar de operação do relé, ou seja, acima desta corrente o relé irá atuar juntamente com valores acima do ângulo de operação. Segundo (Kindermann, 1999), o ajuste do valor inicial do relé deve ser 0.2 A.

Pela Figura 39 verifica-se que em aproximadamente 0.5 segundos o sinal do relé fica em nível alto (um). O curto circuito durou até 1 segundo, neste momento com um atraso o relé deixou de atuar voltando a sua corrente nominal, como é mostrada na figura como um nível baixo (zero). O atraso mencionado diz respeito à estimação do fasor, o algoritmo *Fourier* utiliza um ciclo para determinar a magnitude e o ângulo.

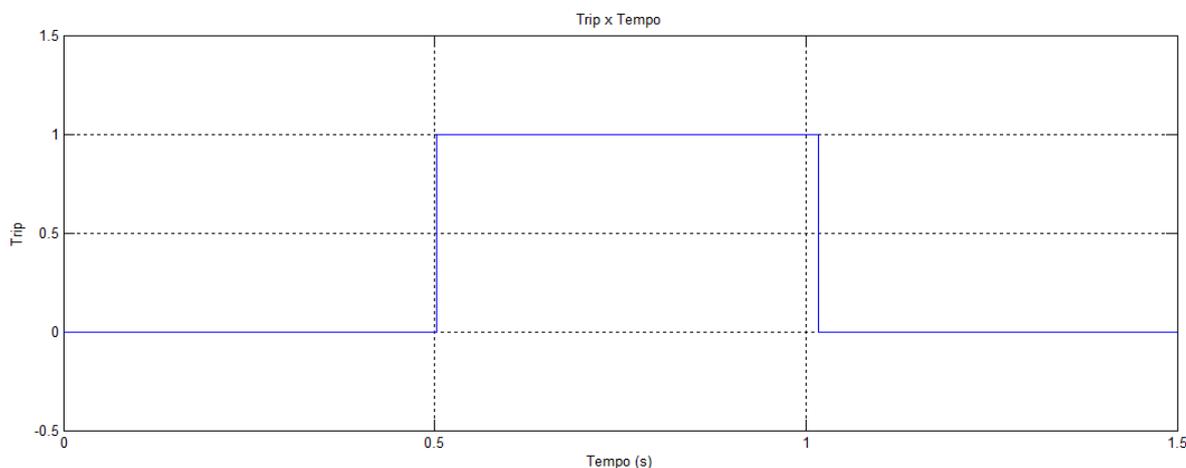


Figura 39 - Teste de atuação do relé diferencial.

Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Teste de curto circuito no lado de alta tensão do transformador

Outro teste pode ser realizado simulando um curto circuito no lado de alta tensão do transformador trifásico. O diagrama do sistema com o bloco de curto de circuito é mostrado na Figura 40.

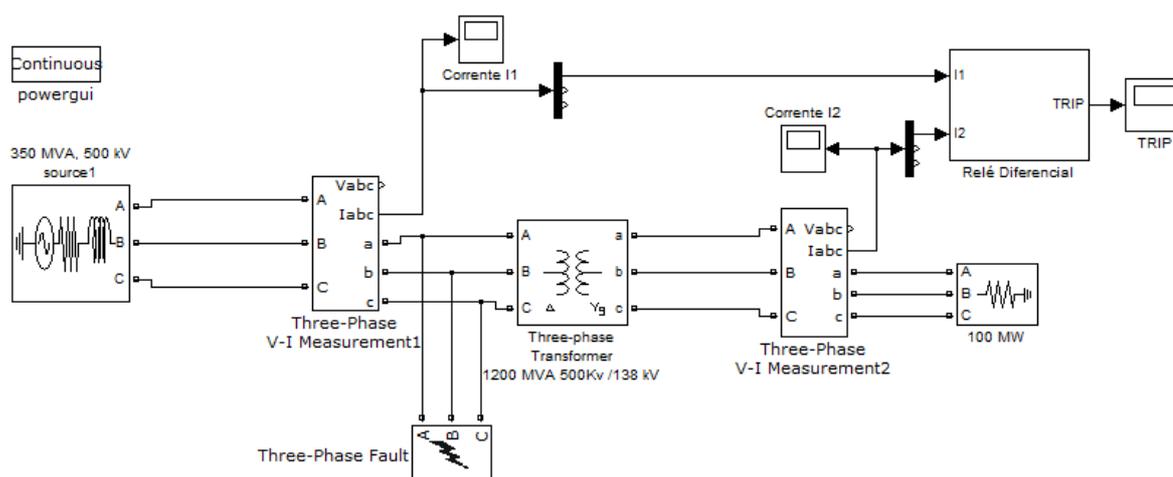


Figura 40 - Sistema com a proteção do relé diferencial com curto circuito no lado de alta tensão do transformador de potência

Fonte: *SimPower Systems*.

Da mesma maneira foram medidas as correntes I_1 do lado de alta tensão e I_2 no lado de baixa tensão do transformador. O ajuste do relé foi realizado anteriormente independente do local em que é aplicado o curto circuito. Com isso, foram mantidos os valores das relações de transformação dos TCs, a declividade de 5% e a corrente mínima de atuação de 0,2 A.

Ao simular o sistema com o relé ajustado a curva de *trip* obtida como mostra a Figura 41. Verifica-se que quando o curto circuito começa em aproximadamente 0.51 segundos o relé diferencial começa a atuar e se estabelece ao longo do curto circuito.

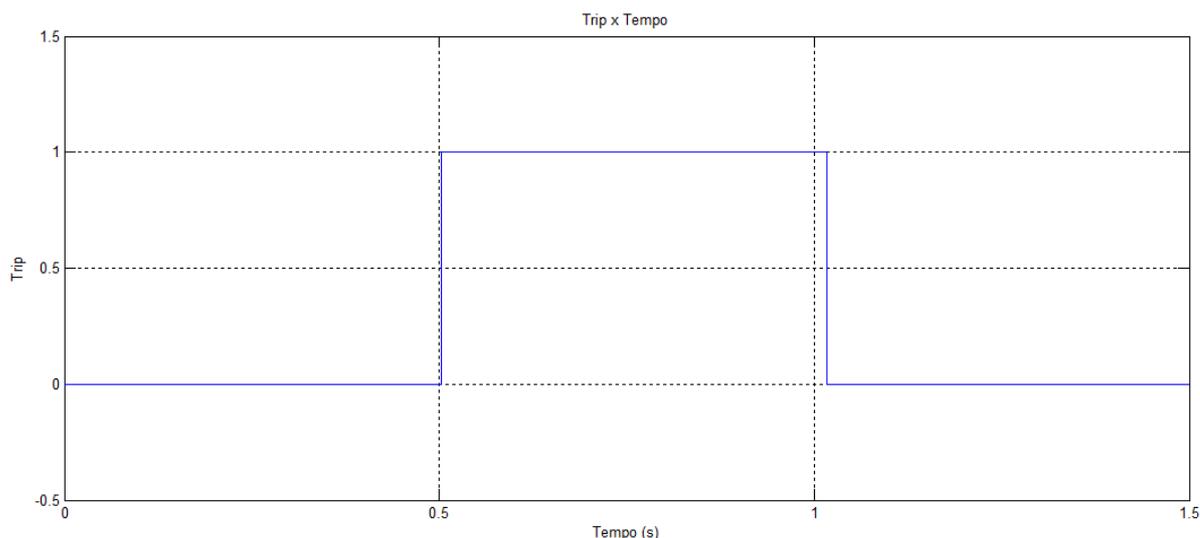


Figura 41 - Trip para o curto circuito localizado no lado de alta tensão do transformador.

