

Willian Jonas Deliberalli

**Uma Nova Proposta para Detecção e
Classificação de Transitórios em Linhas de
Transmissão**

Alegrete, RS

Agosto de 2014

Willian Jonas Deliberalli

Uma Nova Proposta para Detecção e Classificação de Transitórios em Linhas de Transmissão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa

Curso de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Me. Eduardo Machado dos Santos

Alegrete, RS

Agosto de 2014

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

D715n Deliberalli, Willian Jonas

Uma Nova Proposta para Detecção e Classificação de
Transitórios em Linhas de Transmissão / Willian Jonas
Deliberalli.

66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2014.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. I. Título.

Willian Jonas Deliberalli

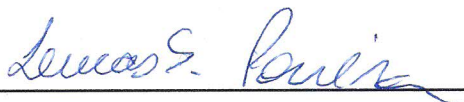
Uma Nova Proposta para Detecção e Classificação de Transitórios em Linhas de Transmissão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

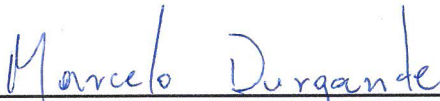
Trabalho aprovado. Alegrete, RS, agosto de 2014:



Prof. Me. Eduardo Machado dos Santos
Orientador



Prof. Bel. Lucas Santos Pereira
Unipampa



Prof. Bel. Marcelo Hahn Durgante
Unipampa

Alegrete, RS
Agosto de 2014

*Dedico este trabalho a minha família,
pelo apoio incondicional nas horas difíceis.*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à Deus por me proporcionar uma vida saudável, força e sabedoria. Também, por me presentear com uma família maravilhosa.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Elaine e Antonio, pelo incentivo e apoio psicológico, e também, pelo suporte financeiro para que eu pudesse estudar sem ter outras preocupações. Agradeço a minha irmã Wanessa, pelo apoio e incentivo.

Aos meus amigos de longa data pela força e incentivo. Também, aos amigos que conquistei durante a graduação, pelo conhecimento transmitido, pela parceria nas horas de estudo e descontração.

Ao meu orientador e amigo Prof. Me. Eduardo Machado dos Santos por compartilhar os seus conhecimentos, pela força, incentivo, dedicação e paciência. O seu acompanhamento foi fundamental para que este trabalho fosse realizado.

*“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”.
(Albert Einstein)*

Resumo

A proteção em linhas de transmissão é de suma importância, pois são elas as responsáveis pelo transporte de energia da geração até o ponto de consumo. Frequentemente, as linhas de transmissão estão vulneráveis a eventos que causam distúrbios transitórios, como por exemplo, descargas atmosféricas, curtos-circuitos, chaveamentos, entrada e rejeição de blocos de cargas, energização de transformadores, entre outros. Neste trabalho, é apresentada uma nova técnica para detecção e classificação de distúrbios transitórios, o que permite diferenciar os diferentes tipos de eventos que acontecem em um sistema de potência. Para isso, foi realizada a investigação e estudo de metodologias já existentes e implantadas em lógicas de relés de proteção, as quais serviram como base para o desenvolvimento e realização deste trabalho. Esta abordagem consiste na criação de um sistema teste e na realização de simulações de diferentes eventos que, eventualmente, podem acontecer nas linhas de transmissão. As simulações são realizadas no *software* EMTP-ATP e os de tensão e corrente gerados a partir dessas simulações foram salvos em um banco de sinais. Um algoritmo detector e classificador de transitórios foi criado e implementado no *software* MATLAB[®]. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, pois foi possível detectar e classificar corretamente cada um dos eventos analisados em um curto espaço de tempo.

Palavras-chave: Sistema Elétrico de Potência, Linhas de Transmissão, Detecção de faltas, Classificação de faltas, Relés de Proteção, Circuitos Elétricos.

Abstract

The protection of transmission lines is extremely important because they are responsible to transport the energy from the generation to the point of consumption. Often, the transmission lines are vulnerable to transient events that cause disturbances, such as lightning, short circuits, switching, input and rejection of load blocks, power transformers excitation, among other events. In this work a new technique for detection and classification of transient disturbances, which allows to differentiate the different types of events occurring in a power system is presented. For this, the research and the study of existing methods of protection relays served as the basis for the development and realization of this work. This research consists in creating a test system and the simulations of different events that eventually can happen in transmission lines. The simulations were performed in EMTP-ATP software and the results generated were saved in a database signals. An algorithm that will analyze the signals generated database was implemented in MATLAB[®] software for the detection and classification of transient events. The results were satisfactory, because it was possible to detect and correctly classify each of the phenomena mentioned in a little space of time.

Keywords: Electric Power System, Transmission Lines, Fault Detection, Fault Classification, Protection Relays, Electric Circuits.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação esquemática de um neurônio.	17
Figura 2 – Chaveamento de um circuito RL série alimentado por uma fonte de tensão senoidal (SLUIS, 2001).	24
Figura 3 – A forma da corrente transitória em um circuito indutivo depende do instante de comutação (SLUIS, 2001).	26
Figura 4 – Representação do chaveamento de um circuito LC (SLUIS, 2001).	27
Figura 5 – Tensão sobre o capacitor para três valores iniciais diferentes da tensão no capacitor. A fonte de tensão CC tem o valor de $E = 100$ V (SLUIS, 2001).	28
Figura 6 – Fonte de tensão senoidal chaveada a um circuito RLC série (SLUIS, 2001).	29
Figura 7 – Respostas de um circuito RLC série após ocorrido o chaveamento em $t = 0$ (SLUIS, 2001).	30
Figura 8 – Efeito de uma nuvem carregada sob uma linha de transmissão de alta tensão (SLUIS, 2001).	31
Figura 9 – Curva de magnetização do transformador (SLUIS, 2001).	32
Figura 10 – Corrente inrush do transformador e o fluxo no núcleo (SLUIS, 2001).	33
Figura 11 – Tipos de curtos-circuitos.	34
Figura 12 – Forma de onda da corrente de curto-circuito simétrica e suas envoltórias.	35
Figura 13 – Corrente assimétrica de curto-circuito.	35
Figura 14 – Corrente de curto-circuito.	35
Figura 15 – Relé de alavanca.	37
Figura 16 – Relé de disco de indução.	38
Figura 17 – Sistema teste utilizado para as simulações.	42
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação de transitórios.	44
Figura 19 – Diferença entre os pontos de um sinal de amostragem.	45
Figura 20 – Pontos que resultam da função diferença calculada para a fase A de um sinal de corrente.	45
Figura 21 – Níveis de detecção dos sinais amostrados.	46
Figura 22 – Sinais de corrente para um curto-circuito trifásico em 25% da linha de transmissão.	50
Figura 23 – Sinais de tensão para um curto-circuito trifásico em 25% da linha de transmissão.	51
Figura 24 – Níveis de detecção dos sinais de corrente de um curto-circuito trifásico.	52
Figura 25 – Níveis de detecção dos sinais de tensão de um curto-circuito trifásico.	52
Figura 26 – Sinais de corrente para um curto-circuito bifásico em 25% da linha de transmissão.	53

