

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

João Ricardo da Mata Soares de Souza

**REDUÇÃO DO CONJUNTO DE CASOS AVALIADOS EM TESTES DE
APLICAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO UTILIZANDO GRAFO DE GABRIEL**

BELO HORIZONTE

2019

TESE DE DOUTORADO Nº 313

**REDUÇÃO DO CONJUNTO DE CASOS AVALIADOS EM TESTES DE
APLICAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO UTILIZANDO GRAFO DE
GABRIEL**

Joao Ricardo da Mata Soares de Souza

DATA DA DEFESA: 08/11/2019

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**REDUÇÃO DO CONJUNTO DE CASOS AVALIADOS EM
TESTES DE APLICAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO
UTILIZANDO GRAFO DE GABRIEL**

Joao Ricardo da Mata Soares de Souza

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Clever Sebastião Pereira Filho

Belo Horizonte - MG

Novembro de 2019

S729r

Souza, João Ricardo da Mata Soares de.

Redução do conjunto de casos avaliados em testes de aplicação de relés de proteção utilizando grafo de Gabriel [recurso eletrônico] / João Ricardo da Mata Soares de Souza. - 2019.

1 recurso online (98 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho.

Coorientador: Alberto Resende de Conti.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexo: f. 87.

Bibliografia: f. 82-86.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Confiabilidade (Engenharia) - Teses. 3. Método de Monte Carlo - Teses. 4. Proteção elétrica - Teses. 5. Transitórios (Eletricidade) - Teses. I. Pereira Filho, Clever Sebastião. II. Conti, Alberto Resende de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)


"Redução do Conjunto de Casos Avaliados em Testes de Aplicação de Relés de Proteção Utilizando Grafo de Gabriel"

Joao Ricardo da Mata Soares de Souza

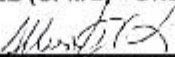
Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 08 de novembro de 2019.

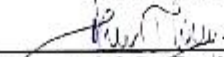
Por:



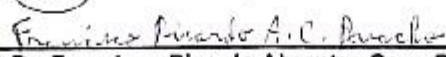
Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho
DEE (UFMG) - Orientador




Prof. Dr. Alberto Resende De Conti
DEE (UFMG) - Coorientador



Prof. Dr. Denis Vinicius Coury
Engenharia Elétrica (USP de São Carlos)



Prof. Dr. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho
Engenharia Elétrica (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)



Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG)

AGRADECIMENTO

A Deus, fonte de todo conhecimento, criador e razão de tudo.

A minha esposa Dênia pelo companheirismo, pela paciência, pelo carinho, pelo cuidado e principalmente pelo amor.

Ao meu filho Davi, cujo sorriso é meu maior incentivo.

A minha mãe Zélia pelo exemplo de fé, de garra e de caráter.

Ao meu pai Murilo por, apesar do pouco tempo de convívio, sempre ter incentivado minha curiosidade.

Aos companheiros do campus Contagem do CEFET-MG, por todo apoio que têm me dado.

Aos professores Clever Sebastião Pereira Filho e Alberto Resende De Conti, pelos ensinamentos e por toda assistência dada ao longo deste trabalho e de outros.

Aos amigos Geraldo e Raphael pelo apoio. Em especial, aos amigos prof. Marcos Roberto pelo auxílio nos testes dos relés com os simuladores de sistema elétrico de potência, e prof. Listz Simões, do CEFET-MG, pelo auxílio com os transformadores.

Se houvesse uma verdadeira explicação entre a congruência entre a racionalidade das nossas mentes e a do mundo, ela certamente residiria em uma razão ainda mais profunda, responsável por embasar ambas. Tal razão poderia ser dada pela racionalidade do Criador.

John Polkinghorn

RESUMO

O desempenho adequado das funções de proteção é de extrema importância para o funcionamento dos sistemas elétricos de potência. Por esta razão, a execução de testes em relés de proteção se faz necessária para assegurar o correto funcionamento de sistemas de proteção. A norma IEEE C37.233 define diversos tipos de testes para sistemas de proteção com diferentes finalidades. Dentre eles, o chamado teste de aplicação objetiva avaliar a confiabilidade de um relé de proteção, definindo a probabilidade de o aparelho operar adequadamente nas situações em que se espera que ele opere e vice-versa - tal procedimento deve ser realizado pelo usuário final do produto. O método de Monte Carlo costuma ser empregado para tal avaliação, tendo se mostrado um procedimento eficaz para o teste de aplicação. Entretanto, sua eficiência tem o inconveniente de requerer um número muito extenso de casos de teste, o que demanda um maior tempo e mão-de-obra para sua execução. Como forma de contornar esse inconveniente, o presente trabalho propõe uma nova metodologia para a redução da quantidade de testes necessários para o procedimento, sem alterar a precisão do processo quanto à estimativa da confiabilidade do relé de proteção. A metodologia proposta utiliza o grafo de Gabriel, um recurso da área de inteligência artificial para a construção de classificadores, para alcançar o objetivo do trabalho. Observou-se uma redução significativa na quantidade de casos de teste sem que se alterasse significativamente a precisão da estimativa da confiabilidade dos ajustes do relé de proteção com o procedimento proposto. Como consequência, é possível almejar a otimização no uso de ferramentas de testes de relés de proteção, tais como os simuladores de sistemas elétricos de potência ou malas de teste, além do RTDS (*Real Time Digital Simulator*).

Palavras-chave: Confiabilidade de relés de proteção, Método de Monte Carlo, Proteção elétrica, Transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

The good performance of protective relay functions is very important to guarantee the correct behavior of the power system. Thus, it is necessary to perform tests in protective relays to ensure the correct operation of protection systems. The IEEE standard C37.233 defines several types of tests for protection systems with different goals. One of them, the so-called application test, is dedicated to evaluate the reliability of a protective relay in a specific situation. It is designed to define the probability of the protective relay to operate properly when it is expected and the probability of the protective relay to not operate properly when it is expected – this procedure must be performed by the final user or under his supervision. The Monte Carlo method is usually performed to do this evaluation and has proved to be an effective procedure for the application test. However, its efficiency has the drawback of requiring a very large number of test cases, which requires more time and labor to perform. As a means to overcome this inconvenience, the present work proposes a new methodology to reduce the amount of tests required for the procedure without changing the process accuracy as the reliability relay estimate. The proposed methodology uses Gabriel graph, a resource available in the area of artificial intelligence for the construction of classifiers, to achieve the objective of the work. A significant reduction in the number of test cases was observed without a significant change in the estimated accuracy of the protective relay settings with the proposed procedure. As a consequence, it is possible to optimize the use of protective relay testing tools such as power system simulators or test cases, as well as Real Time Digital Simulator (RTDS).

Keywords: Power system protection, Monte Carlo Method, Reliability, Tests, Electromagnetic Transients.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de teste de malha aberta de um relé de distância Schweitzer SEL-311C com uma mala de testes Omicron CMC 256 Plus.	22
Figura 2.2 – Esquema de teste de malha aberta de um relé de distância Schweitzer SEL-311C com uma mala de testes Omicron CMC 256 Plus.	23
Figura 2.3 – Sequência dos procedimentos adotados para a avaliação da confiabilidade dos ajustes de relés diferenciais proposta em (SOUZA, 2012).....	28
Figura 2.4 – Composição das resistências de falta nas simulações de curto-circuito (SOUZA, 2012)	31
Figura 3.1 – Exemplo de classificador <i>k-nearest neighbor</i> para $k = 3$	35
Figura 3.2 – Exemplo de diagrama de Voronoi com a superfície de separação obtida por esta técnica (BHATTACHARAYA, 1992).....	36
Figura 3.3 – Grafo obtido pela triangulação de Delaunay feita a partir do diagrama de Voronoi apresentado na figura 3.2	38
Figura 3.4 – Construção de um grafo de Gabriel (SOUZA, 2018).	39
Figura 3.5 – Espaço característico obtido pela execução do primeiro passo da metodologia proposta para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça de transformadores.	41
Figura 3.6 – Espaço característico obtido pela execução do segundo passo da metodologia proposta para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça de transformadores, onde são acrescentados os casos de controle.	41
Figura 3.7 – Espaço característico com o grafo de Gabriel obtido pela execução do terceiro passo da metodologia proposta para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça de transformadores.	42
Figura 3.8 – Espaço característico com o grafo de Gabriel com a sequência de testes feitos a partir da aplicação da metodologia proposta para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça de transformadores.	43
Figura 3.9 – Fluxograma com a sequência dos passos da metodologia proposta.	44
Figura 4.1 – Diagrama esquemático com um exemplo de funções de proteção implementadas em um relé de proteção de linha de transmissão.	48
Figura 4.2 – Diagrama esquemático com as conexões dos transformadores de corrente utilizadas na proteção diferencial de transformador convencional e na proteção diferencial contra falta a terra restrita.	49

Figura 4.3 – Estrutura das matrizes de entrada G e de adjacência Adj do grafo de Gabriel construído.	51
Figura 4.4 – Exemplo de grafo de Gabriel construído para a execução de testes da função de proteção diferencial de transformador durante curtos-circuitos entre a espira e a carcaça de transformadores.	52
Figura 4.5 – Matriz de adjacência Adj do grafo de Gabriel da figura 4.4 com o destaque da submatriz que contém as informações das conexões entre os casos avaliados e os de controle e indicação das colunas referentes aos pontos cujos casos correspondentes devem ser utilizados para se iniciar os testes.	53
Figura 4.6 – Sistema desenvolvido para a avaliação da metodologia proposta neste trabalho.	54
Figura 4.7 – Sistema implementado para a avaliação da metodologia proposta neste trabalho.	55
Figura 4.8 – Localização da impedância vista em cada um dos casos simulados (avaliados e de controle) para avaliação da aplicação da metodologia proposta em relés de distância.	59
Figura 4.9 – Espaço característico para avaliação da aplicação da metodologia proposta em relés de distância utilizando como grandezas características os módulos dos sinais de operação e de restrição.	59
Figura 4.10 – <i>Zoom</i> da região de fronteira do grafo de Gabriel obtido para o primeiro subconjunto.	61
Figura 4.11 – Sistema elétrico de potência utilizado para a execução das simulações.	62
Figura 4.12 – Partes do modelo híbrido (XFMR) disponível no ATP. Reprodução de (CHIESA, 2005).	63
Figura 4.13 – Diagrama multifilar de um transformador de aterramento. Reprodução de (BLACKBURN, 2007).	66
Figura 4.14 – Sequência de operações realizadas pelo modelo de relé diferencial de transformador apresentado em (SOUZA, 2012) e utilizado neste trabalho.	67
Figura 4.15 – Característica de operação do modelo de relé diferencial utilizado neste trabalho.	68
Figura 4.16 – Espaço característico construído para a realização dos testes em um relé diferencial de transformador para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça.	71
Figura 4.17 – Relé SEL-487E utilizado para avaliar o desempenho da metodologia de testes proposta.	75

Figura 4.18 – Simulador de sistema elétrico de potência OMICRON CMC 256 Plus utilizado para avaliar o desempenho da metodologia de testes proposta.	76
Figura 4.19 – Montagem feita com o simulador de sistema elétrico de potência OMICRON CMC 256 Plus e o relé SEL-487E para avaliar o desempenho da metodologia de testes proposta.....	76
Figura 4.20 – Diagrama esquemático da montagem feita com o simulador de sistema elétrico de potência OMICRON CMC 256 Plus e o relé SEL-487E para avaliar o desempenho da metodologia de testes proposta.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Testes em sistemas de proteção de acordo com a norma IEC C37.233.	21
Tabela 2.2 - Faixas de valores da variável tipo $U(0,1)$ que correspondem a cada tipo de falta (SOUZA, 2018).	30
Tabela 2.3 - Faixas de valores da variável tipo $U(0,1)$ que correspondem a cada localização de falta (SOUZA, 2012).	31
Tabela 4.1 – Situações utilizadas para geração dos casos avaliados e de controle para cada relé testado neste trabalho.	47
Tabela 4.2 – Valores de impedâncias dos geradores do diagrama apresentado na figura 4.7.	56
Tabela 4.3 – Valores de impedâncias das linhas de transmissão do diagrama apresentado na figura 4.7.	56
Tabela 4.4 – Comparação do resultado da taxa de sucessos obtidas a partir da aplicação direta do método de Monte Carlo e da metodologia baseada no grafo de Gabriel com um nível de confiança de 99,97%.	60
Tabela 4.5 – Parâmetros do transformador utilizado nas simulações.	65
Tabela 4.6 – Parâmetros do transformador utilizado nas simulações obtidos pelos ensaios de curto-circuito em PU nas bases nominais (18 MVA).	65
Tabela 4.7 – Parâmetros do transformador utilizado nas simulações obtidos pelos ensaios de circuito aberto feitos a partir do enrolamento terciário.	65
Tabela 4.8 – Parâmetros do transformador de aterramento utilizado nas simulações.	66
Tabela 4.9 – Parâmetros do equivalente do sistema elétrico utilizado nas simulações.	67
Tabela 4.10 – Parâmetros de ajuste utilizados no modelo de relé implementado (SOUZA, 2018).	69
Tabela 4.11 – Comparação do resultado da taxa de sucessos obtida a partir da aplicação direta do método de Monte Carlo e da metodologia baseada no grafo de Gabriel com um nível de confiança de 99,97 %.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	<i>Linha de Transmissão</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema</i>
RTC	<i>Relação de Transformação de Corrente</i>
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
SEP	<i>Sistema Elétrico de Potência</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
TNA	<i>Transient Network Analyzer</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
1.1 Relevância do trabalho.....	14
1.2 Objetivos do trabalho	15
1.3 Metodologia	16
1.4 Produção Bibliográfica	18
1.5 Organização do texto	19
CAPÍTULO 2 - TESTES DE APLICAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO	20
2.1 Testes em relés de proteção de acordo com a norma IEEE C37.233	20
2.2 Histórico do desenvolvimento dos equipamentos utilizados em testes transitórios de relés de proteção	23
2.3 Histórico do desenvolvimento das metodologias utilizadas em testes transitórios de relés de proteção	24
2.4 O uso do Método de Monte Carlo nos testes de aplicação de relés de proteção	26
2.5 Considerações finais	31
CAPÍTULO 3 - REDUÇÃO NA QUANTIDADE DE CASOS DE TESTE UTILIZANDO O GRAFO DE GABRIEL	33
3.1 Relés de proteção como comparadores	33
3.2 Princípio de funcionamento dos classificadores	34
3.3 O grafo de Gabriel.....	38
3.4 Apresentação da metodologia proposta	39
3.5 Comentários finais	44
CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	46
4.1 Definição dos testes utilizados para avaliação da metodologia proposta	46
4.2 Sistema desenvolvido para a execução dos testes	49
4.3 Aplicação da metodologia proposta em testes de relé de distância.....	54
4.3.1 Descrição da modelagem utilizada.....	54
4.3.1.1 O sistema elétrico.....	54
4.3.1.2 O relé de distância	56

4.3.2 Resultados obtidos.....	57
4.4 Aplicação da metodologia proposta em testes de relé diferencial de transformador.....	62
4.4.1 Descrição da modelagem utilizada.....	62
4.4.1.1 O transformador de potência.....	63
4.4.1.2 O transformador de aterramento.....	65
4.4.1.3 O equivalente do sistema elétrico de potência.....	67
4.4.1.4 O relé de proteção diferencial de transformador.....	67
4.4.2 Resultados obtidos.....	70
4.4.2.1 Curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça do transformador.....	70
4.4.2.2 Energizações a vazio do transformador.....	72
4.4.2.3 Testes com um relé de proteção real.....	74
4.5 Comentários finais.....	78
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	79
5.1 Conclusões gerais.....	79
5.2 Propostas de continuidade.....	81
REFERÊNCIAS.....	82
ANEXO A.....	87
ANEXO B.....	94

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do trabalho

A principal função de um sistema de proteção é isolar quaisquer equipamentos do sistema elétrico de potência (SEP) que venham a ser submetidos a condições anormais de operação, evitando que danos significativos possam ocorrer ou se espalhar para outros aparelhos conectados ao sistema (MASON, 1956). Dentre as condições anormais de operação, o curto-circuito tem grande destaque.

O bom desempenho dos sistemas de proteção é de vital importância para o SEP. Como informação, muitos blecautes de impacto significativo foram causados por problemas nos sistemas de proteção, seja por atuação indevida, quando o sistema de operação atua quando não deveria, ou por recusa de atuação, condição em que o sistema de proteção não atua quando deveria.

Um exemplo de atuação indevida foi o evento ocorrido no Sistema Interligado Nacional (SIN) no dia 10 de novembro de 2009. Um blecaute ocorreu devido ao desligamento dos três circuitos da linha de transmissão (LT) de 765 kV Itaberá – Ivaiporã, o principal elo de ligação entre a usina hidroelétrica de Itaipu e o SIN, proveniente da atuação incorreta da proteção de sobrecorrente residual do reator *shunt* do circuito 3 desta linha (ANEEL, 2010). Além disso, de acordo com o Operador Nacional do Sistema (ONS), somente no ano de 2014, 160 atuações de relés de proteção classificadas como incorretas foram registradas na Rede Básica

(ONS, 2015). Tais atuações resultaram na retirada de equipamentos de serviço indevidamente, ocasionando perdas para as concessionárias e para os consumidores.

Por esta razão, a confiabilidade dos sistemas de proteção tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos (ANDERSON, 1984; ANDERSON, 1998; JCDRCZCJCZAK, 2017a; JCDRCZCJCZAK, 2017b). Além disso, para garantir a confiabilidade dos sistemas de proteção, a norma IEEE C37.233 (IEEE, 2009) define diversos tipos de testes a que esses sistemas devem ser submetidos em diferentes ocasiões. Dentre os listados pela norma, o chamado teste de aplicação visa avaliar a confiabilidade de um relé de proteção em aplicações específicas. Dessa forma, almeja-se definir a probabilidade de um relé pré-ajustado operar adequadamente em situações desejadas, como curtos-circuitos na região interna à zona de proteção do equipamento, e de não atuar em condições normais do sistema, como em energizações, sobrecargas ou curtos-circuitos externos à sua zona de proteção.

Um recurso comumente utilizado para a realização dos testes de aplicação é o Método de Monte Carlo, como indicado em (SOUZA, 2012). O trabalho em questão implementa um modelo computacional de um relé diferencial de transformador com o objetivo de avaliar seu desempenho em diferentes situações simuladas, no domínio do tempo, por meio do programa *Alternative Transients Program* (ATP). Embora a metodologia proposta em (SOUZA, 2012) tenha se mostrado eficaz, ela requer um número elevado de casos de teste, o que torna a sua aplicação em relés de proteção por meio de ferramentas de testes, como os simuladores de SEP ou malas de teste, e o Real Time Digital Simulator (RTDS), uma atividade onerosa, que demanda uma quantidade significativa de tempo e mão-de-obra.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é aprimorar a metodologia de testes de relés proteção proposta em (SOUZA, 2012), visando a diminuir a quantidade de casos a serem avaliados por meio do emprego do Método de Monte Carlo, preservando a precisão dos resultados e ampliando seu domínio de uso para outros tipos de relés

de proteção. Para alcançar o objetivo principal, a realização de alguns objetivos específicos é necessária:

- Identificar as grandezas que exercem uma maior influência no desempenho dos relés de proteção;
- Identificar os casos em que há maior probabilidade de falha dos relés de proteção.
- Desenvolver uma ferramenta computacional capaz de fazer simulações computacionais no domínio do tempo para a avaliação do desempenho de relés de proteção em diferentes situações.
- Desenvolver uma ferramenta computacional para execução da metodologia proposta.
- Validar esta ferramenta por meio de comparação com dados de testes em laboratório.

1.3 Metodologia

Este trabalho se inicia com uma revisão bibliográfica acerca das ferramentas e das metodologias desenvolvidas para a execução de testes transitórios de relés de proteção. De acordo com a norma IEEE C37.233 (IEEE, 2009), estes testes transitórios devem ser feitos nos chamados testes de aplicação.

Em seguida, discute-se o emprego de técnicas estocásticas e, em particular, do método de Monte Carlo para a avaliação de execução de testes de aplicação. Essa discussão mostrou a importância de se desenvolver uma metodologia capaz de reduzir a quantidade de casos avaliados.

A redução da quantidade de casos avaliados em testes de aplicação, objeto deste estudo, é obtida por meio da utilização do grafo de Gabriel (GABRIEL, 1969), que é um recurso muito utilizado em aplicações de inteligência artificial para a construção de classificadores (TORRES, 2015). Estes, por sua vez, são ferramentas computacionais utilizadas para classificar um conjunto de dados separando-os em categorias previamente definidas, denominadas classes. Sua aplicação no trabalho envolve um grafo de Gabriel composto por vértices representativos de cada caso

simulado. Assim, escolhendo-se adequadamente as grandezas utilizadas na composição do espaço em que este grafo é construído, espera-se que a conexão de seus vértices se dê em função da probabilidade dos casos associados aos mesmos levarem à falha do sistema de proteção. Desta maneira, iniciam-se os testes com os pontos cuja probabilidade de falha é maior, e segue-se com a avaliação dos pontos vizinhos dos pontos aos que vierem a falhar. Os testes são encerrados quando não houver mais falhas. Considera-se que não ocorrerão falhas nos pontos que não foram testados, pois os próprios casos estão ordenados em função da probabilidade de falha do sistema de proteção. Os casos em que esta probabilidade era maior já foram efetuados a priori.

Neste trabalho, a técnica de redução proposta foi aplicada para testar dois tipos diferentes de relés de proteção: relé de distância, utilizado na proteção de linhas de transmissão, e relé diferencial de transformador. Em ambos, procurou-se identificar situações em que estes poderiam falhar. Assim, foi avaliada a capacidade da metodologia proposta identificar corretamente tais falhas.

Para o relé de distância, foi testado o desempenho da unidade AT de primeira zona, que identifica curtos-circuitos ou faltas monofásicas envolvendo a fase A e a terra na LT protegida. Uma vez que a proteção de distância se baseia na impedância de sequência positiva vista por uma das extremidades da LT, ela apresenta dificuldades na discriminação de curtos-circuitos no final da LT protegida daqueles que ocorrem no início das LT adjacentes. Portanto, a unidade de zona 1, que é instantânea, é propositalmente dessensibilizada, sendo ajustada para detectar somente curtos-circuitos que ocorram em até 80 a 85% da LT protegida. A proteção do trecho restante fica a cargo de outros esquemas de proteção, tais como unidades de distância temporizadas (zona 2), esquemas de teleproteção ou diferenciais de linha (MASON, 1956).

No caso do relé diferencial, avaliaram-se duas situações diferentes: curtos-circuitos entre a espira e a carcaça, em que se espera a atuação do relé de proteção, e energizações a vazio, em que o relé não deve operar. Curtos-circuitos entre a espira e a carcaça que, porventura, ocorram próximos ao final do enrolamento e, conseqüentemente, próximos do aterramento, são pouco significativos em relação à disposição das correntes dos enrolamentos e tendem a passar despercebidos pela proteção diferencial, que vem a falhar nestas ocasiões. Estes curtos-circuitos são detectados somente por esquemas de proteção contra

falta à terra restrita ou, em último caso, pelos esquemas de proteção intrínsecos do transformador por meio de outros relés, como o de Buchholz (MASON, 1956, ZIEGLER, 2005), que monitora a presença de gases no óleo isolante do transformador. Energizações de transformadores, por sua vez, são situações em que se espera que o sistema de proteção não atue. Entretanto, as correntes elevadas que surgem no enrolamento pelo qual o transformador é energizado, conhecidas como correntes de *inrush*, podem implicar a atuação indevida do relé diferencial. Por esta razão, estes relés possuem esquemas especiais para a identificação das correntes de *inrush* baseados, principalmente, na sua composição harmônica.

Os testes descritos foram realizados tanto em relés modelados computacionalmente, quanto em um relé diferencial de transformador do fabricante SEL, modelo SEL-487E, para o caso de curtos-circuitos entre a espira e a carcaça.

1.4 Produção Bibliográfica

Ao longo do doutorado, os seguintes trabalhos foram apresentados em congressos relacionados a temas que auxiliaram no desenvolvimento da metodologia proposta:

- J. R. M. SOUZA, C. S. PEREIRA, A. R. DE CONTI “*Evaluation of the Effect of Parameters of Three-Phase Transformer Core Models on the Harmonic Content of Inrush Currents: Implications on the Setting of Inrush Detection Functions*” apresentado na *International Conference on Power System Transients IPST – 2015* em Cavtat, Croácia (SOUZA, 2015b);
- J. R. M. SOUZA, C. S. PEREIRA, A. R. DE CONTI “*Evaluation of the Effect of Advanced Core Settings of the Hybrid Transformer Model on the Harmonic Content of Inrush Currents*” apresentado na *International Conference on Power System Transients IPST – 2017* em Seul, Coréia do Sul (SOUZA, 2017a);
- J. R. M. SOUZA, C. S. PEREIRA, A. R. DE CONTI “*Designing and Training an Artificial Neural Network Fed by Harmonic Content of Differential Currents for Inrush Detection*” apresentado na *International*

Conference on Power System Transients IPST – 2017 em Seul, Coréia do Sul (SOUZA, 2017b).