Fonte: Autoria própria.

Portanto, para ambos os testes realizados tanto para um curto circuito situado no lado de baixa tensão quanto no lado de alta tensão o relé diferencial atuou enquanto o curto circuito estava presente fazendo assim que a proteção do transformador fosse garantida.

4.1.3 Teste de curto circuito fora da região de proteção

Na Figura 42 é mostrado um último teste nesse sistema. Trata-se da ocorrência de uma falta fora da região de proteção, que é definida pelos TCs. A falta está localizada no lado de alta tensão, 500 kV.

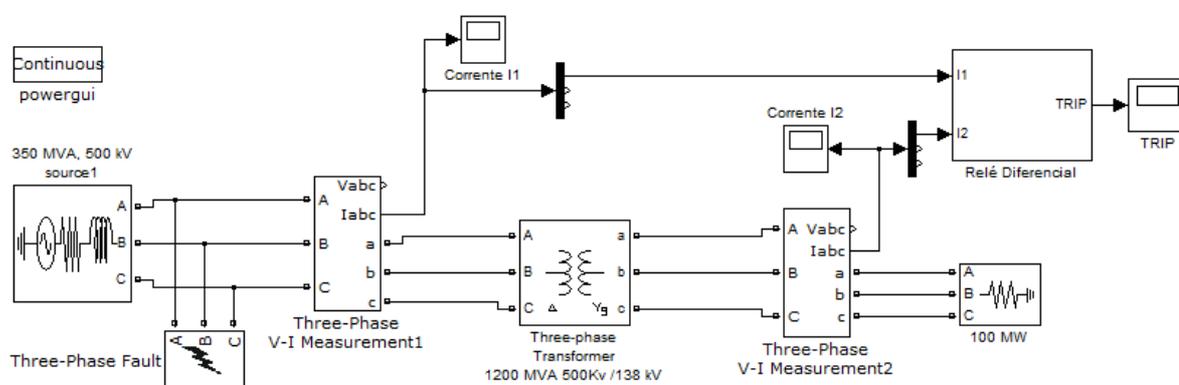


Figura 42-Sistema com a proteção do relé diferencial com curto circuito fora da região de proteção.

Fonte: Autoria própria.

As correntes nominais para I_1 e I_2 se mantiveram em 156 A e 552 A respectivamente. O ajuste do relé diferencial é o mesmo para os testes anteriores, considerando os mesmos valores das relações de transformação dos TC, ajuste de declividade e corrente mínima de operação. Na Figura 43 é apresentado o gráfico *trip* do relé diferencial. Nota-se que pelo gráfico o relé não atuou conforme previsto, pois a falta ocorreu fora da região de proteção do relé diferencial.

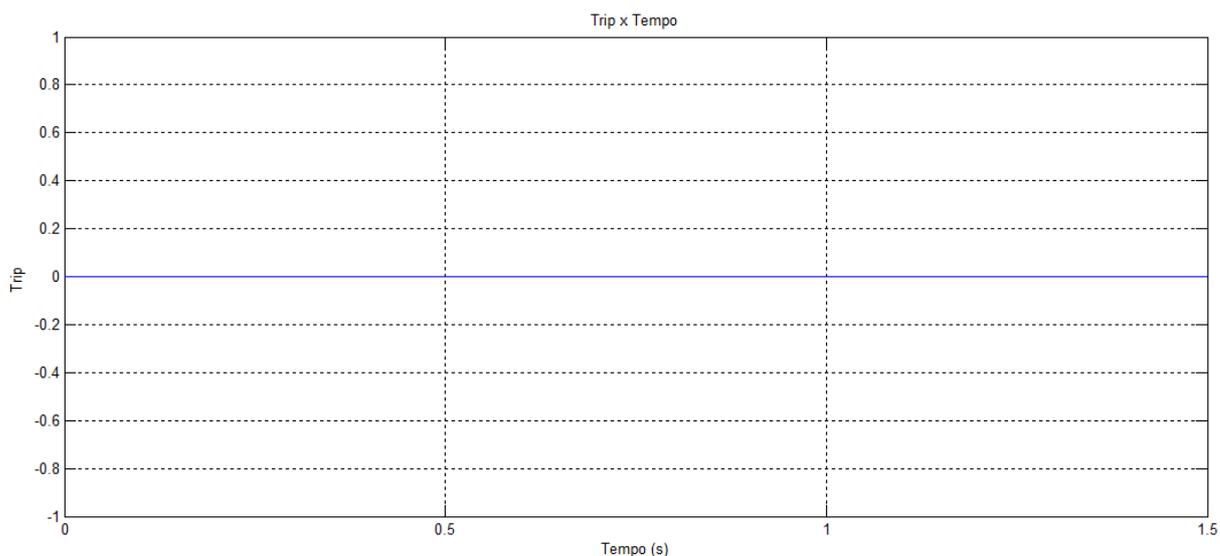


Figura 43 - Teste de atuação do relé para falta fora da região de proteção.

Fonte: Autoria própria.

4.2 SISTEMA COM A PROTEÇÃO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE

Para testar o relé de sobrecorrente utilizou-se o sistema da Figura 44. Trata-se de um sistema trifásico com três linhas de transmissão de 500 KV, a primeira possui 300 km de extensão, segunda linha com 75 km e a terceira linha possui 150 km de extensão. As três linhas de transmissão possuem o mesmo valor de impedância 0,01757 ohms/km. O sistema possui um gerador trifásico com capacidade de 5000 MVA e 500 kV, representando uma barra infinita. O gerador fornece energia para uma carga no final da linha com potência ativa de 300MW e tensão de 500 kV.

