

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ARIAN RODRIGUES FAGUNDES

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL SOB INFLUÊNCIA
DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM CONDIÇÕES DE SATURAÇÃO**

**Alegrete
2016**

ARIAN RODRIGUES FAGUNDES

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL SOB INFLUÊNCIA
DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM CONDIÇÕES DE SATURAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos.

**Alegrete
2016**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

F156a Fagundes, Arian.
Análise do Desempenho da Proteção Diferencial Sob Influência dos
Transformadores de Corrente em Condições de Saturação / Arian
Rodrigues Fagundes. – 12/12/2016.
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2016.
"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Proteção. 2. Relé Diferencial. 3. Saturação. 4. Transformador de
Corrente. 5. Curto-Circuito. I. Título.

ARIAN RODRIGUES FAGUNDES

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL SOB INFLUÊNCIA DOS
TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM CONDIÇÕES DE SATURAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 12 de dezembro de 2016.

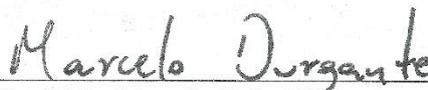
Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador



Prof. Dr. Giovanni Guarienti Pozzebon
UNIPAMPA



Prof. Me. Marcelo Hahn Durgante
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à memória de minha avó Eva de Medeiros Rodrigues e seu incansável esforço em educar e proporcionar o acesso ao ensino à suas filhas e netos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Joel e Maria Inêz, por desde a infância me estimularem aos estudos e à busca por conhecimento, pelos valores de respeito, honestidade e dignidade transmitidos diariamente e principalmente, todo o empenho afim de garantir que eu chegasse até aqui.

A minha irmã Ariane, que de maneira descontraída sempre me incentivou.

A minha namorada Priscila, pelo apoio, compreensão e todas as palavras encorajadoras.

Agradeço ao corpo docente e funcionários da Unipampa Campus Alegrete, em especial ao professor, amigo e orientador Eduardo Machado dos Santos, pelas oportunidades de aprendizado, pela confiança e paciência durante a orientação e pelo exemplo de educador que é.

Aos colegas e membros do Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência (GESEP) pela companhia diária.

Agradeço às amigadas que a graduação me proporcionou, ao Rodrigo Darays pela receptividade e aqueles que vieram a se tornar minha segunda família: Alex Itczak, Theodoro Rodrigues, Davi Heinz, Marcel Stalter, Diego Pinheiro e Paulo Ricardo.

A Deus por tudo.

“A curiosidade é mais importante do que o conhecimento”.

Albert Einstein

RESUMO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem a função de interligar a geração de energia e a carga consumidora com a máxima eficiência e o mínimo possível de falhas e interrupções. No SEP a proteção é feita por relés, os quais são dispositivos alocados em pontos estratégicos do sistema e que, quando detectam anomalias, atuam enviando um sinal para abertura de um disjuntor, de modo a isolar o mais rápido possível o sistema do ponto onde ocorreu o defeito. A operação dos relés acontece a partir dos sinais de tensão e corrente existentes na rede. Esses sinais são transmitidos aos relés através de Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs). Fazendo referência apenas aos TCs, pode-se afirmar que são equipamentos fundamentais para o correto funcionamento dos métodos de proteção, pois sua principal função é replicar as altas correntes primárias em menor escala no seu secundário, assegurando a obtenção dos sinais de corrente da rede. Os TCs estão sujeitos à saturação de seus núcleos, fenômeno no qual a forma de onda de corrente é distorcida nos terminais secundários, prejudicando o desempenho dos relés de proteção, os quais baseiam-se em valores eficazes da grandeza em questão para determinarem sua atuação ou não no esquema de proteção. Nesse contexto, o presente trabalho demonstra o desempenho de relés diferenciais sob o efeito da saturação dos transformadores de corrente, de modo a identificar possíveis atuações indevidas para defeitos fora da zona protegida. Foram analisados casos para diferentes tipos de curto-circuito (CC) e de acordo com os resultados obtidos através das simulações, pode-se concluir que as distorções do sinal de corrente no secundário do TC saturado influenciam diretamente na operação dos relés diferenciais de proteção. Preliminarmente foi possível constatar que tais distorções se tornam mais severas de acordo com a magnitude da corrente de curto-circuito

Palavras-Chave: Proteção, Relé Diferencial, Saturação, Transformador de Corrente, Curto-Circuito.

ABSTRACT

The Electric Power System (EPS) has the function of interconnecting the generation of energy and the consuming load with the maximum efficiency and the minimum possible of failures and interruptions. In the EPS the protection is made by relays, which are devices allocated at strategic points of the system that, when they detect anomalies, they act by sending a signal to open a circuit breaker, in order to isolate the system as quickly as possible from the point where it occurred The defect. The operation of the relays takes place from the voltage and current signals in the network. These signals are transmitted to the relays through Potential Transformers (PTs) and Current Transformers (CTs). Referring only to CTs, it can be said that they are fundamental equipment for the correct operation of the protection methods, since its main function is to replicate the high primary currents in a smaller scale in its secondary, ensuring the obtaining of the current signals of the network. The CTs are subject to the saturation of their core, a phenomenon in which the current waveform is distorted at the secondary terminals, damaging the performance of the protection relays, which are based on root mean square values of the quantity in question to determine its performance or not in the protection scheme. In this context, the present work demonstrates the performance of differential relays under the effect of saturation of current transformers, in order to identify possible undue performances for defects outside the protected zone. We have analyzed cases for different types of short circuit and according to the results obtained through the simulations, it can be concluded that the current signal distortions in the secondary of the saturated CT directly influence the operation of the differential protection relays. Preliminarily it was possible to verify that such distortions become more severe according to the magnitude of the short-circuit current.

Keywords: Protection, Differential Relay, Saturation, Current Transformer, Short Circuit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Circuito equivalente de um transformador de corrente.....	24
Figura 2 – Curvas de excitação típicas para TCs classe C.	25
Figura 3 – Circuito simplificado do transformador de corrente.	28
Figura 4 – Formas de onda da corrente secundária para um TC saturado e não-saturado.	29
Figura 5 – Esquema básico da proteção diferencial.....	31
Figura 6 – Esquema simplificado de proteção diferencial percentual.....	32
Figura 7 - Falta interna a região protegida por relé diferencial para um sistema radial.	33
Figura 8- Falta interna a região protegida por relé diferencial para um sistema em anel.	33
Figura 9 - Falta externa a região protegida por relé diferencial.....	33
Figura 10 - Curva de operação do relé diferencial percentual.....	35
Figura 11 - Sistema teste proposto.	38
Figura 12 – Forma de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) do para carga de 4 ohms resistiva, falta monofásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.....	41
Figura 13 – Valor RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 4 ohms resistiva, falta monofásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	42
Figura 14 – Comportamento da corrente diferencial e trip do Relé Comum para carga de 4 ohms resistiva, falta monofásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.....	42
Figura 15 – Comportamento das correntes e trip do Relé Percentual para carga de 4 ohms resistiva, falta monofásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.....	42
Figura 16 – Forma de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) do para carga de 4 ohms resistiva, falta bifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.....	43
Figura 17 – Valor RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 4 ohms resistiva, falta bifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	43

Figura 18 – Comportamento da correntes e trip do Relé Comum para carga de 4 ohms resistiva, falta bifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	44
Figura 19 – Comportamento do Relé Percentual para carga de 4 ohms resistiva, falta bifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	44
Figura 20 – Formas de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) do para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	45
Figura 21 – Valor RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	45
Figura 22 – Comportamento da corrente e trip do Relé Comum para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	46
Figura 23 – Atuação do Relé Percentual para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	46
Figura 24 – Magnitude das correntes que fluem no Relé Percentual e momento do trip, para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	47
Figura 25 – Formas de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	47
Figura 26 – Valores RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.	47
Figura 27 – Comportamento da corrente e o trip do Relé Comum para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 50% da linha de transmissão.	48
Figura 28 – Atuação do Relé Percentual para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 25% da linha de transmissão.	48
Figura 29 – Magnitude das correntes que fluem no Relé Percentual e momento do trip, para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 80% linha de transmissão.	48
Figura 30 – Formas de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) do para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% linha de transmissão.	49

Figura 31 – Valores RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% linha de transmissão.	49
Figura 32 – Comportamento da corrente e trip do Relé Comum para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% da linha de transmissão.....	50
Figura 33 – Atuação do Relé Percentual para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% da linha de transmissão.....	51
Figura 34 – Magnitude das correntes que fluem no Relé Percentual e momento do trip, para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% linha de transmissão.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valor correspondente ao fluxo remanescente no TC.	39
Tabela 2 – Relação de impedâncias nos pontos de falta da linha de transmissão. ..	40
Tabela 3 – Casos simulados.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI – *American National Standards Institute*
ATP – *Alternative Transient Program*
CC – Curto-Circuito
EMTP – *Electromagnetic Transients Program*
FR – Fluxo remanescente ou fluxo residual
GESEP – Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência
IEC – *International Electrotechnical Commission*
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
LT – Linha de Transmissão
NBR – Norma Brasileira
RMS – *Root Mean Square*
RTC – Razão de transformação do transformador de corrente
SEP – Sistema Elétrico de Potência
TC – Transformador de Corrente
TP – Transformador de Potencial
UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

LISTA DE SÍMBOLOS

A_d – Ajuste % de declividade

f – Frequência de operação do sistema

f_{mm} – Força magnetomotriz

fp – Fator de Potência

fs – Fator de Sobrecorrente

i_1 – Corrente primária

$i_{1/n}$ – Corrente secundária total

$I_{1max\ cc}$ – Corrente máxima eficaz de curto-circuito do enrolamento primário

I_{1nom} – Corrente primária nominal

i_2 – Corrente secundária

I_{cc} – Corrente de curto-circuito

i_e – Corrente de excitação

i_{in} – Corrente secundária do TC 1

i_{loss} – Perdas do núcleo

i_m – Corrente de magnetização

i_{out} – Corrente secundária do TC 2

mH – Milihenry

$N1$ – Número de espiras do enrolamento primário

$N2$ – Número de espiras do enrolamento secundário

R_m – Resistência de magnetização

R_s – Resistência do enrolamento secundário

V_c – Tensão da carga

V_s – Tensão secundária de excitação

X_d – Reatância de dispersão

X_m – Reatância de magnetização

Z_c – Impedância da carga

Z_e – Impedância do ramo de excitação

Z_m – Impedância de magnetização

Ω – Ohm

α – Ângulo de declividade da curva de operação do relé diferencial percentual

Z_+ – Impedância de sequência positiva

Z_0 – Impedância de sequência zero

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Considerações Gerais.....	19
1.2 Objetivos	21
1.3 Motivação.....	21
1.4 Estrutura do Trabalho.....	22
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 Transformadores de Corrente: Modelagem e Aspectos Construtivos	23
2.1.1 Circuito Equivalente dos TCs.....	24
2.1.2 Corrente de Magnetização e Característica de Excitação do TC.	25
2.1.3 Fator de Sobrecorrente (FS).....	26
2.1.4 Efeitos do Fluxo Remanescente	26
2.2 Saturação de Transformadores de Corrente	28
2.3 Proteção Diferencial.....	30
2.3.1 Relé Diferencial Comum	31
2.3.2.1 Característica de operação do Relé Diferencial Percentual	34
2.3.3 Proteção Diferencial de Transformadores	35
2.3.4 Efeitos da Saturação na Proteção Diferencial	36
3 METODOLOGIA	37
3.1 Sistema Teste	37
3.2 Representação da Operação dos Relés	38
4 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	39
4.1 Casos Simulados	39
4.2 Resultados	40
4.2.1 Carga de 4 ohms puramente resistiva para curto-circuito monofásico, fluxo remanescente de 25% ponto de falta 50% LT (caso 38 do banco de dados).	41
4.2.2 Carga de 4 ohms puramente resistiva para curto-circuito bifásico, fluxo remanescente de 25% e ponto de falta 50% LT (caso 98 do banco de dados): .	43
4.2.3 Carga de 4 ohms puramente resistiva para curto-circuito trifásico.	44
4.2.3.1 Fluxo remanescente de 25% e ponto de falta 50% LT (caso 158 do banco de dados):	45

4.2.3.2 Fluxo remanescente de 80% e ponto de falta 50% LT (caso 160 do banco de dados):	46
4.2.4 Carga de 10 ohms puramente resistiva para curto-circuito trifásico, fluxo remanescente de 50% e ponto de falta 10% LT (caso 171 do banco de dados).	49
4.3 Considerações Finais do Capítulo.....	50
5 CONCLUSÃO	52
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	53
REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICE A – Banco de Dados dos sinais com a especificação do número de cada caso simulado e a variação dos parâmetros	56
APÊNDICE B – Resultados das simulações	61

1 INTRODUÇÃO

O Capítulo introdutório apresenta a contextualização do trabalho e a problemática abordada. Além disso, serão expostos os objetivos e a motivação para a realização desta pesquisa, os quais estão associados ao aprimoramento e a contribuição para a otimização dos dispositivos de proteção diferencial. Por fim, é descrita a organização dos demais capítulos.

1.1 Considerações Gerais

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é o conjunto de dispositivos e instalações que, de maneira ordenada, tem a função de realizar a ligação entre a geração de energia e a carga consumidora com a máxima eficiência e o mínimo possível de falhas e interrupções. Para que isto seja possível, são necessários estudos, pesquisas e o planejamento tanto da geração, transmissão, e da distribuição de energia, incluindo a proteção destas etapas. O SEP opera de forma interligada, sendo que as distâncias físicas não são representadas em distâncias elétricas. Assim, os distúrbios propagam-se muito rapidamente pela rede, logo, a proteção do sistema elétrico de potência é de suma importância para a não interrupção do fornecimento de energia elétrica e segurança dos equipamentos envolvidos.

No SEP a proteção é feita por relés, os quais são dispositivos instalados em pontos estratégicos do sistema e que, quando detectam anomalias, atuam enviando um sinal para abertura de um disjuntor, de modo a isolar o mais rápido possível o sistema do ponto onde ocorreu o defeito. A operação dos relés acontece a partir dos sinais de tensão e corrente existentes na rede. Esses sinais são transmitidos aos relés, respectivamente, por de Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs). Fazendo referência apenas aos transformadores de corrente, afirma-se que são equipamentos fundamentais para o correto funcionamento dos métodos de proteção do SEP, pois sua principal função é replicar as altas correntes primárias em menor escala no seu terminal secundário. Assim, asseguram a obtenção dos sinais de corrente da rede, permitindo a operação adequada dos instrumentos de medição e proteção, sem a necessidade destes

equipamentos possuírem correntes nominais idênticas à corrente de carga do circuito ao qual estão conectados.