Figura 27 – Sinais de tensão para um curto-circuito bifásico em 25% da linha de transmissão.	53
Figura 28 – Níveis de detecção dos sinais de corrente de um curto-circuito bifásico.	54
Figura 29 – Níveis de detecção dos sinais de tensão de um curto-circuito bifásico. .	54
Figura 30 – Sinais de corrente para um curto-circuito monofásico em 25% da linha de transmissão.	55
Figura 31 – Sinais de tensão para um curto-circuito monofásico em 25% da linha de transmissão.	55
Figura 32 – Níveis de detecção dos sinais de corrente de um curto-circuito monofásico.	56
Figura 33 – Níveis de detecção dos sinais de tensão de um curto-circuito monofásico.	56
Figura 34 – Sinais de corrente para a energização de uma transformador em uma linha de transmissão.	57
Figura 35 – Níveis de detecção dos sinais de corrente para a energização de transformador.	57
Figura 36 – Níveis de detecção dos sinais de tensão para a energização de transformador.	57
Figura 37 – Sinais de corrente para uma abertura monopolar no sistema.	58
Figura 38 – Sinais de tensão para uma abertura monopolar no sistema.	58
Figura 39 – Níveis de detecção dos sinais de corrente para uma abertura monopolar.	59
Figura 40 – Níveis de detecção dos sinais de tensão para uma abertura monopolar.	59
Figura 41 – Sinais de corrente para uma entrada de carga no sistema.	60
Figura 42 – Sinais de tensão para uma entrada de carga no sistema.	60
Figura 43 – Níveis de detecção dos sinais de corrente para uma entrada de carga trifásica.	61
Figura 44 – Níveis de detecção dos sinais de tensão para uma entrada de carga trifásica.	61

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do sistema utilizados no projeto	43
Tabela 2 – Detecção de curto-circuito 3ϕ	48
Tabela 3 – Detecção de curto-circuito 2ϕ	48
Tabela 4 – Detecção de curto-circuito 1ϕ	49
Tabela 5 – Detecção de transitórios	50

Sumário

	Introdução	14
1	REVISÃO DA LITERATURA	17
1.1	Métodos baseados na teoria de Redes Neurais Artificiais (RNA's)	17
1.2	Métodos baseados na teoria de Transformada Wavelet	19
1.3	Conclusões Gerais	21
2	DISTÚRBIOS TRANSITÓRIOS	23
2.1	Introdução	23
2.2	Chaveamentos	23
2.2.1	Chaveamento de um circuito RL	24
2.2.2	Chaveamento de um circuito LC	26
2.2.3	Chaveamento de um circuito RLC	28
2.3	Descargas atmosféricas	31
2.4	Correntes de Inrush do transformador	32
2.5	Curto-circuito	33
3	PROTEÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS	36
3.1	Relés de proteção	36
3.1.1	Relé eletromecânico	37
3.1.2	Relé eletrônico	38
3.1.3	Relé digital numérico	38
3.2	Proteção de sobrecorrentes	39
3.3	Proteção de sobretensões	40
4	DESENVOLVIMENTO	42
4.1	Metodologia	42
4.2	Análise dos Resultados	50
4.2.1	Curto-circuito trifásico	50
4.2.2	Curto-circuito bifásico	52
4.2.3	Curto-circuito monofásico	54
4.2.4	Energização de transformador	55
4.2.5	Abertura monopolar	58
4.2.6	Entrada de carga trifásica	59
	Conclusão	62

Trabalhos Futuros	63
Referências	64

Introdução

Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência resultam de uma variedade de distúrbios em uma linha de transmissão, tais como a comutação de chaves, incidência de raios, faltas, entre outros. O estudo de transitórios é de extrema importância, pois são nesses momentos que os componentes do sistema de energia estão sujeitos a sobrecorrentes e sobretensões.

A proteção em linhas de transmissão é de suma importância, pois as mesmas são consideradas um dos componentes mais vulneráveis do Sistema Elétrico de Potência. O sistema deve suportar sobretensões e sobrecorrentes com um certo limite, ou os efeitos das mesmas devem ser reduzidos e limitados com dispositivos de proteção, especialmente quando ocorre uma falta. Na ocorrência de uma falta, a proteção deve atuar de forma apropriada, desativando apenas a parte defeituosa do sistema, reduzindo assim os impactos das interrupções ao mínimo possível. Além disso, os dispositivos de proteção devem ser capazes de restaurar o sistema de maneira muito rápida.

As faltas também acarretam em prejuízos técnicos e financeiros significativos, principalmente quando envolvem consumidores industriais e empresas que possuem seus processos automatizados. A proteção em sistemas elétricos de potência está diretamente ligada à qualidade dos serviços prestados e fornecidos pelos agentes distribuidores. As mudanças na estrutura do setor elétrico, com grande parte das empresas distribuidoras sendo privatizadas, levam à necessidade de um maior controle de qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores finais. Para tal, torna-se importante o estabelecimento de índices de desempenho do fornecimento, de modo que seja possível o controle da qualidade de energia elétrica de forma objetiva.

Os sistemas de proteção também estão sujeitos a falhas. Por isso, os equipamentos que compõem a rede devem ser dimensionados para suportar correntes e tensões elevadas, até que algum dispositivo de proteção de retaguarda acione o disjuntor, caso a proteção principal deixe de atuar. Desta maneira, a estimativa da corrente de curto-circuito torna-se indispensável para a especificação dos equipamentos do sistema elétrico.

Atualmente, os mecanismos de proteção em uma linha de transmissão são geralmente compostos por relés digitais, que utilizam sinais de corrente e tensão como entrada e contam com o auxílio de algoritmos com lógicas específicas para realizar o diagnóstico de faltas. Os relés de proteção ficam conectados ao sistema de energia elétrica através de transformadores de corrente e de potencial, energizados e inativos, até que um evento de falta ocorra.

Os relés têm como finalidade proteger os equipamentos de um sistema elétrico de potência, como geradores, transformadores e cabos, bem como, manter a integridade do

sistema e o adequado fornecimento de energia elétrica. Desta maneira, quando ocorrer uma falta, o sistema deve ser isolado o mais rapidamente possível para preservar a estabilidade do mesmo. No caso de uma falta, o relé irá enviar um sinal de abertura para um disjuntor, a fim de desconectar a linha em falta. Em um sistema interligado, o resto da rede, pode, em seguida, continuar a funcionar normalmente, ou, pelo menos, em condições próximas das normais.

Os diferentes tipos de transitórios requerem respostas diferentes, e os diferentes tipos de falta exigem a tomada de medidas diferentes. Por isso, é importante a distinção de faltas de outros eventos transitórios, pois as operações de comutação podem causar transitórios similares aos induzidos por faltas (MO; KINSNER, 1996).

O planejamento adequado de um sistema elétrico de potência necessita de diversos estudos e análises, entre os quais se destacam a análise de curto-circuito, o fluxo de carga, a análise de estabilidade e a análise de transitórios eletromagnéticos. Na maior parte do tempo, os sistemas operam em regime permanente, porém estão sujeitos a solicitações extremas de tensão e corrente. Por isso, conforme já citado, devem ser projetados para suportar eventos que causem sobretensões e sobrecorrentes (ARAUJO; NEVES, 2005).

Neste trabalho, foram realizados estudos a cerca das metodologias existentes para detecção e classificação de faltas, aplicadas em relés de proteção, as quais que serviram como base para o desenvolvimento deste trabalho. As técnicas observadas que foram utilizadas em outros trabalhos para detecção e classificação de transitórios abordam Redes Neurais Artificiais (RNA's) e processamento de sinais utilizando Transformada Wavelet.