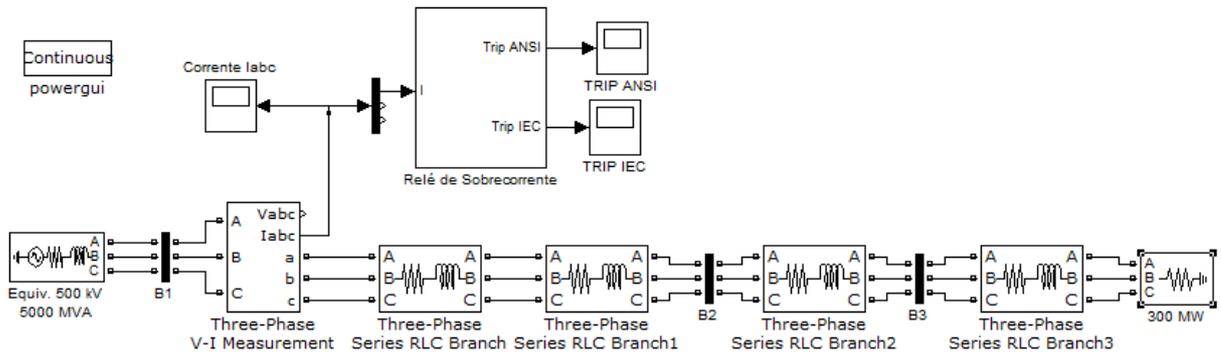


Figura 44 - Sistema elétrico com relé de sobrecorrente.

Fonte: Simulink/Matlab.

A corrente medida no sistema é de aproximadamente 465,58 A em condições normais de operação. Neste sistema foram simulados curtos-circuitos para duas situações diferentes. Uma situação é a ocorrência de uma falta na barra B1 e a outra para a ocorrência de uma falta no meio da primeira linha de transmissão situada entre as barras B1 e B2.

4.2.1 Teste de curto circuito na Barra B1

Para o caso de uma falta na barra B1 foi adicionado o bloco *Three-Phase Fault* no sistema para fazer o teste como é mostrado na Figura 45. Esse caso representa um curto-circuito na saída da linha de transmissão, no mesmo ponto onde o relé é instalado.

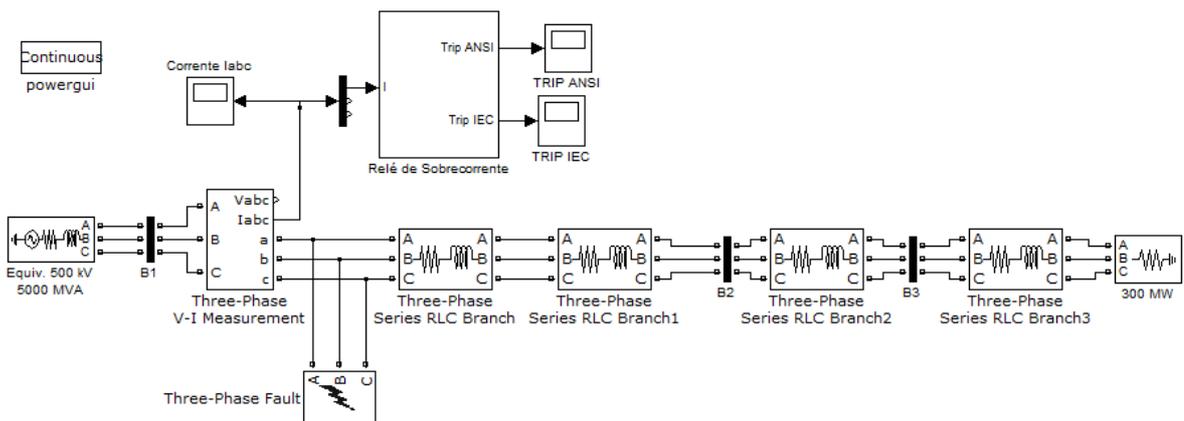


Figura 45 - Teste no sistema com uma falta na barra B1.

Fonte: Simulink/Matlab.

A forma de onda da corrente medida é mostrada na Figura 46. A falta no sistema foi simulada para um intervalo de tempo de 0.5 segundos. A corrente de curto circuito em regime permanente tem um valor próximo a 8101 A.

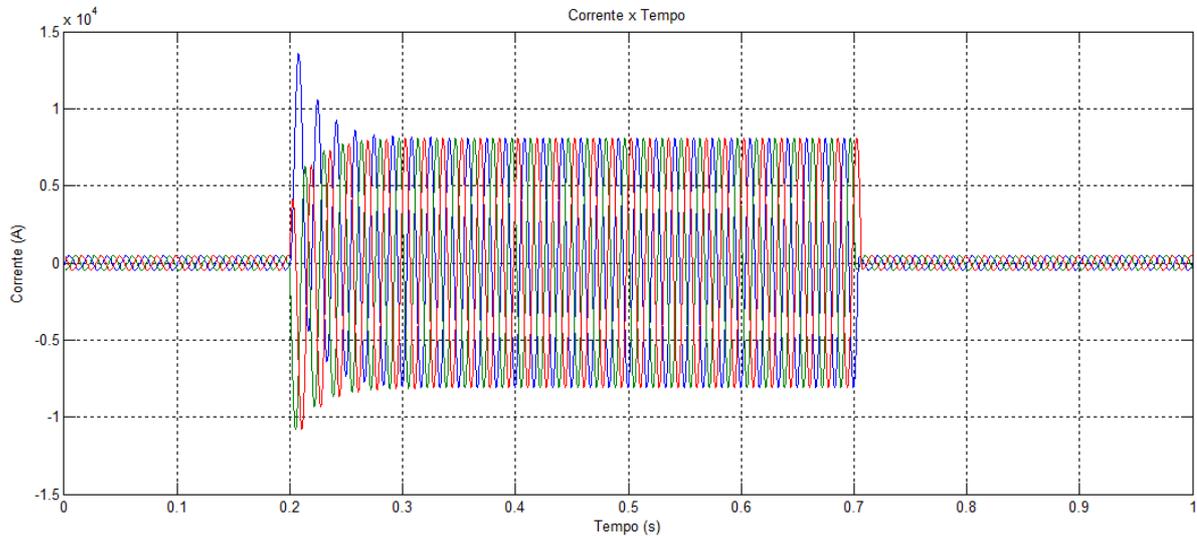


Figura 46 - Forma de onda da corrente do sistema com curto circuito.

Fonte: Autoria Própria.

Após o teste com o bloco de falta, iniciou-se o cálculo de ajuste do relé de sobrecorrente. A primeira parte é fazer o dimensionamento do TC. Este cálculo segue os critérios de corrente de carga nominal e de corrente de curto circuito.