Os TCs estão sujeitos à saturação de seus núcleos, fenômeno no qual a forma de onda de corrente é distorcida nos terminais secundários do transformador, prejudicando o desempenho dos relés de proteção a eles conectados (SANTOS, 2011), os quais se baseiam em valores RMS da grandeza em questão para determinarem sua atuação ou não no esquema de proteção. A saturação de um TC tem como principais causas as componentes unidirecionais das correntes de curto-circuito, o fluxo magnético remanescente no núcleo e a carga do TC (IEEE Std C57.13-1993 e IEEE Std C37.110-2007). Uma solução seria o dimensionamento do TC com maior núcleo, porém, isso acarretaria na elevação do custo de fabricação.

Vale ressaltar que, durante a saturação, a corrente de excitação do núcleo do TC eleva-se a valores significativos. A corrente no enrolamento secundário após a saturação não representará a forma de onda correspondente da corrente primária. Sendo assim, os relés de proteção, que dependem do valor RMS desta corrente para atuar, poderão interpretar de forma errônea este sinal de corrente secundária, o que pode conduzir ao atraso, adianto ou na operação indevida, desligando desnecessariamente um trecho do sistema. Ainda, um TC saturado pode provocar a não operação dos relés de proteção, comprometendo o funcionamento do sistema elétrico de potência.

De acordo com Rebizant et al. (2004), os relés diferenciais são considerados robustos e confiáveis. Entretanto, existem situações em que esses mecanismos são induzidos a operação incorreta. Os critérios de sensibilidade e seletividade podem não considerar a possibilidade da saturação do TC para faltas externas, podendo ocasionar a operação indevida do relé nessas situações. Em relés de distância, Mooney (2008) constatou que a saturação do TC origina uma redução da magnitude do valor de corrente e na defasagem da mesma, causando um expressivo aumento na impedância vista por relés deste tipo de proteção, resultando em problemas de subalcançe e retardos na operação desses dispositivos. No caso dos relés de sobrecorrente, a saturação do TC pode fazer com que a corrente vista por esses relés seja inferior a real, implicando na não operação ou atraso no tempo de operação dos mesmos (KOJOVIC, 2002; EL-AMIN & AL-ABBAS, 2006). Sendo assim, podemos dizer que o correto funcionamento dos serviços de distribuição, transmissão e a qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor final são

proporcionais ao desempenho dos esquemas de proteção do sistema elétrico de potência.

Nesse contexto, o presente trabalho se propõe a analisar o desempenho de relés diferenciais sob o efeito da saturação dos transformadores de corrente, de modo a identificar possíveis atuações indevidas para defeitos fora da zona protegida, considerando diferentes tipos de curto-circuito, diferentes níveis de fluxo residual nos núcleos dos TCs e alterando os pontos de falta ao longo da linha de transmissão.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo estabelecer contribuições à representação e uma análise da filosofia de proteção diferencial e abordar os assuntos relacionados à saturação dos transformadores de corrente utilizados nos sistemas de proteção do SEP.

Como objetivo específico cita-se:

- Analisar a influência da distorção do sinal de corrente dos enrolamentos secundários do TC provocada pela saturação e seu impacto no comportamento e operação dos relés de proteção diferencial;
- Avaliar o desempenho da proteção diferencial em casos específicos em que os distúrbios ocorram fora de sua zona de proteção.

1.3 Motivação

O relé tem como função principal a proteção com a garantia de sensibilidade, seletividade, velocidade, confiabilidade e robustez, garantindo a continuidade de operação e a vida útil dos equipamentos conectados ao sistema elétrico de potência. Entretanto, em inúmeras situações os mesmos podem ser induzidos a atuar de maneira indevida ou até mesmo não atuarem, em decorrência do fenômeno da saturação, que afeta o núcleo dos transformadores de corrente. A saturação é motivo de estudo desde meados dos anos 20, sendo discutidas alternativas para minimizar ou combater esse problema nos dispositivos de proteção. As últimas décadas foram de grandes avanços computacionais e tecnológicos, o que contribuíram para publicações de inúmeras pesquisas abordando os efeitos da

saturação. São exemplos destes estudos os trabalhos de ZOCHOLL & SMAHA (1992), KEZUNOVIC et al. (1994), BRIDGER & BURSE (1997). Sendo assim, devido à importância da robustez do SEP e de garantir cada vez mais sua segurança e disponibilidade, foi realizado o presente estudo, com o objetivo de se obter uma análise sobre os efeitos da saturação dos TCs e seu impacto sobre o desempenho dos esquemas de proteção diferencial e assim contribuir com a disponibilidade do sistema elétrico, por meio da confiabilidade dos seus esquemas de proteção.

1.4 Estrutura do Trabalho

Na Introdução é retratada a função do Sistema Elétrico de Potência bem como a importância da proteção do mesmo, juntamente encontram-se a estrutura, motivação e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica onde são abordados os fundamentos dos Transformadores de Corrente e tópicos em relacionados ao princípio de funcionamento, tipos de transformadores, a curva de excitação, bem como uma síntese das causas da saturação e seus efeitos sobre a proteção diferencial. Também são apresentados os relés diferenciais e suas principais características de operação e sua função no sistema de proteção.

O Capítulo 3 descreve os métodos para o desenvolvimento do trabalho, desde a realização da pesquisa, formulação do problema até o sistema teste adotado para a realização das simulações e apresenta informações sobre a modelagem e implementação de seus componentes.

No Capítulo 4 são especificados os diferentes tipos de casos de curto-circuito simulados e suas variações, cujos sinais de corrente distorcidas por saturação foram processados através do algoritmo de simulação dos relés, também são expostos e discutidos os resultados obtidos pelas simulações.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho, considerando a utilização da proteção diferencial para um transformador de força e seu o desempenho frente aos casos simulados em que a falta ocorre na linha de transmissão, ou seja, fora da zona de proteção estabelecida pelos TCs.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

A proteção do sistema elétrico de potência é basicamente realizada por relés, estes dispositivos são alocados estrategicamente de modo que interpretem anomalias que ocasionalmente possam ocorrer resultantes de alguma falta ou perturbação e assim atuar isolando o equipamento ou local defeituoso do restante do sistema.

Os transformadores de corrente são responsáveis pela alimentação dos relés, replicando proporcionalmente, mas, em menor escala nos seus terminais secundários os níveis primários de corrente. A saturação destes TCs pode ocasionar a distorção da forma de onda de corrente enviada aos relés e assim resultar na indevida ou até mesmo a não atuação da proteção do sistema elétrico.

2.1 Transformadores de Corrente: Modelagem e Aspectos Construtivos

Os TCs são equipamentos que proporcionam o correto funcionamento dos dispositivos de proteção e medição sem que tenham a necessidade de utilizarem os mesmos valores da corrente de carga do circuito ao qual estão conectados, isto resulta na redução do dimensionamento destes instrumentos.

Além de reproduzir proporcionalmente em seu terminal secundário a forma de onda de corrente do primário e propiciar aos elementos de controle, medição e proteção conectados a este terminal níveis de corrente aceitáveis para seu funcionamento, o transformador de corrente tem por finalidade realizar a isolamento destes componentes do circuito de alta tensão.

O sistema de potência deve ser conectado em série ao enrolamento primário do TC e em série com a bobina do secundário conectam-se os relés.

A razão de transformação de um TC (RTC) é obtida pela Equação 1. E em termos das correntes nominais conforme a Equação 2.

$$RTC = \frac{N2}{N1} \quad (1)$$

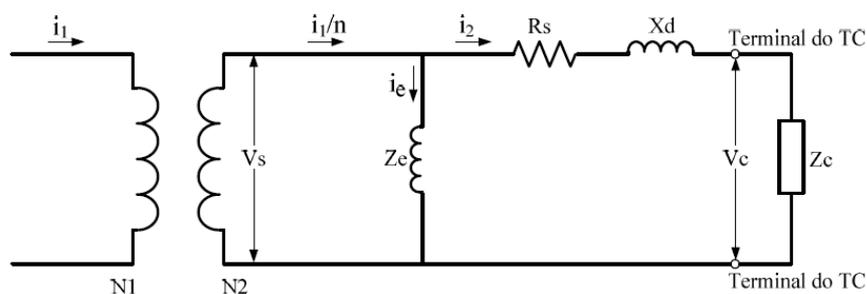
$$RTC = \frac{I_{1nom}}{5} \quad (2)$$

Os valores de RTC podem ser de 5:5, 10:5, 15:5, 20:5, 30:5, 40:5, 50:5, 60:5, 75:5, 100:5, 125:5, 150:5, 200:5, 250:5, 300:5, 400:5, 500:5, 600:5, 800:5, 1000:5, 1200:5, 1500:5, 2000:5, 3000:5, 4000:5, 5000:5, 6000:5, 8000:5 A de acordo com a Norma NBR 6856 (KINDERMANN, 1999). Já de acordo com o padrão ANSI a RTC assume os valores de 10:5, 15:5, 25:5, 40:5, 50:5, 75:5, 100:5, 200:5, 300:5, 400:5, 600:5, 800:5, 1200:5, 1500:5, 2000:5, 3000:5, 4000:5, 5000:5, 6000:5, 8000:5 e 12000:5 A (IEEE Std C57.13-1993). E a corrente nominal fornecida no terminal secundário é de 5A (ANSI e ABNT).

2.1.1 Circuito Equivalente dos TCs

A Figura 1 ilustra o circuito equivalente de um TC conectado a uma carga qualquer, onde V_s simboliza a tensão secundária de excitação, i_1 e i_2 são as correntes primária e secundária respectivamente, i_1/n a corrente secundária total, i_e a corrente de excitação, V_c a tensão da carga, Z_e a impedância do ramo de excitação, R_s a resistência do enrolamento secundário, X_d a reatância de dispersão, Z_c a impedância da carga e o número de espiras é representado por $N1$ para o enrolamento primário e $N2$ para o secundário.

Figura 1 – Circuito equivalente de um transformador de corrente.



Fonte: Santos, 2011, p. 8

Em condições normais de operação o valor da corrente de excitação é muito pequeno e o erro causado por essa corrente se torna desprezível, porém em situações em que ocorram curtos-circuitos o TC pode operar em sua faixa não-linear da curva de magnetização do núcleo, ocorrendo erros expressivos à transformação, distorcendo a forma de onda secundária do sinal de saída e comprometendo a correta operação dos relés de proteção.

A corrente i_e é dada pela Equação 3, sendo i_m a corrente de magnetização e i_{loss} as perdas do núcleo.

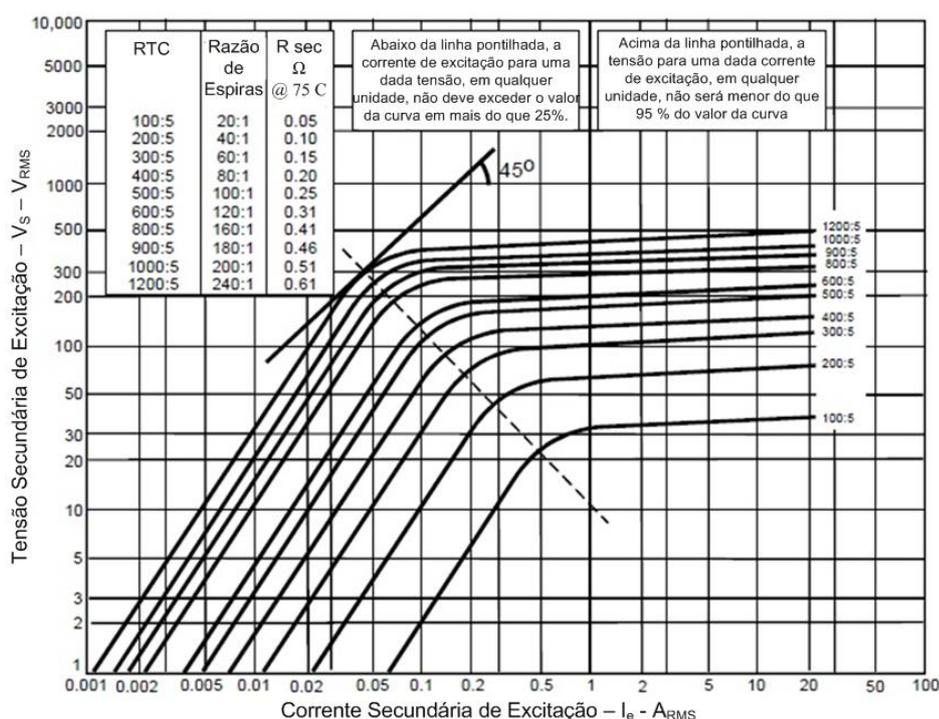
$$i_e = i_m + i_{loss} \quad (3)$$

Os valores máximos de erros admitidos para TCs utilizados nos esquemas de proteção são de 2,5%, 5% e 10%, sendo 10% como valor mais utilizado.

2.1.2 Corrente de Magnetização e Característica de Excitação do TC.

A curva que relaciona a tensão do secundário V_s em função da corrente de excitação do núcleo i_e do TC é chamada de curva de excitação, em escala logarítmica esta curva representa a operação de cada TC, é obtida em ensaios e cálculos realizados ainda durante o processo de fabricação. A Figura 2 mostra o conjunto de curvas para um TC do tipo C.

Figura 2 – Curvas de excitação típicas para TCs classe C



Fonte: IEEE Std C37.110-2007

O ponto de máxima permeabilidade magnética do núcleo do transformador de corrente é conhecido como de Ponto de Joelho “*knee-point*” (IEEE std C37 110-2007), neste ponto ocorre um incremento de 10% na tensão de excitação

provocando uma alteração em 50% na corrente de excitação (IEC 60044-6). De acordo com o padrão ANSI o joelho da curva de excitação é definido como o ponto em que a tangente da curva forma um ângulo de 45° com a abscissa para TCs sem entreferro, porém para núcleos com entreferro o ângulo deve ser de 30°.

A operação dentro da região linear da curva de magnetização do núcleo do TC ocorre quando os valores de tensão e corrente não ultrapassam o joelho da curva, quando estes valores ultrapassam o limite deste ponto, o TC opera em sua região não linear, nessa região seu núcleo encontra-se magneticamente saturado e como consequência provoca a distorção da forma de onda de corrente do sinal do secundário.