Visando aprimorar o desempenho das técnicas existentes e viabilizar a classificação rápida e precisa dos eventos transitórios, esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma nova técnica para detecção e classificação dos diferentes tipos de transitórios ocorridos em linhas de transmissão, sejam eles acarretados por agentes externos ou internos ao sistema. Essa análise tem como finalidade permitir a tomada de decisão adequada dos dispositivos de proteção quando ocorrida uma perturbação no sistema e, até mesmo, permitir a intervenção correta dos operadores do sistema frente a essas situações. Além disso, a metodologia proposta visa reduzir os cortes indevidos de cargas que resultam em não fornecimento de energia aos consumidores fora dos trechos defeituosos da rede.

Para isso, um sistema teste foi criado no *software* EMTP-ATP para a realização de simulações. Formam simulados casos de curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos em diferentes pontos de uma linha de transmissão, além de aberturas monopolares, energização de transformadores e entradas de cargas no sistema. Todos esses eventos são os principais causadores de distúrbios transitórios nos sinais de corrente e tensão. Posteriormente, foi criado um banco de sinais com as forma de onda obtidas nas referidas simulações e implementada a lógica de detecção e classificação de transitórios no *software* MATLAB[®].

O capítulo 1 aborda a revisão da literatura e o estado da arte sobre as lógicas de detecção e classificação de transitórios. As metodologias descritas abordam Redes Neurais Artificiais (RNA's) e Transformada Wavelet (TW), duas das metodologias amplamente utilizadas para este fim. O capítulo 2 descreve os principais fenômenos causadores de distúrbios transitórios. Além disso, relata os possíveis danos que eles podem causar na rede e de qual maneira interferem nos sinais de corrente e tensão do sistema elétrico. No capítulo 3, são apresentados alguns tipos de relés de proteção, bem como, os seus princípios de operação. Por fim, no capítulo 4, é descrita a metodologia empregada para a realização do trabalho, como também as análises dos respectivos resultados obtidos através das simulações realizadas. Ao final, são feitas as conclusões a cerca dos resultados obtidos e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

1 Revisão da Literatura

Nas últimas décadas, uma quantidade significativa de trabalhos tem sido feita na área de diagnósticos de faltas, particularmente em sistemas de transmissão. Muitas técnicas convencionais são baseadas em abordagens algorítmicas, mas algumas técnicas mais recentes, envolvem a utilização de Inteligência Artificial, tais como as fundamentadas em Redes Neurais Artificiais (RNA's), além de técnicas de processamento de sinais como a Transformada Wavelet (TW).

1.1 Métodos baseados na teoria de Redes Neurais Artificiais (RNA's)

As Redes Neurais são convenientes para resolver problemas de proteção em sistemas de energia, pois elas tem capacidade de alcançar mais rapidamente a precisão e seletividade desejada.

Uma RNA contém uma camada de entrada, uma camada de saída e possivelmente uma ou mais camadas escondidas (GIOVANINI; COURY, 1999). A representação esquemática de um neurônio pode ser observada na Fig. 1.

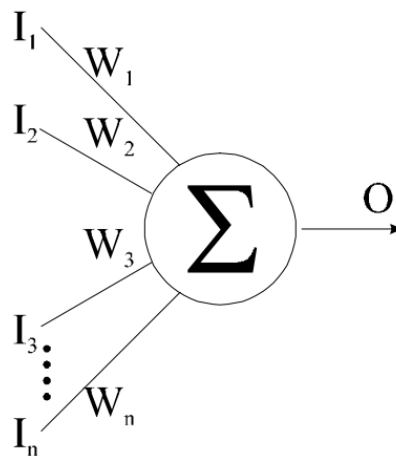


Fig. 1 – Representação esquemática de um neurônio.

No estudo abordado por (GIOVANINI; COURY, 1999), o neurônio recebe sua entrada através de um conjunto de links ponderados. A sua ativação será assim definida através da somatória destas entradas ponderadas. A saída do neurônio é definida por uma função *threshold*, sendo frequentemente representada pela função sigmoideal, dada pela Equação (1.1).

$$f(x) = \frac{1}{1 - e^{-x}} \quad (1.1)$$

A saída do neurônio é então propagada, ou para outros neurônios ou para a saída da rede.

No trabalho de (GIOVANINI; COURRY, 1999), foi desenvolvido um *software* com base em uma RNA multi-camadas para a classificação de faltas em uma linha de transmissão. Essa metodologia foi capaz de classificar corretamente uma falta em até 4 ms após a ocorrência da mesma. Enquanto que, em outros casos estudados, a classificação foi completada em até 5 ms. Para verificação e validação do *software*, foram simulados dez tipos de faltas distintas, envolvendo todas as fases e combinações possíveis em diversos pontos da linha de transmissão.

Deve ser enfatizado que, nesse estudo, os dados foram gerados a uma taxa amostral de 1 kHz e que a simulação levou em consideração aspectos físicos reais da linha de transmissão. Dessa forma, os dados obtidos foram bem próximos aos encontrados na prática.

Para o treinamento da rede de classificação foram utilizados dados pós-falta, compostos basicamente por três amostras de cada corrente (I_A, I_B e I_C) e três amostras da corrente de sequência zero (I_0), levando-se em conta que a detecção da falta poderia ser feita na 1ª, 2ª ou 3ª amostra pós-falta. Desta maneira, a RNA obteve quatro saídas (I_A, I_B, I_C e I_0), sendo que, para as fases envolvidas na falta, o valor de saída da rede deveria ser igual a 1, enquanto que para as fases não envolvidas deveria ser igual a 0.

Outro estudo com base em RNA's, foi o proposto por (OLESKOVICZ et al., 2001) onde a Rede Neural Artificial foi utilizada para simular um esquema de proteção à distância de uma linha de transmissão. Para realizar a simulação, as tarefas foram subdivididas em diferentes módulos de RNA's para a detecção e classificação de faltas, bem como a localização das mesmas em zonas de proteção diferentes. Foi estudada uma linha de transmissão de 440 kV e 100 km de extensão.

Além disso, as simulações foram realizadas tendo como variáveis a distância de aplicação da falta, a resistência de falta, o ângulo de incidência da falta, o tipo da falta e as condições de operação do sistema elétrico.

Como entradas para os módulos de RNA's, foram utilizadas tensões e correntes trifásicas, amostradas numa frequência de 1 kHz, em condições de pré e pós-falta. Os dados utilizados pelos algoritmos de redes neurais foram divididos em duas partes, uma utilizada para treinamento e outra utilizada para testes.

Para essa metodologia, o desempenho das RNA's foi altamente satisfatório quanto a precisão e velocidade de resposta. Com o auxílio desta arquitetura, uma falta pode ser detectada em até 5 ms após a ocorrência da mesma. Já a classificação, é capaz de diferenciar corretamente as fases envolvidas entre 4 e 9 ms. A RNA estimou a resposta esperada em 98% dos testes. Os erros observados são relativos às respostas incorretas que

são situadas nas zonas de transição das RNA's.

1.2 Métodos baseados na teoria de Transformada Wavelet

A Transformada Wavelet também se apresenta como sendo um método muito eficiente na detecção de faltas. É um dos métodos mais eficientes para análises de comportamentos transitórios de tensão e corrente. O sinal pode ser decomposto em várias bandas de frequência, as quais são extraídas por uma única função chamada de Wavelet-Mãe.

A TW é aplicada para decomposição dos transitórios de falta, por causa da sua capacidade de extrair informações do sinal, tanto no domínio do tempo como no da frequência (PANIGRAHI; MAHESHWARI, 2011).