- Dimensionamento do TC utilizando o critério de corrente nominal de carga:

Corrente nominal I_{nom} :

$$I_{nom} = 465,6 \text{ A}$$

Relação de transformação do TC:

$$RTC = \frac{465,6}{5} = 93,12$$

A corrente de curto circuito I_{cc} em regime permanente:

$$I_{cc} = 8102 \text{ A}$$

Valor nominal referente ao primário do TC, considerando um fator de sobrecorrente FS=20:

$$I_{nomTC} = \frac{8102}{20} = 405,1 \text{ A}$$

Relação de transformação do TC:

$$RTC = \frac{405,1}{5} = 81,02$$

O critério da corrente de carga nominal foi escolhido, pois possui uma relação de transformação $RTC=93,12$. Em seguida, após o dimensionamento do TC calculou-se a corrente de ajuste do relé de sobrecorrente.

$$I_{pickup} = \frac{(1.5) \cdot I_{carga}}{RTC} = \frac{(1.5) \cdot \left(\frac{465,6}{\sqrt{2}}\right)}{93,12} = 5,30 \text{ A}$$

O próximo passo é escolher qual a curva de ajuste de temporização que será utilizada de acordo com a Tabela 1, neste caso foi utilizada a norma ANSI para uma curva moderadamente inversa. Em seguida definiu-se o *Dial* de Tempo para 0.1 segundos. O *Dial* de tempo representa qual a curva de temporização do relé, definindo seu tempo de operação. Como nesse exemplo apenas um relé é utilizado, não foi realizada a coordenação com outras proteções, logo o ajuste de tempo escolhido corresponde à curva com a atuação mais rápida.

Após fazer os ajustes necessários do relé, fez-se novamente o teste para um curto circuito na barra B1. A análise pode ser feita primeiro pelo tempo de atuação do relé calculado. Levando em consideração o valor da corrente de curto-circuito, o tempo calculado em que o relé começa a operar foi de 0,0260 segundos.

A representação da saída *trip* do relé de sobrecorrente é mostrada na Figura 47. Verifica-se que o tempo de atuação do relé representa o atraso no sinal de TRIP do relé. No entanto, esse tempo de atuação apresenta um atraso adicional de tempo além do tempo calculado. Isso porque o bloco *Discrete Fourier* apresentado na modelagem utiliza aproximadamente um ciclo de frequência fundamental para estimar a magnitude da corrente medida no sistema.

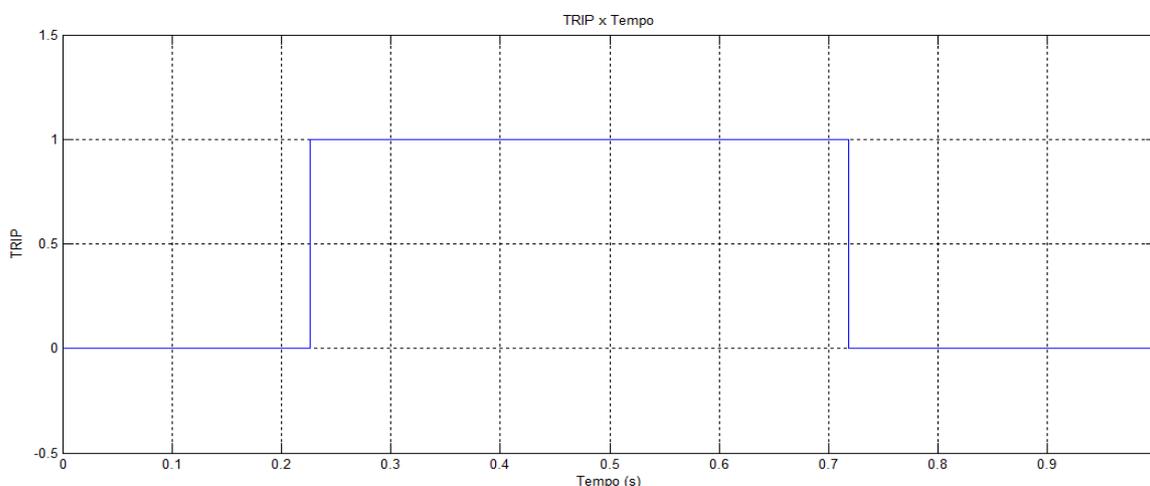


Figura 47 - Trip para um curto circuito na Barra B1.

Fonte: Autoria Própria.

4.2.2 Teste de curto circuito na linha de transmissão

O próximo teste realizado com o relé de sobrecorrente foi para a situação de curto circuito na linha de transmissão de 300 km de comprimento que está entre as barras B1 e B2, como é apresentado na Figura 48. O curto circuito simulado ocorreu a 100 km de distância da barra B1. Sendo que as características do curto circuito foram mantidas as mesmas que o simulado anteriormente na barra B1.

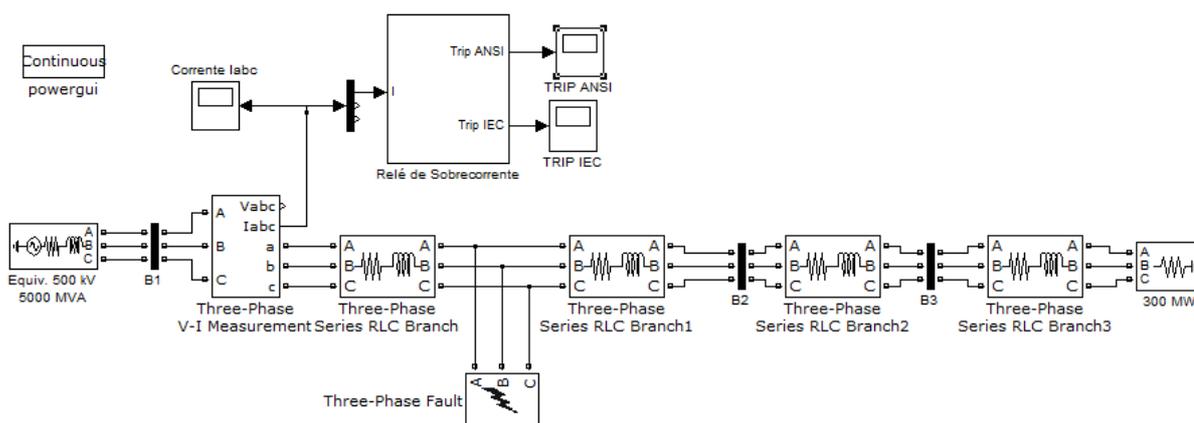


Figura 48 - Teste no sistema com uma falta na linha entre as barras B1 e B2.

Fonte: *Simulink/Matlab*.

A Figura 50 apresenta a forma de onda da corrente já com o curto circuito. Verifica-se que a corrente de curto circuito atingiu valores de 4899,4 A após estabilizar. A duração do curto circuito simulado foi novamente de 0.5 segundos.