2.1.3 Fator de Sobrecorrente

Define a razão entre o valor máximo da corrente de curto-circuito eficaz que pode circular pelo primário e a corrente primária nominal que permita a operação do TC em sua região linear da curva de saturação e mantenha o erro de sua classe. O fator de sobrecorrente (f_s) é dado por (4). A ABNT adota como valores para o fator de sobrecorrente 5, 10, 15 ou 20. O Padrão ANSI padroniza como 20.

$$f_s = \frac{I_{1\max cc}}{I_{1nom}} \quad (4)$$

Relacionado ao aspecto construtivo o f_s produz uma limitação no transformador de corrente quanto ao erro oriundo da falta de linearidade da curva de magnetização do núcleo (KINDERMAN, 1999).

Os TCs destinados à proteção adotam como precisão 2,5% e 10%, e o erro máximo não deve exceder este valor.

2.1.4 Efeitos do Fluxo Remanescente

O fluxo remanescente ou fluxo residual (FR) é definido como a densidade de fluxo que certo material precisa para manter-se magnetizado mesmo após a força magnetomotriz (f_{mm}) ser removida. O fluxo remanescente presente no núcleo dos TCs está relacionado com o valor do fluxo no instante anterior a interrupção da

corrente primária, e é determinado pelos valores da componente unidirecional, corrente primária simétrica e da impedância do circuito secundário. O máximo fluxo residual acontece na interrupção da corrente primária durante a saturação do transformador.

Uma vez estabelecido no núcleo do TC, o fluxo remanescente é lentamente dissipado. Uma tensão equivalente a 60% da tensão do ponto de joelho deve ser aplicada para reduzir o fluxo remanescente em menos de 10% da densidade de fluxo de saturação. O fluxo remanescente permanecerá no núcleo até que este seja desmagnetizado (SANTOS, 2011). Em IEEE Std C37 110-2007 são descritas algumas formas de controlar o fluxo remanescente:

- Utilizando núcleos com entreferro;
- Núcleos com duas magnetizações;
- Quantidades diferentes de aço no núcleo.

2.1.5 Tipos de TCs Considerando Aspectos Físicos e de Construção

Os TCs são classificados quanto ao modelo do enrolamento primário e de acordo com o formato do núcleo (IEEE Std C57.13-1993 e IEEE Std C37.110-207). Quanto sua construção mecânica os principais tipos de TC são:

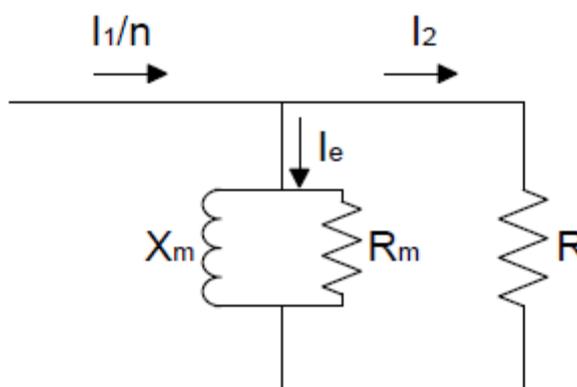
- Tipo Enrolado: O enrolamento do primário é composto de uma ou mais espiras que envolvem mecanicamente o núcleo do transformador. Os enrolamentos são isolados entre si. É indicado para utilização em sistemas de medição;
- Tipo Barra: O primário é constituído de uma barra fixada por intermédio do núcleo, este tipo de TC é indicado para resistir aos esforços causados por elevados valores de corrente;
- Tipo Bucha: Composto de núcleo toroidal é semelhante ao tipo barra, porém, sua instalação é feita na bucha na dos equipamentos elétricos que funcionam como enrolamento primário, possuem maior precisão para altas correntes e não são utilizados para medição;
- Tipo Janela: O secundário e o núcleo são isolados e não possui enrolamento primário integrado a sua estrutura. Contém uma abertura

através do núcleo onde passa um condutor que é utilizado como primário sendo o ar é o isolante entre este condutor e o corpo do TC.

2.2 Saturação de Transformadores de Corrente

O circuito simplificado de um TC mostrado pela Figura 3, onde i_1 é a corrente primária, n é a relação de transformação, i_e é a corrente de excitação do núcleo e i_2 a corrente fornecida a carga R pelo terminal secundário, esta corrente é calculada através da Equação 5. X_m , R_m e Z_m representam a reatância, resistência e a impedância de magnetização respectivamente.

Figura 3 – Circuito simplificado do transformador de corrente

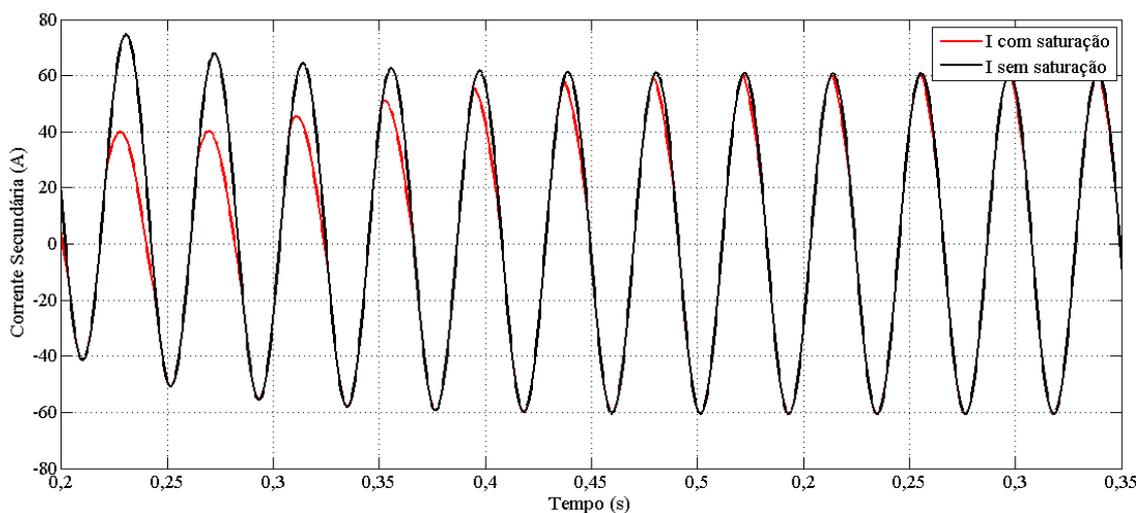


Fonte: Santos, 2011, p. 17

$$i_2 = \frac{i_1}{n} - i_e \quad (5)$$

Operando em sua condição padrão o transformador de corrente retrata de maneira fiel no secundário a forma de onda equivalente das correntes do primário, no entanto, em condições de saturação magnética do núcleo o valor desta impedância sofre uma queda considerável e a maior parcela da corrente i_1/n transita pelo ramo de magnetização, distorcendo o sinal recebido pela carga conectada ao TC. A distorção destes sinais pode ser observada na Figura 4, que também apresenta um comparativo entre o sinal distorcido pela saturação e o sinal ideal.

Figura 4 – Formas de onda da corrente secundária para um TC saturado e não-saturado



Fonte: Autoria Própria

As componentes unidirecionais das correntes de curto-circuito, o fluxo magnético remanescente no núcleo e a carga do TCs são as principais causas da saturação (IEEE Std C57.13-1993 e IEEE Std C37.110-2007). Um TC dimensionado com núcleo maior poderia ser uma solução, entretanto, aumentaria valor dos custos de fabricação.

O normalmente os TCs são capazes de reproduzir de forma precisa as correntes assimétricas de curto-circuito por até dois ciclos antes de entrarem na sua região saturada de atuação (IEEE Std C37.110-2007). O guia IEEE também cita como fatores que determinam o tempo até saturação de transformadores de corrente empregados nos sistemas de proteção:

a) Grau de assimetria da corrente de falta: Quanto mais elevada a assimetria da corrente de falta, o tempo até a saturação será menor.

b) Magnitude da corrente de falta: As magnitudes da componente senoidal da corrente e da corrente assimétrica são proporcionais, conforme maior for à magnitude da corrente de falta mais rápido acontece a saturação do núcleo do TC.

c) Fluxo remanescente no núcleo do TC: O fluxo remanescente do núcleo do transformador, irá se somar ou subtrair com o fluxo gerado pela corrente primária de falta, dependendo de sua polaridade. Caso ocorra uma soma entre fluxos, o TC irá saturar mais rapidamente.

d) Impedância do circuito secundário: Quanto maior for à carga conectada no secundário do TC, menor será o tempo até a saturação, pois cargas maiores exigem

maiores níveis de tensão e o fluxo é proporcional à tensão. Para duas impedâncias de mesma magnitude, a de maior parcela saturará de forma mais lenta do que para cargas puramente resistivas. Isso ocorre, pois, a indutância representa baixa impedância para as componentes contínuas das correntes assimétricas, diminuindo a tensão na carga e o fluxo associado.

e) Tensão de saturação: Quanto maior for a seção transversal do núcleo de um TC, maior será o fluxo exigido para o TC saturar. Assim, ocorre o aumento da tensão de saturação e, conseqüentemente, aumenta o tempo até a saturação ocorrer.

f) Relação de espiras: Ao aumentar a razão de espiras secundárias, a quantidade de fluxo necessário para produzir uma força eletromotriz secundária será pequena e a saturação ocorrerá para tensões mais altas. Porém, um incremento no número de espiras pode reduzir a corrente no secundário para determinada corrente primária, diminuindo o fluxo no núcleo.

2.3 Proteção Diferencial

A filosofia de proteção diferencial tem sido aplicada no SEP desde o fim do século 19, sendo um dos primeiros sistemas de proteção utilizados, é empregada geralmente aos transformadores de força, barramentos, grandes motores e geradores, linhas de transmissão que empregam sistemas de tele proteção, reatores, entre outros (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

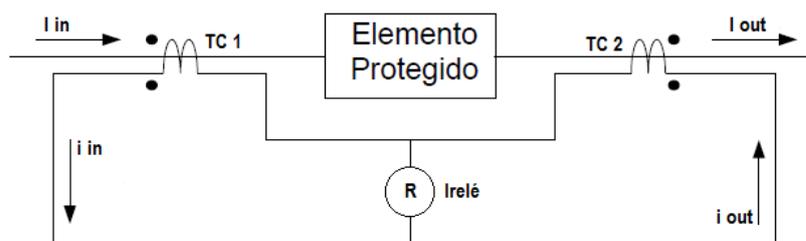
A proteção diferencial só deverá ocorrer para faltas internas a zona delimitada (protegida) pelos TCs. Sendo a única condição para a operação do relé quando a corrente que passa pela bobina de operação $I_{relé}$ (diferença fasorial entre as correntes secundárias dos i_{in} e i_{out}) for maior que um valor de corrente de ajuste previamente determinado. Logo, se $i_{in} = i_{out}$, a corrente $I_{relé} = 0$, o relé não atua. Quando $I_{relé} \leq I_{ajuste}$, o relé não atua e finalmente para $I_{relé} \geq I_{ajuste}$, o relé irá atuar. A corrente $I_{relé}$ é dada pela Equação 6:

$$I_{relé} = i_{in} - i_{out} \quad (6)$$

O relé diferencial é representado pelo número de função 87, a Figura 5 mostra o circuito simplificado da proteção diferencial de transformadores com o

esquema de conexão dos TCs conectados em série aos ramais primários e secundários. Logo, a corrente do relé ou corrente diferencial é constantemente monitorada pelo relé de proteção que desconecta o transformador caso a corrente diferencial seja maior que o valor limiar (*pick-up*) de ajuste.

Figura 5 – Esquema básico da proteção diferencial



Fonte: Autoria Própria

2.3.1 Relé Diferencial Comum

É o tipo mostrado acima (Figura 5) e é composto de um relé de sobrecorrente com a função diferencial 87. Ajusta-se neste relé apenas um valor de corrente, que estipula o limite para corrente diferencial sem a atuação do relé. O relé atua quando o valor de ajuste é superado (SANTOS, 2011).

2.3.2 Relé Diferencial Percentual

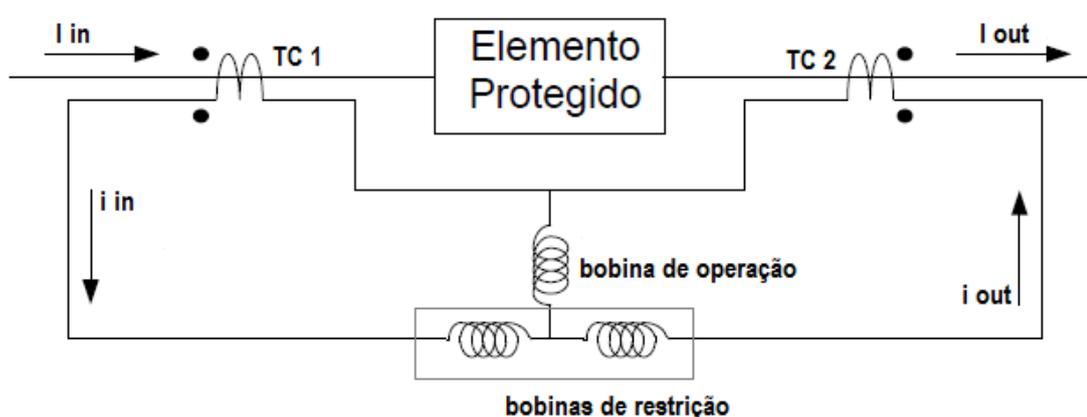
O relé diferencial percentual segue a filosofia de proteção apresentada anteriormente, porém, possui um circuito diferencial que adiciona maior robustez à sensibilidade por pequenas correntes diferenciais, uma vez que as bobinas de retenção permitem uma variação nos limiares de atuação (ANDERSON, 1999).

Logo, pode-se dizer que o esquema diferencial percentual é uma adaptação do modelo de proteção diferencial comum, com a alteração na adição de bobinas de restrição que limitam sua operação e desta forma a operação do relé se dará de acordo com uma curva característica separando as zonas de atuação e não atuação.

No circuito de proteção diferencial percentual estão presentes duas correntes circulantes que podem ser definidas como:

- Corrente de restrição: Percorre as bobinas de restrição do circuito diferencial, é dada pela Equação 7 e que faz referência ao torque de restrição aplicado por esta corrente ao movimento do disco dos obsoletos relés diferenciais eletromecânicos.
- Corrente de operação: Representa a corrente que flui pela bobina de operação conectada em série com relé de sobrecorrente, determinada pela diferença entre as correntes secundárias dos TCs conectados ao circuito diferencial Equação 8.