Os sinais de falta são conhecidos por conter transitórios e harmônicos. Estas componentes de alta frequência possuem informações essenciais que podem ser utilizadas para identificar faltas no sistema de alimentação da rede (ADEWOLE; TZONEVA, 2012).

Em (AL-KABABJIE et al., 2012), é abordado o desenvolvimento de um novo relé de distância para detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão utilizando a TW. O coeficiente da aproximação discreta da TW, com a Wavelet de Haar, é tomado como um índice para a detecção e seleção da fase com defeito em uma linha de transmissão. A componente unidirecional exponencialmente decrescente direta de deslocamento (DC) do sinal de corrente em um sistema de potência, foi utilizada como um indicador de detecção de faltas. A técnica desenvolvida neste trabalho, permite detectar a falta e enviar um sinal de disparo do relé durante a primeira metade do ciclo, após ocorrida a falta.

O estudo apresentado por (SILVA et al., 2007), apresenta um algoritmo de detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão, a partir da análise de registros oscilográficos via Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet. O algoritmo desenvolvido no referido trabalho se divide em dois módulos, um de detecção e outro de classificação da falta. No módulo de detecção, as tensões e correntes de um registro são obtidas. Em seguida, aplica-se a Transformada Wavelet Discreta (TWD) apenas às correntes. Então, um conjunto de regras é avaliado para identificar se o registro corresponde a uma falta. No módulo de classificação, as amostras de tensão e correntes passam por um processo de reamostragem, onde a frequência original do sinal é convertida para uma frequência padrão de 1200 Hz. Em seguida, emprega-se um processo de janelamento, onde cada janela é apresentada a uma RNA, que indica qual é o tipo de falta relacionado àquelas amostras. O ponto de destaque dessa metodologia é a possibilidade de diferenciar uma falta de outras ocorrências relacionadas à qualidade de energia elétrica, tais como afundamentos de tensão e transitórios de chaveamento.

É apresentado em (PANIGRAHI; MAHESHWARI, 2011) uma nova proposta para

proteção à distância de linhas de transmissão, consistindo na utilização de *Support Vector Machines* (SVM's) para detecção e classificação de faltas. O algoritmo desenvolvido baseia-se no cálculo do valor RMS de energia transitória dos sinais de pré-falta e pós-falta das três correntes de linha e das três tensões de linha. A Transformada Wavelet Discreta (TWD) é aplicada para a decomposição dos transitórios de faltas. Conseqüentemente, os dados provenientes da decomposição são utilizados para o treinamento da arquitetura SVM. Os sinais de tensão e corrente são amostrados a uma frequência de 5 kHz e os valores RMS da energia transitória são extraídos usando a Daubechies 4 (db4) como Wavelet-Mãe. Essa Wavelet-Mãe foi escolhida pois verificou-se que a mesma é excelente para detectar uma mudança abrupta no valor RMS de energia transitória dos sinais de pré e pós-falta. As decomposições dos sinais são realizadas no nível 1, pois possuem frequências na ordem de 25-50 Hz. Essas frequências, por sua vez, são ótimas indicadoras para a detecção de uma falta. O esquema proposto mostrou-se imune às resistências de faltas, às variações de carga, às ações de religamento e até mesmo à saturação do transformador de corrente. Isto só é possível pois o conteúdo de energia transitória nestes eventos é muito baixo, o que ocorre devido ao seu tempo de existência ser muito curto.

Além disso, (JAMEHBOZORG; SHAHRTASH, 2010) desenvolveu um novo método para a classificação de faltas em linhas de transmissão de circuito simples. O algoritmo proposto é capaz de classificar uma falta utilizando apenas sinais de tensão e corrente de um dos lados da linha protegida. O tipo de falta é reconhecido por meio de um algoritmo de decisão em árvore. A tensão de uma das fases e as correntes de outras duas fases são usadas para calcular os fasores das dezenove primeiras harmônicas ímpares. Para este procedimento, aplica-se a Transformada Discreta de Fourier de Meio-Ciclo. Conseqüentemente, estes valores são transmitidos a uma árvore de decisões para a classificação das faltas. Para se obter uma boa velocidade na tomada de decisões, foi necessária a combinação de amostras de pré e pós falta. Entretanto, o momento exato do início da falta foi determinado. Para detectar uma falta, a proposta é baseada na teoria de ondas viajantes. Para isso, as componentes da tensão e da corrente de cada fase foram extraídas e f foi calculada para cada fase pela Equação (1.2).

$$f = v_{SI} - Z_C \cdot i_{SI} \quad (1.2)$$

Em (1.2), Z_C é a impedância característica da linha. Se nenhuma falta ocorrer, a amplitude de f em todas as fases terá valores relativamente baixos, enquanto que, para uma ocorrência de falta, este valor aumentará consideravelmente em pelo menos uma das fases. Este método demonstrou muita rapidez na tomada de decisões, podendo classificar corretamente uma falta no primeiro quarto de ciclo do sinal. Além disso, mostrou-se ser um método robusto e eficaz.

Ainda, o foco do trabalho de (SARAVANABABU et al., 2013) foi desenvolver

uma nova técnica para detecção e classificação de faltas em tempo real. Nesse trabalho, também foi aplicada a TWD para a análise dos sinais de falta, porém, utilizando um único nível de decomposição. Desta maneira, os requisitos de cálculos são consideravelmente reduzidos quando comparados com vários níveis de decomposição utilizados em outros trabalhos. Uma característica importante deste trabalho é que a lógica é determinística, o que o torna independente e evita a necessidade de um histórico de dados que podem não estar disponíveis. O algoritmo utiliza a Wavelet Daubechies 5 em seu primeiro nível de decomposição, com taxa de amostragem de 2 kHz. As amostras utilizadas pelo algoritmo são apanhadas em um espaço de tempo muito curto, 0.5 segundos. O módulo de classificação da falta é constituído por duas lógicas separadas, que depende se a falta envolve ou não a terra. Este é uma aspecto importante, pois as características de uma falta que envolve a terra são diferentes das que não envolvem a terra, ou seja, precisam ser tratadas separadamente.

No trabalho de (SOARES et al., 2003) é apresentada uma proposta para detecção e classificação de faltas baseada na codificação por sub-bandas. Para isso, são utilizados coeficientes wavelet de primeira escala, das tensões de fase e de suas componentes modais, bem como o conteúdo de energia destes sinais. Para transformar os sinais de tensão de falta para o domínio modal, foi utilizada a matriz de transformação de Clarke, dada pela Equação (1.3):

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Em (1.3), v_a , v_b e v_c são as tensões de fase e v_0 , v_α e v_β são as componentes modais das tensões. Após esse cálculo, é realizada a transformação para o domínio wavelet e os coeficientes de primeira escala das componentes modais são obtidos. Os coeficientes wavelet são obtidos implementando um algoritmo de codificação por sub-bandas, utilizando a Daubechies 4 como wavelet-mãe. Vale ressaltar que o uso das componentes modais 0, α e β pode ser empregado como variáveis na detecção de faltas em linhas de transmissão. Porém, a detecção não será efetuada se utilizada apenas uma das componentes, pois esta aplicação não detecta todos os tipos de falta. Por outro lado, o uso de duas componentes é viável, desde que sejam empregadas as componentes 0 e β ou α e β .