O princípio de funcionamento da metodologia proposta e os primeiros resultados obtidos para aplicações em relés diferenciais foram apresentados no seguinte artigo de periódico:

- J. R. M. SOUZA, C. S. PEREIRA, A. R. DE CONTI “*Reducing the Number of Tests Cases for Reliability Assessment of Protective Relays*” publicado na *IEEE Transactions on Power Delivery* v. 33, nº 6, p. 3114-3121, 2018 (SOUZA, 2018).

1.5 Organização do texto

Neste capítulo é apresentada a contextualização do trabalho, sendo estabelecidos os objetivos, a metodologia utilizada e a produção bibliográfica resultante de seu desenvolvimento. No Capítulo 2 são discutidos os testes feitos em relés de proteção de acordo com a norma IEEE C37.233 (IEEE, 2009), sendo apresentado o estado da arte, com ênfase nos testes de aplicação, buscando elencar trabalhos que foram desenvolvidos propondo ferramentas e metodologias para este fim. Também é feita uma breve apresentação da metodologia proposta em (SOUZA, 2012) para a realização de testes de aplicação em relés diferenciais de transformador usando o Método de Monte Carlo, que é a base da técnica proposta neste trabalho. O Capítulo 3, por sua vez, descreve pormenorizadamente a metodologia proposta, que se baseia no grafo de Gabriel. No capítulo 4, os resultados obtidos são apresentados e discutidos. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões de continuidade.

Capítulo 2

TESTES DE APLICAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO

2.1 Testes em relés de proteção de acordo com a norma IEEE C37.233

A norma IEC C37.233 (IEEE, 2009) é um guia para testes em sistemas de proteção. Ela define basicamente cinco tipos de testes, apresentados na tabela 2.1: de certificação, aplicação, comissionamento, manutenção periódica e detecção de problemas.

O objeto deste trabalho está relacionado aos chamados testes de aplicação. De acordo com a norma IEC C37.233, os testes de aplicação têm a finalidade de garantir que sistemas de proteção, relés, algoritmos ou até mesmo ajustes, funcionem adequadamente em uma determinada situação e em uma localização específica do SEP. Por esta razão, os testes requerem um modelo detalhado do SEP. Para que este detalhamento seja maior, a norma IEC C37.233 recomenda que sejam feitos testes transitórios. Para isso, devem ser avaliados diversos casos de curtos-circuitos ou outros fenômenos que possam afetar o desempenho do relé de proteção em diferentes condições. Os testes podem ser feitos de duas maneiras diferentes: em malha aberta ou em malha fechada.

Tabela 2.1 - Testes em sistemas de proteção de acordo com a norma IEC C37.233.

Tipo de Teste	Finalidade	Detalhes do Teste
Testes de Certificação	Avaliar o desempenho de um relé ou sistema de proteção para garantir seu funcionamento correto em diferentes tipos de situações em que este equipamento possa vir a ser utilizado.	Feitos por uma organização de certificação. Pode utilizar registros oscilográficos, sinais simulados ou até mesmo simuladores em tempo real.
Testes de Aplicação	Avaliar o desempenho de um relé ou sistema de proteção para garantir seu funcionamento correto na situação específica em que este será utilizado, avaliando, inclusive, o ajuste a ser implementado no relé.	Feitos em laboratório por solicitação do usuário final ou pelo próprio. Pode utilizar registros oscilográficos, sinais simulados ou até mesmo simuladores em tempo real.
Testes de Comissionamento	Garantir que o sistema de proteção irá funcionar conforme projetado, verificando a integridade dos componentes e suas conexões.	Feito <i>in loco</i> , ou seja, na subestação em que o sistema irá operar.
Testes de Manutenção Periódica	Garantir que o sistema de proteção permanece funcionando corretamente após certo período de tempo	Feito <i>in loco</i> . Existem diferentes filosofias utilizadas para definir a periodicidade e os tipos de testes que devem ser feitos.
Testes de Detecção de Problemas (<i>Troubleshooting</i>)	Verificar se a proteção atuou corretamente após a ocorrência de um determinado evento.	Utiliza os registros oscilográficos para reproduzir as condições da ocorrência.

No esquema de teste em malha aberta, eventos durante os quais se deseja testar o desempenho do relé proteção são simulados no domínio do tempo, por meio de programas como o ATP. Posteriormente, os sinais de

tensão e corrente obtidos em cada caso simulado são exportados por meio de arquivos de computador, geralmente nos formatos COMTRADE (IEEE, 1999) ou pl4. Estes arquivos são interpretados, posteriormente, por meio de simuladores de SEP de malha aberta, popularmente conhecidos como malas de teste, que fazem a amplificação destes sinais de tensão e corrente nos relés de proteção testados. Eventualmente, os sinais de atuação das funções de proteção do relé podem ser aplicados à mala de testes apenas para avaliação do tempo de operação destas funções, não interferindo nas simulações. A figura 2.1 apresenta um esquema de teste de malha aberta, em que uma mala de testes Omicron CMC 256 Plus é utilizada para testar um relé de distância Schweitzer SEL-311C.

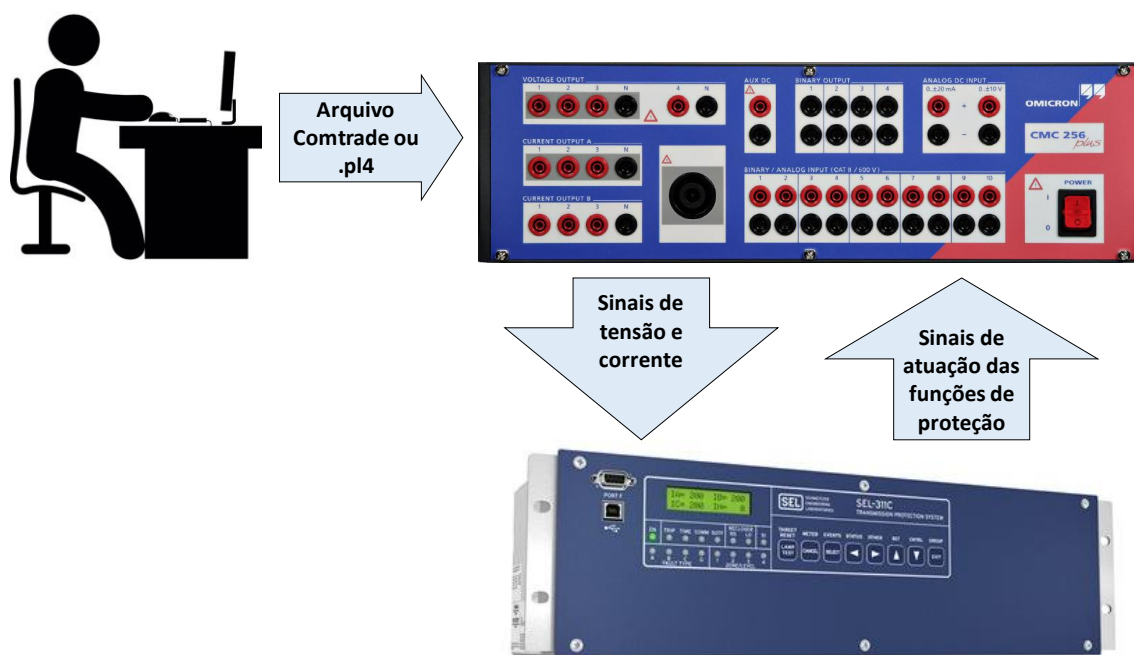


Figura 2.1 – Esquema de teste de malha aberta de um relé de distância Schweitzer SEL-311C com uma mala de testes Omicron CMC 256 Plus.

Nos testes em malha fechada, por sua vez, a simulação é feita por computadores dedicados que interagem com o relé testado em tempo real. Assim, da mesma maneira que os sinais oriundos das simulações influenciam o desempenho do relé, as respostas das funções implementadas no relé, tais como as funções de proteção e de religamento automático, também influenciam as simulações. A figura 2.2 apresenta um esquema de teste de um

relé Schweitzer SEL-31C utilizando um simulador de malha fechada, da marca RTDS *Technologies*.



Figura 2.2 – Esquema de teste de malha aberta de um relé de distância Schweitzer SEL-311C com uma mala de testes Omicron CMC 256 Plus.

Na próxima seção, apresenta-se o histórico de desenvolvimento dos equipamentos de testes de relés de proteção.

2.2 Histórico do desenvolvimento dos equipamentos utilizados em testes transitórios de relés de proteção

Os primeiros sistemas desenvolvidos para a execução de testes transitórios em sistemas de proteção utilizavam elementos de circuitos analógicos, como indutores e resistores, para representar os componentes do SEP, como geradores, LT e outros, em escala. Estes sistemas eram conhecidos como *Transient Network Analyzers* (TNAs). Além de exigirem um grande tempo para o preparo das simulações, apresentavam diversas limitações, especialmente na representação da não linearidade do núcleo dos transformadores de potência (NIMMERSJO,1989).

Com o desenvolvimento de técnicas computacionais para a simulação de fenômenos transitórios, surgiram os primeiros sistemas digitais para a execução de testes de sistemas de proteção (WILLIAMS,1984;

KEZUNOVIC,1991). Basicamente, os sinais obtidos por meio de registros oscilográficos ou simulações computacionais são aplicados nos relés por meio de amplificadores de potência. Este sistema de teste é utilizado até os dias atuais para realizar os testes em malha aberta, com as malas de teste fazendo a função do controlador de testes e dos amplificadores de potência.

Há situações, no entanto, em que os testes de malha aberta não são suficientes. Nos casos dos testes das proteções de LT ou de transformadores interligadores, por exemplo, a abertura dos disjuntores de um terminal modifica a corrente nos demais terminais. Assim, para se verificar adequadamente o desempenho das proteções nesta situação, é necessário que a atuação do relé seja informada ao simulador em tempo real. Isso motivou o desenvolvimento de equipamentos capazes de realizar testes em malha fechada.

Os primeiros sistemas de teste de proteção em malha fechada eram analógicos e utilizavam os mesmos princípios do TNA (JOETTEN,1985). Embora possuíssem circuitos eletrônicos para emular o comportamento de indutâncias não lineares, estes sistemas ainda eram limitados, grandes, caros e de difícil manuseio. Posteriormente, surgiu o primeiro sistema digital de simulação para testes de proteção em malha fechada, conhecido como RTDS (MCLAREN,1992). Este sistema vem sendo aperfeiçoado ao longo dos anos e hoje encontra um grande número de aplicações (ASSADOLLASH, 2019; ZHANG, 2019; JIA, 2019; JI, 2019), sendo oferecido por alguns fabricantes, como a *RTDS Technologies* e a *OPAL RT Technologies*.

2.3 Histórico do desenvolvimento das metodologias utilizadas em testes transitórios de relés de proteção

Com o surgimento de equipamentos digitais para testes de relés de proteção na década de 1990, começaram a surgir os primeiros trabalhos relacionados à metodologia utilizada para se fazer testes transitórios em relés de proteção. Uma primeira metodologia foi apresentada por (KEZUNOVIC, 1997) para aplicações em relés de distância. Nela, os parâmetros que influenciam no desempenho do relé, como o tipo de falta, sua localização e o

ângulo de incidência, foram variados sistematicamente. Além disso, por vezes os algoritmos dos relés de proteção podem apresentar uma pequena instabilidade que pode afetar a estimativa de grandezas como o tempo de operação, a localização de falta estimada (SOUZA, 2015a) e, até mesmo, a confiabilidade. Para se levar tal instabilidade em consideração, em (KEZUNOVIC, 1997) o teste de cada caso foi repetido dez vezes.

Esta variação sistemática dos parâmetros demanda a definição de faixas e de intervalos de variação. Essas definições, por um lado, podem levar a um número muito grande de simulações e, por outro, podem tornar os testes pouco representativos. Por esta razão, trabalhos posteriores sugeriram o uso de ferramentas estatísticas para se gerar os casos a serem simulados.

Em (SOUZA, 2012), foi proposta uma metodologia baseada no Método de Monte Carlo para fazer os testes de aplicação dos relés diferenciais. Nesta metodologia, os parâmetros são variados aleatoriamente em cada caso simulado, de acordo com funções densidade de probabilidade previamente definidas. A quantidade de casos de teste necessários depende da taxa de sucessos obtida, mais precisamente do desvio padrão do seu estimador. Por esta razão, utilizou-se um processo iterativo que calcula este desvio padrão após a execução de cada teste para definir se a quantidade de casos simulados é suficiente.

Em (ZUBIC, 2015), foi apresentada uma metodologia para testes de aplicação em relés de distância que utiliza também uma abordagem probabilística. Nesse trabalho, os parâmetros de teste também foram modelados a partir de suas funções densidade de probabilidade. Há, inclusive, uma discussão sobre a definição dessas funções a partir de registros históricos de ocorrências nos sistemas elétricos da Bósnia e Herzegovina e da Sérvia. Entretanto, o número de casos simulados no trabalho foi arbitrado em 10.000, sem se fazer nenhuma consideração sobre as razões que levaram a esta escolha.

Trabalhos posteriores sugeriram o uso de cadeias de Markov para se calcular a confiabilidade de relés de proteção e para melhor definição dos ajustes da função de proteção por meio do parâmetro calculado. Em (JCDRZCJCZAK, 2017a), por exemplo, uma cadeia de Markov é proposta para

o estudo de relés de distância, levando-se em conta as proteções de retaguarda. Neste contexto, as confiabilidades ou taxas de sucesso, calculadas em cada situação específica, podem ser entendidas como as taxas de transição entre os estados desta cadeia de Markov.

Em (JCDRZCJCZAK, 2017b), o uso de simulações feitas em programas de transitórios eletromagnéticos, como o ATP, de maneira estocástica, é sugerido para se calcular as taxas de transição, tal como feito em (SOUZA, 2012) e em (ZUBIC, 2015). Entretanto, de forma semelhante a (ZUBIC, 2015), a quantidade de simulações feitas para o cálculo da confiabilidade também foi arbitrada sem qualquer justificativa. Em seu trabalho, foram utilizados 2358 casos.

2.4 O uso do Método de Monte Carlo nos testes de aplicação de relés de proteção

Conforme visto na seção anterior, muitos trabalhos recentes sobre metodologias de execução de testes transitórios em relés de proteção têm proposto o uso de técnicas estocásticas. Neste trabalho, utiliza-se uma das técnicas mais conhecidas para este fim, que é o Método de Monte de Carlo.

No Método de Monte Carlo, um modelo matemático $F(\eta)$ é simulado N vezes usando um conjunto de m variáveis aleatórias $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m]$ como dado de entrada (THOMOPOULOS, 2013). Em testes de relés de proteção, $F(\eta)$ pode ser definido como o resultado de um caso. Para cada caso simulado, existem duas diferentes possibilidades de resultado: sucesso, avaliado como 1, ou falha, avaliado como 0. A definição de sucesso depende do problema analisado. Em casos de curtos-circuitos internos à zona de proteção do relé avaliado, o resultado esperado é a sua operação (*trip*) e a taxa de sucessos refere-se à dependabilidade (URDEN, 1997). Por outro lado, em situações de curtos-circuitos externos ou outros fenômenos transitórios, como energizações, espera-se que o relé não opere e a taxa de sucessos refere-se à segurança (URDEN, 1997).

Quando o evento avaliado tem apenas duas possibilidades de resposta, o modelo matemático utilizado para análise estocástica é denominado modelo binomial. A execução de uma sequência de experimentos desta natureza é denominada como processo de Bernoulli (SOUZA, 2012). Este processo pode ser utilizado para estimar a taxa de sucessos \hat{P} , a partir da aproximação pela taxa de sucessos empiricamente medida p :

$$\hat{P} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N F_i(\eta) = p \quad (2.1)$$

De acordo com a lei dos grandes números, a equação 2.1 representa um estimador não polarizado. Assim, sua esperança tende para a taxa de sucessos p quando N tende para infinito, isso é:

$$E(\hat{P}) = p \quad (2.2)$$

Por sua vez, variância do estimador da taxa de sucessos vale:

$$\sigma_{\hat{P}}^2 = \frac{p(1-p)}{n} \quad (2.3)$$

Então, a taxa de sucessos estimada pode ser representada em conjunto com o intervalo de confiança por:

$$\hat{P} = p \pm Z_C \cdot \sigma_P \quad (2.4)$$

Na equação 2.4, Z_C é um fator de tolerância associado ao nível de confiança c . Em (SOUZA, 2012), considerou-se $c = 0,9997$, o que leva a $Z_C = 3,00$ (RUBINSTEIN, 2017). Desta maneira, se forem feitas 1000 simulações para se testar um determinado relé de proteção e este vier a falhar em 100 casos, a taxa de sucessos estimada será de $0,900 \pm 0,028$, com um nível de confiança de 99,97%, como resultado da aplicação das equações 2.3 e 2.4.

Esse princípio foi utilizado em (SOUZA, 2012) para se testar relés diferenciais de transformador em quatro diferentes situações:

- Energizações
- Curtos-circuitos externos (faltas passantes).
- Curtos-circuitos internos à zona de proteção do relé diferencial, porém externos ao transformador (entre as buchas do transformador e os TCs de pedestal);
- Curtos-circuitos internos entre os enrolamentos e a carcaça do transformador (faltas fase-terra);

A figura 2.3 apresenta a sequência dos procedimentos adotados para a avaliação de cada uma destas situações.



Figura 2.3 – Sequência dos procedimentos adotados para a avaliação da confiabilidade dos ajustes de relés diferenciais proposta em (SOUZA, 2012)

Nesta metodologia, define-se um valor de desvio padrão aceitável para o estimador e segue-se fazendo os testes no relé até que o valor do parâmetro seja alcançado, considerando um número mínimo de 100 testes. No

fluxograma apresentado na figura 2.3, o valor arbitrado para este desvio padrão foi de 0,01.

Para a simulação de cada uma destas situações, foi necessária a criação de vetores de estado com a definição das variáveis aleatórias que influenciam em cada uma delas. A equação 2.5 apresenta o vetor de estados η^a utilizado nas simulações de energização em (SOUZA, 2012).

$$\eta^a = \begin{bmatrix} \eta_1^a \\ \eta_2^a \\ \eta_3^a \\ \eta_4^a \\ \eta_5^a \\ \eta_6^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{pre} + \left(\frac{U(0,1)}{60}\right) \\ N(0, \sigma_d) \\ N(0, \sigma_d) \\ \varphi_{max} \cdot U(0,1) \\ \varphi_{max} \cdot U(0,1) \\ \varphi_{max} \cdot U(0,1) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Na equação 2.5, $U(a, b)$ corresponde a uma variável aleatória definida por uma distribuição uniforme cujos limites são a e b , enquanto $N(\mu, \sigma)$ corresponde a uma variável aleatória definida por uma distribuição normal com média μ e desvio padrão σ . A variável t_{pre} é o tempo que antecede o evento testado, no caso a energização, e σ_d é o desvio padrão da discrepância dos polos do disjuntor do circuito pelo qual o transformador será energizado. Assim, o primeiro elemento do vetor de estados η^a define o instante de fechamento do polo da fase A do disjuntor, enquanto o segundo e o terceiro elementos representam a discrepância entre os polos da fase A e das demais fases B e C. Este procedimento está em consonância com a determinação do item 9.2.1.2 dos Procedimentos de Rede do ONS (ONS, 2018). A variável φ_{max} corresponde ao fluxo residual máximo obtido pela curva de excitação ou a partir da tensão máxima de operação do transformador. Desta maneira, os três últimos elementos do vetor de estados η^a definem os fluxos residuais de cada fase. Ressalte-se que esta situação na qual os fluxos residuais das três fases são independentes entre si somente ocorre em casos de bancos de transformadores monofásicos.

Nas simulações de curtos-circuitos, o vetor de estados η^b utilizado é o apresentado na equação 2.6.

$$\eta^b = \begin{bmatrix} \eta_1^b \\ \eta_2^b \\ \eta_3^b \\ \eta_4^b \\ \eta_5^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(0,1) \\ U(0,1) \\ U(0,1) \cdot R_{Fmax} \\ U(0,1) \cdot R_{Nmax} \\ t_{pre} + \left(\frac{U(0,1)}{60}\right) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Na equação 2.6, η_1^b define o tipo de falta. Esta variável aleatória é definida pela distribuição uniforme limitada entre 0 e 1. A tabela 2.2 apresenta a relação entre o valor desta variável e o tipo de falta correspondente (SOUZA, 2018). Estes valores estão de acordo com as probabilidades de cada tipo de falta apresentadas em (BLACKBURN,1993).

Tabela 2.2 - Faixas de valores da variável tipo $U(0,1)$ que correspondem a cada tipo de falta (SOUZA, 2018).

Tipo de Curto-circuito	Valor de η_1^b
AT	$0 \leq \eta_1^b < 0,25$
BT	$0,25 \leq \eta_1^b < 0,50$
CT	$0,50 \leq \eta_1^b < 0,75$
ABT	$0,75 \leq \eta_1^b < 0,77$
BCT	$0,77 \leq \eta_1^b < 0,79$
CAT	$0,79 \leq \eta_1^b < 0,81$
ABCT	$0,81 \leq \eta_1^b < 0,83$
AB	$0,83 \leq \eta_1^b < 0,88$
BC	$0,88 \leq \eta_1^b < 0,93$
CA	$0,93 \leq \eta_1^b < 0,98$
ABC	$0,98 \leq \eta_1^b \leq 1$

Seguindo a mesma lógica, a variável aleatória η_2^b foi utilizada de forma similar para definir o local da falta. Como no caso avaliado em (SOUZA, 2012), o transformador possuía três enrolamentos. As faixas desta variável, que correspondem a cada localização possível, foram definidas conforme a tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Faixas de valores da variável tipo $U(0,1)$ que correspondem a cada localização de falta (SOUZA, 2012).

Enrolamento sob Curto-circuito	Valor de η_2^b
Primário	$0 \leq \eta_2^b < 0,33$
Secundário	$0,33 \leq \eta_2^b < 0,67$
Terciário	$0,67 \leq \eta_2^b < 1$

As variáveis aleatórias η_3^b e η_4^b definem os valores das resistências que compõem o arranjo de falta tal como apresentado na figura 2.4. Assim, R_{Fmax} e R_{Nmax} representam os valores máximos que estas resistências podem assumir.

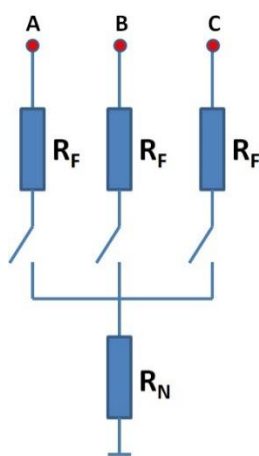


Figura 2.4 – Composição das resistências de falta nas simulações de curto-circuito (SOUZA, 2012)

A variável aleatória η_5^b define o instante em que ocorre o curto-circuito seguindo os mesmos princípios utilizados pela variável η_1^a .

2.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma análise do estado da arte dos testes de aplicação em relés de proteção. Por esta análise verificou-se que trabalhos atuais têm dado preferência a métodos que utilizam uma abordagem estatística dos

parâmetros de ensaio. Entretanto, para se garantir uma boa exatidão do resultado dos testes, estes métodos demandam um número de testes muito elevado, o que pode dificultar sua aplicação. A metodologia proposta neste trabalho visa a minimizar este problema, provendo uma maneira de reduzir o número de testes necessários, impactando minimamente na qualidade dos resultados.

Capítulo 3

REDUÇÃO NA QUANTIDADE DE CASOS DE TESTE UTILIZANDO O GRAFO DE GABRIEL

3.1 Relés de proteção como comparadores

Conforme apresentado no capítulo anterior, o intervalo de confiança de um estimador baseado no Método de Monte Carlo depende da sua variância, que, por sua vez, depende da quantidade de casos simulados. Por isso, por vezes se faz necessária a simulação de um número elevado de casos para se obter uma variância que seja pequena o suficiente. Além de consumir muito tempo, esse procedimento pode desgastar os contatos de saída do relé sob teste. Desta maneira, seria interessante reduzir a quantidade de casos a serem testados, desde que isso não afete a variância do estimador.

Em (WARRINGTON,1968), é demonstrado que um relé de proteção pode ser visto como um comparador, uma vez que sua decisão de operar ou não depende basicamente da comparação entre duas grandezas. Além disso, grandezas de bloqueio também são usadas em alguns relés. Desta maneira, o comportamento de um relé de proteção pode ser definido a partir de um conjunto de grandezas. Por exemplo, a operação de um relé diferencial de transformador pode ser definida a partir da corrente diferencial, da corrente de restrição e da razão entre as

componentes de segunda harmônica e fundamental da corrente diferencial que é utilizada como grandeza de bloqueio para evitar atuações indevidas durante a energização do transformador protegido (ZIEGLER, 2005). Estas grandezas formam um espaço característico que é dividido em duas regiões: a de operação e a de não-operação.