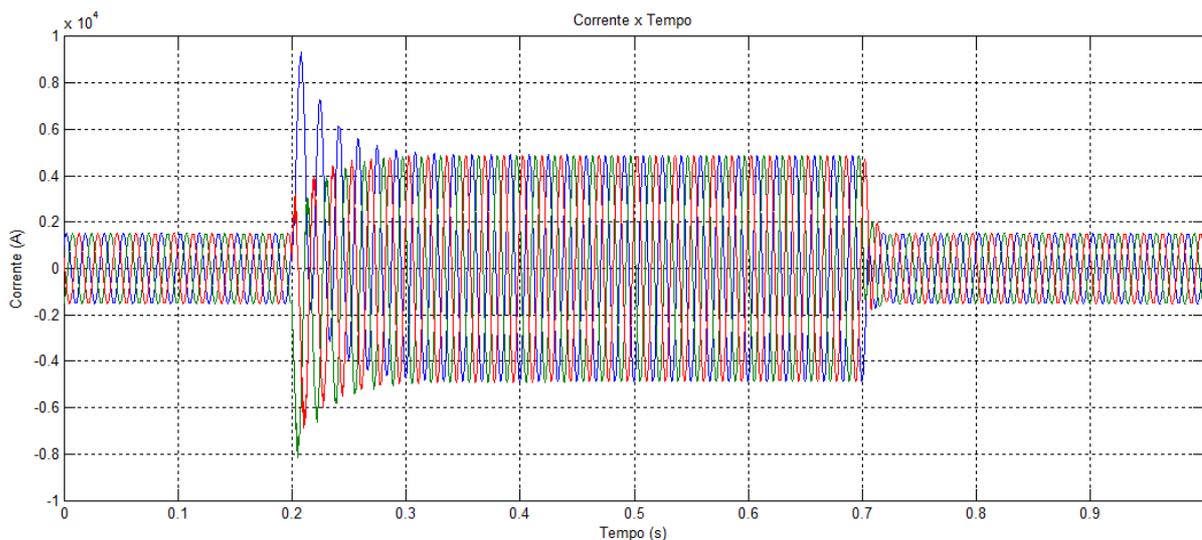


Figura 49 - Forma de onda da corrente com curto circuito na linha de transmissão.

Fonte: *Autoria própria*.

Com o ajuste do relé feito anteriormente calculou-se novamente o tempo de atuação do relé. O tempo calculado pelo relé foi de 0.0322 segundos. A saída *trip* do

relé de sobrecorrente é mostrada na Figura 50. Nota-se que o tempo de atuação obtido pelo relé somado ao tempo adicional de aproximadamente um ciclo devido ao cálculo do bloco *Discrete Fourier* corresponde ao esperado.

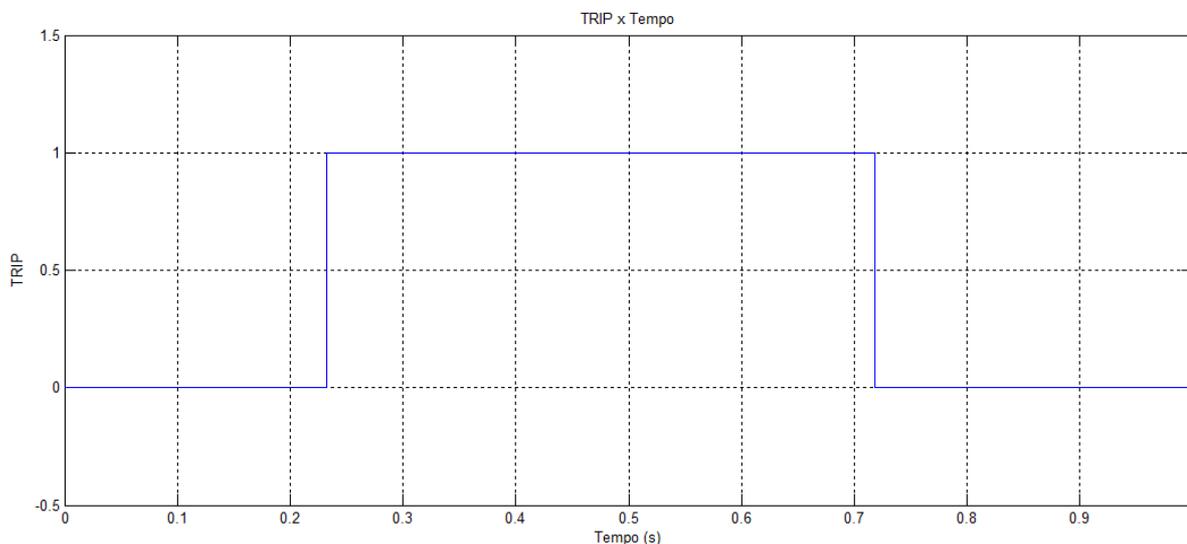


Figura 50 - Trip para o curto circuito localizado na linha de transmissão.

Fonte: Autoria própria.

Ao realizar mais um teste para uma falta que está localizada no fim da linha de transmissão entre as barras B1 e B2, ou seja, a 300 km do ponto de medição. Verifica-se que o tempo de atuação do relé aumenta, passa para 0.0453 segundos. Portanto, verificou-se com estes testes que o relé de sobrecorrente operou da maneira esperada. Como foi visto o valor do tempo de atuação do relé se alterou de acordo com a posição da falta, ou seja, quanto mais longe a posição da falta em relação ao relé maior será o tempo de atuação.

4.3 SISTEMA COM A PROTEÇÃO DO RELÉ DE DISTÂNCIA

A Figura 51 apresenta o sistema elétrico utilizado para avaliar o comportamento do relé de distância. O sistema é composto de um gerador trifásico com potência de 5000 MVA e tensão fase-fase de 500 KV (representando o equivalente de um sistema maior). Uma carga de 100 MW é conectada ao sistema através de três linhas de transmissão, cada uma com 100 Km de comprimento e com mesmo valor de resistência 0,3679 ohms/km e indutância 0,0014691 henry/km.

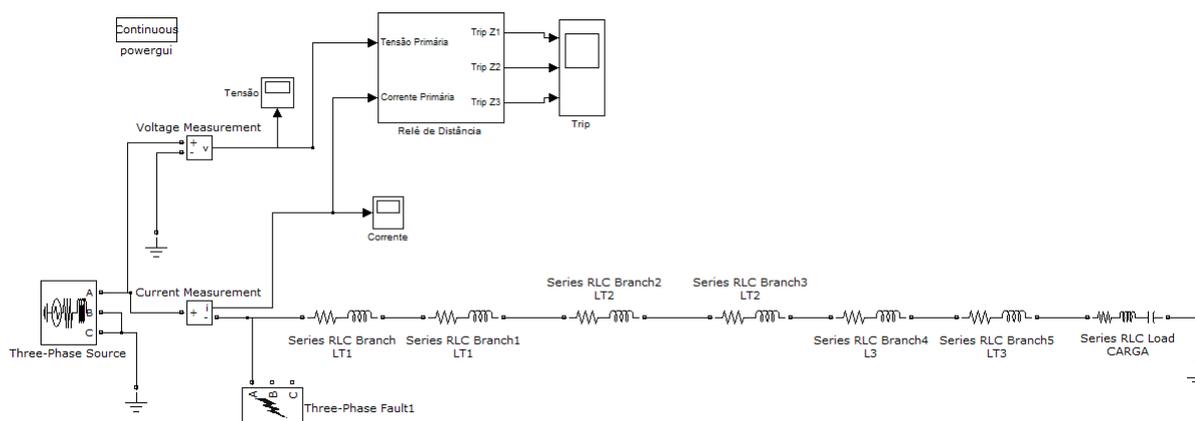


Figura 51 - Sistema elétrico com relé de distância.