1.3 Conclusões Gerais

A Transformada Wavelet mostra ser um artifício matemático essencial para decomposição de sinais de tensão e corrente. Este método é um dos mais eficientes na análise de transitórios, pois os sinais podem ser decompostos em várias bandas de frequência, o que permite uma análise muito mais detalhada em função dos coeficientes extraídos. Os estudos

apontam que a família de Wavelets Daubechies 4 é a mais eficiente, pois fornece uma detecção de falta mais precisa do que as outras famílias de Wavelets analisadas. Porém, existem restrições na utilização da Transformada Wavelet, a qual pode falhar em casos de afundamentos de tensão e energização de linhas de transmissão.

Geralmente, a Transformada Wavelet é associada com arquiteturas de RNA's. Elas apresentam uma excelente precisão e altíssima velocidade na detecção e classificação de faltas. As RNA's são muito eficientes neste aspecto, pois são capazes de detectar uma falta em até $5ms$. Já as classificações precisam de um tempo um pouco maior, precisando de até $9ms$, pois necessitam de uma amostragem de dados maior do que na detecção.

2 Distúrbios Transitórios

2.1 Introdução

Os distúrbios em sistemas elétricos de potência são classificados principalmente como fenômenos de estado estacionário e transitório (SILVA, 2010). Normalmente, o sistema opera em uma frequência de 60 Hz e os transitórios acontecem em frequências muito mais elevadas, na faixa de kiloHertz (kHz) ou até megaHertz (MHz). Neste caso, as frequências mudam rapidamente e a metodologia de cálculo e as representações fasoriais são modelados por equações diferenciais, obedecendo as “Leis das Tensões e das Correntes de Kirchhoff” (SLUIS, 2001).

Os transitórios em um sistema de potência, em sua maioria, são resultados de ações de comutação e eventos naturais. É possível destacar, como exemplos, as descargas atmosféricas, a energização de transformadores, as comutações de corte e entrada de carga e seccionadoras que interligam diversas partes do sistema, bem como fusíveis e disjuntores que interrompem altas correntes provenientes de curtos-circuitos.

2.2 Chaveamentos

Operações de chaveamento dão origem a transitórios dependentes dos parâmetros LC das linhas e que se propagam em ambos os lados dos disjuntores (CAMARGO, 2006).

As funções mais comuns executadas pelos dispositivos de comutação são para conectar e desconectar cargas do sistema. Esta ação, pode ser representada por um circuito RL em muitos casos. Cargas com baixo fator de potência serão predominantemente indutivas, por outro lado, cargas com alto fator de potência serão predominantemente resistivas. Essas noções são fundamentais, pois se tornam importantes na determinação da forma do transitório gerado. Nas seguintes subseções serão demonstrados diferentes tipos de chaveamentos e seus respectivos comportamentos.

Vale ressaltar, que existe um instante mais desfavorável para ocorrer o curto-circuito, em que a corrente é máxima. A situação mais desfavorável é quando a onda de tensão passa por zero no momento da ocorrência da falta, pois é o valor máximo da componente contínua. Assim, existe uma possibilidade da duplicação da corrente de pico em relação à corrente de curto-circuito inicial simétrica. Por outro lado, a situação mais favorável, por assim dizer, é quando a onda de tensão passa pelo seu valor de pico (máximo ou mínimo) no momento da ocorrência do curto-circuito. Neste caso, a corrente de falta não apresenta componente contínua, ou seja, ela será totalmente simétrica.

Segue aqui um estudo de chaveamentos de circuitos RC, RL e RLC que serão importantes para compreender os comportamentos dos transitórios elétricos abordados neste trabalho. Este estudo pode ser encontrado no livro publicado por Sluis (2001), intitulado *Transients in Power Systems*, e que, a partir daqui, segue quase totalmente reproduzido neste capítulo.

2.2.1 Chaveamento de um circuito RL

Na Fig. 2, uma tensão é conectada a um circuito de uma indutância e uma resistência em série. De fato, esta é a representação mais simples de um sistema monofásico de alta tensão com fechamento de um disjuntor em uma linha de transmissão. A fonte de tensão E representa as forças eletromotrizes dos geradores síncronos conectados ao sistema. A indutância L representa a indutância síncrona destas máquinas, a indutância de fuga dos transformadores, a indutância dos barramentos, dos cabos e linhas de transmissão. As perdas do sistema estão representadas pela resistência R .

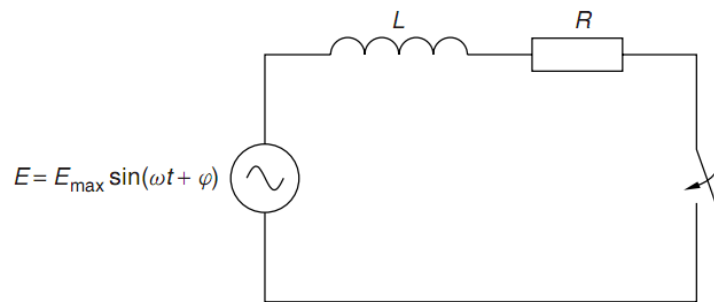


Fig. 2 – Chaveamento de um circuito RL série alimentado por uma fonte de tensão senoidal (SLUIS, 2001).

Neste caso, a componente de corrente transitória é determinada pela indutância. Aplicando a Lei das Tensões de Kirchhoff, no circuito da Fig. 2, é obtida a equação diferencial não homogênea (2.1).

$$E_{max} \sin(\omega t + \varphi) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

O interruptor do circuito da Fig. 2 pode fechar em qualquer instante de tempo e o ângulo de fase da tensão E pode assumir valores entre 0 e 2π rad. Para encontrar a solução geral da equação diferencial, é necessário resolver a equação característica da equação diferencial homogênea (Equação 2.2).

$$Ri + L\lambda i = 0 \quad (2.2)$$

O escalar λ é o autovalor da equação característica. Ele é encontrado como sendo $\lambda = -(R/L)$ e assim, a solução geral da Equação 2.1 é:

$$i_h(t) = C_1 e^{-(R/L)t} \quad (2.3)$$

A solução particular é encontrada substituindo na Equação 2.1 uma expressão geral para a corrente

$$i_p(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.4)$$

A e B podem ser determinados como:

$$A = \frac{RE_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad B = -\frac{\omega L E_{max}}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (2.5)$$

Isto resulta na solução particular para a corrente

$$i(t) = i_h(t) + i_p(t) \quad (2.6)$$

Antes do fechamento da chave na Fig. 2, o fluxo magnético da indutância L é igual a zero. Este, por sua vez, continua a ser zero após o instante imediato do fechamento da chave, devido à lei da conservação de fluxo. Deste modo, em $t=0$, que é o instante de chaveamento, pode-se escrever:

$$C_1 + \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \left[\varphi - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] = 0 \quad (2.7)$$

Isso nos dá o valor de C_1 , portanto, a expressão completa para o para a corrente, torna-se:

$$i(t) = e^{-(R/L)t} \left\{ \frac{-E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \left[\varphi - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \right\} + \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin \left[\omega t + \varphi - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \quad (2.8)$$

A primeira parte da Equação 2.8 contém o termo $\exp[-(R/L)t]$ que é responsável pelo aparecimento da componente DC do sinal. A expressão entre colchetes é uma constante e seu valor é determinado pelo instante de chaveamento do circuito. Para $[\varphi - \tan^{-1}(\omega L/R)] = 0$, a componente DC é zero e não há nenhuma oscilação transitória. Quando a fase do circuito está em 90° atrasado ou adiantado, e ocorre o chaveamento, a corrente transitória irá atingir uma amplitude máxima, como pode ser visto na Fig. 3.