O valor destas grandezas pode ser calculado por meio do Método de Monte Carlo. Assim, cada caso simulado se torna um ponto no espaço característico. Estes pontos podem ser divididos em duas classes: a de sucessos e a de falhas. Espera-se que os pontos de uma determinada classe estejam dentro de suas respectivas regiões do espaço característico. Por exemplo, em testes de casos de curtos-circuitos da espira para a carcaça, espera-se que os pontos associados a casos de sucesso estejam dentro da região de operação e os pontos associados a casos de falha estejam dentro da região de não-operação.

Como o objetivo dos testes de aplicação é identificar estes eventuais casos de falha, sua execução pode ser entendida como um procedimento de classificação da maneira como este conceito é utilizado na área de inteligência computacional ou de aprendizagem de máquina (*machine learning*), tal como se discute na próxima seção.

3.2 Princípio de funcionamento dos classificadores

Muitos dos problemas de aprendizagem de máquina envolvem um conjunto de dados de entrada que fornecem saídas que são previamente conhecidas. A partir deste conjunto inicial, deseja-se desenvolver algoritmos de predição capazes de inferir as saídas que seriam produzidas por outro conjunto de entradas. Este tipo de abordagem é chamado de aprendizagem supervisionada. Quando as saídas são valores contínuos, estes problemas são definidos como sendo de regressão. Quando as saídas são valores discretos, estes problemas são ditos de classificação (HARSTIE, 2001).

Uma maneira de se solucionar problemas de classificação é procurar identificar as funções de distribuição de probabilidade que geraram os dados de

entrada. Técnicas desta natureza são conhecidas como paramétricas, porque buscam identificar parâmetros relacionados com cada classe para, a partir destes, construir superfícies de separação no espaço característico definido pelas entradas. Quando o espaço característico possui mais do que as três dimensões do espaço euclidiano tradicional, ele é chamado de hiperespaço.

Técnicas paramétricas possuem diversas limitações, dentre as quais se destaca o fato de que, geralmente, é difícil definir a função densidade de probabilidade geradora exata, o que faz com que sejam feitas aproximações que levam a modelos de distribuição mais pobres (BISHOP, 2006). Por esta razão, em muitos casos é preferível utilizar outros tipos de técnicas, conhecidas como não-paramétricas.

Uma das técnicas de classificação não-paramétricas mais comumente utilizada é a *k-nearest neighbor* (FIX, 1952; COVER, 1967; BISHOP, 2006). Nesta técnica, um ponto é classificado de acordo com a classe dominante de seus k vizinhos. A figura 3.1 apresenta um exemplo de classificador *k-nearest neighbor* para $k = 3$ em duas dimensões. Neste exemplo, o ponto 1 seria classificado como pertencente à classe A porque os três pontos mais próximos dele pertencentes ao conjunto de dados previamente classificados correspondem a essa classe. O ponto 2, por sua vez, pertenceria à classe B porque dois dos três pontos mais próximos dele pertencem a essa classe.

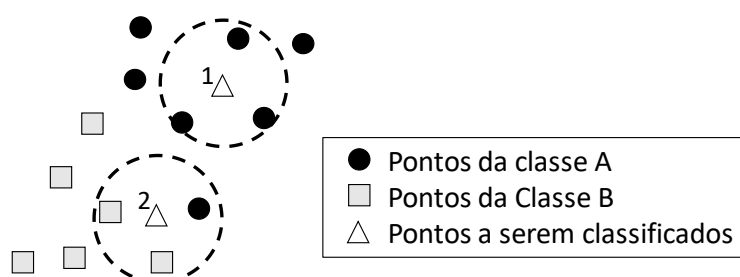


Figura 3.1 – Exemplo de classificador *k-nearest neighbor* para $k = 3$.

Apesar de bastante eficaz, o uso deste recurso tem dois problemas principais: a necessidade de se armazenar todos os pontos do conjunto de dados (alto consumo de memória) e a necessidade de se fazer um número elevado de comparações (alto consumo de processamento). Para se contornar estes problemas,

foi sugerido em (BHATTACHARAYA, 1992) o uso de grafos de proximidade obtidos a partir dos chamados diagramas de Voronoi (AURENHAMMER, 1991). Diagramas de Voronoi são partições de um determinado espaço baseadas na regra *k-nearest neighbor* considerando $k=1$ aplicada a um conjunto de pontos previamente classificados pertencentes a este espaço. A figura 3.2 apresenta um exemplo de diagrama de Voronoi construído em um espaço de duas dimensões (BHATTACHARAYA, 1992). Nesta figura, a linha mais espessa corresponde à superfície de separação, que é obtida a partir das arestas que conectam as regiões de Voronoi de 2 pontos de classes distintas. Uma vez obtida esta superfície, não há mais a necessidade de se armazenar os pontos do conjunto original.

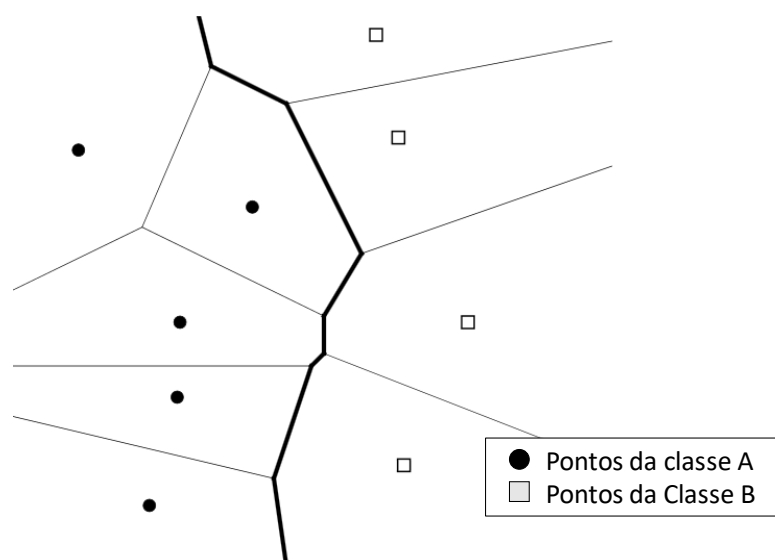


Figura 3.2 – Exemplo de diagrama de Voronoi com a superfície de separação obtida por esta técnica (BHATTACHARAYA, 1992).

Entretanto, algoritmos baseados na aplicação da técnica *k-nearest neighbor* costumam ter um consumo computacional elevado. Uma maneira de se medir o custo computacional de um determinado algoritmo é por meio de sua função de complexidade f . A função de complexidade $f(n)$ define o tempo necessário para se executar um determinado algoritmo para um conjunto de entradas de tamanho n . Outra grandeza muito utilizada para se avaliar algoritmos é a complexidade assintótica $O(f)$, que, lançando mão do conceito matemático de dominação assintótica de funções, desconsidera constantes que eventualmente multipliquem a

função de complexidade para se ter uma ideia de seu comportamento para valores elevados de n . Se um determinado algoritmo executa um número de operações que é proporcional ao tamanho dos dados de entrada, sua complexidade é definida como $O(n)$. Por sua vez, se outro algoritmo executa um número de operações que é proporcional ao quadrado do tamanho dos dados de entrada, sua complexidade é definida como $O(n^2)$ (ZIVIANI, 1999).

De acordo com (BHATTACHARAYA, 1992) a complexidade de um algoritmo de construção da superfície de separação entre duas classes baseado na aplicação direta da técnica *k-nearest neighbor* para um conjunto com n pontos em um espaço de d dimensões é $O(dn^{d+2})$ para o pior caso, enquanto a de um algoritmo baseado no diagrama de Voronoi é de $O(n^{d/2})$. De qualquer maneira, embora o algoritmo baseado no diagrama de Voronoi seja mais eficiente do que o *k-nearest neighbor*, ele ainda possui alto custo computacional para aplicações com um número elevado de dimensões. Uma alternativa para se obter algoritmos menos dependentes do número de dimensões é o uso dos chamados grafos de proximidade.

Grafos são conjuntos de segmentos de retas (denominadas arestas, elementos ou elos) que interligam os pontos de um determinado conjunto (denominados vértices ou nós). Estes grafos são ditos de proximidade quando as regras que definem sua construção estão relacionadas com a proximidade dos vértices. Um exemplo de grafo de proximidade é aquele construído a partir da chamada triangulação de Delaunay (AURENHAMMER, 1991). Uma triangulação de Delaunay é obtida interligando os pontos cujas regiões de Voronoi têm arestas em comum. A figura 3.3 apresenta o grafo obtido pela triangulação de Delaunay feita a partir do diagrama de Voronoi apresentado na figura 3.2.

Outro tipo de grafo de proximidade, que é um sub-grafo da triangulação de Delaunay e que tem sido amplamente utilizado para a construção de classificadores, é o grafo de Gabriel (BHATTACHARAYA, 1992; ZHANG, 2002; DYER, 2009; TORRES, 2014). A técnica apresentada neste trabalho para reduzir o conjunto de casos de teste gerados se baseia no princípio de funcionamento dos classificadores que utilizam o grafo de Gabriel.

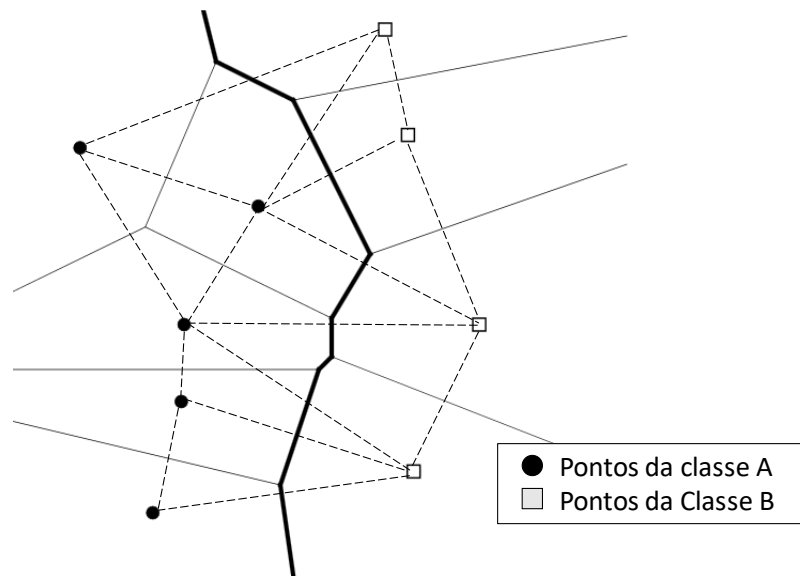


Figura 3.3 – Grafo obtido pela triangulação de Delaunay feita a partir do diagrama de Voronoi apresentado na figura 3.2

3.3 O grafo de Gabriel

O grafo de Gabriel é um tipo específico de grafo planar no qual uma aresta é considerada válida somente se a hipersfera cujo diâmetro é dado por esta aresta não contiver nenhum outro vértice (GABRIEL, 1969; ZHANG, 2002). Em outras palavras, o segmento de reta que interliga os pontos x_i e x_j somente é uma aresta válida se

$$\delta^2(x_i, x_j) = \delta^2(x_i, x_k) + \delta^2(x_j, x_k) \quad (3.1)$$

para todos os pontos x_k possíveis, onde, para quaisquer pontos a e b , $\delta(a, b)$ é a distância euclidiana entre ambos. A distância euclidiana $\delta(x_p, x_s)$ entre dois pontos $x_p(p_1, p_2, \dots, p_n)$ e $x_s(p_1, p_2, \dots, p_s)$ em um hiperespaço de n dimensões é dada por:

$$\delta(x_p, x_s) = \sqrt{(p_1 - s_1)^2 + (p_2 - s_2)^2 + \dots + (p_n - s_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (p_i - s_i)^2} \quad (3.2)$$

A figura 3.4 mostra um exemplo de conjunto de pontos em um espaço bidimensional que exemplifica o processo de construção de um grafo de Gabriel (SOUZA, 2018). Neste caso, as hiperesferas correspondem a circunferências. Assim, o segmento de reta entre x_b e x_c corresponde a uma aresta válida porque a circunferência cujo diâmetro é $\overline{x_b - x_c}$ não contém nenhum outro ponto. O segmento de reta que interliga os pontos x_a e x_b , por sua vez, não corresponde a uma aresta válida porque a circunferência cujo diâmetro é $\overline{x_a - x_b}$ contém outro ponto representado por y .

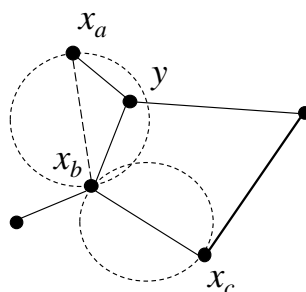


Figura 3.4 – Construção de um grafo de Gabriel (SOUZA, 2018).

Em um grafo de Gabriel, pontos interconectados por arestas são chamados de vizinhos de Gabriel. Algoritmos de classificação baseados no grafo de Gabriel identificam os pares de vizinhos de Gabriel que pertencem a classes diferentes para orientar a construção da superfície de separação (TORRES, 2014). Em um pior caso, um algoritmo para construção do grafo de Gabriel tem uma complexidade $O(dn^3)$, o que significa que seu consumo computacional é bem menos dependente da quantidade de dimensões do que os métodos baseados na técnica *k-nearest neighbor* e no diagrama de Voronoi (BHATTACHARAYA, 1992).

3.4 Apresentação da metodologia proposta

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para reduzir a quantidade de casos gerados inicialmente pelo método de Monte Carlo para a avaliação da confiabilidade de relés de proteção, definindo quais destes casos realmente

precisam ser testados. Para a geração destes casos, o primeiro passo é definir um conjunto de variáveis aleatórias tal como descrito no item 2.4.1.2. Posteriormente, define-se uma quantidade fixa de simulações a serem feitas.

No método apresentado em (SOUZA, 2012), as formas de onda das correntes e tensões (caso o algoritmo do relé necessite destas grandezas) obtidas por meio do Método de Monte Carlo em todos os casos simulados teriam que ser aplicados no relé testado por meio de simuladores de sistema elétrico de potência (conhecidos como malas de teste) ou RTDS. A metodologia proposta neste trabalho, no entanto, faz uma seleção prévia dos casos cuja probabilidade de falha é maior, reduzindo assim a quantidade de casos que precisam ser efetivamente testados no relé. Para tal, devem ser seguidos os seguintes passos:

Passo 1: Definem-se grandezas características que têm relação com o princípio de operação do relé sob teste. Essas grandezas podem ser as mesmas utilizadas pelos comparadores dos algoritmos dos relés, acrescidas de eventuais grandezas de bloqueio. Por exemplo, para a avaliação do desempenho de relés diferenciais de transformadores durante curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça, as grandezas características podem ser a corrente diferencial e a corrente de restrição. Assim, o espaço característico ficaria similar ao apresentado na figura 3.5. Por outro lado, quando se deseja avaliar o desempenho destes mesmos relés durante energizações dos transformadores protegidos, deve-se levar em conta também a razão entre as componentes de segunda harmônica e fundamental da corrente diferencial. Após calcular o valor destas grandezas, cada caso simulado se torna um ponto em um espaço característico cujo número de dimensões corresponde à quantidade de grandezas características definidas.

Passo 2: Simula-se uma certa quantidade de casos de outras situações em que se espera que o relé tenha um desempenho diferente daquele esperado da situação sob teste. Seguindo o exemplo iniciado no passo 1, para situações de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça do transformador protegido, na qual se espera que o relé diferencial opere, uma escolha adequada de casos de controle seriam os de curtos-circuitos externos à zona de proteção do relé, situação na qual se espera que o relé diferencial não opere. Posteriormente, as grandezas características estipuladas no passo 1 são também calculadas para estes casos,

sendo chamadas de casos de controle. A figura 3.6 mostra como fica o espaço característico com o acréscimo destes casos. A quantidade destes casos de controle pode ser inferior à quantidade de casos avaliados. Neste trabalho, verificou-se que um conjunto de casos de controle com um tamanho entre 5 e 10% do conjunto de casos avaliados é suficiente.

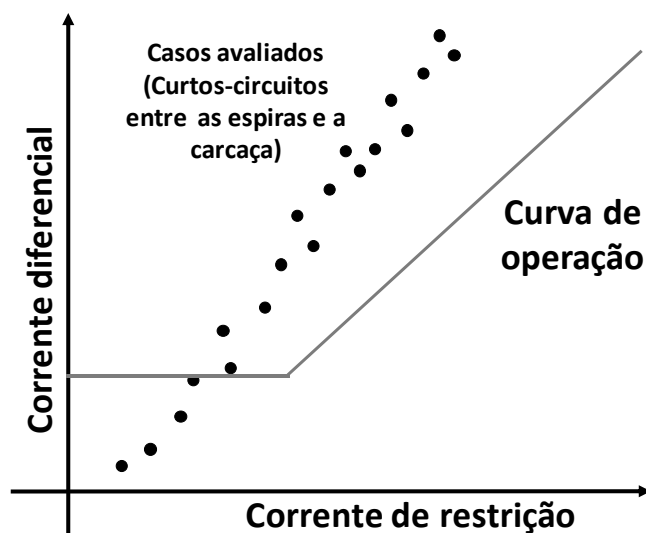


Figura 3.5 – Espaço característico obtido pela execução do primeiro passo da metodologia proposta para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça de transformadores.

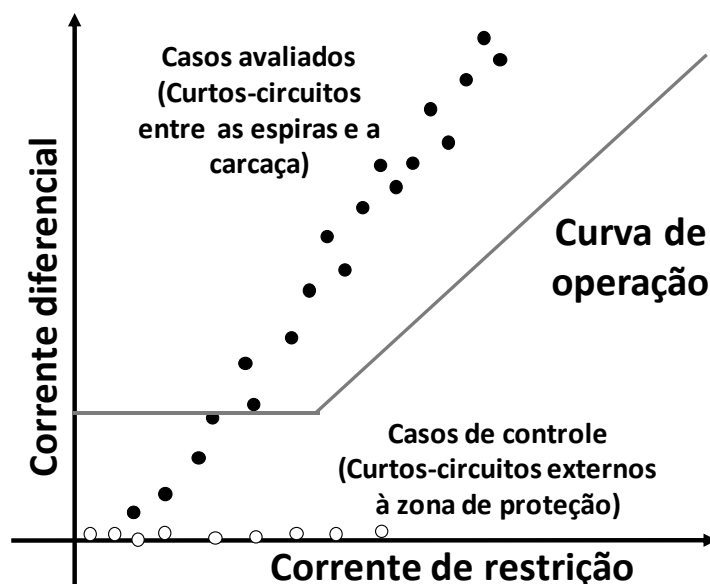


Figura 3.6 – Espaço característico obtido pela execução do segundo passo da metodologia proposta para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça de transformadores, onde são acrescentados os casos de controle.

Passo 3: Constrói-se o grafo de Gabriel com o conjunto completo (casos avaliados e casos de controle), conforme apresentado na figura 3.7.

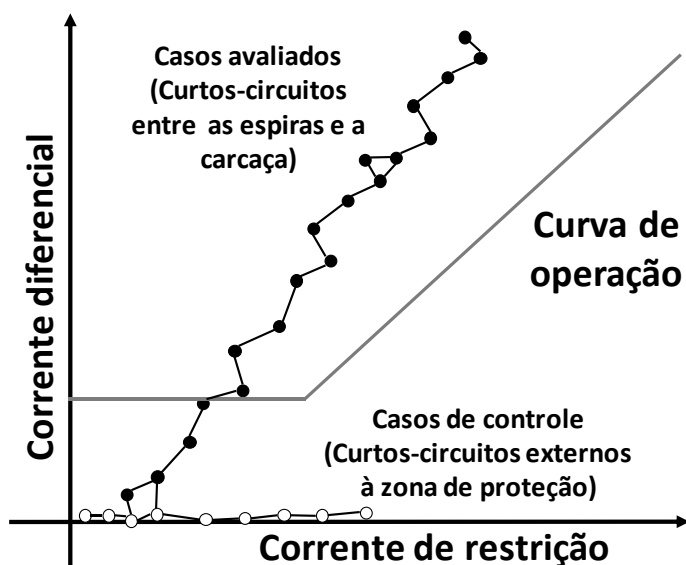


Figura 3.7 – Espaço característico com o grafo de Gabriel obtido pela execução do terceiro passo da metodologia proposta para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça de transformadores.

Passo 4: Iniciam-se os testes a partir dos casos do conjunto avaliado que são vizinhos de Gabriel dos casos de controle. A justificativa desta escolha é que se houver casos de falha a serem identificados eles provavelmente estarão mais próximos dos casos de controle do que dos casos de sucesso. Seguindo o exemplo que vem sendo desenvolvido, nas situações de curto-circuito entre a espira e a carcaça do transformador, provavelmente os casos em que o relé diferencial falha (deixa de atuar) estão localizados mais próximos dos pontos referentes aos casos de controle (curtos-circuitos externos) do que os pontos referentes a casos em que o relé atua corretamente.

Passo 5: Caso o relé venha a falhar em algum destes casos avaliados no passo 4, testam-se os vizinhos de Gabriel destes casos. A razão para este procedimento é que, baseado no princípio de funcionamento dos classificadores *k-nearest neighbor*, espera-se que eventuais casos de falha ainda não testados estejam localizados próximos dos casos de falha já testados.

Passo 6: Repete-se o passo 5 até que não ocorra mais nenhum caso de falha. Ao final deste procedimento, espera-se que todos os casos de falha tenham sido detectados.

Passo 7: Encerram-se os testes supondo-se que em todos os demais casos não testados o relé opera corretamente.

A figura 3.8 mostra a sequência dos pontos referentes aos casos testados. Os números próximos aos pontos correspondem à sequência dos testes até a parada do algoritmo. Neste caso, na primeira etapa são testados os dois casos cujos pontos são vizinhos de Gabriel dos casos de controle assinalados pelo número 1. Nas etapas seguintes testam-se os demais pontos na ordem em que estão enumerados.

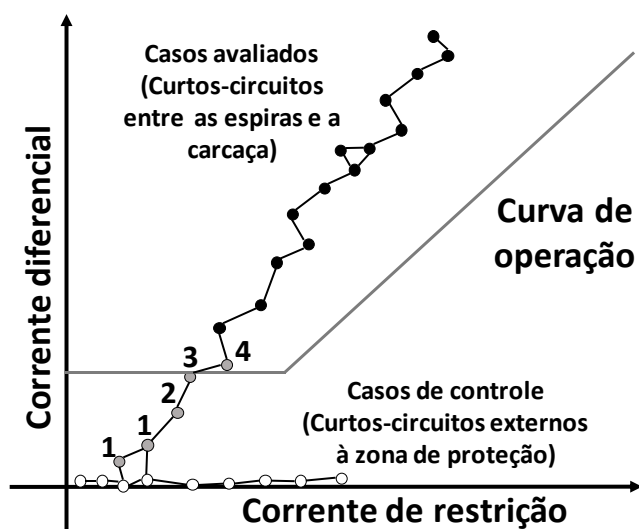


Figura 3.8 – Espaço característico com o grafo de Gabriel com a sequência de testes feitos a partir da aplicação da metodologia proposta para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça de transformadores.

A figura 3.9 apresenta um fluxograma com a sequência dos passos da metodologia proposta. Esta metodologia baseia-se no fato de que os pontos relacionados com as eventuais falhas tendem a estar localizados entre os casos de controle e a superfície de separação, explorando, assim, a semelhança que há entre os classificadores e os testes de aplicação mencionada no início deste capítulo. Em outras palavras, se os classificadores podem ser definidos como algoritmos desenvolvidos para separar os elementos de um conjunto de dados em diferentes classes, os testes de aplicação podem ser entendidos como classificadores com

duas classes: a dos casos de sucesso e a dos casos de falha. Desta maneira, a execução dos passos apresentados corresponde a uma varredura desta região entre os casos de controle e os de sucesso buscando identificar a superfície de separação.