Fonte: SIMULINK.

Os parâmetros das linhas de transmissão são apresentados na Tabela 2. O valor de impedância de cada uma das três linhas é importante para fazer o ajuste do relé, pois é através destes valores que as zonas de proteção são definidas. Neste sistema com três linhas de transmissão haverá três zonas de proteção que o relé irá atuar.

Tabela 2 - Parâmetros da linha de transmissão.

Resistência (Ohms/Km)	Indutância (H/Km)
0,3679	0,001469

Antes de realizar os ajustes das zonas de proteção foram definidos os valores das relações de transformação do TC e TP. Para determinar a relação de transformação do TC foi adicionado no sistema elétrico o bloco *Three-Phase Fault* na barra B1. Com isso, foi possível simular a falta com maior valor de corrente de curto circuito no sistema. A justificativa está no momento de fazer o cálculo de ajuste do TC, que utiliza o critério de corrente de curto circuito e corrente de carga nominal. A Figura 52 apresenta a forma de onda que foi medida com a falta ocorrendo no início da linha de transmissão.

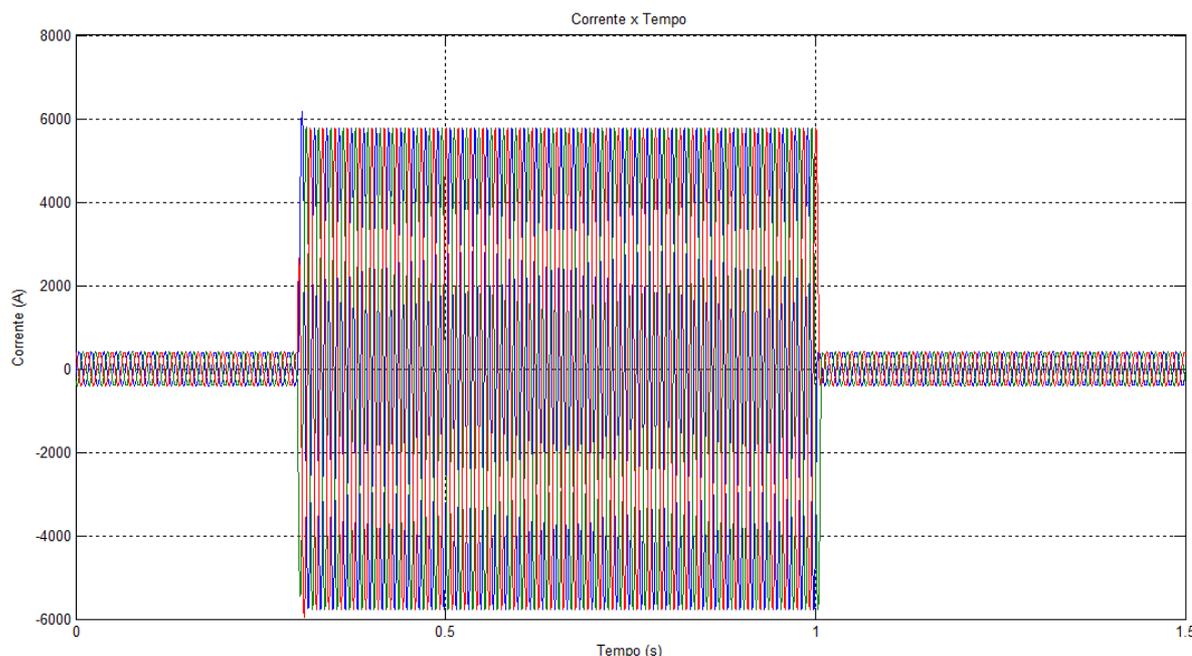


Figura 52 - Forma de onda da corrente para curto circuito.

Fonte: Autoria própria.

A corrente nominal trifásica é de aproximadamente 401,8A. O curto circuito simulado teve duração de 0,7 segundos e sua corrente tem um valor aproximado, após estabilizar de 5773 A. Com os valores de corrente medidos é possível fazer o ajuste do transformador de corrente. Este cálculo segue os critérios de corrente de carga nominal e de corrente de curto circuito, como é mostrado em seguida:

- Dimensionamento do TC utilizando o critério de corrente nominal de carga:

Corrente nominal I_{nom} :

$$I_{nom} = 401,8 \text{ A}$$

Relação de transformação do TC:

$$RTC = \frac{401,8}{5} = 80,36$$

A corrente de curto circuito I_{cc} em regime permanente:

$$I_{cc} = 5773 \text{ A}$$

Considerando um fator de sobrecorrente $FS=20$:

$$I_{nomTC} = \frac{5773}{20} = 288,7 \text{ A}$$

Relação de transformação do TC:

$$RTC = \frac{288,7}{5} = 57,7$$

Portanto, pela análise dos critérios utiliza-se a relação $RTC=80,36$ definido pelo critério de corrente de corrente nominal.

O cálculo da relação de transformação do TP utiliza a tensão medida na barra B1, ou seja, no início da linha de transmissão.

$$V_{\text{medida}} = 384600 \text{ V}$$

Relação de transformação do TP:

$$RTP = \frac{384600}{115} = 3344,3$$

Para definir os valores das impedâncias das zonas de proteção, foram utilizados os valores de impedância das linhas de transmissão. Considerando que as três linhas têm o mesmo comprimento, ou seja, 100 km.

$$Z_{LT} = 0,3679 + j * (0,0014691 * 2 * \pi * 60)$$

$$Z_{LT} = (0,3679 + j * 0,553837 * 100)$$

$$Z_{LT} = 36,79 + j * 55,3837$$

$$|Z_{LT}| = 66,4895 \Omega$$

Tabela 3 - Impedância primária das três linhas de transmissão.