Figura 6 – Esquema simplificado de proteção diferencial percentual



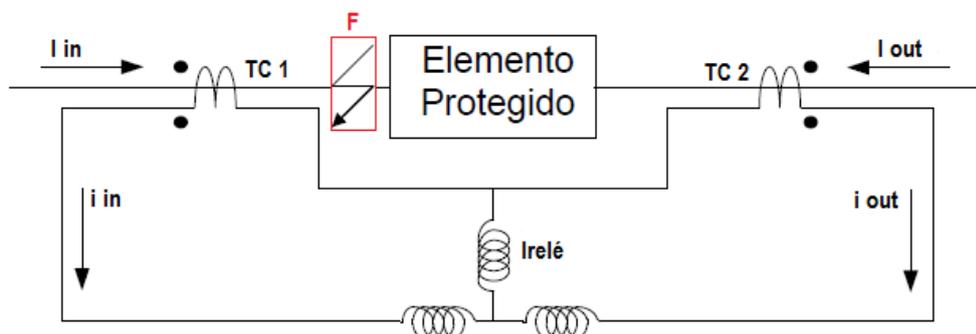
Fonte: Autoria Própria

$$I_{restrição} = \frac{i_{in} + i_{out}}{2} \quad (7)$$

$$I_{operação} = i_{in} - i_{out} \quad (8)$$

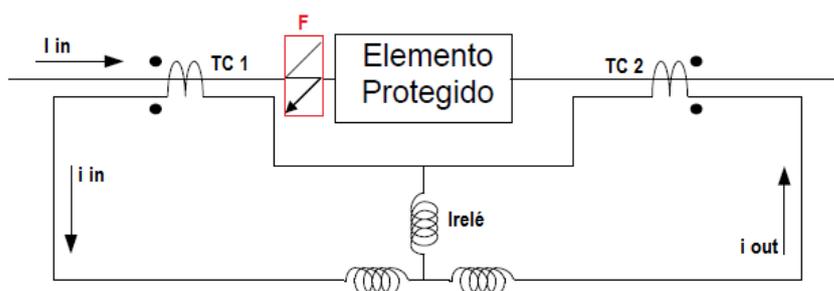
Para faltas externas ao trecho protegido, a corrente $(i_{in} - i_{out})$ será igual a zero, pois a corrente de entrada é a mesma que a corrente de saída e, portanto, não deve ocorrer a atuação da proteção. Quando ocorre uma falta interna, i_{out} torna-se negativo, a corrente na bobina de operação será $(i_{in} + i_{out})$ e a restrição depende da razão entre i_{in} e i_{out} , para $i_{in} = i_{out}$, a restrição será desprezível ou nula.

Figura 7 – Esquema simplificado de proteção diferencial percentual para falta interna a região protegida em um sistema radial



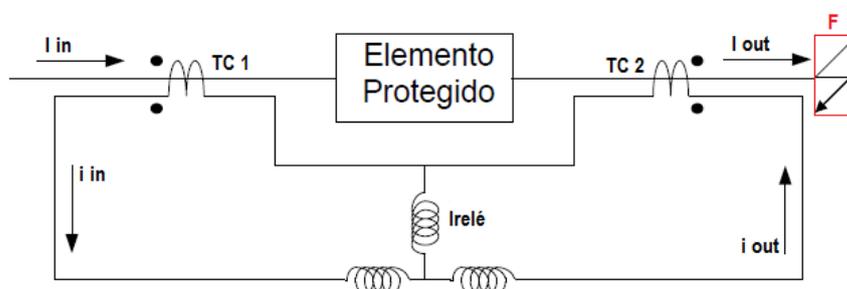
Fonte: Autoria Própria

Figura 8 – Esquema simplificado de proteção diferencial percentual para falta interna a região protegida em um sistema em anel



Fonte: Autoria Própria

Figura 9 – Esquema simplificado de proteção diferencial percentual para falta externa a região protegida



Fonte: Autoria Própria

2.3.2.1 Característica de operação do Relé Diferencial Percentual

A fim de garantir o correto funcionamento do esquema de proteção diferencial, são necessários ajustes nas relações de transformação dos transformadores. Devido a erros encontrados no processo de produção, e às propriedades físicas dos materiais magnéticos utilizados, pequenas correntes diferenciais podem estar presentes na bobina de operação do relé. Diante disso, adota-se uma margem de segurança para a corrente de operação que determina um nível mínimo de corrente diferencial a partir do qual o relé deverá atuar. Essa margem de corrente de operação é fixada através da especificação do fator k , chamado característica diferencial percentual e é definida através da Equação 9 (HARLOW, 2007):

$$I_{\text{operação}} \geq k I_{\text{restrição}} \quad (9)$$

Dois ajustes devem ser feitos para o relé diferencial percentual:

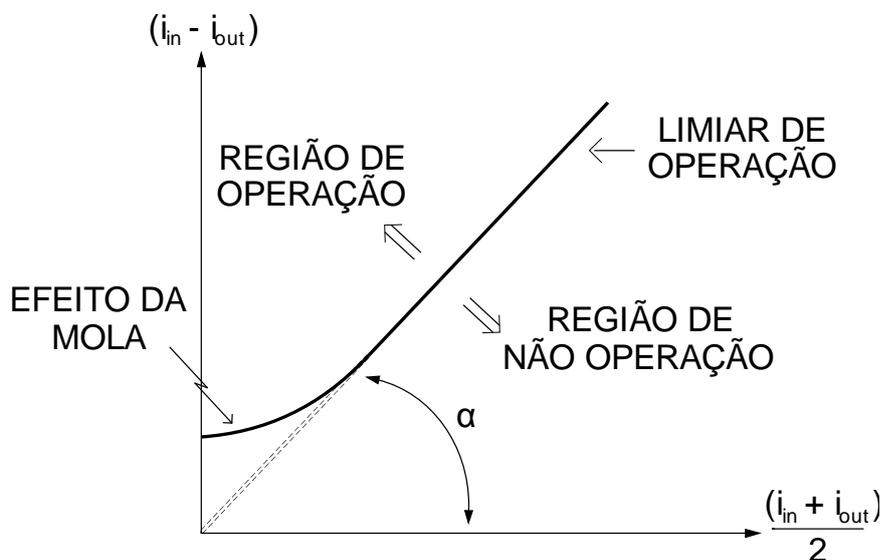
- i) Ajuste da declividade (A_d) ou *slope* (Equação 10), podendo ser adotado de 5% a 25% para máquinas síncronas e entre 10% e 45% para transformadores de potência. Se a declividade for de 20%, tem-se o ângulo = 11,31°. Sendo assim, um relé com ajuste de 20% possui maior sensibilidade do que um relé com ajuste de 45% (maior declividade).

$$A_d = \text{tg}(\alpha) \quad (10)$$

- ii) Ajuste do *pick-up* do relé (I_{ajuste}), é o ajuste inicial da corrente mínima de atuação podendo ser de 0,1A ou 0,2A, ou o valor recomendado pelo fabricante de acordo com o modelo do relé (KINDERMAN, 2006).

E com base nos parâmetros e valores de ajuste citados acima tem-se a curva característica de operação do relé diferencial percentual, esta curva é semelhante à mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Curva de operação do relé diferencial percentual.



Fonte: Autoria Própria

2.3.3 Proteção Diferencial de Transformadores

A robustez dos esquemas de proteção diferencial de transformadores, depende dos relés utilizados, do tipo de transformador (autotransformador, transformador de dois ou três enrolamentos) e da prioridade do transformador na operação do sistema. Vários fatores influenciam o desempenho desta proteção quando aplicada a transformadores, sendo alguns deles:

- A localização dos TCs definindo a zona protegida;
- A Conexão do transformador, estabelece o tipo de ligação dos TCs, objetivando o balanço das correntes passantes devido a defasagem angular e a relação de transformação do transformador.
- Desequilíbrios provocados pelas relações de transformação de TCs e do transformador, acarretando a presença de corrente diferencial.
- A presença de corrente transitória durante a energização do transformador
- O fenômeno da saturação e erro de exatidão provocam correntes diferenciais elevadas para as condições de carga ou de defeitos externos.

De acordo com Harlow (2007) o relé diferencial com característica percentual típica com restrição harmônica soluciona os problemas relacionados ao fenômeno

inrush e sobre excitação de forma eficiente. Porém a proteção diferencial poderá atuar de maneira indevidamente para faltas externas em casos que ocorram:

- Grande diferença entre os erros dos TCs;
- Alto nível de carregamento no enrolamento secundário dos TCs, podendo ocorrer a saturação;
- Problemas relacionados ao equipamento dentro da zona de proteção.

2.3.4 Efeitos da Saturação na Proteção Diferencial

Embora relés diferenciais sejam considerados confiáveis e robustos, existem situações em que esses dispositivos serão induzidos a operar indevidamente. Critérios de alta sensibilidade e seletividade podem não considerar a possibilidade da saturação do TC para faltas externas, podendo levar o relé a operar de forma incorreta (REBIZANT et al., 2004).

A saturação do TC, durante faltas externas, gera correntes diferenciais fictícias que podem ser maiores do que os valores de ajuste para operação do relé diferencial. Sendo assim, o relé considerará a falta externa como interna e irá operar indevidamente (DASHTI et al., 2007).

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda as metodologias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho, este, realizado dentro das instalações da universidade sendo grande parte do material disponibilizado pelo Grupo de Energia e Sistemas Elétricos – GESEP da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA. A produção do trabalho se deu durante as seguintes etapas:

- Revisão da literatura e análise do problema;
- Criação do sistema teste;
- Simulações de curto-circuito;
- Implementação da lógica dos relés;
- Simulações da operação do sistema de proteção diferencial para os diferentes casos propostos;
- Análise dos resultados obtidos.

3.1 Sistema Teste

O sistema teste adotado para as simulações de curto-circuito pode ser visto na Figura 11. A partir destas simulações em EMTP-ATP - *Alternative Transient Program* foram obtidos os sinais de tensão e corrente empregados no estudo.

A frequência do sistema é 60 Hz. Os geradores G_1 e G_2 possuem a mesma amplitude de tensão, porém, com um ângulo de defasagem de 30° (atraso de G_2 em relação a G_1), de modo que o fluxo de potência se dá no sentido de G_1 para G_2 . A impedância de sequência zero (Z_0) é de $3,681 + j24,515\Omega$ e de e sequência positiva (Z_+) é de $0,819 + j7,757\Omega$ para esses geradores.

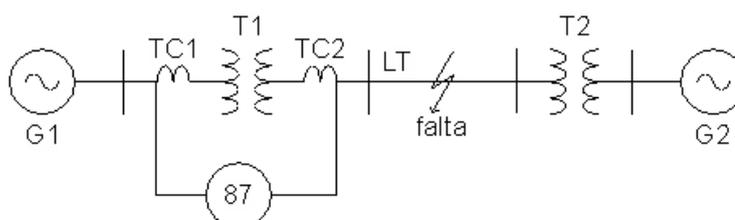
A linha de transmissão possui comprimento de 100 km. Suas impedâncias de sequência zero e positiva são, respectivamente: $Z_0 = 18,41 + j122,58\Omega/\text{km}$, e $Z_+ = 4,1 + j 38,78 \Omega/\text{km}$. Ainda, ressalta-se que foram simulados TCs do tipo C400, com relação de transformação igual a 2000:5 em ambos os terminais, uma vez que o transformador de força possui relação de transformação de 1:1, a resistência e a indutância do secundário do transformador são respectivamente $0,5 \Omega$ e $0,3 \text{ mH}$.

Kezunovic et al. (1994) detalham o modelo do transformador de núcleo saturável adotado nas simulações.

As simulações foram realizadas com carga de 4 ohms puramente resistiva, 4 ohms e fator de potência 0,5 e carga de 10 ohms puramente resistiva.

O tempo total de cada simulação foi de 0,4 segundos, e, em todos os casos simulados, a falta ocorre no instante de tempo de 0,19 s.

Figura 11 – Sistema teste proposto.



Fonte: Autoria Própria

3.2 Representação da Operação dos Relés

Os relés tiveram suas características de operação implementadas em rotinas estruturadas no software Matlab®, reproduzindo a lógica de operação de um relé diferencial comum e um relé diferencial percentual. Os valores foram ajustados em 10% para a declividade logo o *slope* do relé diferencial percentual é $\alpha = 5,71^\circ$. O *pick-up* do relé segue o valor recomendado de 0,2A.

Para determinar os valores RMS instantâneos dos sinais de tensão e corrente oriundos das simulações de curto-circuito foi implementado também em Matlab® um filtro de Fourier de ciclo completo. Esses sinais foram catalogados compõe o banco de dados (Apêndice A) de sinais, usado para alimentar o algoritmo principal que através do processamento destas informações determina a atuação dos relés de proteção.

4 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

Uma vez apresentada a metodologia adotada, este Capítulo tem como objetivo expor os resultados obtidos através das simulações de curto-circuito e o comportamento detalhado da proteção diferencial frente a 5 casos, de um total de 180. Com o propósito de observar o desempenho do relé diferencial em diferentes situações, os casos escolhidos apresentam algumas variações de parâmetros.

4.1 Casos Simulados

Foram simulados curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos, variando o nível de fluxo remanescente do TC saturado da fase A em 0%, 25%, 50% e 80% para as cargas citadas no item 3.1, a relação do valor percentual com o valor real é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Valor correspondente ao fluxo remanescente no TC

Fluxo Remanescente Máximo	Valor Residual Correspondente
0%	0 V
25%	0,3775 V
50%	0,755 V
80%	1,208 V

Fonte: Autoria Própria

Como o propósito deste trabalho é investigar o comportamento da proteção diferencial quando ocorrem distúrbios fora da zona de proteção, os pontos de ocorrência das faltas foram adotados a partir de 0% da linha de transmissão, passando por 5%, 10%, 25% até 50% da LT, as impedâncias utilizadas nas simulações do ATP antes e após o local da falta são mostradas na Tabela 2.

Todos os casos foram simulados para amostragens de 5760 Hz (96 amostras/ciclo), 3840 Hz (64 amostras/ciclo), 1920 Hz (32 amostras/ciclo), 960 Hz (16 amostras/ciclo) e 480 Hz (8 amostras/ciclo). A variação de parâmetros e os valores utilizados para os mesmos, bem como o número total de simulações realizadas são mostrados na Tabela 3.