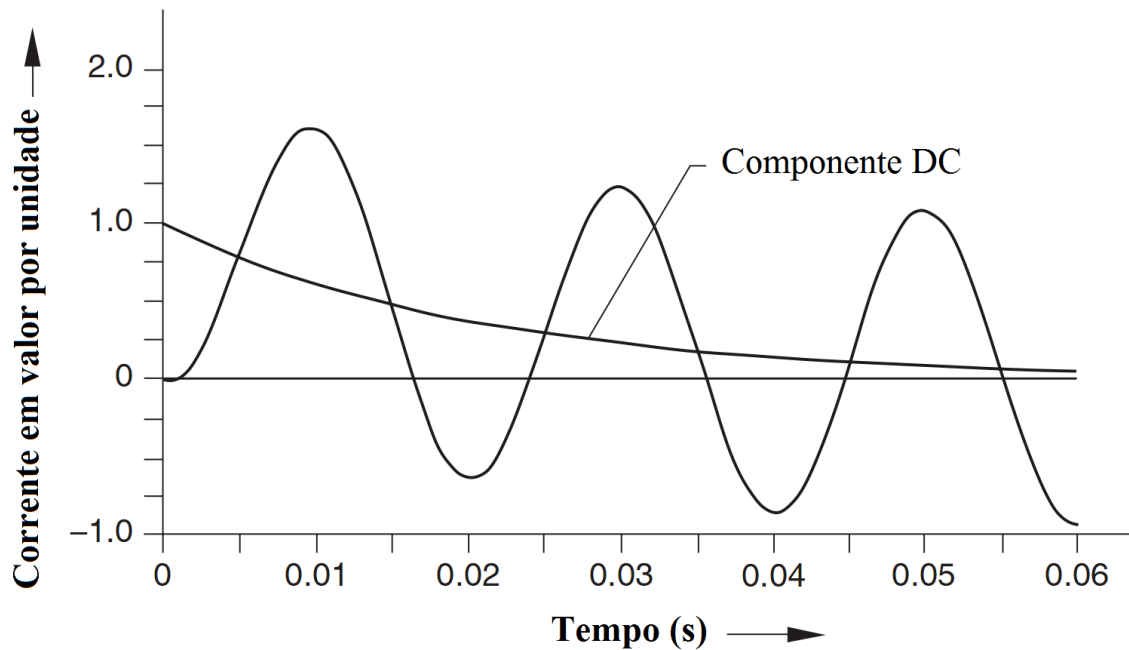


Fig. 3 – A forma da corrente transiente em um circuito indutivo depende do instante de comutação (SLUIS, 2001).

A corrente na Fig. 3 é chamada de *corrente assimétrica*. No caso em que não ocorre a oscilação transiente da corrente, e a mesma se encontra no estado estacionário, é chamada de *corrente simétrica*. A corrente assimétrica pode chegar a um valor máximo de pico com cerca de duas vezes o valor da corrente simétrica, isto vai depender da constante de tempo L/R do circuito.

2.2.2 Chaveamento de um circuito LC

A ligação série de uma indutância e uma capacitância, é a forma mais simples da representação de um disjuntor de alta tensão comutando um banco de capacitores ou uma linha de distribuição. Na Fig. 4, pode ser observado um circuito que representa a energização de uma linha.

Após o fechamento da chave, uma forte oscilação pode ocorrer na rede. Isto se deve ao fato de haver uma troca de energia com uma certa frequência entre os dois elementos armazenadores de energia presentes no circuito. Aplicando a Lei das Tensões de Kirchhoff, resulta na Equação 2.9.

$$E = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.9)$$

Para resolver a equação diferencial 2.9, é empregada a Transformada de Laplace, e

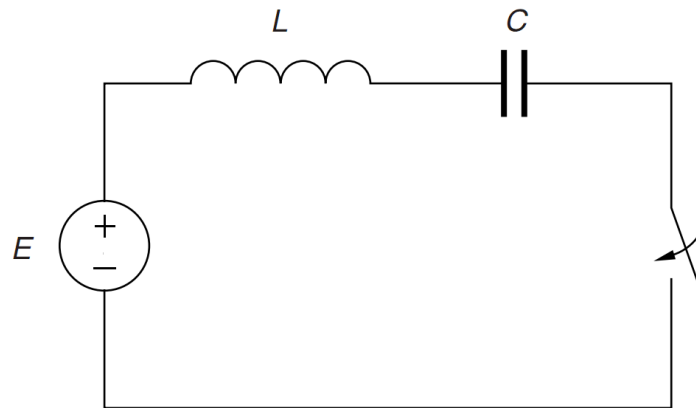


Fig. 4 – Representação do chaveamento de um circuito LC (SLUIS, 2001).

a Equação 2.10 é obtida.

$$\frac{E}{s} = sLi(s) - Li(0) + \frac{i(s)}{sC} + \frac{V_c(0)}{s} \quad (2.10)$$

Na Equação 2.10, s é a variável complexa de Laplace. Portanto, esta equação pode ser reescrita como:

$$i(s) \left(s^2 + \frac{1}{LC} \right) = \frac{E - V_c(0)}{L} + si(0) \quad (2.11)$$

Sendo que a condição inicial para a corrente é $i(0) = 0$, e supondo que não há nenhuma carga no capacitor, ou seja, $V_c(0) = 0$ e assumindo $\omega_0^2 = 1/LC$ a Equação 2.11, torna-se:

$$i(s) = E \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2.12)$$

Agora, aplicando a Transformada Inversa de Laplace, temos a solução da Equação 2.10 no domínio do tempo, representada pela Equação 2.13.

$$i(t) = E \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\omega_0 t) \quad (2.13)$$

Depois de fechar o interruptor no tempo $t = 0$, a corrente começa a oscilar com uma frequência natural

$$\omega_0 = \sqrt{LC} \quad (2.14)$$

A impedância característica, $Z_0 = (L/C)^{1/2}$, em conjunto com o valor da tensão E da fonte, determina o valor de pico da corrente oscilante.

Quando existe uma carga presente no capacitor, a corrente no domínio de Laplace torna-se:

$$i(s) = [E - V_c(0)] \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2.15)$$

A tensão no capacitor no domínio de Laplace é dada pela Equação 2.16.

$$V_c(s) = \frac{E}{s} - sLi(s) = \frac{E}{s} - [E - V_c(0)] \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2.16)$$

Aplicando a transformada de Laplace, a tensão no capacitor no domínio do tempo, torna-se:

$$V_c(t) = E - [E - V_c(0)] \cos(\omega_0 t) \quad (2.17)$$

A Fig. 5 mostra as formas de onda de tensão para três valores iniciais de tensão no capacitor. Pode ser observado que para $V_c(0) = 0$ a forma de onda de tensão pode atingir o dobro do valor de pico da tensão da fonte. Para uma carga negativa, a tensão de pico excede esse valor. Quando a impedância característica do circuito possuir um valor baixo, por exemplo, um capacitor com um alto valor de capacitância e um indutor com baixa indutância, o pico da corrente pode alcançar um valor muito elevado.