Linha de Transmissão	Impedância (Ohms)
L1	66,4895
L2	66,4895
L3	66,4895

Com os valores das impedâncias primárias das linhas definidas, é possível obter os valores de cada uma das zonas de proteção, como é demonstrado a seguir:

- Primeira zona de proteção:

$$Z_1 = 85\% \cdot Z_{1\text{primario}} \cdot \frac{RTC}{RTP}$$

$$Z_1 = 0,80 \cdot 66,4895 \cdot \frac{80,36}{3344,3} = 1,2785 \Omega$$

- Segunda zona de proteção:

$$Z_2 = \left(100\% \cdot Z_{1\text{primario}} + 50\% \cdot Z_{2\text{primario}} \right) \cdot \frac{RTC}{RTP}$$

$$Z_2 = (1 \cdot 66,4895 + 0,5 \cdot 66,4895) \cdot \frac{80,36}{3344,3} = 2,3975 \Omega$$

- Terceira zona de proteção:

$$Z_3 = \left(100\% \cdot Z_{1_{primario}} + 100\% \cdot Z_{2_{primario}} + 30\% \cdot Z_{3_{primario}} \right) \cdot \frac{RTC}{RTP}$$

$$Z_3 = (1 \cdot 66,4895 + 1 \cdot 66,4895 + 0,3 \cdot 66,4895) \cdot \frac{80,36}{3344,3} = 3,6761 \Omega$$

O último ajuste a ser feito é em relação ao tempo de atuação de cada zona de proteção do relé de distância. Segundo (Kindermann, 1999) a temporização da primeira zona de atuação é instantânea. Já para a segunda zona de proteção define-se um intervalo de tempo de 0,25 segundos e para terceira zona de proteção define-se o valor do tempo de atuação como duas vezes o intervalo de tempo definido, ou seja, 0,5 segundos.

Com o relé de distância ajustado fez-se os testes para validar a atuação do relé quando a falta ocorre dentro ou fora das zonas de proteção. Foram realizados testes simulando curto circuito de 0.5 segundos de duração nas três linhas de transmissão. A Tabela 4 apresenta em qual linha ocorreu o curto circuito, posição da falta, a impedância secundária medida no momento da falta, qual zona de proteção do relé que atuou e o tempo de atuação do relé. Lembrando que as três linhas de transmissão possuem o mesmo comprimento.

Tabela 4 - Testes de curto circuito em diferentes posições da linha de transmissão.

Linha de transmissão	Posição (Km)	Impedância medida da falta (ohm)	Trip (zona de proteção)	Tempo de atuação (s)
L1	30	0,4795	1 ^a	0
L1	79	1.2626	1 ^a	0
L2	10	1.7581	2 ^a	0.25
L2	49	2.3814	2 ^a	0.25
L3	10	3.3564	3 ^a	0.50
L3	29	3,6601	3 ^a	0.50
L3	40	3,8358	Nenhuma	0

Um dos testes realizados pode ser observado na Figura 53 para a ocorrência de uma falta na primeira linha. A falta ocorreu no ponto de 49 km da linha.

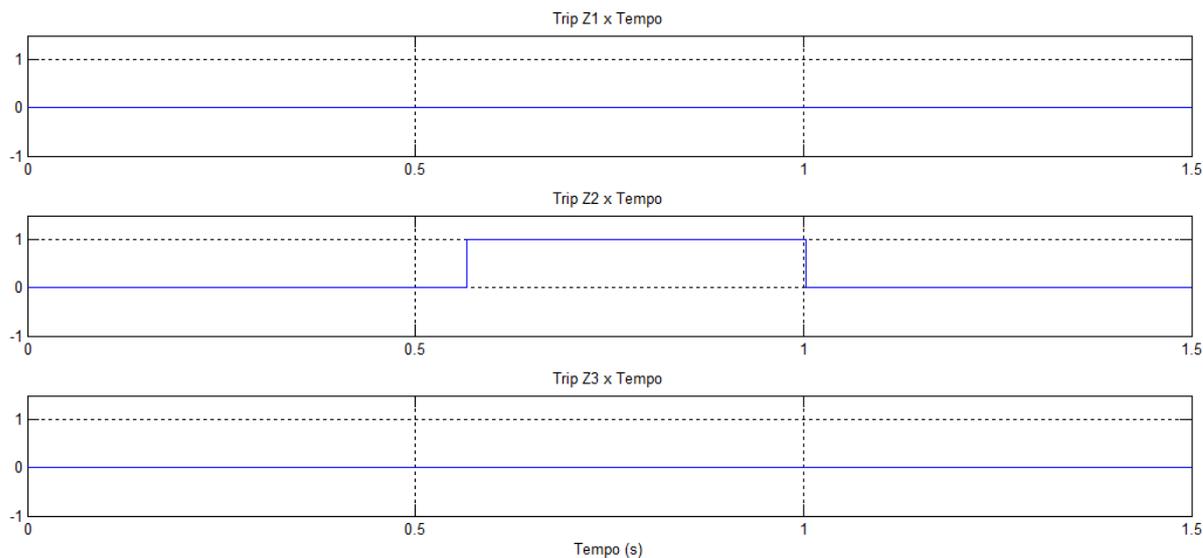


Figura 53 - Simulação de curto circuito na primeira linha de transmissão em 49 km.

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os valores da Tabela 4 de impedância secundária estão de acordo com os valores de ajuste calculados. A Figura 53 apresenta que a segunda zona de proteção do relé é acionada e com atraso de tempo de 0.25 segundos como era o esperado, pois a falta ocorreu em 0.30 segundos.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O capítulo 4 apresentou a forma de ajuste de cada uma das funções de proteção sendo estas introduzidas em sistemas elétricos individuais. Após serem feitos os ajustes nos relés, foram realizados os testes para validar a atuação conforme o curto circuito aplicado no sistema elétrico. Como foi visto, o ajuste para o relé diferencial foi feito utilizando como referência o livro (Kindermann, 1999) de um ajuste de corrente e declividade pré estabelecidos. Com isso, o relé diferencial atuou de maneira desejada. Para fora da zona de proteção, o relé diferencial não atuou na faixa de regime permanente da falta, mas para o regime transitório houve picos em que o relé atuou durante milissegundos. Isso aconteceu, pois a forma como foram estimados os fasores fez com que a faixa de transitório do curto circuito não seja definida de forma precisa, levando determinado tempo para se estabelecer o valor de regime permanente. Analisando o relé de sobrecorrente verifica-se que o mesmo atuou como o esperado. Os testes foram feitos visando o tempo de atuação do relé,

para distâncias maiores o relé demorou mais para atuar como o esperado. O relé de distância obteve dados satisfatórios para simulações de faltas nas três linhas de transmissão. Testes foram feitos visando os limites das zonas de proteção como mostra a Tabela 4, por exemplo, na linha 1 aplicou-se uma falta em 79 km da linha e a primeira zona de proteção atuou, assim como na linha 2 com uma falta a 49 km acionando a segunda zona de proteção e a na terceira linha com uma falta a 29 km acionando a terceira zona de proteção. Foi simulada uma falta fora das zonas de proteção, na linha 3 a 40 km e o resultado foi que nenhuma zona de proteção atuou, pois já estava fora dos limites de proteção deste relé.