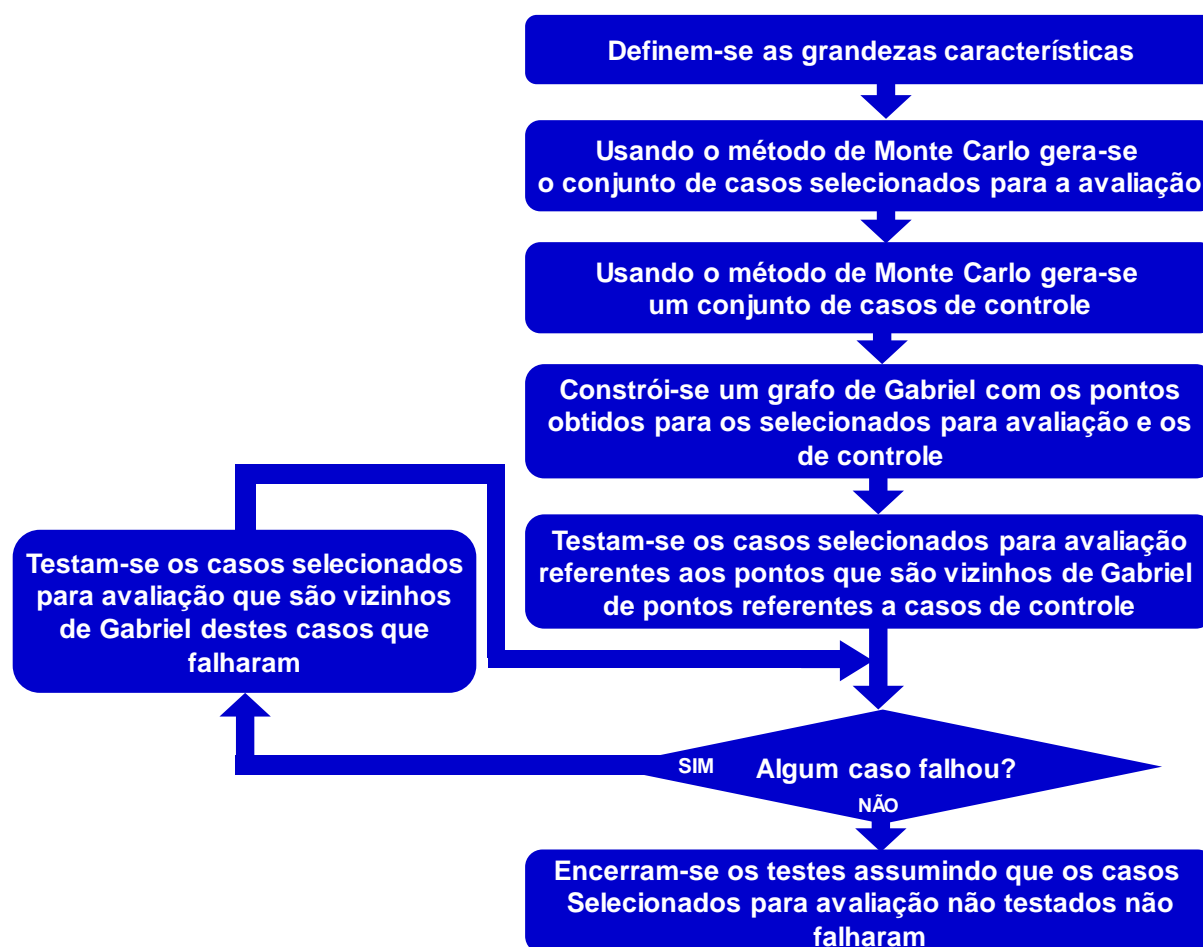


Figura 3.9 – Fluxograma com a sequência dos passos da metodologia proposta.

3.5 Comentários finais

Este capítulo apresentou uma descrição das motivações que levaram ao desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho, juntamente com a descrição de seu funcionamento. Por uma questão de visualização, o exemplo de aplicação apresentado se baseia no emprego da metodologia proposta para o caso

particular de duas dimensões. Entretanto, a metodologia também pode ser aplicada para casos com mais dimensões, tal como se verifica no próximo capítulo.

Capítulo 4

AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 Definição dos testes utilizados para avaliação da metodologia proposta

Com o objetivo de avaliar o desempenho da metodologia proposta, esta foi utilizada para a realização de testes de aplicação em dois tipos de relés modelados computacionalmente: relés de distância comumente empregados na proteção de linhas de transmissão e relés diferenciais de transformadores. Além disso, foi feito um teste com um relé diferencial de transformador real modelo SEL-487E.

A tabela 4.1 mostra as condições que foram testadas em cada tipo de relé modelado, bem como as condições utilizadas para gerar os casos de controle em cada uma. Para o relé real, foi testada somente a situação de curtos-circuitos entre a espira e a carcaça.

Uma vez que o objetivo da metodologia proposta é estimar a taxa de sucessos de um relé em uma dada situação, seria razoável supor que as situações escolhidas para avaliá-la sejam aquelas em que o relé sob teste pode vir a falhar. Desta maneira, é possível verificar se a metodologia proposta identifica corretamente estes casos de falha. Assim, as situações elencadas na tabela 4.1 foram escolhidas com base neste critério.

Tabela 4.1 – Situações utilizadas para geração dos casos avaliados e de controle para cada relé testado neste trabalho.

Tipo de relé	Situações avaliadas	Situações utilizadas para a geração dos casos de controle
Relé de distância	Curtos-circuitos monofásicos (fase A) internos	Curtos-circuitos monofásicos (fase A) nas linhas de transmissão adjacentes à frente e atrás
Relé diferencial de transformador	Curtos-circuitos entre a espira e a carcaça	Curtos-circuitos externos
	Energizações	Curtos-circuitos internos

Em relés de distância (função ANSI 21), para se evitar problemas de seletividade, as unidades de primeira zona, que são instantâneas, são ajustadas em subalcance cobrindo entre 80% e 85% da linha de transmissão (MASON, 1956). Assim, elas tendem a falhar durante curtos-circuitos próximos ao final da linha de transmissão protegida. Geralmente, este trecho é coberto por outras funções de proteção, como as unidades de distância de segunda zona (que são temporizadas), as unidades de sobrecorrente de neutro de tempo inverso (67N), os esquemas de teleproteção (85) ou, até mesmo, a função diferencial de linha de transmissão (87L). Por vezes, todas estas funções de proteção são implementadas no mesmo relé, como ilustrado na figura 4.1. Salienta-se que neste trabalho optou-se por verificar somente a atuação da unidade de distância monofásica da fase A (unidade AT), nas condições de curtos-circuitos monofásicos na própria fase A, apenas para verificar a aplicabilidade da metodologia proposta. A avaliação completa da aplicação desta metodologia em relés de distância envolvendo as outras unidades e outras condições de curto-circuito será objeto de trabalhos futuros.

Relés diferenciais de transformador, por sua vez, podem vir a atuar indevidamente durante as energizações dos transformadores protegidos. Durante estes eventos, ocorre a circulação de uma corrente elevada, conhecida como corrente de *inrush*, em decorrência do comportamento não linear da reatância de magnetização. Como esta corrente circula somente no enrolamento pelo qual o transformador está sendo energizado, o elemento de proteção diferencial, que se baseia na lei de Kirchhoff das correntes, pode interpretá-la erroneamente como um

curto-circuito. Por esta razão, estes relés possuem funções especificamente projetadas para identificar estas correntes e bloquear o elemento diferencial nestas condições (ZIEGLER, 2005). Geralmente, o funcionamento destes elementos se baseia na composição harmônica da corrente diferencial, uma vez que estas correntes de *inrush* tem a presença de harmônicos pares, em especial do segundo. No entanto, estas funções de proteção podem falhar em algumas ocasiões. Por isso, técnicas de detecção de correntes de *inrush* seguem sendo frequente objeto de estudo (MORADI, 2019).

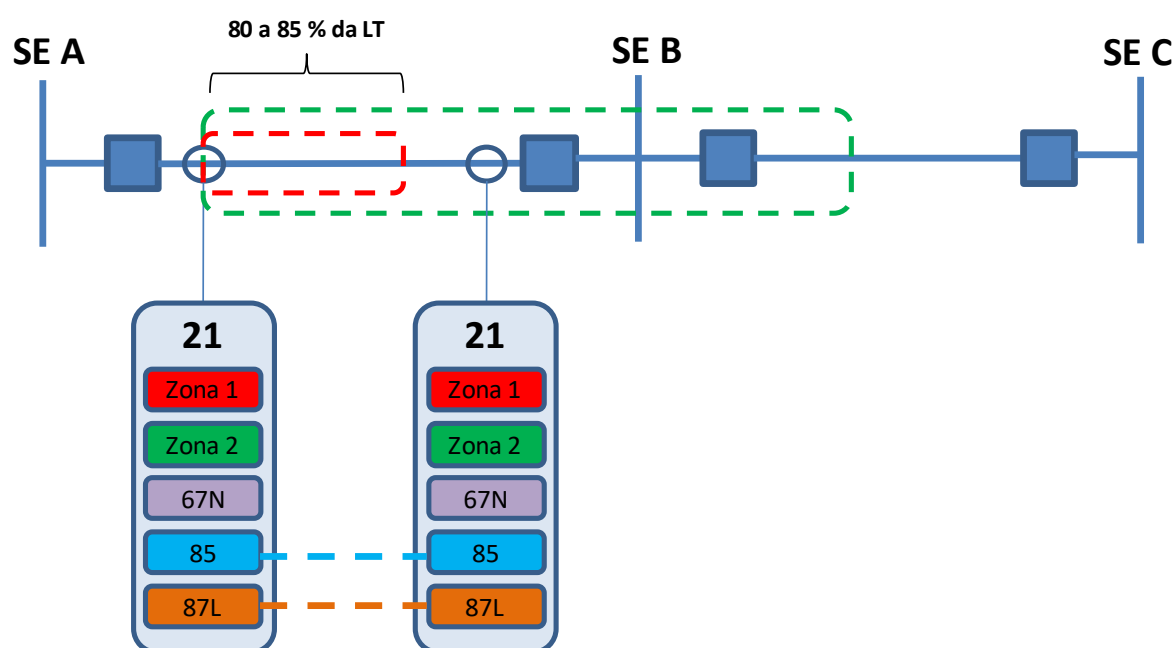


Figura 4.1 – Diagrama esquemático com um exemplo de funções de proteção implementadas em um relé de proteção de linha de transmissão.

Relés diferenciais de transformador também podem vir a falhar em casos de curtos-circuitos entre espiras e carcaça próximos ao aterramento. Nestas situações, a variação da corrente diferencial pode ser baixa a ponto de ser insuficiente para sensibilizar a função de proteção diferencial. Estes curtos-circuitos somente são detectados por elementos de proteção contra falta à terra restrita (REF – *Restricted Earth Fault*) ou pelos relés que compõem proteção intrínseca do transformador. A função de proteção contra falta à terra restrita é um tipo especial de função de proteção diferencial projetada para proteger um único enrolamento a partir das medições das correntes na sua entrada e no neutro (ZIEGLER, 2005), conforme

ilustrado na figura 4.2. Proteções intrínsecas, por sua vez, são aquelas que utilizam grandezas não elétricas, como o relé Buchholz (função ANSI 63), que detecta a presença de gases decorrentes de combustão no óleo isolante do transformador.

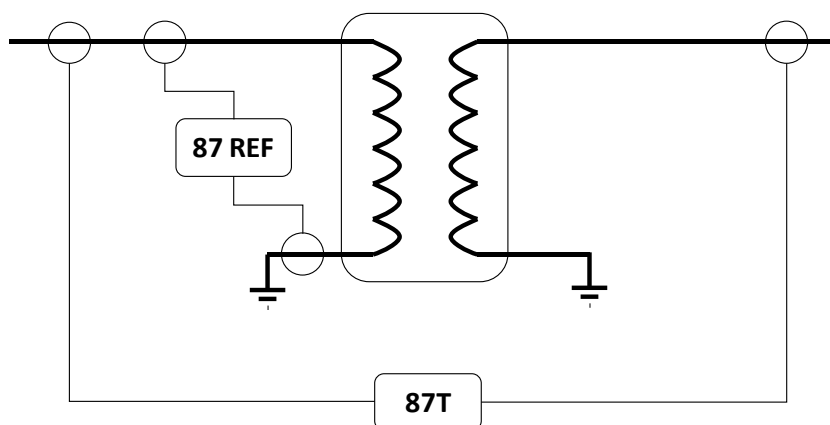


Figura 4.2 – Diagrama esquemático com as conexões dos transformadores de corrente utilizadas na proteção diferencial de transformador convencional e na proteção diferencial contra falta a terra restrita.

4.2 Sistema desenvolvido para a execução dos testes

Para avaliar o desempenho da metodologia proposta foi desenvolvido um sistema em duas etapas. A primeira etapa foi desenvolvida no Scilab, que é um software de programação livre que trabalha com uma linguagem de alto nível similar àquela utilizada no MATLAB. O algoritmo desenvolvido para esta etapa executa os seguintes passos:

1. Definição dos valores das variáveis aleatórias que compõe o vetor de estados de cada caso simulado (casos a serem avaliados e casos de controle);
2. Montagem dos arquivos com os cartões com os parâmetros utilizados nas simulações de cada caso (extensão .atp).
3. Execução de um arquivo de lote (extensão .bat), que realiza as simulações por meio do software ATP.

4. Leitura do arquivo com o resultado das simulações de cada caso (extensão .lis) para extrair os sinais de tensão e corrente obtidos em cada simulação.
5. Aplicação destes sinais ao relé digital modelado para avaliar o seu desempenho em cada um dos casos simulados.
6. Cálculo das grandezas características selecionadas em cada um dos casos simulados.
7. Montagem de um arquivo CSV que contém os valores das grandezas características e o resultado da atuação do relé para cada um dos casos simulados.

A segunda etapa do sistema desenvolvido foi implementada em linguagem R. Esta etapa executa os passos da metodologia conforme apresentado no item 3.3, tendo como entrada o arquivo CSV gerado na etapa anterior. A linguagem R foi escolhida por se tratar de uma linguagem de programação de alto nível que possui diversas bibliotecas com funções para aplicações em inteligência artificial. O algoritmo desenvolvido em R executa os seguintes procedimentos:

1. Leitura do arquivo CSV gerado pelo algoritmo desenvolvido no Scilab.
2. Montagem da matriz G contendo as grandezas características para os casos avaliados e para os casos de controle acrescentados ao final da matriz. Considerando a simulação de m casos para avaliação e n casos de controle utilizando k grandezas características, a matriz G possui dimensões $(m+n) \times (k)$. A figura 4.3 apresenta a estrutura da matriz G .
3. Construção do grafo de Gabriel utilizando a função gg disponível na biblioteca *cccd*, que constrói um objeto da classe grafo deste tipo tendo como entrada a matriz A obtida no passo anterior.
4. Obtenção da matriz de adjacência Adj do grafo de Gabriel criado no passo anterior utilizando a função *get.adjacency* disponível na biblioteca *igraph*. O elemento da linha i e coluna j da matriz de adjacência de um determinado grafo vale 1 se, e somente se, há uma aresta entre os pontos i e j . Caso contrário, este elemento vale 0. Considerando a matriz G tal

como descrita no passo 2, a matriz de adjacência Adj tem dimensões $(m + n) \times (m + n)$. A figura 4.3 apresenta a estrutura da matriz Adj .

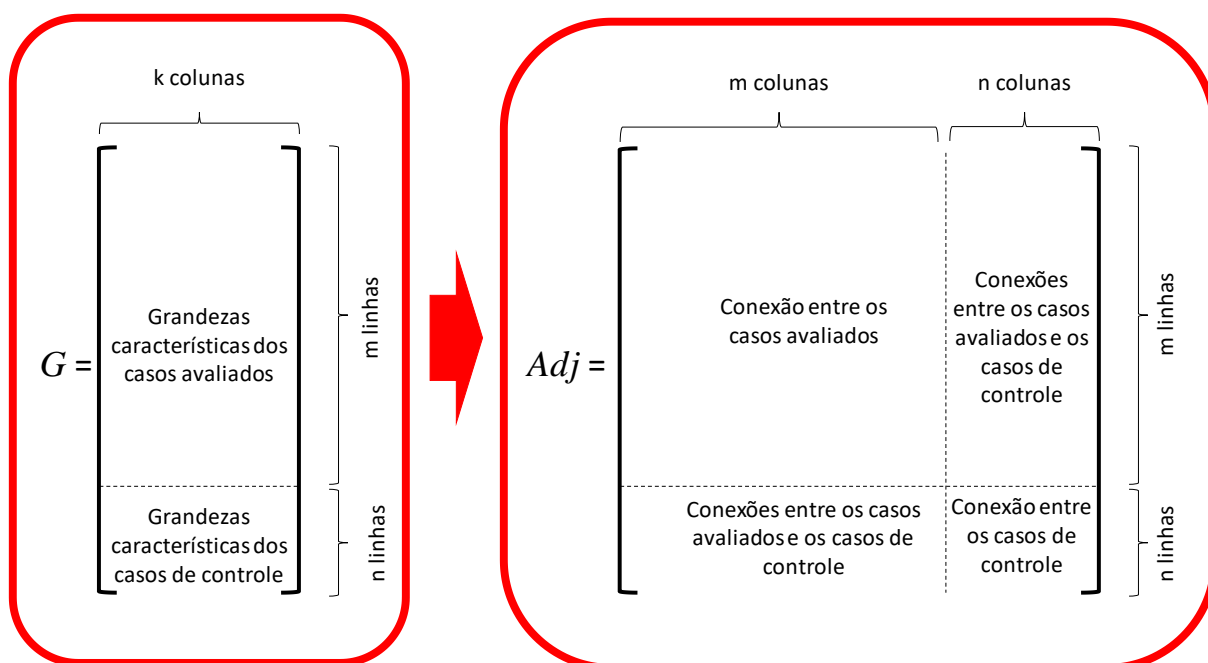


Figura 4.3 – Estrutura das matrizes de entrada G e de adjacência Adj do grafo de Gabriel construído.

5. Uma vez que, de acordo com o passo 2, os pontos referentes aos casos de controle foram colocados ao final da matriz G , a matriz Adj pode ser dividida em quatro submatrizes distintas descritas na figura 4.3, a saber:
 - a. A primeira, contendo as primeiras m linhas e colunas, com as informações das conexões do grafo entre os pontos referentes aos próprios casos avaliados;
 - b. A segunda, contendo as últimas n linhas e colunas, com as informações das conexões do grafo entre os pontos referentes aos casos de controle;
 - c. A terceira, com as últimas n linhas e as primeiras m colunas, com a informação das conexões entre os pontos referentes a casos avaliados e os casos de controle;
 - d. A quarta, com as primeiras m linhas e a últimas n colunas, que é igual à transposta da terceira.

6. A partir da terceira submatriz obtida no passo anterior, identificam-se os pontos dentre o conjunto de casos a serem avaliados que são vizinhos de Gabriel dos casos de controle para iniciar os testes. Para tal, basta verificar quais colunas desta matriz possuem algum elemento cujo valor é igual a 1. A figura 4.4 apresenta um exemplo de grafo de Gabriel construído para o teste da função de proteção diferencial de transformador durante curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça de um transformador de maneira semelhante ao apresentado na figura 3.7. A figura 4.5, por sua vez, apresenta a matriz de adjacência Adj correspondente a este grafo, destacando a submatriz que contém as informações de conexão entre os casos avaliados e de controle. Nesta figura, as setas indicam as colunas que correspondem aos pontos correspondentes aos casos pelos quais os testes devem ser iniciados (l e m)

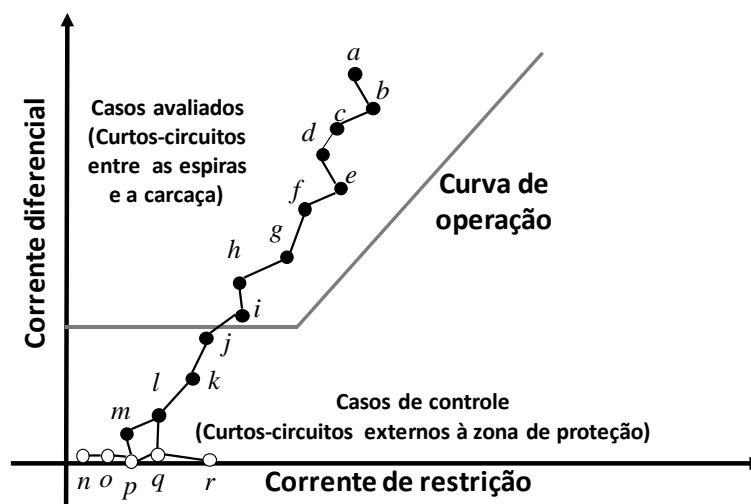


Figura 4.4 – Exemplo de grafo de Gabriel construído para a execução de testes da função de proteção diferencial de transformador durante curtos-circuitos entre a espira e a carcaça de transformadores.

7. Verificar o desempenho do relé para os pontos selecionados no passo anterior. Nos testes feitos utilizando o relé modelado, esta verificação foi feita consultando os dados do arquivo CSV. Nos testes feitos utilizando o relé real, esta verificação foi feita a partir dos testes reais efetuados cujos resultados foram informados pelo usuário para cada caso.

8. Prosseguir com os testes de acordo com os passos da sessão 3.4 até que não haja mais nenhum caso a ser testado.
9. Informar o resultado obtido.

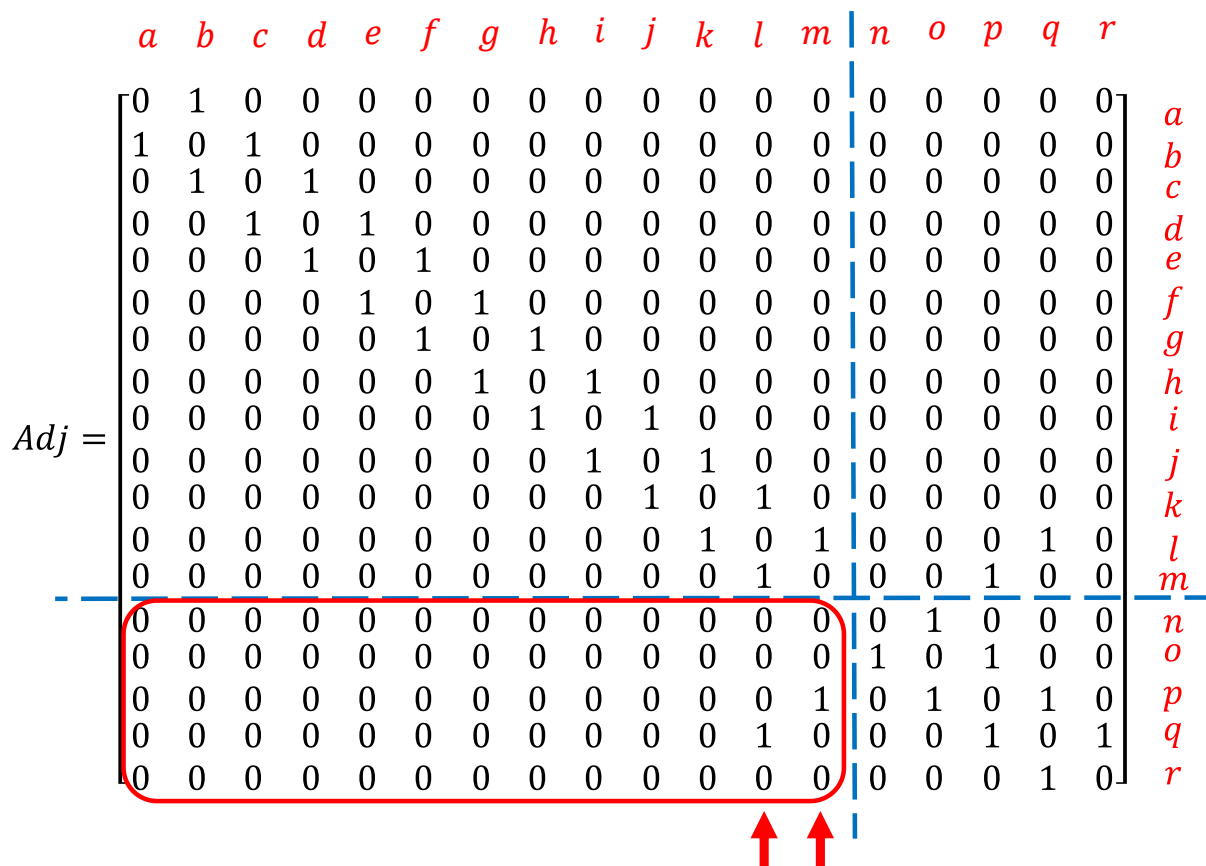


Figura 4.5 – Matriz de adjacência *Adj* do grafo de Gabriel da figura 4.4 com o destaque da submatriz que contém as informações das conexões entre os casos avaliados e os de controle e indicação das colunas referentes aos pontos cujos casos correspondentes devem ser utilizados para se iniciar os testes.

A figura 4.6 apresenta um fluxograma com a sequência de procedimentos adotados neste sistema.