Tabela 2 – Relação de impedâncias nos pontos de falta da linha de transmissão

Ponto de Falta	Impedância da LT Antes do Local da Falta	Impedância da LT Após o Local da Falta
0% LT	0	$Z_o = 18,41 + j122,58\Omega$ $Z_+ = 4,1 + j38,78\Omega$
5% LT	$Z_o = 0,921 + j6,129\Omega$ $Z_+ = 0,205 + j1,939\Omega$	$Z_o = 17,49 + j116,45\Omega$ $Z_+ = 3,895 + j36,841\Omega$
10% LT	$Z_o = 1,841 + j12,26\Omega$ $Z_+ = 0,41 + j3,878\Omega$	$Z_o = 16,569 + j110,32\Omega$ $Z_+ = 3,69 + j34,902\Omega$
25% LT	$Z_o = 4,603 + j30,65\Omega$ $Z_+ = 1,025 + j9,695\Omega$	$Z_o = 13,808 + j91,935\Omega$ $Z_+ = 3,075 + j29,085\Omega$
50% LT	$Z_o = 9,205 + j61,29\Omega$ $Z_+ = 2,05 + j19,39\Omega$	$Z_o = 9,205 + j61,29\Omega$ $Z_+ = 2,05 + j19,39\Omega$

Fonte: Autoria Própria

Tabela 3 – Casos simulados

Parâmetro	Varição
Tipos de CC	Monofásico, Bifásico, Trifásico
Carga do TC	4 Ω resistiva, 10 Ω resistiva, 4 Ω fp=0,5
Nível Fluxo Residual	0%, 25%, 50%, 80%
Ponto de Falta	0% LT, 5%LT, 10% LT, 25% LT, 50% LT
Amostras/Ciclo	8, 16, 32, 64, 96
Total de Simulações	900

Fonte: Autoria Própria

4.2 Resultados

Após inseridos os parâmetros característicos do sistema a ser simulado, o ATP fornece uma série de sinais de resposta, para a realização deste trabalho, foram utilizados apenas os sinais da corrente primária (ideal) e secundária (distorcida), referentes à Fase A do sistema. Como já mencionado, são essas informações que compõem o banco de sinais a ser processado pelo algoritmo desenvolvido.

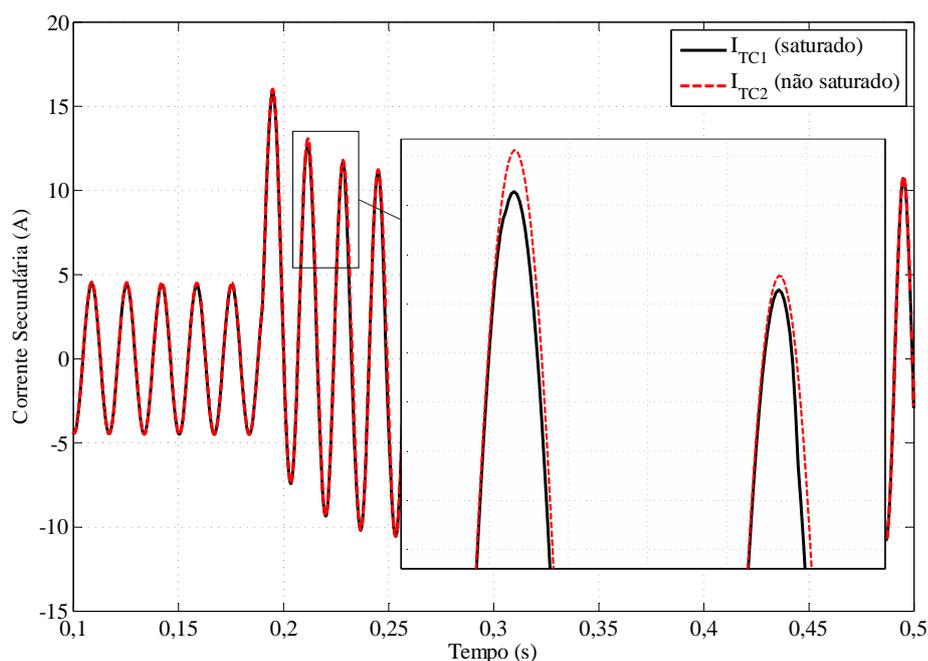
Os resultados descritos neste tópico retratam o comportamento do relé diferencial mediante a influência dos sinais distorcidos pela saturação dos TC para diferentes condições de curto-circuito na linha de transmissão do sistema teste proposto. A seguir, são apresentadas as respostas das simulações e discutidos 5 de um total de 180 casos, todas as situações abaixo utilizam uma taxa de 96 amostras/ciclo. O Apêndice B contém o tempo de atuação dos relés para todas as simulações realizadas.

4.2.1 Carga de 4 ohms puramente resistiva para curto-circuito monofásico, fluxo remanescente de 25% ponto de falta 50% LT (caso 38 do banco de dados).

A Figura 12 mostra as formas de onda de corrente do TC 1 saturado e do TC 2 em condição de não saturação, ambos conectados a fase A do sistema, os valores RMS dessas correntes são exibidos na Figura 13, as diferenças visualizadas não são de maior importância, visto que em caso de curto externo, o elemento diferencial de operação do relé é submetido praticamente a diferença entre os módulos das correntes secundárias dos TCs 1 e 2. Nesta situação, de nível de curto-circuito relativamente baixo, os fatores que poderiam causar um significativo desbalanço entre as correntes, não estão presentes com intensidade suficiente para provocar a operação indevida da proteção diferencial para a ocorrência da falta externa ao transformador.

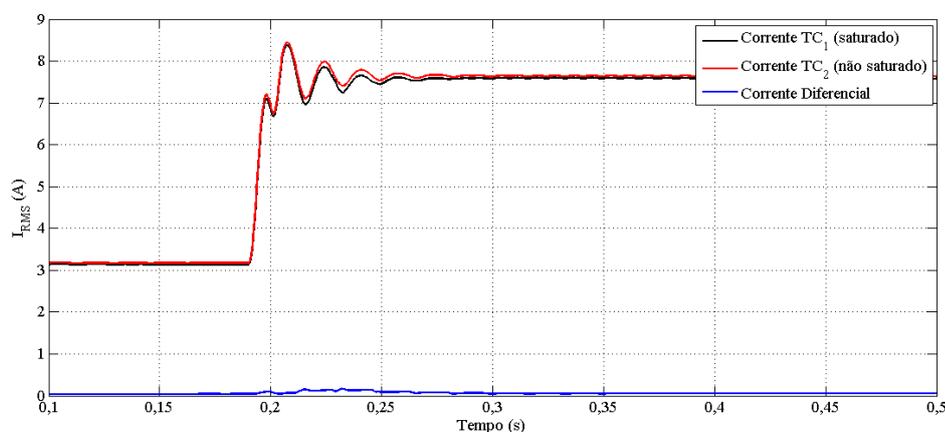
Portanto, registra-se neste caso o correto comportamento dos relés diferenciais ao não atuarem, como pode ser visto a ausência do disparo (*trip*) do relé nas Figuras 14 e 15, para o relé diferencial comum e percentual respectivamente.

Figura 12 – Forma de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) do para carga de 4 ohms resistiva, falta monofásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.



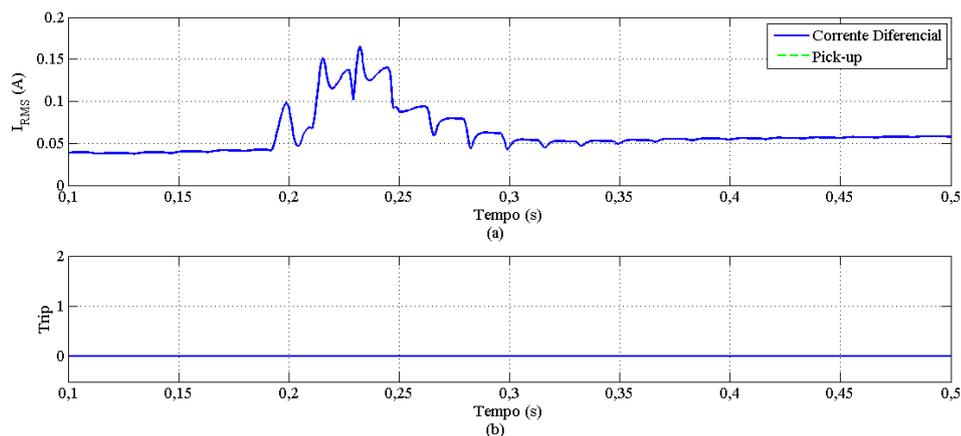
Fonte: Autoria Própria

Figura 13 – Valor RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 4 ohms resistiva, falta monofásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão



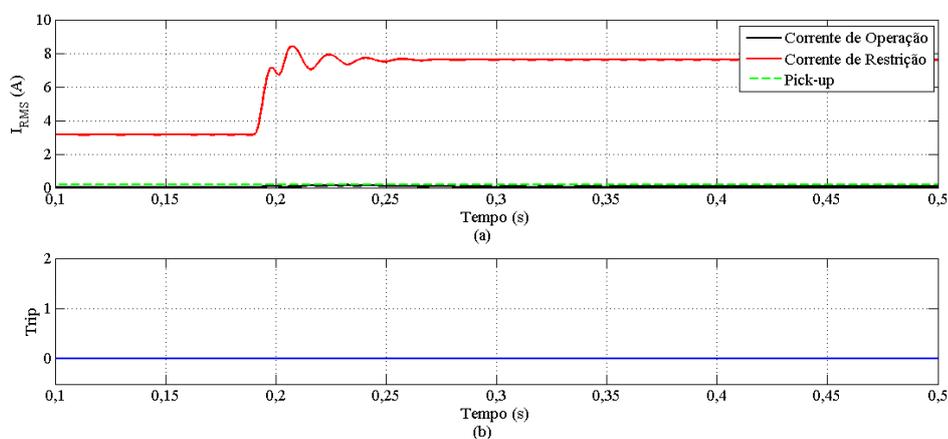
Fonte: Autoria Própria

Figura 14 – Comportamento da corrente diferencial e *trip* do Relé Comum para carga de 4 ohms resistiva, falta monofásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.



Fonte: Autoria Própria

Figura 15 – Comportamento das correntes e *trip* do Relé Percentual para carga de 4 ohms resistiva, falta monofásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão

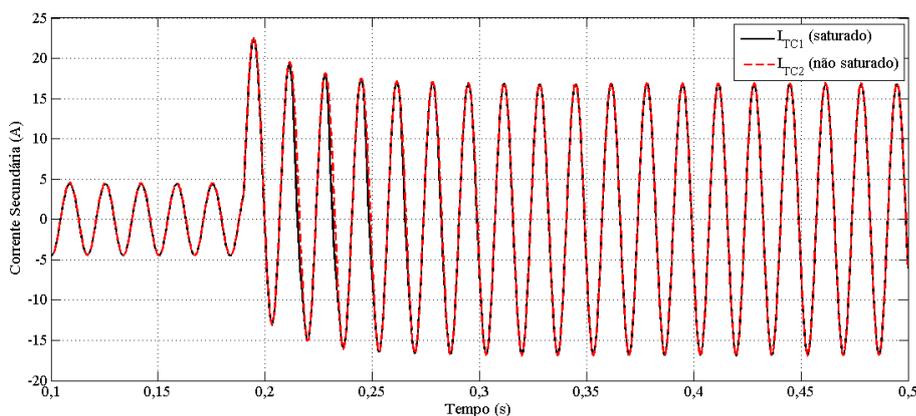


Fonte: Autoria Própria

4.2.2 Carga de 4 ohms puramente resistiva para curto-circuito bifásico, fluxo remanescente de 25% e ponto de falta 50% LT (caso 98 do banco de dados):

Neste caso a distorção do sinal da corrente secundária já ocorre com maior intensidade, desde o segundo ciclo após o instante da falta Figura 16, mesmo mantendo os mesmos parâmetros do caso acima, porém para curto-circuito bifásico.

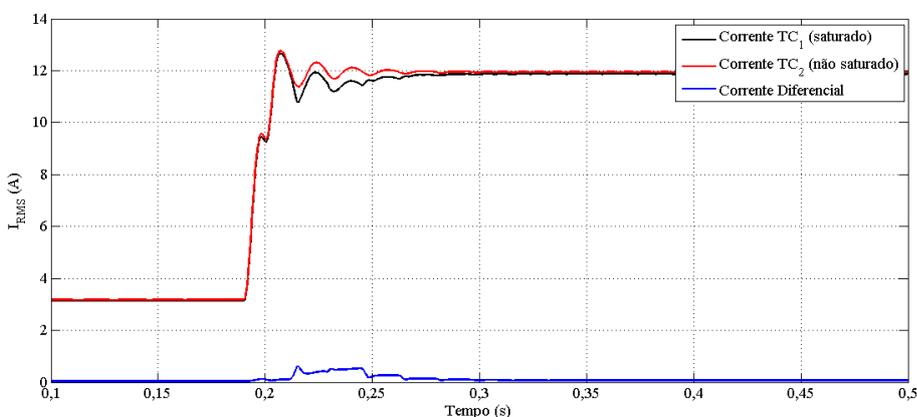
Figura 16 – Forma de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) do para carga de 4 ohms resistiva, falta bifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 17 podemos observar o maior desbalanço entre as correntes secundárias dos TCs 1 e 2, visto a influência do erro referente as relações de transformação dos TCs. Entretanto, este erro não é suficiente para provocar a operação indesejada do relé percentual.

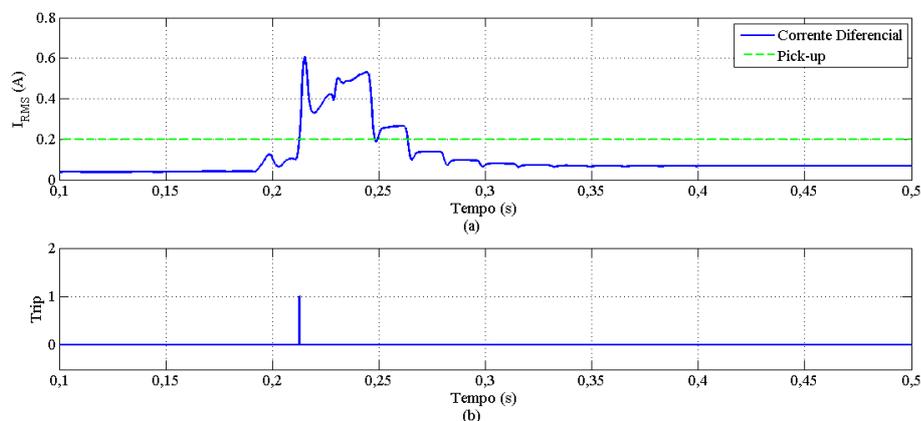
Figura 17 – Valor RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 4 ohms resistiva, falta bifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão



Fonte: Autoria Própria

A intensidade da corrente para este nível de curto-circuito já foi suficiente para atuação do relé comum (Figura 18), o trip do relé acontece no instante 0,2128 s.