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma forma de implementação de modelos computacionais de relés de proteção. Para isso, foi feito um estudo sobre as funções de proteção que eram propostas no trabalho, desde a parte conceitual, ajustes, como era o funcionamento e as equações que descreviam o próprio relé. Em paralelo com o estudo das funções de proteção, estudou-se a maneira de como se utilizar a ferramenta de modelagem *Simulink/Matlab*, sendo esta utilizada para criar os modelos em diagrama de blocos das respectivas funções de proteção estudadas. No que diz respeito à estimação de fasores, após um estudo sobre os métodos mais utilizados, optou-se por usar o algoritmo baseado em transformada de Fourier, o qual já está implementado no *Simulink* no bloco *Discrete Fourier*. Com este bloco foi possível obter o valor da componente de frequência fundamental do sinal de entrada. No entanto, a estimativa obtida dessa forma não é precisa no regime transitório e também não é rápido o suficiente para a proteção. Uma investigação mais detalhada sobre esses algoritmos de estimação é necessária para melhorar as simulações realizadas.

A partir disso foi feita a modelagem em diagrama de blocos dos relés de proteção diferencial, distância e sobrecorrente. A partir desta modelagem foi possível realizar as análises de atuação dos relés utilizando o *Simulink*. Os relés foram inseridos em modelos de sistemas elétricos nos quais eram simulados curtos circuitos que provocavam diferentes reações no sistema. Verificando as consequências do curto circuito no sistema através dos testes e medições dos parâmetros das componentes fundamentais foram realizados os ajustes necessários para a correta operação dos relés.

Os modelos em diagramas de blocos desenvolvidos permitiram realizar uma análise do comportamento da proteção nos sistemas aplicados. No entanto, os modelos desenvolvidos não correspondem totalmente ao comportamento real do funcionamento prático do relé apresentando um atraso no momento que deveriam atuar. Analisando mais especificamente verificou-se que a razão do atraso era pelo fato de que na estimação dos fasores pelo bloco *Discrete Fourier*, o mesmo faz uso de o um ciclo de frequência fundamental para realizar os seus cálculos. No relé de distância obtiveram-se resultados satisfatórios, ou seja, as impedâncias das faltas

simuladas estavam dentro das zonas de proteção que se esperava. Foi também simulado um curto circuito fora da zona de proteção e o resultado foi que nenhuma zona de proteção atuou.

Os testes realizados nos relés de sobrecorrente e diferencial foram considerados satisfatórios, mas foi demonstrado também que os modelos obtidos são dignos de aperfeiçoamento. Para o relé de sobrecorrente foram simuladas três situações, uma delas, um curto circuito na primeira barra que ligava o gerador com a linha de transmissão que neste caso tratava-se da corrente de curto circuito de maior valor em regime permanente e as outras duas situações para curtos circuitos no meio da linha de transmissão. Para ambos os casos a função de proteção atuou de maneira correta com o tempo calculado pelo relé temporizado juntamente com o atraso acarretado pelo bloco de estimação de fasores da corrente medida do sistema. Já para o relé diferencial que tinha como função a proteção de um transformador trifásico foram feitos testes para curto circuito em ambos os lados do transformador e fora da região de proteção limitada pelos transformadores de corrente. O relé diferencial utiliza duas condições para estabelecer sua atuação conforme (Kindermann, 1999). A primeira é a corrente de operação ultrapasse a corrente de ajuste definida pelo usuário e a segunda condição diz respeito ao ângulo calculado deve ultrapassar o ângulo de ajuste. Pelos testes realizados verificou-se que o relé atuou somente quando o curto circuito era dentro da região de proteção definida.

De uma forma em geral, pode-se afirmar que os modelos desenvolvidos para as funções de proteção mostraram-se úteis para o estudo mais aprofundado de proteções de sistemas elétricos de potência. Ressalta-se que o estudo feito neste trabalho permitiu ao aluno um melhor entendimento e análise sobre as funções de proteção bem como da ferramenta de simulação utilizada.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros:

- Utilizar outro algoritmo de estimação de fasores, menos suscetível a erros devido à presença de componentes exponenciais decrescentes e mais rápidos.
- Desenvolver modelos de outras funções de proteção, tais como relé de sub ou sobretensão, relé de frequência, etc.;
- Utilização do relé diferencial para a proteção de geradores síncronos, fazendo um estudo da dinâmica do gerador e se aprofundando no desenvolvimento da função de proteção;
- Aprimorar o modelo do relé de distância, fazendo modelagem dos relés de admitância e reatância.

6. REFERÊNCIAS

Anderson, P. M. (1999). *Power System Protection*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

Caminha, A. C. (2009). *Introdução à proteção dos sistemas elétricos*. São Paulo: Edgard Blücher.

Campos, M. M., & Saito, K. (2004). *Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos* (1ª ed.). (P. A. Marques, Ed.) Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda.

Junior, J. B., Guimarães, C. A., & Duarte, A. C. (22 a 27 de 06 de 2003). Modelagem e Avaliação de Algoritmos Clássicos de Filtros de Fourier Utilizados em Relés de Distância Numéricos. *VII Seminário Técnico de Proteção e Controle*, 6.

Kindermann, G. (1999). *Proteção de Sistemas Elétricos*. Florianópolis: Editora do autor.

Lenz, E. P. (2009). *Avaliação de desempenho de relés digitais de proteção de unidades geradoras utilizando registros de oscilografia e sequência de eventos*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Miguel Moreto, J. G. (23 de 04 de 2009). Análise automática de oscilografias em sistemas elétricos de potência. *Revista Controle & Automação*, 16.

Pavel B. Bochev, M. D. (2009). *Least-Squares Finite Element Methods*. Nova York: Springer.

Phadke, A. G., & Thorp, J. S. (2009). *Computer Relaying for Power Systems* (2ª ed.). West Sussex, UK: John Wiley and Sons, Ltd.

Salles, N. J. (2007). *Modelagem e Análise Dinâmica de Sistemas de Proteção de Redes de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Síncronos*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Silva, K. M., Souza, B. A., & Neves, W. L. (s.d.). Um Algoritmo de estimação de fasores para a proteção de distância de linhas de transmissão.

Silva, M. S. (2002). *Modelagem das funções de subestação automatizadas empregando modelos orientados a objeto*. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis* (Internacional Edition ed.). Nova York: McGraw-Hill, Inc.

Tahan, C. M., Casolar, R. P., Labronici, J., Jardini, J. A., Senger, E. C., Moraes, R. M., et al. (28 de Junho de 2005). Improt - Ambientado de simulação da operação de sistemas de proteção e ocorrências do sistema interligado nacional.

Warrington, A. v. (1968). *Protective Relays: their theory and practice*. Chapman and Hall LTD.

Weber M. de Souza, G. J. (22 a 27 de Junho de 2003). Desenvolvimento de um programa computacional para simular uma proteção digital de distância e sua avaliação frente a casos reais de perturbação. *VII Seminário Técnico de Proteção e Controle* .