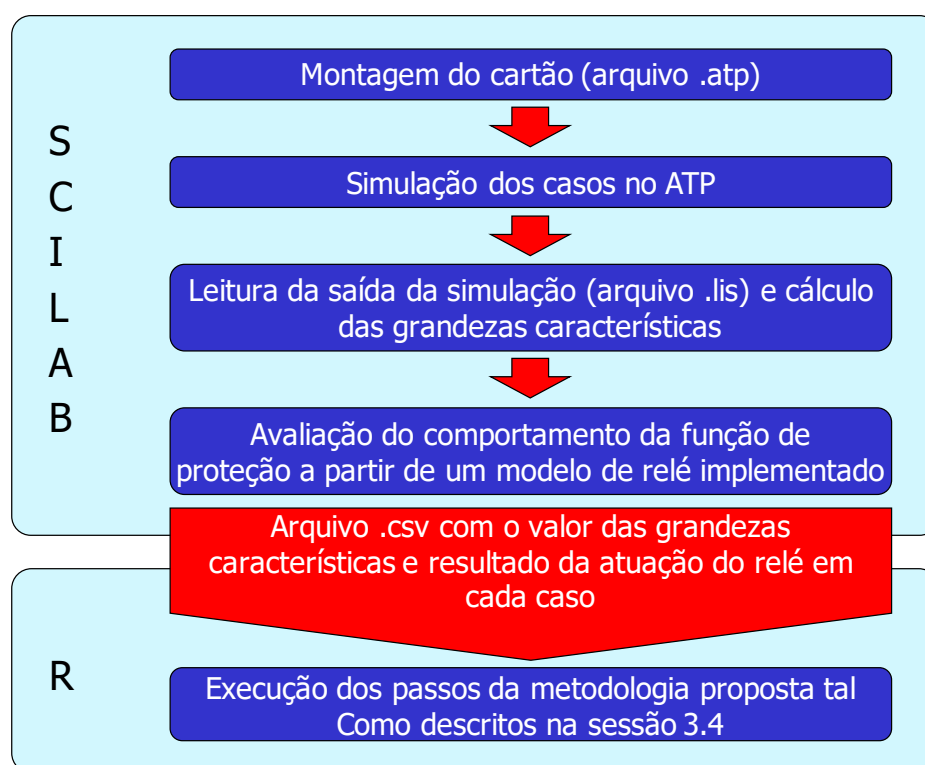


Figura 4.6 – Sistema desenvolvido para a avaliação da metodologia proposta neste trabalho.

4.3 Aplicação da metodologia proposta em testes de relé de distância

4.3.1 Descrição da modelagem utilizada

4.3.1.1 O sistema elétrico

Para a execução dos testes em relés de distância foi considerado o sistema de três barras de 69 kV utilizado para o desenvolvimento de técnicas de coordenação de relés de proteção apresentada em (URDANETA, 1988), cujo diagrama é apresentado na figura 4.7.

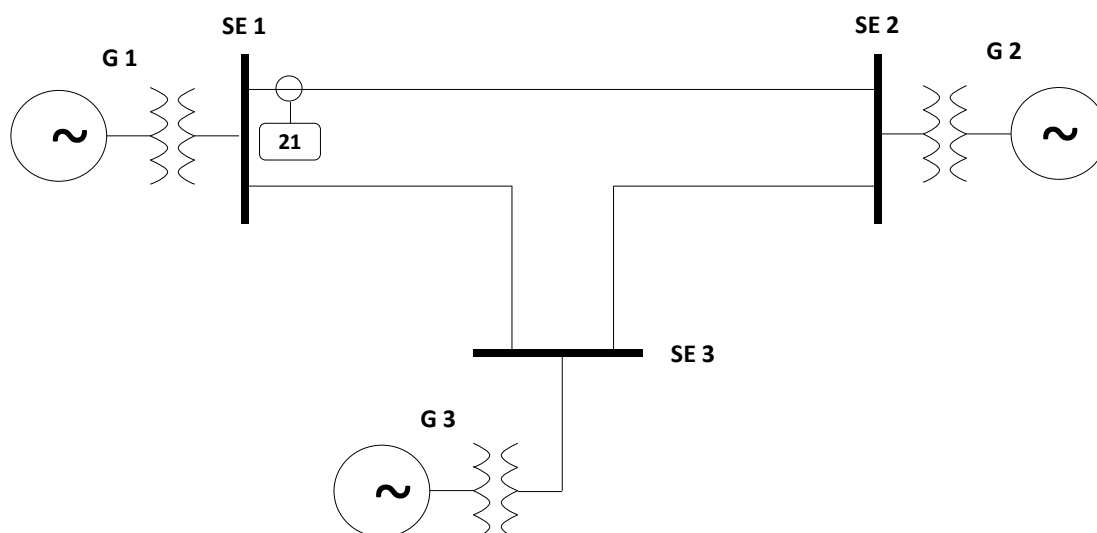


Figura 4.7 – Sistema implementado para a avaliação da metodologia proposta neste trabalho.

As linhas de transmissão foram representadas utilizando o modelo de linha curta. As fontes conectadas às barras, graficamente representadas por geradores e transformadores, foram modeladas por meio de fontes de tensão em série com uma reatância. As tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os parâmetros utilizados para as fontes (grupo gerador-transformador) e linhas de transmissão do diagrama da figura 4.7, respectivamente. Por ter apresentado somente uma aplicação de sua proposta para curtos-circuitos trifásicos, (URDANETA, 1988) apresenta somente os valores das impedâncias de sequência positiva. Os valores das impedâncias de sequência zero utilizados neste trabalho foram escolhidos considerando as faixas de valores apresentadas em (KINDERMANN, 2003). De acordo com esta referência, a reatância de sequência zero de geradores geralmente apresenta valores que variam de 10 a 70% da reatância de sequência positiva. Em linhas de transmissão, por sua vez, os valores da impedância de sequência zero variam entre 2 a 6 vezes o valor da de sequência positiva. A partir destas faixas de valores, optou-se por adotar neste trabalho um valor de reatância de sequência zero para as fontes conectadas às barras de 50% do de sequência positiva e um valor de impedância de sequência zero para as linhas de transmissão de 4 vezes o de sequência positiva, mantendo-se o mesmo ângulo.

Tabela 4.2 – Valores de impedâncias dos geradores do diagrama apresentado na figura 4.7.

	Sequência positiva		Sequência zero	
	Resistência	Reatância	Resistência	Reatância
G 1	-	5,5 Ω	-	2,75 Ω
G 2	-	9,9 Ω	-	4,95 Ω
G 3	-	13,2 Ω	-	6,6 Ω

Tabela 4.3 – Valores de impedâncias das linhas de transmissão do diagrama apresentado na figura 4.7.

	Sequência positiva		Sequência zero	
	Resistência	Reatância	Resistência	Reatância
SE1 – SE2	5,5 Ω	22,85 Ω	22,0 Ω	91,4 Ω
SE2 – SE3	7,6 Ω	27,0 Ω	30,4 Ω	108,0 Ω
SE3 – SE1	4,4 Ω	18,0 Ω	17,6 Ω	72,0 Ω

4.3.1.2 O relé de distância

Para emular o comportamento de uma unidade monofásica de terra de zona 1 de um relé de distância, foi desenvolvido um modelo que utiliza uma característica de operação do tipo mho, que equivale a uma circunferência que toca a origem do plano de impedância (R-X) cujo diâmetro é igual a um valor de impedância utilizado para definir a impedância de alcance $Z_{alcance}$. Conforme mencionado anteriormente, para se evitar problemas de sobrealcance, a unidade de primeira zona é ajustada para um valor pouco menor que a impedância da linha protegida. Em geral, a recomendação é de que se use valores entre 80% e 85% (MASON, 1956). Neste trabalho utilizou-se um valor de $Z_{alcance}$ igual 85% da impedância de sequência positiva da linha de transmissão protegida.

O modelo de relé utilizado neste trabalho foi implementado por meio de um comparador de amplitude conforme proposto em (WARRINGTON, 1968). Os sinais de operação S_O e de restrição S_R adotados foram os seguintes:

$$S_O = I_{relé} \cdot Z_{alcance} \quad (4.1)$$

$$S_R = I_{relé} \cdot Z_{alcance} - V_{relé} \quad (4.2)$$

No caso da unidade utilizada neste trabalho (monofásica de terra da fase A) $I_{relé}$ e $V_{relé}$ valem respectivamente:

$$I_{relé} = I_A + k_0 \cdot I_0 \quad (4.3)$$

$$V_{relé} = V_A \quad (4.4)$$

V_A , I_A e I_0 são, respectivamente, a tensão da fase A, a corrente da fase A e a corrente de sequência zero. Já a constante k_0 , conhecida como fator de compensação de sequência zero vale:

$$k_0 = \frac{Z_1 + Z_0}{Z_1} \quad (4.5)$$

onde Z_1 e Z_0 são, respectivamente, as impedâncias de sequência positiva e de sequência zero da linha de transmissão protegida.

Os fasores de tensão e corrente foram obtidos a partir da aplicação de um filtro cosseno com 64 pontos por ciclo.

4.3.2 Resultados obtidos

Para avaliar o desempenho da metodologia proposta, foi investigado o desempenho da unidade de distância de terra de primeira zona da fase A do relé do terminal SE 1 da linha de transmissão SE 1 – SE 2 69 kV. Para tal, foram simulados 1000 casos de curto-circuito entre a fase A e a terra da linha de transmissão protegida para compor o conjunto de casos a serem avaliados. Esta quantidade se mostrou razoável para a maioria das condições testadas em (SOUZA, 2012). Para compor o conjunto de casos de controle, foram simulados 100 casos de curtos-circuitos nas linhas de transmissão SE 1 – SE 3 69 kV e SE 3 – SE 2 69 kV, também entre a fase A e a terra.

Para a execução das simulações, foi considerada somente a variação de dois parâmetros: a localização e a resistência da falta. Assim, seguindo o mesmo

princípio apresentado na sessão 2.4, para a geração das variáveis aleatórias foi utilizado o seguinte vetor de estados η^{LT} :

$$\eta^{LT} = \begin{bmatrix} \eta_1^{LT1} \\ \eta_2^{LT1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(0,1) \\ R_{max} \cdot U(0,1) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Na equação 4.7, η_1^{LT1} é uma variável aleatória de distribuição uniforme entre 0 e 1 que define a localização do curto-circuito ao longo do comprimento da linha de transmissão. Por sua vez, η_2^{LT1} é uma variável aleatória que define a resistência de falta, onde R_{max} é o valor máximo que esta resistência pode assumir. Esse valor foi arbitrado neste trabalho como sendo igual a 10 Ω . Este valor foi obtido a partir do cálculo da resistência de arco elétrico obtida para uma corrente de curto-circuito de 500 A (compatível com um sistema fraco) e um comprimento de arco de 2 metros (pouco maior do que o comprimento de uma cadeia de isoladores de 69 kV) seguindo a formulação proposta em (KINDERMANN, 1992). Esta modelagem estatística da resistência de aterramento pode ser aprimorada em trabalhos futuros, mas é considerada suficiente para o propósito de teste da metodologia proposta. A figura 4.8 apresenta a característica de operação do relé e os pontos referentes aos casos avaliados e aos casos de controle no plano de impedâncias (R-X).

Foi avaliada a possibilidade do uso de dois diferentes conjuntos de grandezas características: um primeiro, composto pela parte real e pela parte imaginária da impedância vista, gerando o espaço característico tal como a característica de operação da figura 4.8; outro, formado pelos módulos dos sinais de operação e restrição, resultando em um espaço característico tal como mostrado na figura 4.9. Os valores de todas as quatro grandezas foram registrados ao final da simulação, após atingida a condição de regime permanente.

No caso do espaço característico da figura 4.8, os pontos referentes aos casos que falharam são aqueles externos à circunferência definida pela característica mho. No caso do espaço característico da figura 4.9, por sua vez, os pontos referentes aos casos que falharam são aqueles acima da reta que atua como superfície de separação entre as regiões de atuação e não atuação.

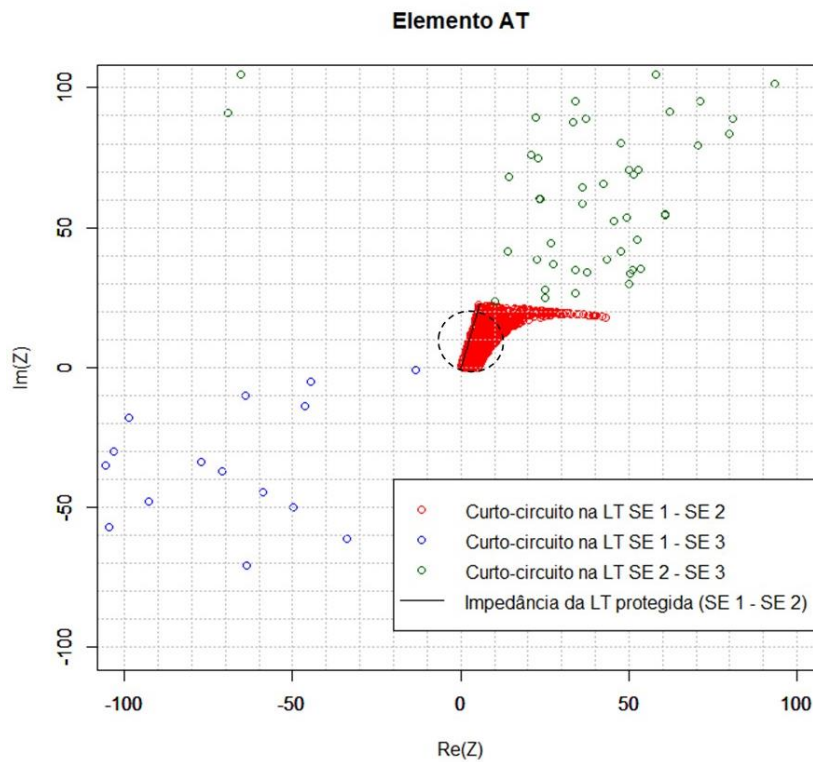


Figura 4.8 – Localização da impedância vista em cada um dos casos simulados (avaliados e de controle) para avaliação da aplicação da metodologia proposta em relés de distância.

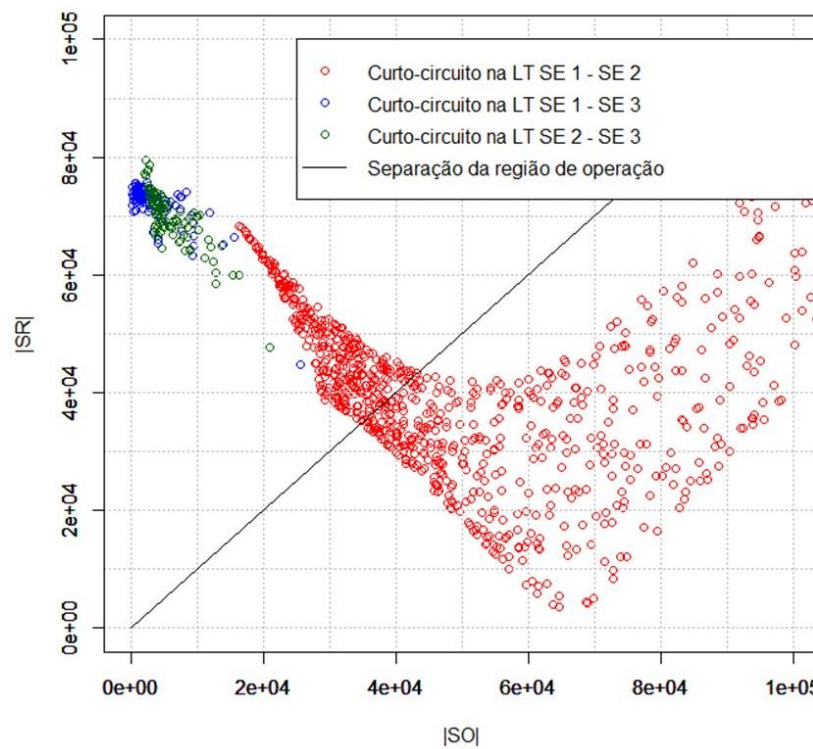


Figura 4.9 – Espaço característico para avaliação da aplicação da metodologia proposta em relés de distância utilizando como grandezas características os módulos dos sinais de operação e de restrição.

A tabela 4.4 apresenta os valores de taxa de sucessos obtida pela aplicação direta do método de Monte Carlo (aplicando ao relé testado todos os 1000 casos simulados) e pela metodologia proposta utilizando ambos os conjuntos de grandezas características. Além disso, para avaliar a repetibilidade do método, o conjunto de dados de teste original foi dividido em quatro subconjuntos iguais com 250 casos a serem avaliados e 50 casos de controle em cada. A tabela 4.4 apresenta também os resultados obtidos para estes quatro subconjuntos.

Tabela 4.4 – Comparação do resultado da taxa de sucessos obtidas a partir da aplicação direta do método de Monte Carlo e da metodologia baseada no grafo de Gabriel com um nível de confiança de 99,97%.

Método	Conjunto	Qtd. de testes	Taxa de sucessos
Monte Carlo (aplicação direta)	Completo	1000	0,689 ± 0,044
	Subconjunto 1	250	0,700 ± 0,087
	Subconjunto 2	250	0,696 ± 0,087
	Subconjunto 3	250	0,784 ± 0,088
	Subconjunto 4	250	0,676 ± 0,089
Método baseado no grafo de Gabriel (utilizando a impedância vista)	Completo	330	0,689 ± 0,044
	Subconjunto 1	81	0,700 ± 0,087
	Subconjunto 2	83	0,696 ± 0,087
	Subconjunto 3	82	0,784 ± 0,088
	Subconjunto 4	84	0,676 ± 0,089
Método baseado no grafo de Gabriel (utilizando os sinais de operação e restrição)	Completo	323	0,689 ± 0,044
	Subconjunto 1	85	0,700 ± 0,087
	Subconjunto 2	85	0,696 ± 0,087
	Subconjunto 3	87	0,784 ± 0,088
	Subconjunto 4	92	0,676 ± 0,089

Pelos dados apresentados na tabela 4.4, pode-se verificar que o resultado da taxa de sucessos estimada não foi afetado pelo uso da técnica proposta que, apesar de ter proporcionado uma redução significativa na quantidade de casos testados, identificou corretamente todos os casos em que o relé de distância falhou, tanto para o conjunto de dados completo quanto para os subconjuntos. Além disso, o uso dos sinais de operação e restrição como grandezas características proporcionou uma

redução ligeiramente maior do que o uso das partes real e imaginária da impedância vista. Isso pode ser explicado pelo fato de os sinais de operação e restrição terem uma relação direta com o princípio de operação do relé testado.

A partir da tabela 4.4 pode-se verificar ainda que os valores da taxa de sucessos obtidos para todos os cinco conjuntos diferentes ficaram próximos, de tal forma que a diferença entre eles é menor do que o intervalo de confiança estabelecido. Isso corrobora a confiabilidade da metodologia proposta.

A figura 4.10 mostra a região de fronteira do grafo de Gabriel construído a partir do primeiro subconjunto utilizando como grandezas características os sinais de operação e restrição. Os pontos amarelos numerados de 1 a 250 correspondem aos casos a serem avaliados enquanto os pontos azuis numerados de 250 a 300 correspondem aos casos de controle. Nesta condição, os testes iniciaram pelos casos 96 e 181, que são vizinhos de Gabriel dos casos de controle. Como estes casos falharam, os testes prosseguiram com o caso 38, que é vizinho de Gabriel do caso 181, continuando até que não tenha ocorrido mais nenhuma falha.

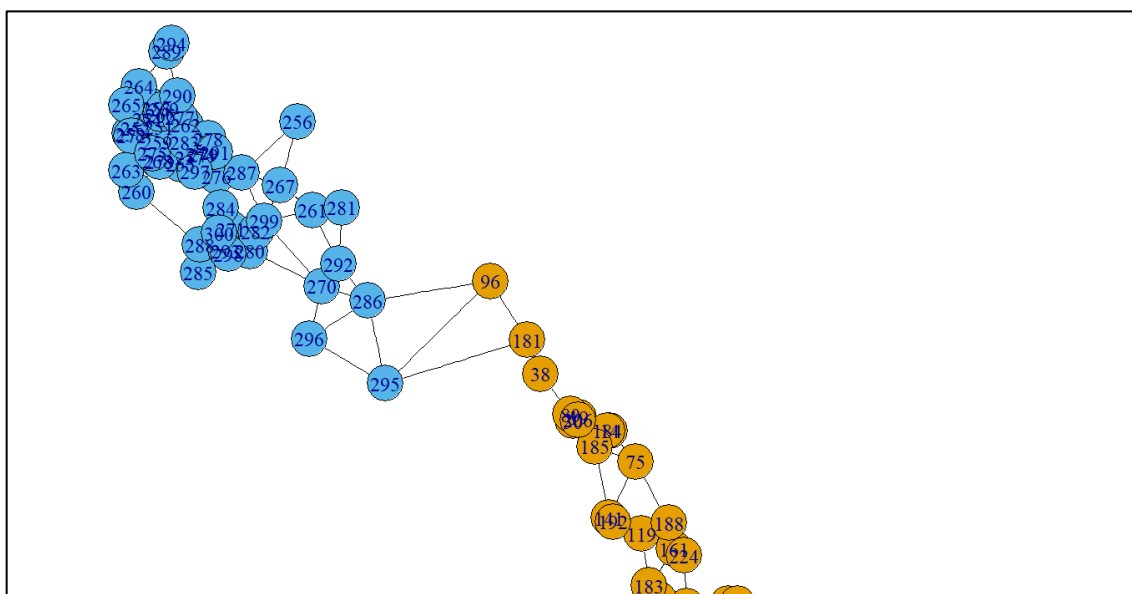


Figura 4.10 – Zoom da região de fronteira do grafo de Gabriel obtido para o primeiro subconjunto.

4.4 Aplicação da metodologia proposta em testes de relé diferencial de transformador

4.4.1 Descrição da modelagem utilizada

Outro tipo de relé utilizado nos testes feitos para se avaliar o desempenho da técnica proposta foi o relé diferencial de transformador. Conforme mencionado anteriormente, o desempenho deste relé foi avaliado em duas diferentes situações: curtos-circuitos entre a espira e a carcaça e energizações.

A figura 4.11 apresenta o esquema do sistema elétrico de potência utilizado nas simulações, que é composto por:

- um transformador de potência trifásico de três enrolamentos 41 MVA, 138 kV/34,5 kV/13,8 kV, cujos enrolamentos estão conectados em estrela aterrado / estrela aterrado / delta;
- um transformador de aterramento em ziguezague conectado ao barramento de 13,8 kV;
- Equivalente do sistema elétrico de potência conectado ao barramento de alta tensão (138 kV);

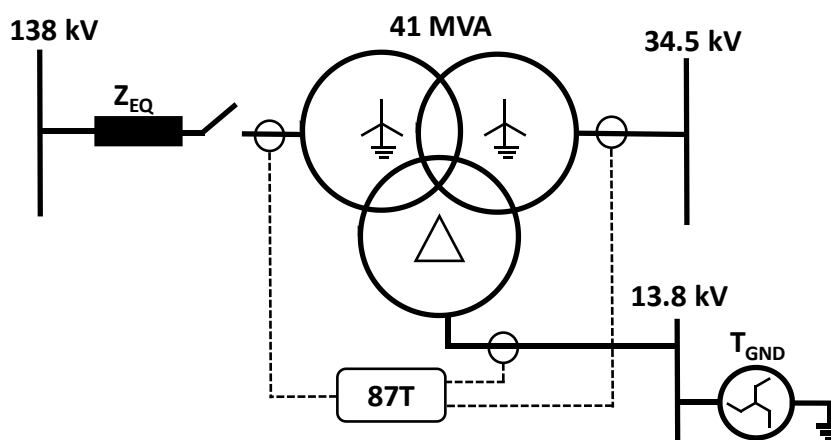


Figura 4.11 – Sistema elétrico de potência utilizado para a execução das simulações.

A descrição detalhada da modelagem de cada um destes elementos deste circuito e do relé de proteção utilizados neste trabalho é apresentada a seguir.

4.4.1.1 O transformador de potência

Para a modelagem do transformador de potência utilizou-se o mesmo modelo utilizado em (SOUZA, 2012), que é similar ao modelo híbrido disponível no ATPDraw (CHIESA, 2005; MORK, 2007). Este modelo é baseado no princípio da dualidade. Por este princípio, o circuito elétrico do modelo é obtido a partir do circuito magnético do núcleo do transformador (CHERRY, 1949; SLEMON, 1953; MARTINEZ-VELASCO, 2010; JAZEBI, 2016).

A figura 4.12 apresenta os elementos que compõem o modelo híbrido do ATPDraw (CHIESA, 2005).