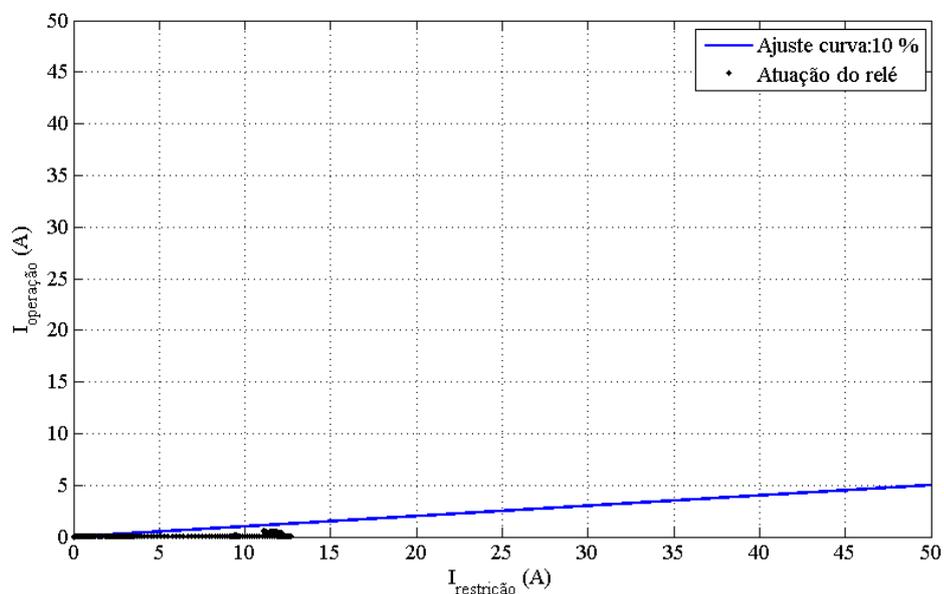
Figura 18 – Comportamento das correntes e *trip* do Relé Comum para carga de 4 ohms resistiva, falta bifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão



Fonte: Autoria Própria

É importante mencionar a vantagem da proteção diferencial percentual, pois, sem as bobinas de restrição a possibilidade de operação seria maior, dado que a corrente de operação estaria alcançando valores próximos ao *pick-up* (Figura 19).

Figura 19 – Comportamento do Relé Percentual para carga de 4 ohms resistiva, falta bifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão



Fonte: Autoria Própria

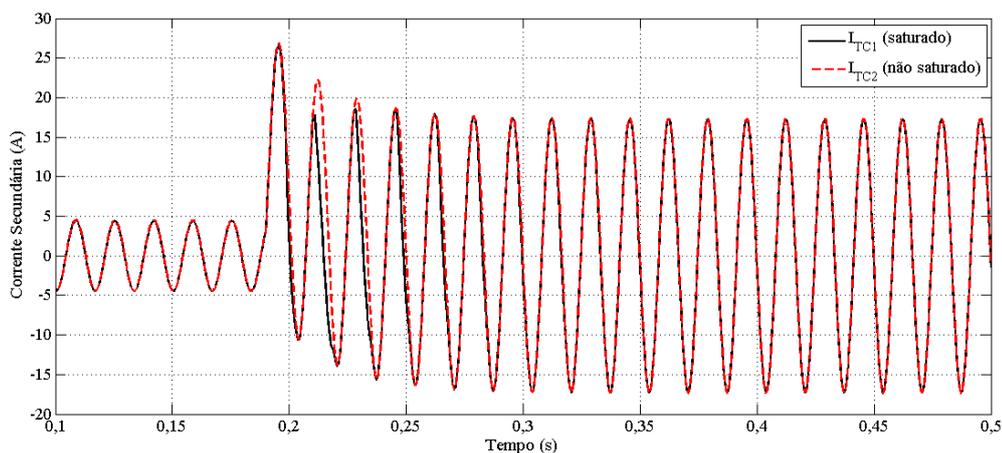
4.2.3 Carga de 4 ohms puramente resistiva para curto-circuito trifásico.

Este item apresenta curtos-circuitos trifásicos com mesma carga, porém, com variações do ponto de falta na linha de transmissão e do nível fluxo remanescente do TC saturado.

4.2.3.1 Fluxo remanescente de 25% e ponto de falta 50% LT (caso 158 do banco de dados):

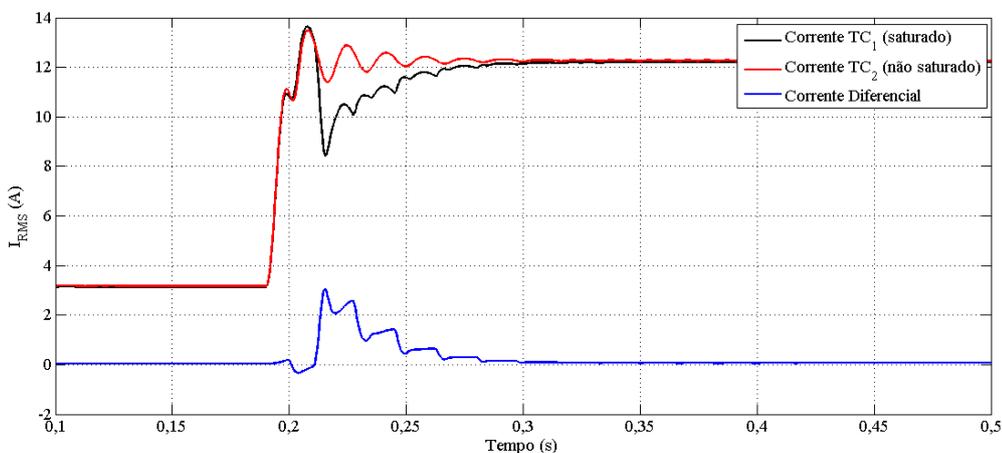
Para a falta trifásica exibida neste caso, as distorções do sinal saturado mostrado na Figura 20, ocorrem com maior expressão do que nas faltas monofásica e bifásica dos itens acima, as deformidades ocorrem a partir do segundo semiciclo após a falta, agravando-se a partir do segundo ciclo e se estendendo até o 5º ciclo pós falta. A Figura 21 mostra a diferença do valor RMS entre as correntes secundárias dos TCs. Novamente, acontece a atuação indevida do esquema de proteção.

Figura 20 – Formas de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) do para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.



Fonte: Autoria Própria

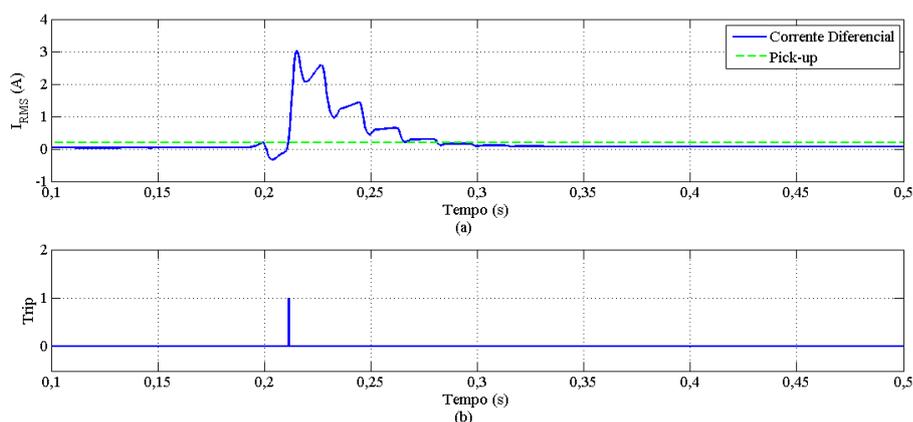
Figura 21 – Valor RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.



Fonte: Autoria Própria

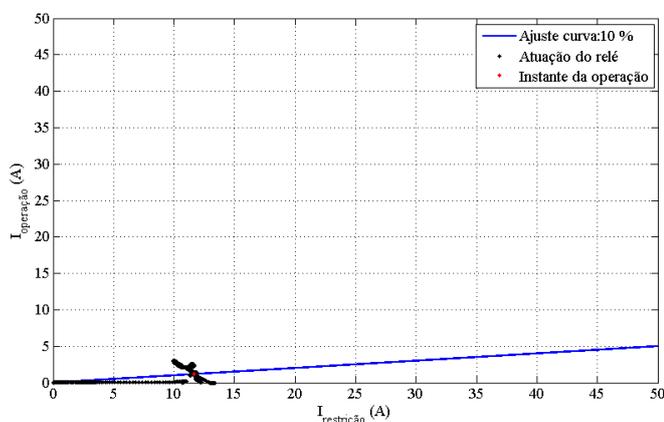
O relé diferencial comum atua no instante 0,21141 s (Figura 22). O *trip* da proteção percentual ocorre em 0,21263 s (Figura 24) e a atuação do relé é mostrado na Figura 23.

Figura 22 – Comportamento da corrente e *trip* do Relé Comum para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão



Fonte: Autoria Própria

Figura 23 – Atuação do Relé Percentual para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.

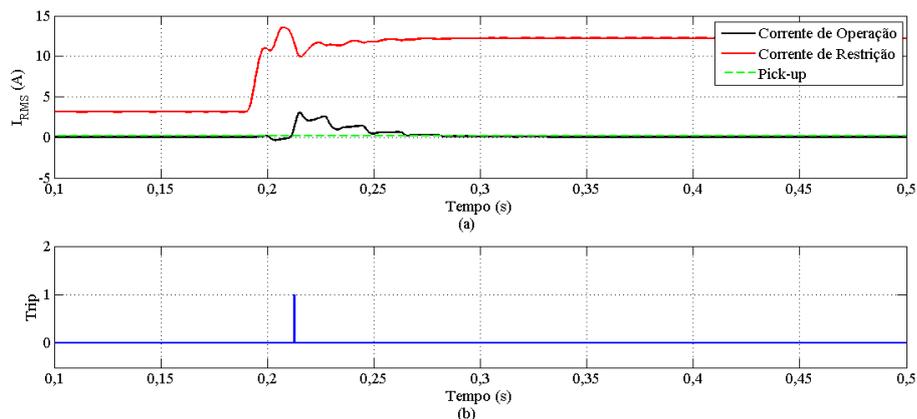


Fonte: Autoria Própria

4.2.3.2 Fluxo remanescente de 80% e ponto de falta 50% LT (caso 160 do banco de dados):

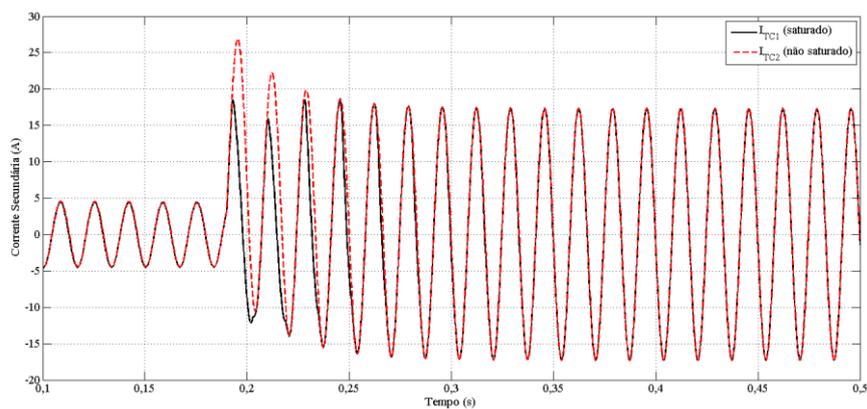
Com o incremento do fluxo remanescente, alterando de 25% para 80% ocorre uma distorção mais rigorosa desde o primeiro semiciclo faltoso como pode ser visto em Figura 25. O desequilíbrio dos valores RMS das correntes do TC 1 e TC 2 acontece imediatamente após a falta (Figura 26). A atuação (indevida) dos relés ocorre em 0,19349 s e 0,19436 s para o relé comum e diferencial, respectivamente.

Figura 24 – Magnitude das correntes que fluem no Relé Percentual e momento do *trip*, para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 25% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.



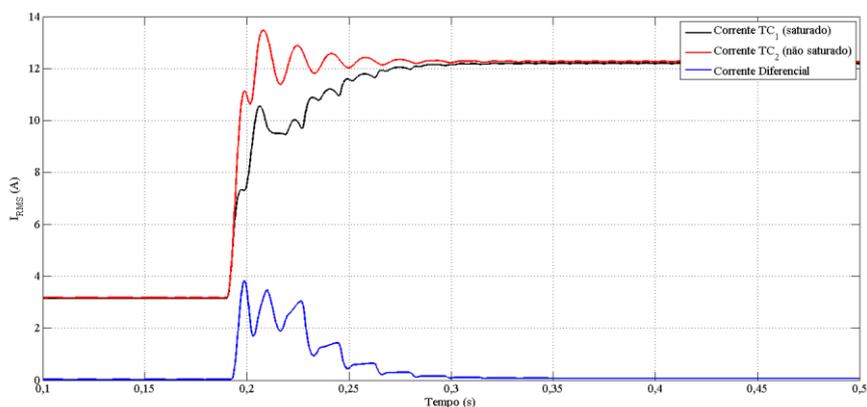
Fonte: Autoria Própria

Figura 25 – Formas de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.



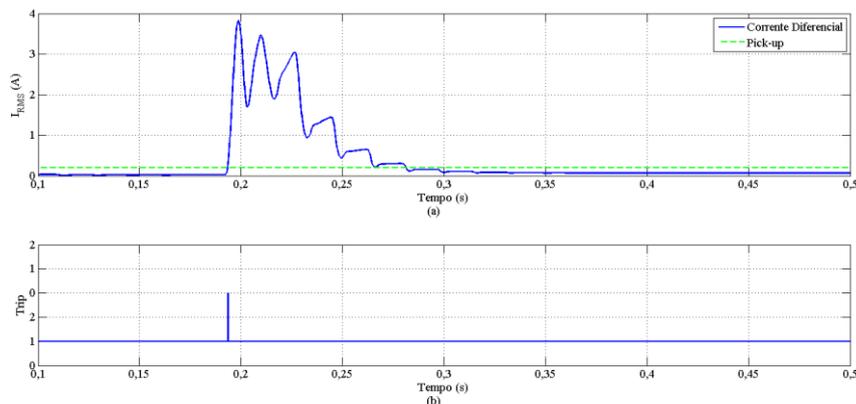
Fonte: Autoria Própria

Figura 26 – Valores RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 50% linha de transmissão.