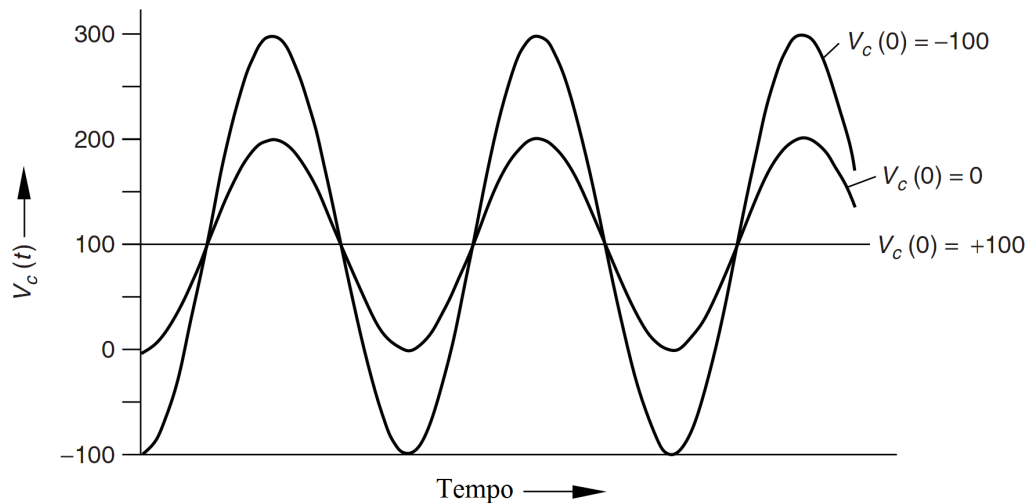


Fig. 5 – Tensão sobre o capacitor para três valores iniciais diferentes da tensão no capacitor. A fonte de tensão CC tem o valor de $E = 100$ V (SLUIS, 2001).

2.2.3 Chaveamento de um circuito RLC

O circuito RLC é representado na Fig. 6. Quando uma fonte de tensão senoidal é chaveada em $t = 0$, a equação que descreve o circuito aplicando a Lei das Tensões de

Kirchhoff é a seguinte:

$$E_{max} \sin(\omega t + \varphi) = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt \quad (2.18)$$

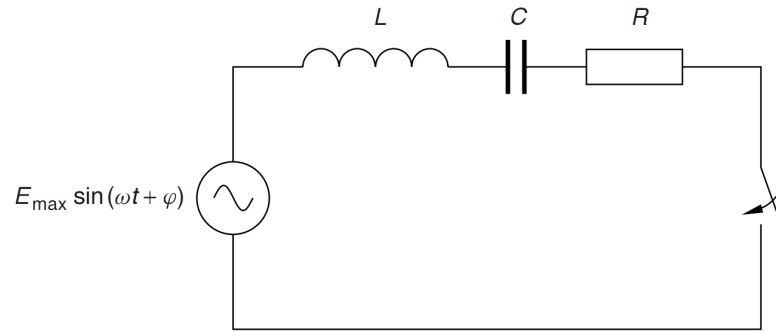


Fig. 6 – Fonte de tensão senoidal chaveada a um circuito RLC série (SLUIS, 2001).

Para encontrar a resposta do transiente, é necessário resolver a equação diferencial homogênea expressada por:

$$0 = \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i \quad (2.19)$$

A solução geral da Equação 2.19 é dada por:

$$i_h(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (2.20)$$

Onde λ_1 e λ_2 são as raízes da equação característica

$$0 = \lambda^2 + \frac{R}{L} \lambda + \frac{1}{LC} \quad (2.21)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2.22)$$

O valor absoluto da expressão $[(R/2L)^2 - (1/LC)]^{1/2}$ é menor do que $R/2L$. Quando $(R/2L)^2 - (1/LC)$ é positivo, as raízes λ_1 e λ_2 são negativas. Quando $(R/2L)^2 - (1/LC)$ é negativo, as raízes λ_1 e λ_2 são complexas, mas a parte real é negativa.

Isso mostra que na solução geral (Equação 2.20) as funções exponenciais serão zero para altos valores de t e a solução particular poderá ser escrita como:

$$i_p(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.23)$$

Nesta solução particular, as constantes A e B devem ser determinadas. A Equação 2.23 é substituída na Equação 2.18 e a solução particular será:

$$i_p(t) = \frac{E_{max}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \sin \left[\omega t + \varphi + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R} \right) \right] \quad (2.24)$$

A solução completa será a soma da solução geral (Equação 2.20) e da solução particular (Equação 2.23).

Três situações diferentes podem ser distinguidas. A primeira é quando $(R/2L)^2 > 1/LC$. Neste caso, a oscilação será *superamortecido* e as raízes da equação característica (2.21) serão reais e negativas. A segunda situação será quando $(R/2L)^2 = 1/LC$, as raízes da equação característica serão iguais e reais, desta maneira, a oscilação será *criticamente amortecida*. A terceira e última situação acontecerá quando $(R/2L)^2 < 1/LC$, as raízes da equação característica serão complexas, então o sistema será *subamortecido*.

As três situações mencionadas podem ser observadas na Fig.7.

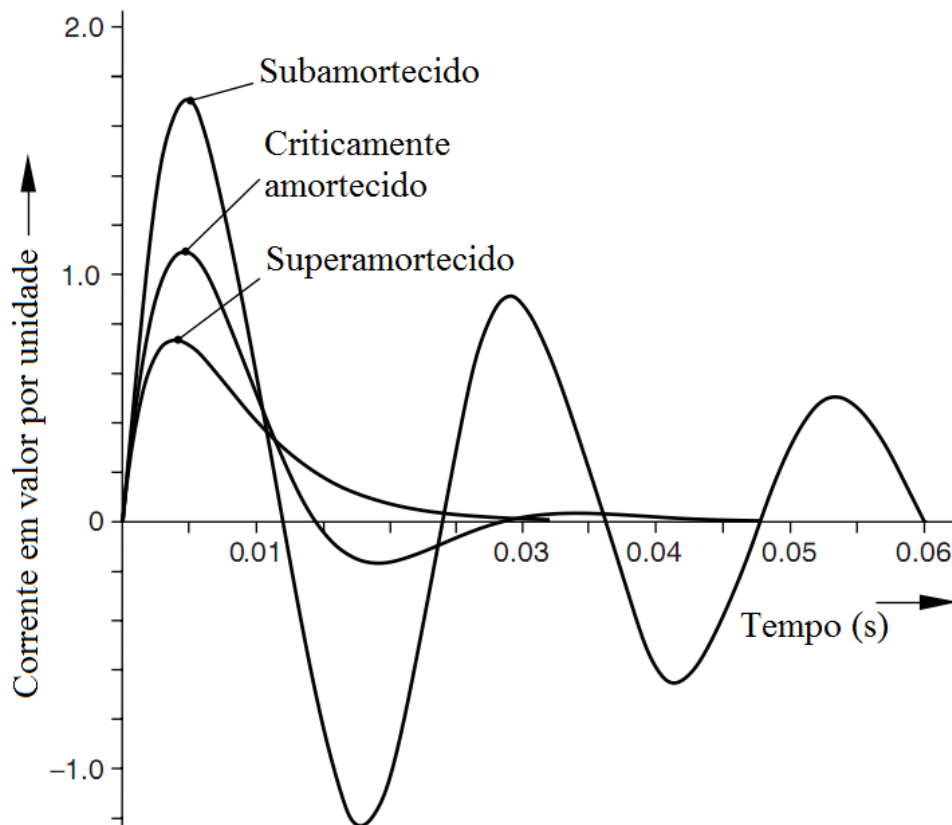


Fig. 7 – Respostas de um circuito RLC série após ocorrido o chaveamento em $t = 0$ (SLUIS, 2001).