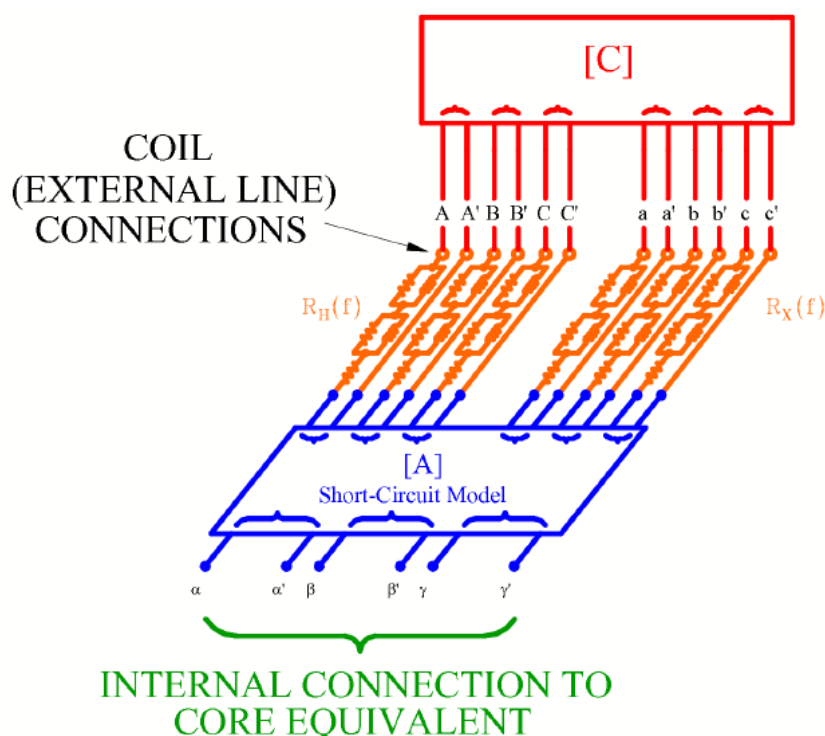


Figura 4.12 – Partes do modelo híbrido (XFMR) disponível no ATP. Reprodução de (CHIESA, 2005).

Conforme pode ser visto na figura 4.12, o modelo híbrido é composto basicamente por quatro partes:

- O circuito equivalente do núcleo;
- A matriz de susceptâncias de dispersão [A];
- As resistências de enrolamento e;
- A matriz de capacitâncias.

As diferenças entre o modelo utilizado neste trabalho e o modelo híbrido do ATPDraw são as seguintes:

- Considerando que neste trabalho não se avalia nenhum fenômeno que envolva frequências elevadas, as capacitâncias do modelo foram desprezadas;
- Pela mesma razão, a variação das resistências dos enrolamentos com a frequência também não foi levada em consideração;
- A obtenção dos parâmetros da equação de Frolich utilizada para representar a não linearidade do núcleo magnético foi feita utilizando o método da pseudo-inversa, tal como em (SOUZA, 2012);
- Para melhorar a exatidão do modelo durante a simulação de curtos-circuitos que envolvam a terra, utilizou-se uma matriz de susceptâncias de dispersão [A] cheia, que leva em conta o acoplamento mútuo entre as fases dos enrolamentos do transformador, tal como feito em (SOUZA, 2012).

Para a modelagem de faltas internas ao transformador (entre os enrolamentos e a carcaça) foi feita uma separação do enrolamento faltoso em dois novos enrolamentos por fase, gerando uma matriz [A] expandida com três novas linhas e colunas. A divisão do enrolamento em condição de falta foi feita levando-se em conta somente a relação entre o número de espiras da seção sob falta e o número total de espiras do enrolamento, tal como feito em (SOUZA, 2012).

Neste trabalho considerou-se um transformador trifásico de três enrolamentos cujos parâmetros são apresentados na tabela 4.5. As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os dados obtidos a partir dos testes de curto-circuito e de circuito aberto, respectivamente.

Tabela 4.5 – Parâmetros do transformador utilizado nas simulações.

	Primário	Secundário	Terciário
V (kV)	138	34,5	13,8
S (MVA)	18	18	18
Conexão	Yg	Yg	D
Defasamento angular (°)	-	0	30

Tabela 4.6 – Parâmetros do transformador utilizado nas simulações obtidos pelos ensaios de curto-circuito em PU nas bases nominais (18 MVA).

	Tensão de base (kV)	Resistência (PU)	Reatância de sequência positiva (PU)	Reatância de sequência zero (PU)
P – S	138	0,0111	0,2426	0,1313
P – T	138	0,0119	0,4393	0,2246
S – T	34,5	0,0100	0,1495	0,0887

Tabela 4.7 – Parâmetros do transformador utilizado nas simulações obtidos pelos ensaios de circuito aberto feitos a partir do enrolamento terciário.

Tensão (kV)	Corrente (A)	Potência (W)
12,46	1,04	-
13,88	1,20	21750
14,52	2,17	-
15,57	7,46	-

4.4.1.2 O transformador de aterramento

Visando a tornar as proteções de corrente do barramento de 13,8 kV sensíveis a curtos-circuitos que envolvam a terra, foi considerada a presença de um transformador de aterramento cujos enrolamentos estão dispostos em ziguezague conectado a este barramento. Por causa da disposição dos seus enrolamentos, este tipo de transformador permite a passagem somente da componente de sequência zero da corrente, cuja presença geralmente está relacionada à ocorrência de curtos-

circuitos que envolvam a terra. A figura 4.13 apresenta o diagrama multifilar deste tipo de transformador (BLACKBURN,2007).

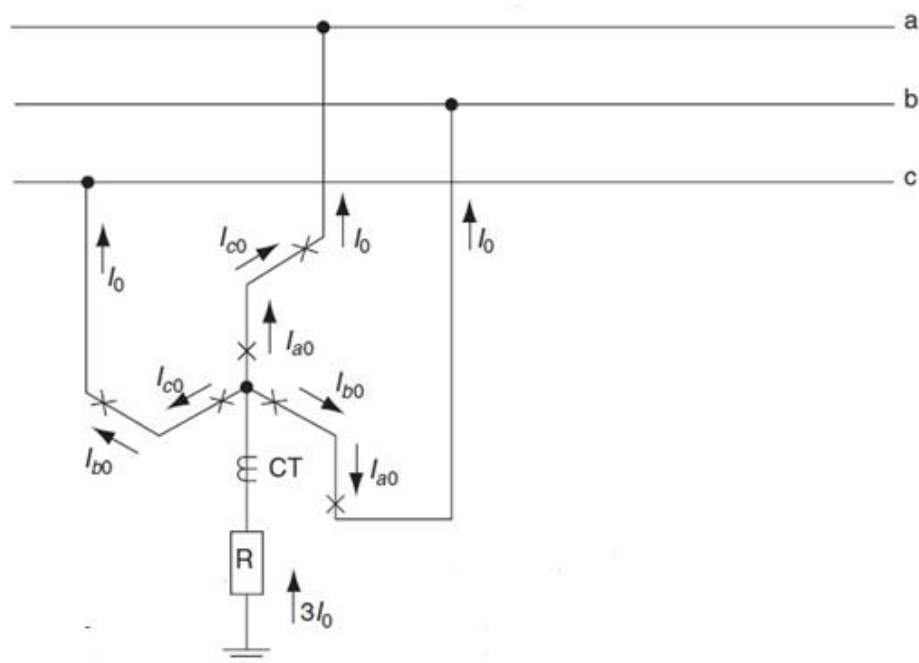


Figura 4.13 – Diagrama multifilar de um transformador de aterramento. Reprodução de (BLACKBURN, 2007).

Nas simulações, o transformador de aterramento foi modelado por meio de um elemento RL com acoplamento mútuo do ATP. A tabela 4.8 apresenta os valores dos parâmetros do modelo do transformador de aterramento utilizados neste trabalho. Como este tipo de transformador se comporta como um circuito aberto para correntes de sequência positiva, aos parâmetros referentes a esta componente foi atribuído o maior valor possível no ATP que é 999999 Ω .

Tabela 4.8 – Parâmetros do transformador de aterramento utilizado nas simulações.

Parâmetro	Sequência Positiva	Sequência Zero
Resistência (Ω)	999999	0,2
Indutância (mH)	999999	0,0179845

4.4.1.3 O equivalente do sistema elétrico de potência

O circuito equivalente visto pelos terminais do enrolamento pelo qual o transformador é conectado ao sistema elétrico de potência é modelado neste trabalho por meio de dois elementos básicos do ATP: uma fonte cossenoidal trifásica (elemento 14) de 138 kV e um elemento RL com acoplamento mútuo. A tabela 4.9 apresenta os parâmetros do circuito equivalente utilizado neste trabalho.

Tabela 4.9 – Parâmetros do equivalente do sistema elétrico utilizado nas simulações.

Parâmetro	Sequência Positiva	Sequência Zero
Resistência (Ω)	2,62880	6,56060
Indutância (mH)	0,0247361	0,0547705

4.4.1.4 O relé de proteção diferencial de transformador

O modelo de relé utilizado neste trabalho foi o mesmo apresentado em (SOUZA, 2012), que foi baseado no relé SEL-387E fabricado pela *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL, 2005). A sequência de operações feitas por este modelo é apresentada na figura 4.14.

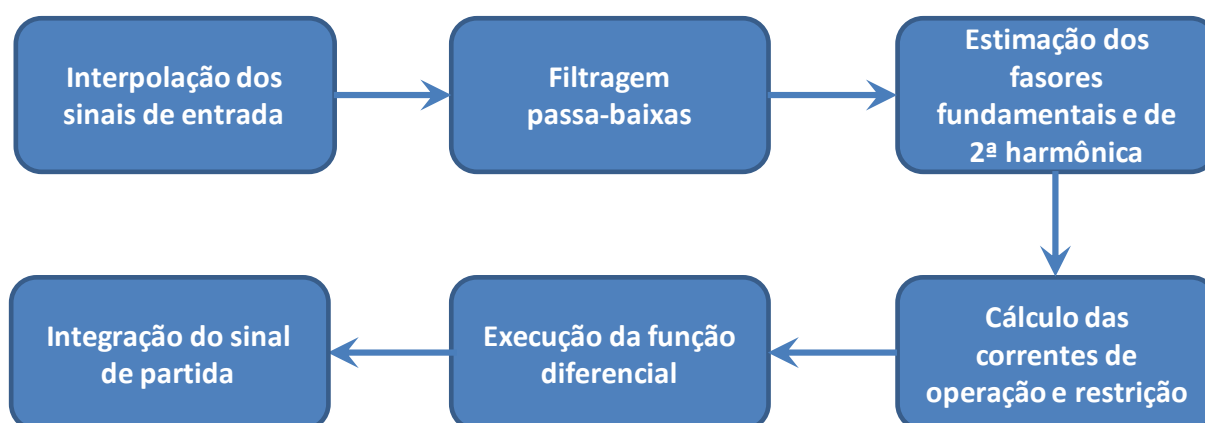


Figura 4.14 – Sequência de operações realizadas pelo modelo de relé diferencial de transformador apresentado em (SOUZA, 2012) e utilizado neste trabalho.

Na primeira etapa do modelo do relé, os sinais de corrente são interpolados para adequar a taxa de amostragem àquela utilizada pelo relé SEL-387E, que é de 64 pontos por ciclo (SEL, 2005). Posteriormente, estes sinais são submetidos a um

filtro passa-baixas *anti-aliasing* de Butterworth com uma frequência de corte de 300 Hz.

Posteriormente, a estimação dos fasores fundamentais, de segunda e de quarta harmônica é feita a partir de um filtro cosseno de 64 pontos por ciclo. Estes fasores são utilizados para o cálculo das correntes diferencial e de restrição utilizadas para a definição da característica de operação da função diferencial. A figura 4.15 apresenta a característica de operação do relé considerada para este trabalho.

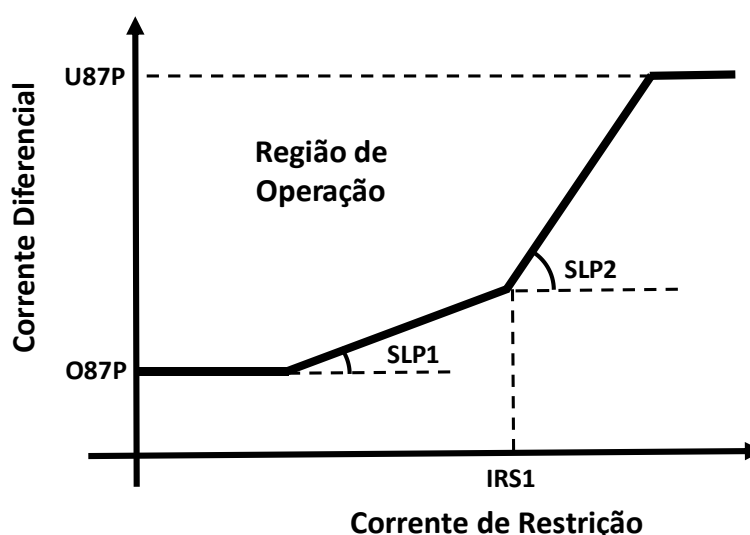


Figura 4.15 – Característica de operação do modelo de relé diferencial utilizado neste trabalho.

O modelo de relé implementado, bem como o relé SEL-387E, pode trabalhar com dois esquemas diferentes de detecção de corrente de *inrush*: o esquema de bloqueio (que pode ser independente ou cruzado) e o de restrição harmônica. Na técnica de bloqueio harmônico, a função diferencial é bloqueada quando a componente de segunda harmônica da corrente diferencial excede um determinado valor definido pelo ajuste PCT2. Quando a opção de bloqueio independente é habilitada (IHBL = "Y"), o elemento diferencial de cada fase é avaliado separadamente, ou seja, se em um deles a componente de segunda harmônica da corrente diferencial exceder o valor pré-definido somente este elemento é bloqueado. No esquema de bloqueio cruzado (IHBL = "N"), por sua vez, quando a componente de segunda harmônica da corrente diferencial de qualquer um dos

elementos de fase exceder o valor pré-definido, todas as três unidades diferenciais são bloqueadas. Na lógica de restrição harmônica, que sempre trabalha de maneira independente, uma constante c proporcional à taxa de segunda harmônica da corrente diferencial de cada elemento de fase e inversamente proporcional ao valor ajustado em PCT2 é somada à corrente de restrição deste elemento.

A tabela 4.10 apresenta os parâmetros de ajuste que foram utilizados (SOUZA, 2018). Estes parâmetros foram obtidos com base nas características do transformador protegido e nas recomendações feitas pelo fabricante do relé (SEL, 2005).

Tabela 4.10 – Parâmetros de ajuste utilizados no modelo de relé implementado (SOUZA, 2018).

Parâmetros	Descrição do Parâmetro	Valor
CTR1	Valor da RTC do enrolamento primário.	60
CTR2	Valor da RTC do enrolamento secundário.	160
CTR3	Valor da RTC do enrolamento terciário.	400
TAP1	Valor do Tap do enrolamento primário.	2,91
TAP2	Valor do Tap do enrolamento secundário.	4,36
TAP3	Valor do Tap do enrolamento terciário.	4,36
O87P	Corrente diferencial de partida.	0,35
SLP1	Inclinação do primeiro trecho da característica de operação.	30
SLP2	Inclinação do segundo trecho da característica de operação.	60
IRS1	Valor de corrente de restrição onde ocorre a mudança da inclinação.	6
U87P	Corrente diferencial de partida do elemento irrestrito.	10
PCT2	Percentual de segunda harmônica de referência.	20
IHBL	Habilita o esquema de bloqueio harmônico independente	-
HRSTR	Habilita o esquema de restrição harmônica	-

4.4.2 Resultados obtidos

Para avaliar o desempenho da metodologia proposta foram avaliadas duas diferentes situações: curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça do transformador e energizações a vazio. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

4.4.2.1 Curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça do transformador

Para os casos em que a condição avaliada foi a de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça do transformador, foram feitas 1000 simulações para montar o conjunto de casos avaliados. Fazendo-se o teste com 1000 casos, na pior condição (que seria para uma taxa de sucessos de 0,5) o intervalo de confiança que pode ser obtido com um nível de confiança de 99,97% é de $\pm 0,047$. Uma redução neste intervalo de confiança pode ser obtida aumentando a quantidade de casos simulados. Porém, como o objetivo é ilustrar a aplicabilidade da metodologia ora proposta, 1000 casos podem ser considerados suficientes.

Além disso, foram simulados mais 100 casos de curtos-circuitos nas buchas do transformador externos à zona de proteção do relé para serem utilizados como casos de controle.

O relé diferencial de transformador possui três elementos que são responsáveis por cada uma das fases. Para a realização deste trabalho, optou-se por utilizar como grandezas características os valores máximos de corrente diferencial e de restrição registrados em cada simulação. Como o espaço característico possui somente duas dimensões, é possível representá-lo graficamente. A figura 4.16 mostra este espaço característico.

As correntes diferencial e de restrição de cada elemento foram definidas como em (SEL, 2005):

$$I_{dif} = |I_{pri} + I_{sec} + I_{ter}| \quad (4.7)$$

$$I_{res} = \frac{(|I_{pri}| + |I_{sec}| + |I_{ter}|)}{2} \quad (4.8)$$

Nas equações 4.7 e 4.8, I_{dif} , I_{res} , I_{pri} , I_{sec} e I_{ter} correspondem às correntes diferencial, de restrição, e dos enrolamentos primário, secundário e terciário de cada elemento, respectivamente.

Dos 1000 casos de curtos-circuitos da espira para a carcaça diretamente testados com o Método de Monte Carlo, o relé diferencial falhou em detectar 233, o que resulta em uma taxa de falha de $0,767 \pm 0,040$ com um nível de confiança de 99,97%. Ao aplicar a metodologia proposta baseada no grafo de Gabriel, foi necessária a execução de apenas 234 testes para identificar estes 233 casos de falha. O anexo A apresenta uma tabela com a sequência de casos efetivamente testados. Este resultado mostra a efetividade da metodologia proposta em reduzir o conjunto de testes sem afetar significativamente a qualidade do resultado. Neste caso, inclusive, o valor obtido para a taxa de sucessos com a aplicação da metodologia proposta foi exatamente o mesmo obtido com a aplicação direta do método de Monte Carlo, ou seja, $0,767 \pm 0,040$ com um nível de confiança de 99,97%.

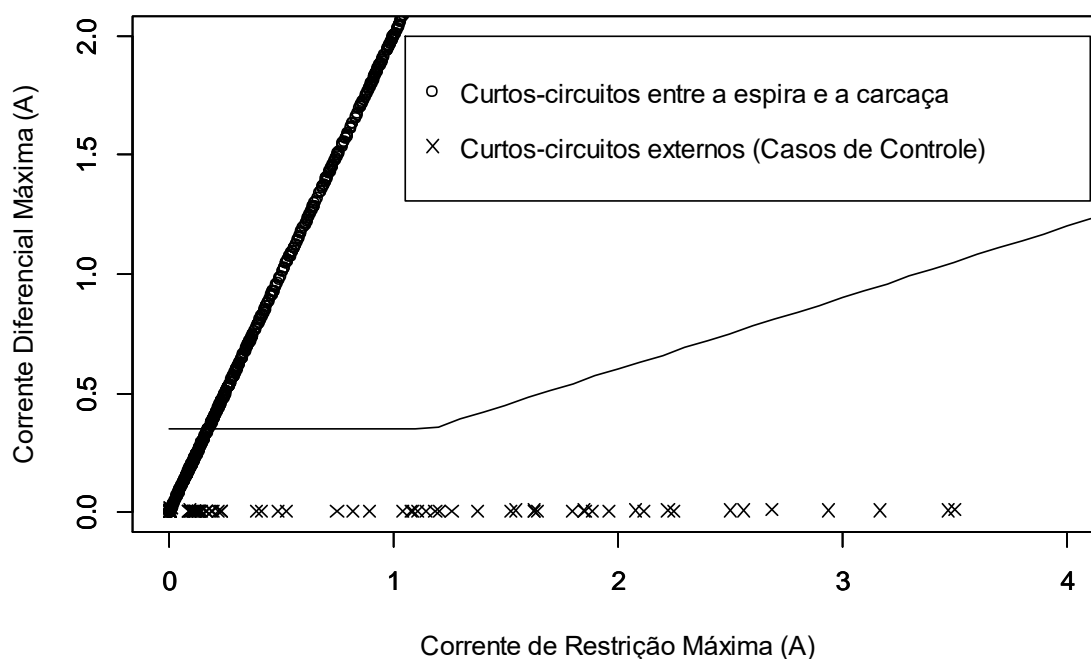


Figura 4.16 – Espaço característico construído para a realização dos testes em um relé diferencial de transformador para casos de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça.

4.4.2.2 Energizações a vazio do transformador

Outra situação avaliada neste trabalho para testar a metodologia proposta foi a energização a vazio. Para isso, foram levadas em consideração as três diferentes técnicas de detecção de correntes de *inrush* disponíveis no modelo do relé implementado: a de bloqueio independente, a de bloqueio cruzado e a de restrição. Semelhante ao que foi feito para a situação de curtos-circuitos entre a espira e a carcaça, foram simulados 1000 casos de energizações a vazio usando o Método de Monte Carlo tal como descrito na seção 2.2.2. Salienta-se que nesta situação a definição de sucesso é diferente daquela da seção 4.3.1, uma vez que durante energizações do transformador protegido a vazio espera-se que o relé de proteção não opere. Como casos de controle foram utilizadas 100 simulações de curtos-circuitos internos.

Ao aplicar diretamente o método de Monte Carlo, verificou-se que o relé de proteção diferencial atua incorretamente em 46 casos quando se utiliza a técnica de bloqueio cruzado, o que resulta em uma taxa de sucessos de $0,954 \pm 0,011$ com um nível de confiança de 99,97%. Por outro lado, quando se utiliza a técnica de bloqueio independente o relé atua incorretamente em 488 casos, resultando em uma taxa de sucessos de $0,512 \pm 0,027$ com um nível de confiança de 99,97%. Já para a lógica de restrição, o relé atua indevidamente em 192 casos, o que resulta em uma taxa de sucessos de $0,808 \pm 0,037$ com um nível de confiança de 99,97%.

Para a aplicação da metodologia proposta para testes de situações de curtos-circuitos entre espiras e a carcaça, neste trabalho optou-se em utilizar um espaço característico que é similar à característica de operação do relé. Entretanto, esta não é uma condição obrigatória. Para avaliação das situações de energização a vazio, por exemplo, neste trabalho optou-se por avaliar a utilização de dois espaços característicos diferentes: um, com seis dimensões, e outro com nove dimensões. No espaço característico de seis dimensões, as grandezas características adotadas foram os valores máximos das componentes fundamental e de segunda harmônica da corrente diferencial de cada um dos três elementos de fase. No espaço característico de nove dimensões, por sua vez, foram acrescentados os valores das correntes de restrição dos três elementos de fase.

Ao aplicar a metodologia baseada no grafo de Gabriel com seis grandezas características foram necessários 165 testes para identificar 45 casos de atuação indevida quando se utiliza a técnica de bloqueio cruzado, falhando em identificar um caso de falha e resultando em uma taxa de sucessos de $0,955 \pm 0,011$ com um nível de confiança de 99,97%. Quando se utiliza a técnica de bloqueio independente, foi necessário testar 698 casos para se identificar 486 casos de atuação indevida, falhando em identificar dois casos de falha e resultando em uma taxa de sucessos de $0,514 \pm 0,027$ com um nível de confiança de 99,97%. Já para a lógica de restrição harmônica, foram necessários 393 testes para identificar 186 casos de falha, deixando de identificar seis destes casos, resultando em uma taxa de sucessos de $0,814 \pm 0,037$ com um nível de confiança de 99,97%.

Ao se utilizar o espaço característico com nove dimensões, a quantidade de testes necessários foi reduzida para 71, 687 e 51 casos para as técnicas de bloqueio cruzado, bloqueio independente e de restrição harmônica, respectivamente. Entretanto, algumas vezes estas reduções vieram acompanhadas de um aumento no número de casos de falha não identificados. Para a lógica de bloqueio cruzado, o teste falhou em identificar 14 casos a mais, enquanto para a lógica de restrição harmônica o teste deixou de detectar mais uma falha. Para a técnica de bloqueio independente, o número de falhas detectadas permaneceu inalterado.

A tabela 4.11 apresenta as taxas de sucesso obtidas para as técnicas de detecção de correntes de *inrush* com ambos os espaços característicos, tanto para a aplicação direta do método de Monte Carlo quanto para a aplicação da metodologia baseada no grafo de Gabriel.

Ao analisar os dados da tabela 4.11, pode-se verificar que, principalmente quando se utiliza o espaço característico com seis dimensões, as diferenças entre os valores obtidos pela aplicação da metodologia baseada no grafo de Gabriel e aqueles obtidos pela aplicação direta do método de Monte Carlo foram pequenas, ficando, na maioria das vezes, dentro dos seus respectivos intervalos de confiança. Isso significa que a aplicação da metodologia proposta tem um impacto mínimo sobre a estimação da taxa de sucessos.

De forma ilustrativa, o anexo B apresenta uma tabela com a sequência de testes efetuados ao aplicar a metodologia proposta baseada no grafo de Gabriel

para a técnica de bloqueio cruzado com um espaço característico de seis dimensões.

Tabela 4.11 – Comparação do resultado da taxa de sucessos obtida a partir da aplicação direta do método de Monte Carlo e da metodologia baseada no grafo de Gabriel com um nível de confiança de 99,97 %.