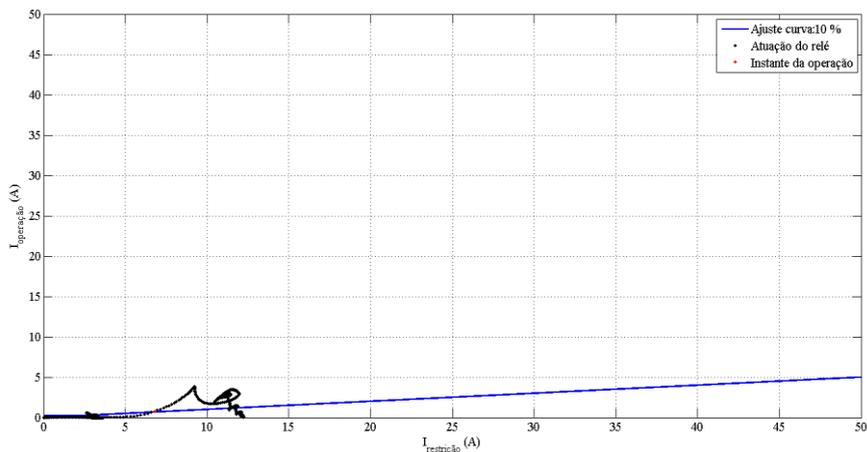
Fonte: Autoria Própria

Figura 27 – Comportamento da corrente e o *trip* do Relé Comum para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 50% da linha de transmissão.



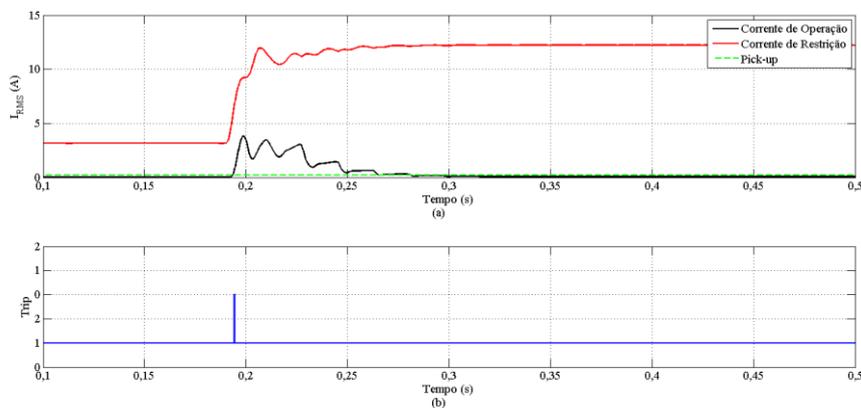
Fonte: Autoria Própria

Figura 28 – Atuação do Relé Percentual para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 25% da linha de transmissão.



Fonte: Autoria Própria

Figura 29 – Magnitude das correntes que fluem no Relé Percentual e momento do trip, para carga de 4 ohms resistiva, falta trifásica, 80% fluxo remanescente em 80% linha de transmissão.

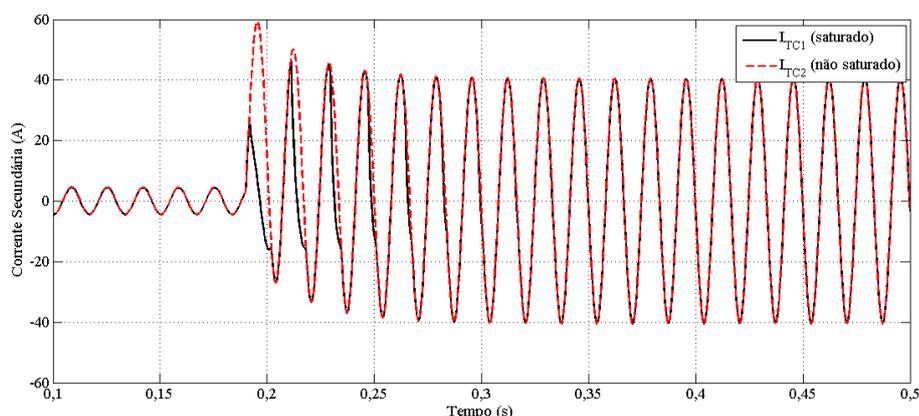


Fonte: Autoria Própria

4.2.4 Carga de 10 ohms puramente resistiva para curto-circuito trifásico, fluxo remanescente de 50% e ponto de falta 10% LT (caso 171 do banco de dados).

Conforme abordado no Capítulo 2, um dos motivos de uma saturação mais severa é o aumento da carga no secundário do TC. Sendo assim, foi elevada a carga inicial de 4 ohms para 10 ohms no secundário do TC para abordagem deste caso. Tal mudança resultou em uma corrente de curto-circuito de maior magnitude, o que provocou uma distorção de maiores proporções durante o primeiro ciclo pós-falta. Na Figura 30, pode-se perceber que as distorções causadas pela saturação são expressivas até o sexto ciclo após a incidência da falta.

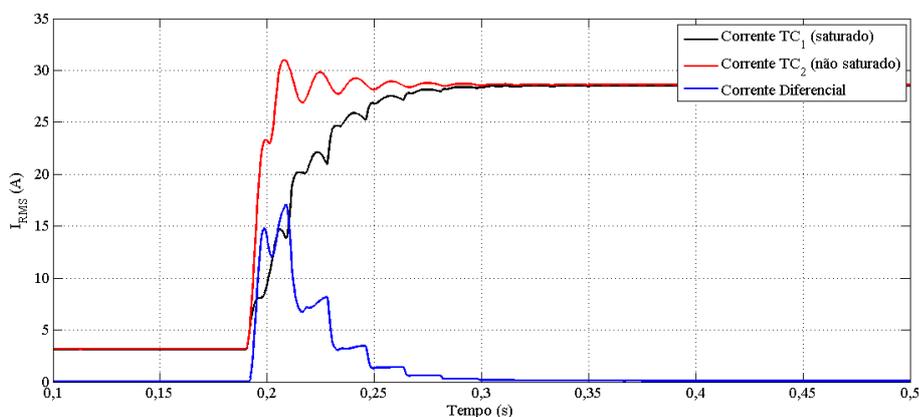
Figura 30 – Formas de onda de corrente secundária do sinal saturado (TC 1) e não saturado (TC 2) do para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% linha de transmissão.



Fonte: Autoria Própria

As magnitudes RMS das correntes são mostradas na Figura 31.

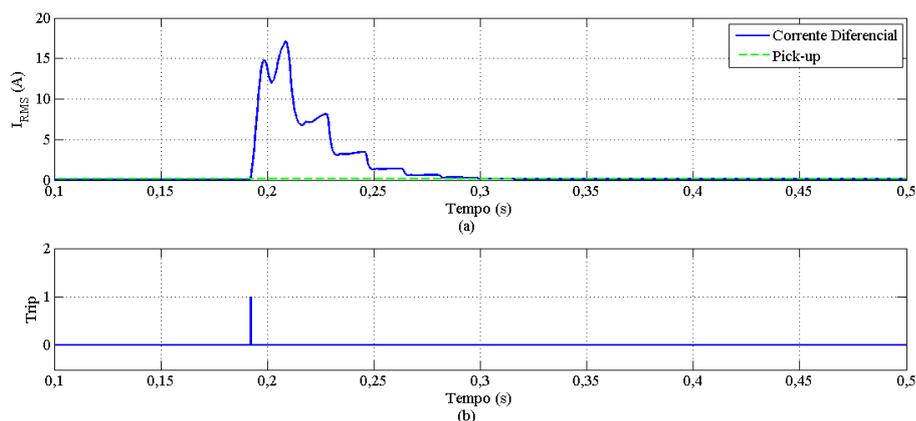
Figura 31 – Valores RMS de corrente do secundário dos TCs para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% linha de transmissão.



Fonte: Autoria Própria

Novamente, houve atuação indesejada dos relés de proteção diferencial, sendo que o *trip* do relé comum (Figura 32) e a atuação do relé percentual diferencial (Figura 34) ocorrem em 0,0021 s e 0,0024 s, respectivamente, após a ocorrência da falta. Ainda, a atuação da lógica percentual diferencial pode ser vista na Figura 33.

Figura 32 – Comportamento da corrente e trip do Relé Comum para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% da linha de transmissão

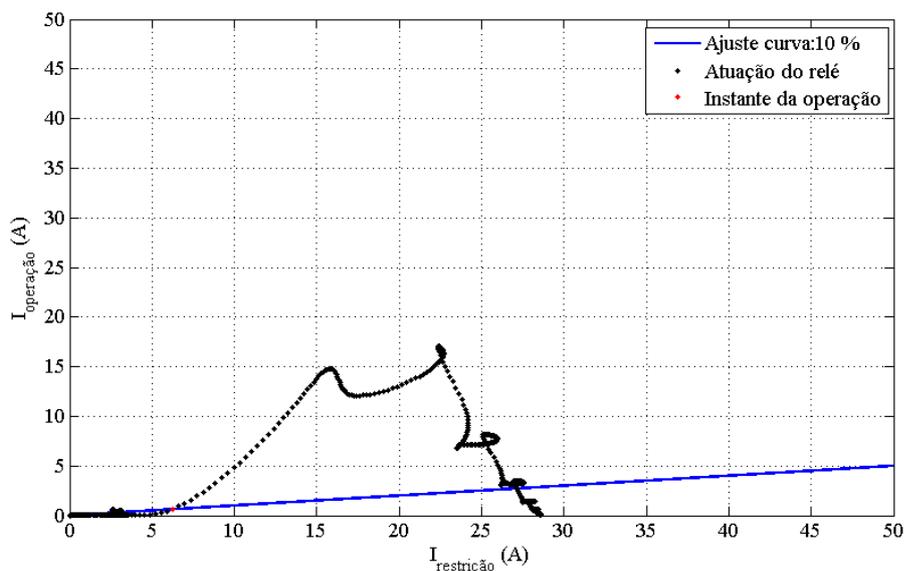


Fonte: Autoria Própria

4.3 Considerações Finais do Capítulo

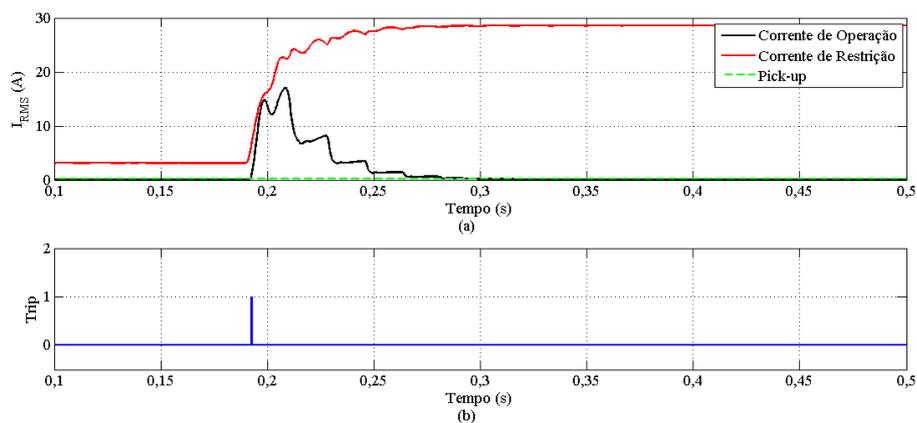
Este Capítulo expôs os resultados obtidos frente aos casos de falta ao longo da linha de transmissão (fora da zona protegida), descrevendo o desempenho da proteção diferencial frente às condições de saturação. Logo, pôde-se concluir que a proteção diferencial, independentemente do tipo, atua indevidamente, para a maioria dos casos de falta externa, quando ocorre a saturação de um dos TCs, foi verificada a atuação indevida do relé comum em 166 casos (92% do total) e do relé diferencial percentual em 150 dos 180 casos, para a taxa de amostragem de 96 amostras/ciclo. Sendo assim, destaca-se a importância do desenvolvimento de metodologias para amenização dos efeitos causados pelo fenômeno da saturação sobre os relés diferenciais. Por fim, ressalta-se que a atuação do relé diferencial para as situações simuladas, independe da taxa de amostragem utilizada, e os resultados para os demais casos analisados encontram-se no Apêndice B.

Figura 33 – Atuação do Relé Percentual para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% da linha de transmissão.



Fonte: Autoria Própria

Figura 34 – Magnitude das correntes que fluem no Relé Percentual e momento do *trip*, para carga de 10 ohms resistiva, falta trifásica, 50% fluxo remanescente em 10% linha de transmissão.



Fonte: Autoria Própria

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista os resultados obtidos por meio das simulações, onde na grande maioria as metodologias de proteção diferencial tiveram atuação indevida, conclui-se que, as distorções do sinal de corrente do secundário do TC saturado influenciam diretamente na operação dos relés de proteção e suas aplicações. Essas distorções tornam-se mais severas de acordo com magnitude da corrente de curto-circuito, a variação desse valor de corrente sofre influência de acordo com o nível de curto-circuito como pode ser visto nos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3.1 onde, foram mantidos os mesmos parâmetros de carga, fluxo remanescente e local de falta, porém, a forma como ocorre a saturação para as variações de falta monofásica, bifásica e trifásica não é igual.

Outro fator que interfere na operação dos relés estudados é a presença do fluxo remanescente no núcleo do TC, na situação envolvendo menor intensidade do fluxo remanescente em 4.2.3.1, a distorção do sinal de corrente secundária, ocorre com maior incidência durante o segundo ciclo pós-falta, porém para a situação envolvendo 80% de fluxo residual vista em 4.2.3.2 essa a distorção ocorre de forma mais severa durante o primeiro ciclo, provocada pela saturação antecipada do núcleo.

Também, pode ser constatado que, com o aumento da carga conectada ao secundário do TC, as distorções na forma de onda da corrente secundária ocorrem com maior severidade. Um exemplo disto, ocorreu no caso onde a carga do TC foi elevada de 4 para 10 ohms, ocasionando variações mais bruscas nos pontos que caracterizam o início dos intervalos saturados e maior magnitude de corrente diferencial.