	Aplicação direta do método de Monte Carlo		Aplicação do método baseado no grafo de Gabriel			
	Qtd. de testes	Taxa de sucessos	6 grandezas características		9 grandezas características	
			Qtd. de testes	Taxa de sucessos	Qtd. de testes	Taxa de sucessos
Bloqueio cruzado	1000	0,954 ± 0,011	165	0,955 ± 0,011	71	0,969 ± 0,016
Bloqueio independente	1000	0,512 ± 0,027	698	0,514 ± 0,027	687	0,514 ± 0,027
Restrição	1000	0,808 ± 0,037	393	0,814 ± 0,037	351	0,815 ± 0,037

4.4.2.3 Testes com um relé de proteção real

Conforme demonstrado anteriormente, a aplicação da metodologia proposta requer a definição de determinadas grandezas características. Estas grandezas podem ser definidas de acordo com aquelas que são usadas pelo próprio algoritmo dos relés. Entretanto, em diversas situações os usuários não conhecem as equações exatas que são utilizadas por estes algoritmos. Além disso, detalhes importantes dos processos de filtragem dos sinais e dos processos de estimação fasorial também são desconhecidos. Entretanto, espera-se que a metodologia baseada no grafo de Gabriel tenha o seu desempenho mantido mesmo que o usuário precise fazer algumas aproximações na definição de suas grandezas características. Esta expectativa se baseia no fato de que se estas aproximações forem feitas adequadamente, elas não afetariam significativamente a posição relativa dos pontos que representam os casos no espaço característico.

Para verificar esta afirmação, a metodologia proposta foi utilizada para testar um relé de proteção diferencial de transformador real SEL-487E, apresentado na figura 4.17, utilizando um simulador de sistema elétrico de potência OMICRON CMC 256 Plus, apresentado na figura 4.18. A figura 4.19 apresenta a montagem realizada. O diagrama esquemático desta montagem é apresentado na figura 4.20.

Basicamente, os arquivos .pl4 gerados pelo ATP associados aos casos simulados com o Método de Monte Carlo, e que foram classificados usando o grafo de Gabriel, foram registrados. Uma rotina implementada em linguagem R foi feita para informar ao usuário o número sequencial do caso que deveria ser testado. As formas de onda de tensão e corrente registradas nestes arquivos .pl4 foram então fornecidas como dado de entrada ao simulador da OMICRON, sendo verificado pelo usuário se o relé operaria ou não.



Figura 4.17 – Relé SEL-487E utilizado para avaliar o desempenho da metodologia de testes proposta.



Figura 4.18 – Simulador de sistema elétrico de potência OMICRON CMC 256 Plus utilizado para avaliar o desempenho da metodologia de testes proposta.



Figura 4.19 – Montagem feita com o simulador de sistema elétrico de potência OMICRON CMC 256 Plus e o relé SEL-487E para avaliar o desempenho da metodologia de testes proposta.

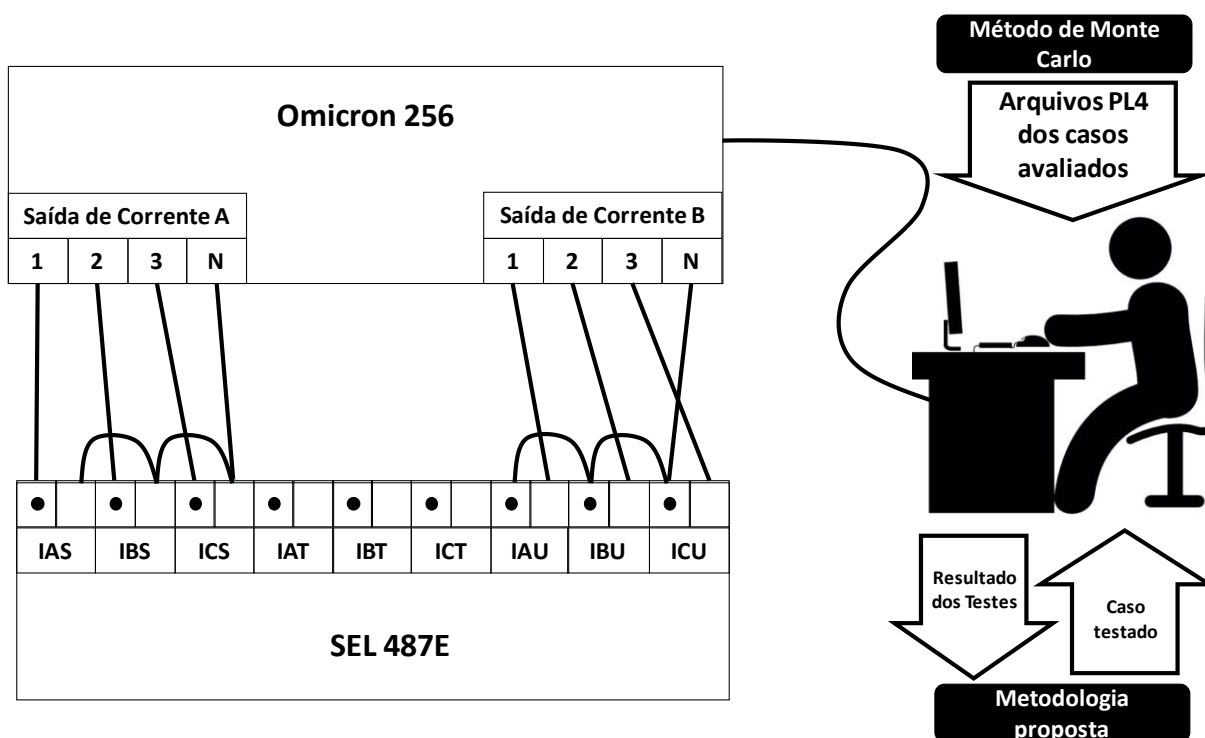


Figura 4.20 – Diagrama esquemático da montagem feita com o simulador de sistema elétrico de potência OMICRON CMC 256 Plus e o relé SEL-487E para avaliar o desempenho da metodologia de testes proposta.

O relé SEL-487E usa uma lógica adaptativa que altera a inclinação da característica de operação durante curtos-circuitos externos. Neste estudo, esta lógica não foi utilizada. Nesse caso, o parâmetro referente à inclinação em ambas as situações foi mantido igual ao valor usado para a inclinação do primeiro trecho do modelo de relé utilizado nos itens 4.4.2.1 e 4.4.2.2 (SLP1 = 30 conforme tabela 4.10). Além disso, o relé SEL-487E usa uma formulação para a corrente de restrição ligeiramente diferente daquela utilizada para o cálculo das grandezas características utilizadas na construção do espaço característico da figura 4.14, que foi baseada no modelo do relé SEL-387E, que é:

$$I_{res} = |I_{pri}| + |I_{sec}| + |I_{ter}| \quad (4.9)$$

Para se verificar o desempenho da metodologia proposta em um relé real, foi avaliada a situação de curtos-circuitos entre as espiras e a carcaça do transformador. Para tal, foram utilizados os mesmos casos utilizados na seção 4.4.2.1. Apesar das diferenças entre as grandezas utilizadas pela técnica de redução

proposta e aquelas usadas pelo relé sob teste, os testes com o relé real apresentaram o mesmo resultado obtido pelo modelo do relé. Em outras palavras o relé real falhou em 233 casos e estes casos de falha foram identificados executando-se somente 234 testes. Para garantir que o relé operaria corretamente para os outros casos, os próximos 10 casos na sequência do grafo de Gabriel foram testados e o relé atuou corretamente em todos eles.

4.5 Comentários finais

Os resultados apresentados neste capítulo ilustram a eficiência da metodologia proposta, que levou a uma redução expressiva do número de testes em todos os casos sem afetar significativamente a qualidade da estimação da taxa de sucessos. Entretanto, verificou-se também que a definição correta das grandezas características e dos casos de controle são de grande importância para o seu desempenho.

Além disso, os testes feitos com um relé real corroboram a aplicabilidade desta metodologia que, aliada a uso de ferramentas automáticas de teste como o RTDS, pode reduzir significativamente os recursos físicos, humanos e financeiros necessários para a execução de testes de aplicação em relés de proteção diferencial de transformadores.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões gerais

Este trabalho apresentou uma metodologia baseada no grafo de Gabriel que visa a reduzir a quantidade de casos de teste necessários para se caracterizar a operação de relés de proteção gerados originalmente pelo método de Monte Carlo. Foi demonstrado que o método proposto reduz significativamente a quantidade de testes necessários sem, no entanto, afetar significativamente a qualidade da estimação da taxa de sucessos. Isso significa que os testes de aplicação podem ser feitos em relés reais de maneira mais eficiente, reduzindo o tempo gasto pelos profissionais e economizando recursos.

Demonstrou-se também que a redução do conjunto de testes depende da taxa de sucessos estimada, uma vez que basicamente o que a metodologia proposta faz é buscar todos os casos de falha. Assim, quanto maior for a taxa de sucessos maior será a redução obtida.

Também foi verificado que eventualmente alguns casos de falha podem não ser detectados quando a metodologia proposta é aplicada. Entretanto, constatou-se também que esta eventual perda na detecção é mínima e não afeta significativamente o resultado da estimação da taxa de sucessos.

O conhecimento completo do algoritmo do relé de proteção sob teste pode ser extremamente útil para a definição de grandezas características e pode levar à

construção de um espaço característico e de um grafo de Gabriel que sejam mais representativos. Isto pode ser verificado principalmente no caso dos testes em relé de distância, onde a escolha dos sinais de operação e restrição, que estão diretamente relacionados ao funcionamento do algoritmo do relé, como grandezas características, levou a uma redução maior do conjunto de casos testados.

Entretanto, os testes feitos neste trabalho com um relé real mostram que a eficiência da metodologia proposta não é afetada mesmo se as grandezas características utilizadas forem ligeiramente diferentes das grandezas utilizadas pelo algoritmo do relé sob teste. Isso sugere que mesmo que o usuário não conheça alguns detalhes da formulação do algoritmo e até mesmo dos processos de tratamento dos sinais de entrada e estimação fasorial do relé de proteção sob teste, é possível que se defina um espaço característico que seja minimamente adequado.

Por outro lado, como pôde ser observado nas aplicações para testes de funções de detecção da corrente de *inrush*, a quantidade de grandezas características utilizadas pode afetar o desempenho da técnica proposta tanto no que diz respeito à redução da quantidade de testes obtida quanto na exatidão do resultado da taxa de sucessos estimada. Assim, a definição adequada deste conjunto de grandezas é de grande importância para o bom desempenho da metodologia proposta neste trabalho.

A metodologia proposta se mostrou eficaz mesmo quando utilizada com um espaço característico de seis dimensões como nos casos de energizações de transformadores avaliados neste trabalho. A menos de um aumento na complexidade da construção do grafo de Gabriel, que se torna menos intuitivo por não poder ser visto graficamente, pode-se dizer que a quantidade de grandezas características utilizadas não é uma limitação para a aplicação da metodologia proposta.

Por fim, ressalta-se que não foi encontrada na literatura nenhuma outra técnica com propósito similar ao da metodologia proposta. Desta maneira, não foi possível apresentar neste trabalho uma análise comparativa do seu desempenho.

5.2 Propostas de continuidade

A metodologia apresentada neste trabalho foi avaliada para a aplicação em relés de distância e diferenciais de transformadores. Entretanto, escolhendo-se adequadamente as grandezas características, os casos de teste e os casos de controle, nada impede que ela seja aplicada no teste de outros tipos de relés de proteção, o que pode vir a ser objeto de trabalhos futuros.

Outra possibilidade de continuidade a este trabalho seria a avaliação do impacto do uso de diferentes conjuntos de casos de controle. A escolha destes casos de controle depende da situação testada. Em testes de situações de curtos-circuitos internos, por exemplo, podem ser utilizados como casos de controle situações de curtos-circuitos externos, sobrecarga ou de algum fenômeno transitório no qual se espera que o relé sob teste não opere.

Por fim, a própria metodologia proposta pode vir a ser aprimorada, buscando maneiras de torná-la menos susceptível ao valor da taxa de sucessos estimada. Para tal, assim como o grafo de Gabriel foi utilizado neste trabalho, o uso de outras ferramentas aplicadas na construção dos classificadores em inteligência artificial pode ser avaliado.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA "ONS RE 3/0107/2015 Relatório de Análise Estatísticas de Desempenho dos Sistemas de Proteção e dos Relés de Proteção Referente ao Ano de 2014"; disponível no sítio <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Relat%3%b3rioDeFiscaliza%3%a7%3%a3oONS.pdf>

ANDERSON, P. M. "Power System Protection" IEEE Press e Mc Graw Hill, 1998.

ANDERSON, P. M. "Reliability Modeling of Protective Systems" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 8, pp. 2207-2214, 1984.

ASSADOLLASH, S.; ZHU, R.; LISERRE, M. "Analysis of Voltage Control Strategies for Wind Farms" IEEE Transactions on Sustainable Energy (Early Access), DOI : 10.1109/TSTE.2019.2915667, 2019.

AURENHAMMER, F.; "Voronoi Diagrams – A Survey of Fundamental Geometric Data Source" ACM Computing Surveys, Vol. 23, No. 3, pp. 345 - 405, Set., 1991.

BHATTACHARAYA, B. K.; POULSEN, R. S.; TOUSSAINT, G. T. "Application of Proximity Graphs to Editing Nearest Neighbor Decision Rules" apresentado na 16th Symp. Interface Between Comput. Sci. Statistic, 1992, disponível no sítio <http://cgm.cs.mcgill.ca/~godfried/teaching/mir-reading-assignments/Nearest-Neighbor-Editing.pdf>

BISHOP, C. "Pattern Recognition and Machine Learning" Springer, 2006.

BLACKBURN, J. L, "Symmetrical Components for Power System Engineering" Marcel Dekker, New York, USA, 1993.

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J.; "Protective Relaying Principles and Applications", Third Edition, CRC Press, 2007

CHERRY, E. C.; "The Duality Between Interlinked Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuits" Proceedings of the Physical Society, Vol. 62B, pp. 101-111, 1949

CHIESA, N.; "Power Transformer Modeling – Advanced Core Model" Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, 2005

COVER, T. M.; HART. P. E. "Nearest Neighbor Pattern Classification" IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 13, No. 1, pp. 21 - 27, Jan, 1967.

DYER, R.; ZHANG, H.; MÖLLER, T. "Gabriel meshes and Delaunay edge flips" Proc. of SIAM/ACM Joint Conf. on Geometric and Physical Modeling (GPM), San Francisco, EUA, 2009

FIX, S.; HODGES J. L. "Discriminatory Analysis Nonparametric Discrimination: Small Sample Performance" USAF School of Aviation Medicine, Ago, 1952, disponível no sítio <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA800391>

GABRIEL, K. R.; SOKAL, R.R; "A new statistical approach to geographic variation analysis"; Systematic Zoology; Vol. 18; pp. 259-278; 1969

HARSTIE, T.; TIBISHIRIANI, R.; FRIEDMAN, J. H. "The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction" Springer, 2001.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS; "IEEE Guide for Power System Protection Testing" IEEE C37.233 2009.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS; " IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems" IEEE C37.111 1999.

JAZEBI, S. et. al. "Duality-Derived Transformer Models for Low-Frequency Electromagnetic Transients – Part I: Topological Models" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 5, pp. 2410-2419, Oct, 2016.

JAZEBI, S. et. al. "Duality-Derived Transformer Models for Low-Frequency Electromagnetic Transients - Part II: Complementary Modeling Guidelines" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 5, pp. 2420-2430, Oct, 2016.

JCDRZCJCZAK, J.; ANDERS, J. G.; "Transition Rates Assessment of Protective Relay Reliability Models with Incomplete Data" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, No. 1, pp. 809-816, Jan., 2017.

JCDRZCJCZAK, J.; ANDERS, J. G., FOTUHI-FIRUZABAD, M.; FARZIN, H.; AMINIFAR, F.; "Reliability Assessment of Protective Relays in Harmonic-Polluted Power Systems" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 1, pp. 556-564, Feb., 2017.

JI, L.; TAO, X., FU, Y.; FU, Y.; MI, Y.; LI, Z. " A New Single Ended Fault Location Method for Transmission Line Based on Positive Sequence Superimposed Network During Auto-Reclosing" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 34, No. 3, pp. 1019-1029, Jun., 2019.

JIA, K.; ZHE, Y.; FANG, Y.; BI, T.; SUMNER, M. "Influence of Inverter-interfaced Renewable Energy Generators on Directional Relay and an Improved Scheme" IEEE Transactions on Power Electronics (Early Access), DOI : 10.1109/TPEL.2019.2904715, 2019.

JOETTEN, R.; WEß, T., WOLTERS, J.; RING, H.; BJOERNSSON, B.; "A New Real-time Simulator for Power System Studies" IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. 104, No. 9, pp. 2604-2611, Sep, 1985.

KEZUNOVIC, M.; ABUR, A., KOJOVIC, L.; SKENDZIC, V.; SINGH, H; FROMEN, C. W.; SEVCIK, D. R.; "DYNA-TEST Simulator for Relay Testing Part I: Design Characteristics" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 414-422, Jan, 1991.

KEZUNOVIC, M.; XIA, Y. Q.; GUO, Y.; FROMEN, C. W.; SEVICIK, D. R. " Distance relay application testing using a digital simulator" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 72-82, Sep, 1997.

KINDERMANN, G.; "Curto-circuito"; UFSC – EEL - LabPlan, Florianópolis, 2003.

MASON, C. R.; "The Art and Science of Protective Relaying"; John Wiley & Sons, New York, 1956.

MCLAREN, P. G.; KUFFEL, R., WIERCKX, R.; GIESBRECHT, J.; ARENDT, L.; "A Real Time Digital Simulator for Testing Relays" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp. 207-213, Jan, 1992.

MORADI, A.; MADANI, M.; " Predictive Formulas to Improve Transformer Protection During Inrush Current Using the Proposed dc Equivalent Circuit" IEEE Transactions on Power Delivery (Early Access), DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2930758, Jul, 2019.

MORAVEJ, Z.; BAGHERI, S.; "Testing of Differential Relay Operation for Power Transformer Protection Using RTDS" apresentado na 30th Power System Conference (PSC2015), Teerã, Irã, 23 a 25 de Novembro, 2015.

MORK, B. A.; GONZALEZ, F.; ISHCHENKO, D.; STUEHM, D. L.; MITRA, J.; "Hybrid Transformer Model for Transient Simulation – Part I: Development and Parameters" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 248-255, Jan, 2007

NIMMERSJO, G.; SAHA, M. M.; HILLSTROM, B. "Experience with a Modern Real-time Power System Simulator" apresentado na Fourth International Conference on Developments in Power Protection, Edimburgo, Reino Unido, 11 a 13 de Abril, 1989.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO "Procedimentos de Rede Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos" Agosto, 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO "ONS RE 3/0107/2015 - Análise Estatística do Desempenho dos Sistemas de Proteção e dos Relés de Proteção referente ao Ano de 2014"; disponível no sítio http://www.consultaesic.cgu.gov.br/busca/dados/Lists/Pedido/Attachments/458198/RESPOSTA_PEDIDO_Relatorio%20de%20Anlise%20Estatistica%20do%20Desempenho%20dos%20Sist.%20de%20Protecao%20de%20LTs%20ONS%202014.Isabela.pdf

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. "Simulation and the Monte Carlo Method" Wiley, New Jersey, USA, 2017.

SEL - Schweitzer Engineering Laboratories; "Schweitzer Engineering Laboratories SEL-387E Current Differential And Voltage Protection Relay – Instruction Manual", 20050614, 2005

SLEMON, G. R.; "Equivalent Circuits for Transformers and Machines Including Non-linear Effects" IEE Proceedings, pt IV, Vol. 100, pp. 129-143, 1953

SOUZA, J. R. M. S. "Desenvolvimento de uma Metodologia para a Avaliação da Confiabilidade dos Ajustes de Relés Diferenciais de Transformadores Baseada no Método de Monte Carlo"; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SOUZA, J. R. M. S.; BETTEGA, M. A.; GIACOMAZZI, C. R. L.; "Análise Comparativa das Técnicas de Localização de Falta Utilizadas pelos Equipamentos Instalados no Sistema da Copel Distribuição" apresentado no XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE; Foz do Iguaçu; Brasil, 2015.

SOUZA, J. R. M. S.; PEREIRA, C. S.; DE CONTI, A. R.; "Evaluation of the Effect of Parameters of Three-Phase Transformer Core Models on the Harmonic Content of Inrush Currents: Implications on the Setting of Inrush Detection Functions" apresentado no International Conference on Power System Transients – IPST 2015; Cavtat; Croácia, 2015.

SOUZA, J. R. M. S.; PEREIRA, C. S.; DE CONTI, A. R.; " Evaluation of the Effect of Advanced Core Settings of the Hybrid Transformer Model on the Harmonic Content of Inrush Currents" apresentado no International Conference on Power System Transients – IPST 2017; Seul; Coréia do Sul, 2017.

SOUZA, J. R. M. S.; PEREIRA, C. S.; DE CONTI, A. R.; " Designing and Training an Artificial Neural Network Fed by Harmonic Content of Differential Currentsfor Inrush Detection" apresentado no International Conference on Power System Transients – IPST 2017; Seul; Coréia do Sul, 2017.

SOUZA, J. R. M. S.; PEREIRA, C. S.; DE CONTI, A. R.; " Reducing the Number of Tests Cases for Reliability Assessment of Protective Relays" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 6, pp. 3114 - 3121, Dec, 2018.

STRINGER, N. T.; LAWHEAD, L., WILKERSON, T.; BIGGS, J.; ROCKFELLER, G. D.; "Testing and Performance of Transformer Differential Relays" IEEE Industry Applications Magazine, pp. 36-42, Jul/Aug, 1997.

THOMOPOULOS, N. T. "Essentials of Monte Carlo Simulation: Statistical Methods for Building Simulation Models" Springer-Verlag, New York, USA, 2013

TORRES, L. C. B., LEMOS, A. P., CASTRO, C. L., BRAGA, A. P; "A Geometrical Approach for Parameter Selection of Radial Basis Functions Networks"; apresentado

no 24^a International Conference on Artificial Neural Networks – ICANN 2014; Hamburgo; Alemanha, 2014

URDANETA, A. J., NADIRA, R., PEREZ JIMENES, L. G. “Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp. 903-911, Jul, 1988.

URDEN, E. A. “Proposed Statistical performance measures for microprocessor-based transmission-line protective relays – Part I: Explanation of the statistics” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 134-143, Jan, 1997.

WARRINGTON, A. R. C. “Protective Relays: Their theory and Practice” Chapman & Hall, Londres, Reino Unido, 1968.

WILLIAMS, A.; WARREN, R. H. J. "Method of Using Data from Computer Simulations to Test Protection Equipment" IEE Proceedings, Vol. 131, No. 7, pp. 349-356, Nov, 1984.

ZHANG, R.; HREDZAK, B. " Distributed Control System with Aperiodic Time-Delayed Sampled Data for Batteries and Renewable Energy Sources in Microgrid" IEEE Transactions on Sustainable Energy (Early Access), DOI : 10.1109/TSTE.2019.2916206, 2019.

ZHANG, W.; KING, I. “A Study of the relationship between support vector machine and Gabriel Graph” apresentado na International. Joint Conf. Neural Network, Honolulu, USA, 12 a 17 de Maio, 2002

ZIEGLER, G. “Numerical Differential Protection: Principles and Applications” Siemens, Nuremberg, Alemanha, 2005.

ZIVIANI, N. “Projeto de Algoritmos com Implementações em Pascal e C” Editora Pioneira Informática, São Paulo, 1999

Anexo A

SEQUÊNCIA DE CASOS DE CURTOS-CIRCUITOS ENTRE ESPIRAS TESTADOS

Conjunto de teste	Caso	Corrente Diferencial Máxima	Corrente de Restrição Máxima	Resultado
1	152	0,015435818	0,007962351	0
	198	0,004755557	0,002622716	0
	245	0,009943138	0,005215705	0
	257	0,016915674	0,008702296	0
	264	0,008353583	0,004421555	0
	431	0,009120904	0,004805294	0
	703	0,007882322	0,004185539	0
	899	0,006132478	0,003308805	0
2	21	0,017563788	0,009026124	0
	49	0,014065498	0,007277389	0
	156	0,014961398	0,007724502	0
	256	0,013952071	0,007218465	0
	291	0,002182111	0,0013359	0
	489	0,001599737	0,001044609	0
	713	0,004003218	0,00224657	0
	721	0,012741945	0,006615469	0
	783	0,001396227	0,000905289	0
	808	0,002983781	0,001736346	0
	943	0,003686027	0,002087877	0
	998	0,015028916	0,007759078	0
3	153	0,01817401	0,009331366	0
4	248	0,02200997	0,011249142	0
5	940	0,024853285	0,01267067	0
6	497	0,025063192	0,012775579	0
7	562	0,025343176	0,012915449	0
8	218	0,030079192	0,015283537	0
9	490	0,030879575	0,015683232	0
10	64	0,031197426	0,015842478	0

Conjunto de teste	Caso	Corrente Diferencial Máxima	Corrente de Restrição Máxima	Resultado
11	575	0,031635897	0,016060515	0
12	227	0,037402004	0,01894422	0
13	886	0,038493054	0,019490059	0
14	244	0,040526219	0,020506569	0
15	929	0,043079011	0,021782886	0
16	840	0,05292337	0,02670455	0
17	224	0,055323685	0,027902682	0
18	762	0,064338329	0,03241137	0
19	527	0,067603541	0,034043613	0
20	389	0,070178008	0,035330989	0
21	11	0,07132148	0,035902741	0
22	174	0,07696805	0,038725541	0
23	191	0,077805494	0,039136324	0
24	546	0,082622558	0,041552572	0
25	517	0,084776532	0,0426294	0
26	962	0,087830497	0,044149599	0
27	673	0,088059369	0,044263091	0
28	3	0,091275553	0,045875564	0
29	822	0,095248888	0,047864957	0
30	877	0,095679978	0,048081195	0
31	581	0,097041283	0,04876134	0
32	474	0,09708888	0,048784757	0
33	395	0,104863858	0,052671945	0
34	996	0,107410947	0,0539457	0
35	798	0,108972469	0,054726349	0
36	151	0,110276289	0,05537871	0
37	885	0,111814092	0,056145711	0
38	115	0,118351825	0,070415628	0
39	752	0,119679653	0,060078545	0
40	316	0,121939877	0,061208761	0
41	734	0,123181624	0,075546091	0
42	76	0,127409186	0,073400664	0
43	360	0,131578213	0,066028078	0
44	642	0,132753437	0,073547726	0
45	854	0,134422345	0,073502581	0
46	16	0,135081014	0,077499191	0
47	48	0,13628278	0,075162851	0
48	609	0,140780529	0,080865127	0
49	111	0,142240849	0,071358027	0
50	278	0,143020873	0,071748726	0

Conjunto de teste	Caso	Corrente Diferencial Máxima	Corrente de Restrição Máxima	Resultado
51	307	0,144089022	0,075522974	0
52	225	0,14548904	0,072981691	0
53	47	0,146179745	0,08136474	0
54	925	0,149066039	0,084678172	0
55	670	0,151118849	0,075797401	0
56	761	0,151511309	0,091970923	0
57	815	0,152915362	0,089916692	0
58	757	0,15503292	0,077754994	0
59	927	0,156862987	0,096166559	0
60	902	0,15811232	0,079294582	0
61	63	0,158566822	0,089464174	0
62	651	0,158770408	0,080322842	0
63	978	0,158961183	0,081749163	0
64	548	0,160011776	0,090269885	0
65	781	0,160151188	0,097344413	0
66	271	0,161456745	0,094918423	0
67	434	0,163260118	0,081770552	0
68	558	0,164399077	0,085089809	0
69	176	0,1646565	0,094064531	0
70	785	0,164729255	0,082601278	0
71	219	0,165461253	0,082965481	0
72	870	0,165711662	0,086947733	0
73	113	0,165824917	0,088220713	0
74	719	0,167149823	0,095213263	0
75	26	0,170183792	0,085329943	0
76	812	0,171420522	0,092942948	0
77	507	0,172029259	0,088362922	0
78	83	0,176362707	0,101602651	0
79	109	0,17829908	0,089444054	0
80	339	0,178756559	0,097480009	0
81	916	0,179923795	0,090197144	0
82	944	0,181797617	0,09113273	0
83	835	0,182182338	0,091091434	0
84	588	0,183754161	0,098890717	0
85	276	0,184593938	0,092302395	0
86	876	0,18512182	0,092789401	0
87	147	0,185628492	0,099929218	0
88	90	0,185672345	0,092840302	0
89	384	0,185713518	0,113240283	0
90	912	0,187232931	0,093621049	0

Conjunto de teste	Caso	Corrente Diferencial Máxima	Corrente de Restrição Máxima	Resultado
91	6	0,187373434	0,093926671	0
92	748	0,190365903	0,104916166	0
93	216	0,190475919	0,101310722	0
94	598	0,19197265	0,101833944	0
95	776	0,191937417	0,096201059	0
96	660	0,193544333	0,105051522	0
97	913	0,193577348	0,097021029	0
98	429	0,194595681	0,097298191	0
99	547	0,194969866	0,097485201	0
100	695	0,201887629	0,101178695	0
101	81	0,202322949	0,106219162	0
102	477	0,203020201	0,101510377	0
103	439	0,204781522	0,102621222	0
104	483	0,205888963	0,103178015	0
105	720	0,206160558	0,103080703	0
106	299	0,206199627	0,103103763	0
107	292	0,206381458	0,119237728	0
108	772	0,207983053	0,108331829	0
109	68	0,208225634	0,10466046	0
110	663	0,211572869	0,1057869	0
111	636	0,211775907	0,117877776	0
112	633	0,212097912	0,106052842	0
113	528	0,212363247	0,125266308	0
114	904	0,212799057	0,106402598	0
115	78	0,212892367	0,122445407	0
116	475	0,213239829	0,109268192	0
117	59	0,213495165	0,106976276	0
118	324	0,217256626	0,113448256	0
119	101	0,219748959	0,109877256	0
120	380	0,220259664	0,110133436	0
121	520	0,220282704	0,110141813	0
122	586	0,220936725	0,110468652	0
123	628	0,221889327	0,111178814	0
124	328	0,222604965	0,111306373	0
125	583	0,222644869	0,130399797	0
126	853	0,222871847	0,111439824	0
127	597	0,223654225	0,11497844	0
128	251	0,22420215	0,11210519	0
129	565	0,224541349	0,115643643	0
130	259	0,225342408	0,114472998	0

Conjunto de teste	Caso	Corrente Diferencial Máxima	Corrente de Restrição Máxima	Resultado
131	38	0,22554866	0,112774689	0
132	226	0,225908179	0,118842293	0
133	158	0,227297443	0,113648996	0
134	644	0,227534914	0,114000878	0
135	476	0,228187081	0,114093843	0
136	312	0,228904335	0,12925841	0
137	790	0,229292359	0,114880881	0
138	402	0,230059067	0,128738093	0
139	677	0,230353574	0,115405818	0
140	669	0,2345264	0,117263523	0
141	103	0,234819056	0,129646428	0
142	555	0,235839839	0,119265342	0
143	338	0,236870295	0,130197202	0
144	5	0,237524346	0,133850303	0
145	945	0,238118248	0,119059467	0
146	836	0,238412614	0,12691981	0
147	560	0,238549697	0,119677255	0
148	793	0,239373528	0,11968705	0
149	409	0,239704735	0,124062479	0
150	442	0,240238806	0,120122013	0
151	75	0,24101434	0,13228687	0
152	595	0,241029364	0,120747283	0
153	501	0,241925232	0,12975273	0
154	150	0,242845315	0,121655613	0
155	871	0,244372754	0,122186684	0
156	460	0,244465667	0,122465685	0
157	930	0,246229267	0,146858086	0
158	749	0,24749501	0,1257723	0
159	932	0,247691749	0,123846182	0
160	192	0,248027159	0,124017107	0
161	737	0,249353557	0,124677397	0
162	980	0,250799776	0,125627478	0
163	726	0,251724337	0,125864112	0
164	202	0,252827786	0,126414154	0
165	472	0,253830099	0,126917541	0
166	621	0,256707769	0,128355668	0
167	287	0,262640182	0,155625181	0
168	911	0,262980922	0,150291218	0
169	792	0,264429158	0,132215078	0
170	479	0,265894025	0,132947309	0

Conjunto de teste	Caso	Corrente Diferencial Máxima	Corrente de Restrição Máxima	Resultado
171	862	0,266836168	0,133418758	0
172	538	0,267011701	0,16051487	0
173	832	0,267539478	0,139117406	0
174	522	0,268675818	0,134338316	0
175	10	0,270457897	0,1352314	0
176	148	0,271776921	0,160617963	0
177	302	0,275216138	0,137835809	0
178	868	0,275934952	0,137968163	0
179	482	0,27602553	0,138013047	0
180	372	0,277400516	0,138700527	0
181	736	0,280688274	0,171321739	0
182	863	0,280851317	0,140425926	0
183	914	0,286532786	0,143496754	0
184	274	0,288694174	0,170382311	0
185	190	0,288960169	0,146819854	0
186	788	0,28954035	0,1447726	0
187	306	0,290874711	0,14566492	0
188	61	0,291662592	0,145831802	0
189	884	0,292289693	0,161270655	0
190	355	0,2947996	0,147629132	0
191	829	0,29853095	0,150062048	0
192	173	0,298632181	0,149316475	0
193	23	0,298730402	0,149365567	0
194	579	0,30332917	0,151894076	0
195	481	0,303542973	0,151772789	0
196	838	0,307497482	0,157651354	0
197	155	0,307649384	0,15382529	0
198	95	0,30994582	0,180913488	0
199	348	0,315762938	0,157883644	0
200	841	0,316639073	0,169316084	0
201	222	0,319993827	0,160221186	0
202	186	0,325885393	0,162944529	0
203	645	0,326681691	0,172671129	0
204	280	0,328811175	0,164633579	0
205	351	0,335496294	0,172153301	0
206	743	0,337245723	0,179273106	0
207	208	0,339793881	0,169897213	0
208	977	0,340284561	0,170144939	0
209	352	0,341625648	0,170813546	0
210	268	0,341644715	0,180235809	0

Conjunto de teste	Caso	Corrente Diferencial Máxima	Corrente de Restrição Máxima	Resultado
211	542	0,345045835	0,186591369	0
212	45	0,345814863	0,173133517	0
213	445	0,346726848	0,17811988	0
214	518	0,348249741	0,174351844	0
215	866	0,348925373	0,174464723	0
216	999	0,350149423	0,175301523	1

Anexo B

SEQUÊNCIA DE CASOS DE ENERGIZAÇÕES A VAZIO TESTADOS USANDO BLOQUEIO CRUZADO

Conjunto de Teste	Caso	Componente Fundamental da Corrente Diferencial			Componente de 2ª Harmônica da Corrente Diferencial			Resultado
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C	
1	5	0,0350	0,7066	0,6912	0,0724	0,0935	0,1435	1
	35	0,0155	0,5185	0,5122	0,2809	0,2731	0,2383	0
	56	0,0857	0,5848	0,6237	0,1875	0,2395	0,3353	0
	65	0,5413	0,0045	0,5435	0,2672	0,2619	0,2638	1
	66	0,0100	0,4358	0,4360	0,3574	0,3250	0,2646	0
	75	0,0484	0,3417	0,3501	0,5011	0,4368	0,3998	0
	82	0,6990	0,5894	1,0717	0,2449	0,1188	0,0516	0
	103	0,4160	0,1221	0,3730	0,5772	0,2481	0,4685	0
	117	0,4951	0,0049	0,4970	0,3162	0,3124	0,3132	1
	144	0,6015	0,0499	0,6184	0,1600	0,2694	0,2101	0
	145	0,3882	0,0324	0,4003	0,4751	0,3476	0,4048	0
	156	0,6642	0,6181	0,1029	0,1483	0,3026	0,1530	0
	161	0,7532	0,9067	0,2818	0,0513	0,2480	0,2673	0
	172	0,7169	0,0531	0,7101	0,1561	0,0824	0,1028	1
	205	0,7557	0,5954	0,9914	0,6819	0,0962	0,1611	0
	219	0,6049	0,5967	0,0295	0,1990	0,2441	0,1557	0
	247	0,9626	0,5954	0,5692	0,1395	0,2586	0,1156	0
	248	0,4141	0,0075	0,4169	0,4003	0,3986	0,3983	0
	254	0,3494	0,4194	0,1088	0,5067	0,5767	0,4146	0
	260	0,8123	0,6999	0,2447	0,0756	0,2985	0,2301	0
261	0,0539	0,6474	0,6664	0,2110	0,1361	0,1171	0	
288	0,7190	0,7153	0,0064	0,0809	0,0819	0,0762	0	
301	0,0486	0,5930	0,6090	0,3250	0,1600	0,1091	0	
316	0,1332	0,6180	0,6808	0,1608	0,2141	0,3471	0	

Conjunto de Teste	Caso	Componente Fundamental da Corrente Diferencial			Componente de 2ª Harmônica da Corrente Diferencial			Resultado
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C	
1	321	0,6118	0,6091	0,0064	0,1907	0,1871	0,1933	0
	332	0,6299	0,6279	0,0056	0,1722	0,1751	0,1679	0
	335	0,0261	0,6525	0,6570	0,1435	0,1550	0,1778	1
	338	0,7574	0,9697	0,7864	0,1878	0,0552	0,2840	0
	345	0,9179	0,4293	0,7677	0,2477	0,3314	0,0276	0
	352	1,0111	0,7065	0,6597	0,1280	0,2830	0,0881	0
	355	0,5192	0,0294	0,5181	0,3452	0,2473	0,2957	1
	357	0,4003	0,5400	0,7846	0,2359	0,2832	0,3524	0
	359	0,4892	0,3567	0,2067	0,4787	0,3656	0,5652	0
	391	0,0989	0,7475	0,7912	0,1494	0,0342	0,1468	1
	415	0,0638	0,3541	0,3816	0,6000	0,4123	0,3066	0
	421	0,0520	0,6863	0,7055	0,1675	0,0968	0,0896	1
	426	0,1472	0,6886	0,6164	0,3590	0,2137	0,1585	0
	454	0,3418	0,1393	0,4246	0,3972	0,5954	0,5007	0
	461	0,6514	0,0397	0,6558	0,1653	0,1714	0,1597	1
	474	0,5462	0,3433	0,7544	0,2688	0,3745	0,2847	0
	488	0,7600	1,1124	0,5618	0,0424	0,1435	0,1699	1
	507	0,4242	0,3482	0,6528	0,3671	0,5260	0,4520	0
	519	0,3986	0,4193	0,6873	0,3130	0,3924	0,3990	0
	522	0,8371	0,4854	0,5206	0,2977	0,1794	0,2915	0
	526	0,5629	0,6173	0,1169	0,2686	0,3920	0,1994	0
	529	0,2170	0,3377	0,1922	0,6284	0,6318	0,3559	0
	531	0,2785	0,3247	0,1469	0,5639	0,6896	0,1495	0
	536	0,6770	0,4815	0,3060	0,3466	0,2834	0,4437	0
	537	0,5847	0,5810	0,0096	0,2204	0,2186	0,2221	0
	561	0,6022	0,1452	0,5241	0,4887	0,2493	0,3191	0
	563	0,6897	0,7741	0,1703	0,3529	0,3944	0,1228	0
	570	0,7926	0,8395	0,7328	0,1945	0,4026	0,3653	0
	576	0,5986	0,5598	0,0837	0,2598	0,2062	0,3528	0
	584	0,4819	0,0257	0,4785	0,3787	0,3036	0,3412	1
586	0,2882	0,2233	0,4375	0,5810	0,6454	0,5834	0	
590	1,0316	0,6487	0,5966	0,0610	0,3469	0,1150	0	
610	0,3339	0,3207	0,0292	0,4675	0,5760	0,3873	0	
623	0,2362	0,2827	0,4101	0,3380	0,6348	0,6016	0	
624	0,4219	0,4548	0,0795	0,4047	0,5021	0,3111	0	

Conjunto de Teste	Caso	Componente Fundamental da Corrente Diferencial			Componente de 2ª Harmônica da Corrente Diferencial			Resultado
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C	
1	626	0,1362	0,6380	0,7008	0,3156	0,1246	0,1832	0
	658	0,2730	0,4956	0,6557	0,4675	0,4178	0,4820	0
	668	0,4994	0,9912	0,6965	0,4228	0,0813	0,2801	0
	678	0,0405	0,6204	0,6025	0,2434	0,1937	0,1454	0
	682	0,0232	0,5412	0,5402	0,3020	0,2365	0,1538	0
	685	0,1384	0,6461	0,7086	0,3043	0,1164	0,1858	0
	697	0,0048	0,6904	0,6882	0,1097	0,1091	0,1126	1
	698	0,5266	0,7201	1,0558	0,4428	0,0620	0,1873	0
	702	0,3681	0,7527	0,8849	0,2889	0,0971	0,2183	0
	721	0,2258	0,5789	0,6966	0,3907	0,2855	0,2833	0
	725	0,0811	0,4190	0,4030	0,6682	0,5110	0,2963	0
	739	0,4229	0,6930	0,4021	0,4287	0,4725	0,2806	0
	747	0,5855	0,3006	0,3957	0,4254	0,3416	0,4828	0
	753	0,3839	0,5255	0,2121	0,4720	0,5956	0,3836	0
	759	0,0053	0,3912	0,3886	0,3567	0,3774	0,3339	0
	772	0,6621	0,6857	0,0595	0,1168	0,1043	0,2029	0
	784	0,7868	0,9679	0,6525	0,0666	0,3210	0,3598	0
	799	0,0147	0,7252	0,7196	0,1058	0,0933	0,0862	1
	818	0,2523	0,5065	0,3424	0,5277	0,5001	0,4189	0
	836	0,6582	0,7039	0,9077	0,6602	0,2156	0,2178	0
	837	0,0450	0,6697	0,6501	0,1004	0,1337	0,2046	1
	839	0,8665	0,4171	0,8126	0,4781	0,0827	0,1946	0
	845	0,5227	0,4496	0,8030	0,1990	0,4221	0,3749	0
	860	0,6169	0,2409	0,7485	0,0911	0,4919	0,3336	0
	869	0,0352	0,5777	0,5682	0,1956	0,2216	0,2643	0
	902	0,6276	0,0252	0,6242	0,1362	0,1950	0,1803	1
	910	0,6056	0,6781	1,0817	0,2518	0,0485	0,1140	0
	919	0,3024	0,7639	0,8221	0,1598	0,1237	0,2965	0
	925	0,3603	0,8157	0,6036	0,3701	0,3157	0,2262	0
	930	0,5003	0,1630	0,4103	0,5366	0,3310	0,4374	0
944	0,8018	0,1148	0,7439	0,1589	0,1732	0,0360	1	
953	0,5311	0,4030	0,7589	0,1501	0,3540	0,3033	0	
960	0,3750	0,3726	0,0048	0,4357	0,4393	0,4339	0	
973	0,4987	0,4961	0,0470	0,2898	0,3040	0,2925	0	
978	0,1627	0,3654	0,4610	0,4288	0,4792	0,5647	0	

Conjunto de Teste	Caso	Componente Fundamental da Corrente Diferencial			Componente de 2ª Harmônica da Corrente Diferencial			Resultado
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C	
2	17	0,472274	0,052272	0,496076	0,499538	0,291677	0,376186	0
	60	0,513723	0,004546	0,516035	0,376428	0,371949	0,370261	1
	85	0,542323	0,096403	0,573561	0,446084	0,207006	0,313344	0
	139	0,525253	0,121839	0,481087	0,256983	0,465176	0,272592	0
	142	0,624104	0,035195	0,612825	0,147591	0,227248	0,176908	1
	169	0,7567	0,234088	0,678595	0,237116	0,311569	0,075111	0
	218	0,784687	0,331985	0,789614	0,312136	0,18704	0,142643	0
	253	0,462658	0,015772	0,468969	0,363197	0,318178	0,339333	1
	263	0,674494	0,07137	0,646402	0,262444	0,123584	0,171281	1
	272	0,837994	0,306386	0,740453	0,203423	0,302676	0,100413	0
	275	0,069091	0,691682	0,663959	0,250579	0,135163	0,091605	0
	293	0,679594	0,108164	0,685502	0,027845	0,267196	0,147124	1
	307	0,725281	0,080226	0,753088	0,079409	0,269507	0,264447	1
	330	0,721667	0,048235	0,701969	0,272701	0,247299	0,221312	1
	346	0,0046	0,697508	0,694942	0,101937	0,101563	0,105115	1
	358	0,83157	0,821917	0,619212	0,180196	0,403688	0,159549	0
	360	0,115781	0,757982	0,7666	0,21368	0,09925	0,209073	1
	372	0,52287	0,008077	0,525412	0,278224	0,288826	0,282754	1
	397	0,677657	0,045762	0,660785	0,280566	0,263363	0,252979	1
	411	0,697341	1,029244	0,535116	0,050309	0,148258	0,245638	0
	434	0,728717	0,069839	0,713512	0,172612	0,205175	0,271805	1
	477	0,528539	0,143133	0,56377	0,397292	0,26631	0,224438	0
	478	0,014577	0,66677	0,66949	0,190196	0,164677	0,140198	1
	517	0,448529	0,094688	0,480994	0,478712	0,266758	0,31063	0
	595	0,005011	0,641014	0,638946	0,20388	0,208773	0,208814	1
	596	0,490498	0,026841	0,502383	0,374295	0,278548	0,302688	0
	598	0,063441	0,717482	0,691094	0,089077	0,088276	0,179689	1
	671	0,561434	0,004603	0,563797	0,337764	0,335505	0,330306	1
	679	0,61073	0,083335	0,603574	0,336915	0,113311	0,21976	1
	680	0,542056	0,004611	0,544608	0,353338	0,350484	0,346049	1
817	0,608199	0,004537	0,610597	0,2986	0,295106	0,293743	1	
824	0,08101	0,738295	0,727716	0,187609	0,062463	0,154117	1	
880	0,649275	0,167477	0,721965	0,298829	0,247758	0,106993	0	
934	0,490087	0,023136	0,500306	0,357222	0,263979	0,307105	1	
957	0,757391	0,12596	0,708094	0,272095	0,104354	0,120481	1	
994	0,584679	0,00459	0,587279	0,243656	0,240277	0,211977	1	

Conjunto de Teste	Caso	Componente Fundamental da Corrente Diferencial			Componente de 2ª Harmônica da Corrente Diferencial			Resultado
		Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C	
3	14	0,571617	0,067179	0,543833	0,344518	0,398832	0,335078	0
	47	0,481657	0,037464	0,49882	0,391478	0,243468	0,307404	0
	52	0,64125	0,132773	0,66537	0,335104	0,111141	0,168592	1
	54	0,514055	0,014612	0,511237	0,364944	0,387068	0,370185	1
	134	0,664604	0,206976	0,741257	0,348609	0,204621	0,121559	0
	230	0,750902	0,16418	0,678919	0,354074	0,091395	0,156991	1
	266	0,213306	0,71187	0,774397	0,2545	0,048972	0,235198	0
	331	0,719834	0,335217	0,560944	0,396082	0,095389	0,298641	1
	436	0,683358	0,079523	0,669049	0,305639	0,230412	0,247766	1
	466	0,214146	0,716726	0,811352	0,268161	0,067118	0,217459	0
	490	0,561705	0,151337	0,635678	0,44772	0,207951	0,189884	0
	502	0,609587	0,166351	0,53037	0,505049	0,333594	0,394135	0
	510	0,178819	0,679861	0,764341	0,295608	0,080622	0,211006	0
	511	0,684956	0,202707	0,581514	0,461105	0,228812	0,265774	0
	594	0,693845	0,213615	0,62328	0,187875	0,392324	0,168182	0
	694	0,628828	0,027275	0,622761	0,289954	0,299472	0,433972	0
	695	0,567522	0,156759	0,592468	0,07006	0,429269	0,272969	0
	703	0,173144	0,793505	0,711994	0,212276	0,054814	0,253615	0
	745	0,553383	0,162345	0,60097	0,501818	0,143094	0,289335	0
749	0,795632	0,15908	0,713779	0,361516	0,253616	0,227946	0	
4	23	0,739678	0,215055	0,770693	0,353565	0,044094	0,211674	0
	267	0,745511	0,185851	0,65465	0,38866	0,334846	0,258335	0
	324	0,660679	0,283376	0,729533	0,520446	0,05515	0,218061	0
	354	0,606864	0,439877	0,350431	0,406149	0,032328	0,470571	0
	403	0,803849	0,464904	0,488672	0,462829	0,238391	0,334742	0
	543	0,665824	0,499982	0,715404	0,388998	0,156314	0,278367	0
	545	0,766099	0,319054	0,769836	0,380807	0,196736	0,146657	0
	639	0,673138	0,547739	0,437357	0,341209	0,102123	0,418263	0
	644	0,600753	0,304072	0,648955	0,449492	0,177126	0,257807	0
	670	0,822305	0,24145	0,703165	0,37128	0,248837	0,239193	1
	719	0,624572	0,181752	0,691765	0,388499	0,205255	0,154859	0
	852	0,498953	0,088072	0,472703	0,359117	0,523095	0,397763	0
	879	0,726608	0,378307	0,552958	0,516343	0,053888	0,317219	0
897	0,715682	0,449083	0,395115	0,351482	0,280279	0,41111	0	
5	804	0,801667	0,269266	0,653588	0,410681	0,384078	0,25772	0