Por fim, a proteção diferencial, atuando como único ou principal dispositivo de proteção, necessita de ações que minimizem os efeitos do fenômeno da saturação dos transformadores de corrente. São alternativas: técnicas adaptativas, metodologias de detecção ou a correção dos intervalos distorcidos da forma de onda secundária do TC afetado. E deste modo evitar que o relé seja induzido a operar equivocadamente, isolando desnecessariamente o elemento protegido, comprometendo a robustez e a confiabilidade do sistema elétrico.

5.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestões para futuros trabalhos e pesquisas, cita-se:

- Ajustes adaptativos aos relés de proteção diferencial;
- Análise e avaliação de metodologias existentes que minimizem os efeitos da saturação frente às condições abordadas;
- Aprimoramento de técnicas existentes ou proposição de novas técnicas de detecção e correção dos intervalos distorcidos pela saturação dos TCs.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P.M. **Power System Protection**. New York: IEEE Press, McGraw Hill, 1999.
- BRIDGER, B. & BURSE, T. A., **Operation of Ground Sensor Relays Under Conditions of Partial CT Saturation**. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 33, nº 4, pp. 1111- 1116, Jul/Ago.1997.
- DASHTI, H.; PASAND, M. S. & DAVARPANAH, M., **Current Transformer Saturation Detectors for Busbar Differential Protection**. Proceedings of the 42nd International Universities Power Engineering Conference, p. 338-343, Brighton, UK, Set. 2007.
- EL-AMIN, I. M. & AL-ABBAS, N. H., **Saturation of Current Transformers and its Impact on Digital Overcurrent Relays**. Proceedings of the IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp. 1-6, Caracas, Venezuela, Ago. 2006.
- HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering. 2nd**. New York: CRC Press, 2007.
- HOROWITZ, S. H.; PHADAKE, A. G. **Power System Relaying**. 3rd ed. Baldock: Research Studies Press, 2008.
- IEEE Std C37.110-2007. **IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes**. Mai. 2008.
- IEEE Std C57.13-1993. **IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers**. Jun. 1993.
- KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, Lj.; ABUR, A. et al., **Experimental Evaluation of EMTBased Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study**. IEEE Transactions on Power Delivery. V. 9, n. 1, p. 405-413, Jan. 1994.
- KINDERMANN, G., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Editora da UFSC, Vol. 1, 1ªed, Florianópolis, 1999.
- KINDERMANN, G., **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Editora da UFSC, ed. do autor, Florianópolis, 2006.
- KOJOVIC, Lj. A., **Impact of Current Transformer Saturation on Overcurrent Protection Operation**. Proceedings of the 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, pp. 1078-1083, Chicago, IL, USA, Jul. 2002.
- MOONEY, P. E. J., **Distance Element Performance Under Conditions of CT Saturation**. Proceedings of the 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, v. 1, p. 491-497, College Station, TX, USA, Abr. 2008.

REBIZANT, W.; FESER, K.; HAYDER, T. & SCHIEL, L., **Differential Relay with Adaptation During Saturation Period of Current Transformers**. Proceedings of the 14th Power System Protection Conference, p. 124-129, Bled, Slovenia, Set/Out. 2004.

SANTOS, E. M., **Métodos para Correção das Distorções da Forma de Onda Secundária Causadas pela Saturação de Transformadores de Corrente para Serviço de Proteção**. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM): 2011.

ZOCHOLL, S. E. & SMAHA, D. W., **Current Transformer Concepts**. Proceedings of the 46th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference, Atlanta, GA, USA, Abr/Mai. 1992.

APÊNDICE A – Banco de dados dos sinais com a especificação do número de cada caso simulado e a variação dos parâmetros

Nº Caso	Tipo curto-circuito	Carga TC	Nível de fluxo remanescente	Ponto de falta
1	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	0%
2	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	5%
3	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	10%
4	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	25%
5	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	50%
6	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	50%
7	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	50%
8	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	50%
9	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	25%
10	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	25%
11	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	25%
12	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	10%
13	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	10%
14	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	10%
15	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	5%
16	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	5%
17	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	5%
18	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	0%
19	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	0%
20	Monofásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	0%
21	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	0%	0%
22	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	25%	0%
23	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	50%	0%
24	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	80%	0%
25	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	0%	5%
26	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	25%	5%
27	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	50%	5%
28	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	80%	5%
29	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	0%	10%
30	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	25%	10%
31	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	50%	10%
32	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	80%	10%
33	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	0%	25%
34	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	25%	25%
35	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	50%	25%
36	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	80%	25%
37	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	0%	50%
38	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	25%	50%
39	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	50%	50%
40	Monofásico	4 Ω puramente resistiva	80%	50%

41	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	0%	0%
42	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	25%	0%
43	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	50%	0%
44	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	80%	0%
45	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	0%	5%
46	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	25%	5%
47	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	50%	5%
48	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	80%	5%
49	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	0%	10%
50	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	25%	10%
51	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	50%	10%
52	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	80%	10%
53	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	0%	25%
54	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	25%	25%
55	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	50%	25%
56	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	80%	25%
57	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	0%	50%
58	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	25%	50%
59	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	50%	50%
60	Monofásico	10 Ω puramente resistiva	80%	50%
61	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	0%
62	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	0%
63	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	0%
64	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	0%
65	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	5%
66	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	5%
67	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	5%
68	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	5%
69	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	10%
70	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	10%
71	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	10%
72	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	10%
73	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	25%
74	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	25%
75	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	25%
76	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	25%
77	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	50%
78	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	50%
79	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	50%
80	Bifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	50%
81	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	0%
82	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	0%
83	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	0%
84	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	0%
85	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	5%

86	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	5%
87	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	5%
88	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	5%
89	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	10%
90	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	10%
91	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	10%
92	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	10%
93	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	25%
94	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	25%
95	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	25%
96	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	25%
97	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	50%
98	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	50%
99	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	50%
100	Bifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	50%
101	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	0%
102	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	0%
103	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	0%
104	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	0%
105	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	5%
106	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	5%
107	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	5%
108	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	5%
109	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	10%
110	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	10%
111	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	10%
112	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	10%
113	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	25%
114	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	25%
115	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	25%
116	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	25%
117	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	50%
118	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	50%
119	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	50%
120	Bifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	50%
121	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	0%
122	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	0%
123	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	0%
124	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	0%
125	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	5%
126	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	5%
127	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	5%
128	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	5%
129	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	10%
130	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	10%

131	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	10%
132	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	10%
133	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	25%
134	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	25%
135	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	25%
136	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	25%
137	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	0%	50%
138	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	25%	50%
139	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	50%	50%
140	Trifásico	4 Ω fp 0,5 indutivo	80%	50%
141	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	0%
142	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	0%
143	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	0%
144	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	0%
145	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	5%
146	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	5%
147	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	5%
148	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	5%
149	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	10%
150	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	10%
151	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	10%
152	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	10%
153	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	25%
154	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	25%
155	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	25%
156	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	25%
157	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	0%	50%
158	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	25%	50%
159	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	50%	50%
160	Trifásico	4 Ω puramente resistiva	80%	50%
161	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	0%
162	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	0%
163	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	0%
164	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	0%
165	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	5%
166	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	5%
167	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	5%
168	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	5%
169	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	10%
170	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	10%
171	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	10%
172	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	10%
173	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	25%
174	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	25%
175	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	25%

176	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	25%
177	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	0%	50%
178	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	25%	50%
179	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	50%	50%
180	Trifásico	10 Ω puramente resistiva	80%	50%

APÊNDICE B – Resultados das simulações

Caso	Tempo de Atuação do Relé Diferencial (s)									
	Relé Comum	Relé Percentual	Relé Comum	Relé Percentual	Relé Comum	Relé Percentual	Relé Comum	Relé Percentual	Relé Comum	Relé Percentual
	8 amostras/ciclo		16 amostras/ciclo		32 amostras/ciclo		64 amostras/ciclo		96 amostras/ciclo	
1	0,212	Não atua	0,212	Não atua	0,212	Não atua	0,212	Não atua	0,212	Não atua
2	0,229	Não atua	0,229	Não atua	0,230	Não atua	0,230	Não atua	0,230	Não atua
3	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua
4	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua
5	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua
6	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua
7	0,212	Não atua	0,213	Não atua	0,212	Não atua	0,212	Não atua	0,212	Não atua
8	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
9	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua
10	0,196	0,215	0,197	0,215	0,196	0,214	0,197	0,214	0,196	0,214
11	0,192	0,194	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
12	0,210	Não atua	0,212	Não atua	0,212	Não atua	0,211	Não atua	0,211	Não atua
13	0,194	0,198	0,195	0,198	0,194	0,198	0,194	0,198	0,195	0,198
14	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
15	0,198	0,215	0,198	0,215	0,198	0,215	0,198	0,215	0,198	0,215
16	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196
17	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,191	0,192	0,191	0,192
18	0,196	0,212	0,196	0,212	0,195	0,212	0,196	0,212	0,196	0,212
19	0,194	0,194	0,194	0,195	0,193	0,195	0,193	0,195	0,193	0,195
20	0,192	0,192	0,192	0,192	0,191	0,192	0,191	0,192	0,191	0,192
21	0,198	0,212	0,197	0,213	0,197	0,213	0,197	0,213	0,197	0,213
22	0,196	0,196	0,196	0,197	0,195	0,197	0,195	0,197	0,195	0,197
23	0,194	0,196	0,194	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195
24	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
25	0,212	0,212	0,212	0,214	0,212	0,214	0,212	0,213	0,212	0,213
26	0,196	0,212	0,196	0,213	0,196	0,212	0,196	0,212	0,196	0,212
27	0,194	0,196	0,194	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195
28	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
29	0,212	0,215	0,213	0,215	0,213	0,215	0,213	0,215	0,213	0,215
30	0,198	0,212	0,197	0,213	0,197	0,213	0,197	0,213	0,197	0,213
31	0,196	0,196	0,195	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196	0,195	0,196
32	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
33	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua
34	0,212	0,215	0,213	0,214	0,212	0,214	0,212	0,214	0,212	0,214
35	0,196	0,198	0,196	0,198	0,195	0,197	0,196	0,198	0,195	0,197
36	0,194	0,194	0,194	0,195	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
37	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua
38	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua	Não atua
39	0,198	0,212	0,197	0,213	0,197	0,213	0,197	0,213	0,197	0,213

40	0,194	0,196	0,195	0,196	0,194	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195
41	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193
42	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
43	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
44	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
45	0,194	0,194	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
46	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
47	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
48	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
49	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
50	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
51	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
52	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
53	0,194	0,196	0,195	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195
54	0,194	0,194	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
55	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
56	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
57	0,196	0,196	0,196	0,197	0,195	0,196	0,195	0,197	0,195	0,196
58	0,194	0,194	0,194	0,195	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194
59	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194
60	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194
61	0,196	Não atua								
62	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196
63	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
64	0,192	0,192	0,191	0,192	0,191	0,191	0,191	0,191	0,191	0,191
65	0,212	Não atua	0,212	Não atua	0,212	Não atua	0,211	Não atua	0,211	Não atua
66	0,196	0,212	0,195	0,213	0,195	0,212	0,194	0,212	0,195	0,212
67	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
68	0,192	0,192	0,191	0,192	0,191	0,192	0,191	0,191	0,191	0,191
69	0,229	Não atua								
70	0,196	Não atua								
71	0,194	0,194	0,193	0,195	0,193	0,195	0,193	0,194	0,193	0,195
72	0,192	0,192	0,192	0,192	0,191	0,192	0,191	0,192	0,191	0,192
73	Não atua									
74	0,212	Não atua	0,213	Não atua						
75	0,194	0,210	0,194	0,199	0,194	0,199	0,194	0,199	0,194	0,199
76	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
77	Não atua									
78	Não atua									
79	0,196	Não atua								
80	0,192	0,194	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
81	0,196	0,198	0,196	0,198	0,195	0,197	0,195	0,198	0,195	0,197
82	0,194	0,196	0,195	0,196	0,194	0,195	0,194	0,196	0,194	0,196
83	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
84	0,192	0,194	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193

85	0,196	Não atua	0,197	Não atua	0,196	Não atua	0,196	Não atua	0,196	Não atua
86	0,196	0,196	0,195	0,196	0,195	0,196	0,195	0,196	0,195	0,196
87	0,194	0,194	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
88	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
89	0,198	Não atua	0,198	Não atua	0,197	Não atua	0,197	Não atua	0,197	Não atua
90	0,196	0,196	0,196	0,197	0,195	0,197	0,195	0,197	0,195	0,197
91	0,194	0,194	0,194	0,195	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,195
92	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
93	0,215	Não atua	0,214	Não atua						
94	0,198	0,215	0,197	Não atua	0,197	0,214	0,197	0,214	0,197	0,214
95	0,194	0,196	0,195	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196
96	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
97	Não atua									
98	0,212	Não atua	0,213	Não atua						
99	0,196	0,198	0,195	0,197	0,195	0,197	0,195	0,198	0,195	0,197
100	0,194	0,194	0,194	0,195	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
101	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
102	0,192	0,194	0,192	0,193	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
103	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
104	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
105	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
106	0,192	0,194	0,192	0,193	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
107	0,192	0,194	0,192	0,193	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
108	0,192	0,194	0,192	0,193	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192
109	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
110	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
111	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,192	0,192	0,192
112	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,192	0,192	0,192
113	0,194	0,194	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
114	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
115	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
116	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
117	0,194	0,196	0,195	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195
118	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
119	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
120	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
121	0,196	0,198	0,195	0,197	0,194	0,197	0,194	0,197	0,195	0,197
122	0,194	0,194	0,194	0,195	0,193	0,195	0,193	0,195	0,193	0,195
123	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
124	0,192	0,192	0,191	0,192	0,191	0,191	0,191	0,191	0,191	0,191
125	0,196	0,212	0,196	0,212	0,196	0,212	0,196	0,212	0,196	0,212
126	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196	0,194	0,196
127	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193
128	0,192	0,192	0,191	0,192	0,191	0,192	0,191	0,191	0,191	0,191
129	0,198	0,212	0,198	0,214	0,198	0,213	0,198	0,213	0,198	0,213

175	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
176	0,194	0,194	0,193	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193	0,192	0,193
177	0,194	0,196	0,194	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195	0,194	0,195
178	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194	0,193	0,194
179	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193
180	0,194	0,194	0,193	0,194	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193	0,193