2.3 Descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas em linhas de transmissão são as principais causas das faltas. É um evento que pode envolver todas as fases do sistema ou somente uma delas, causando sobretensões nos condutores. As redes aéreas podem ser atingidas por descargas atmosféricas de forma direta ou indireta.

Quando a rede elétrica é atingida diretamente por uma descarga atmosférica, uma tensão elevada se desenvolve e pode superar o nível de isolamento da mesma. Conseqüentemente, ocorre um defeito monopolar ou tripolar. As descargas diretas apresentam uma taxa de crescimento da tensão na faixa de 100 a 2000 kV/ μ s. Uma descarga atmosférica indireta se desenvolve nas proximidades da rede elétrica e, em consequência, é induzida uma determinada tensão nos condutores de fase. Neste caso, as tensões induzidas na rede não superam o valor de 500 kV (FILHO; MAMEDE, 2011).

Uma descarga atmosférica acontece quando a nuvem é carregada negativamente na sua parte inferior e a linha de transmissão é carregada positivamente. Quando a nuvem carregada está flutuando acima da linha de transmissão, uma diferença de potencial surge entre a nuvem e a linha. No entanto, o ar apresenta uma determinada rigidez dielétrica. O aumento da diferença de potencial, denominado gradiente de tensão, poderá atingir um valor que supere a rigidez dielétrica do ar, interposto entre a nuvem e a linha, fazendo com que as cargas elétricas negativas migrem na direção da linha, ocasionando a descarga. Este fenômeno pode ser observado na Fig. 8. Como consequência, a linha de transmissão sofre com elevados níveis de sobrecorrentes e sobretensões.

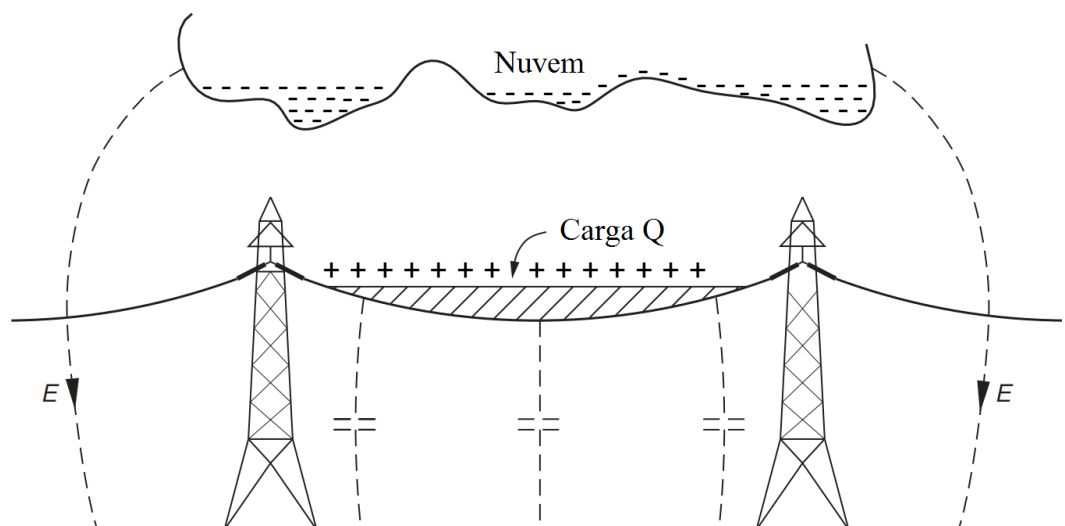


Fig. 8 – Efeito de uma nuvem carregada sob uma linha de transmissão de alta tensão (SLUIS, 2001).

2.4 Correntes de *Inrush* do transformador

As correntes de *Inrush* são provocadas pela energização do transformador. O comportamento dessas correntes dependem e variam de acordo com as características do transformador. Dentre as principais características do transformador, podem-se destacar: a curva de magnetização, a impedância do sistema ao qual está conectado o transformador, as propriedades magnéticas do material do núcleo e o fluxo remanescente do núcleo. A magnitude da corrente de *Inrush* é determinada pela declividade da curva característica de magnetização na região saturada. Para um pequeno aumento de fluxo no núcleo, necessita-se uma grande corrente. Este fenômeno pode ser observado na Fig. 9.

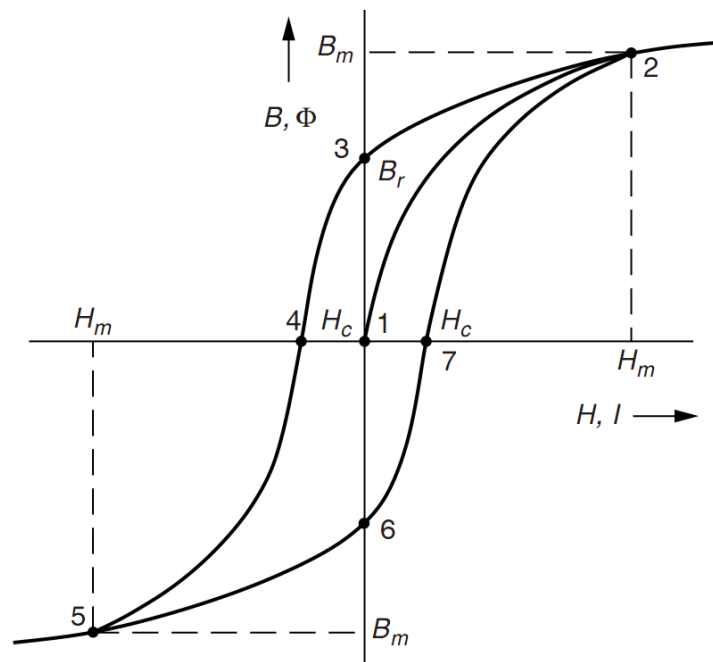


Fig. 9 – Curva de magnetização do transformador (SLUIS, 2001).

Observando a Fig. 9 e partindo do ponto inicial (ponto 1), percebe-se que a densidade de fluxo B segue a curva de magnetização acompanhando o aumento da intensidade do campo magnético H . A qual é aumentada até um valor H_m que é quando a região de saturação é atingida (ponto 2). Quando H é reduzida a zero, o fluxo B não retorna a zero (ponto 3), pois existe uma densidade de fluxo remanescente B_r . Quando H inverte a polaridade e aumenta no sentido negativo e B chega a zero (ponto 4) tem-se o ponto de força coerciva H_c . À medida que H aumenta ainda mais no sentido negativo, o núcleo do transformador fica magnetizado ainda mais com polaridade negativa. No ponto 5, a intensidade de campo magnético é igual a H_m novamente. Quando o fluxo retorna a zero novamente (ponto 6), a magnetização residual B_r reaparece. Quando H inverte no próximo ciclo e aumenta no sentido positivo, o fluxo B assume valor zero e a força coercitiva H_c é presenciada novamente. Com um novo aumento do fluxo, o núcleo do transformador

atinge a saturação com a polaridade inicial.

Quando um transformador é desconectado do sistema, o seu núcleo permanece com um fluxo residual B_r . Posteriormente, quando o transformador é conectado novamente ao sistema em um instante em que a polaridade da tensão do sistema é a mesma polaridade do fluxo residual B_r , a densidade de fluxo total no núcleo será $B_m + B_r$. Desta maneira, o núcleo é forçado para a saturação e o transformador drena um alto valor de corrente do sistema. Portanto, a corrente de *Inrush* do transformador é assimétrica e também contém uma componente DC que leva alguns segundos para desaparecer. Isso pode ser observado na Fig. 10.

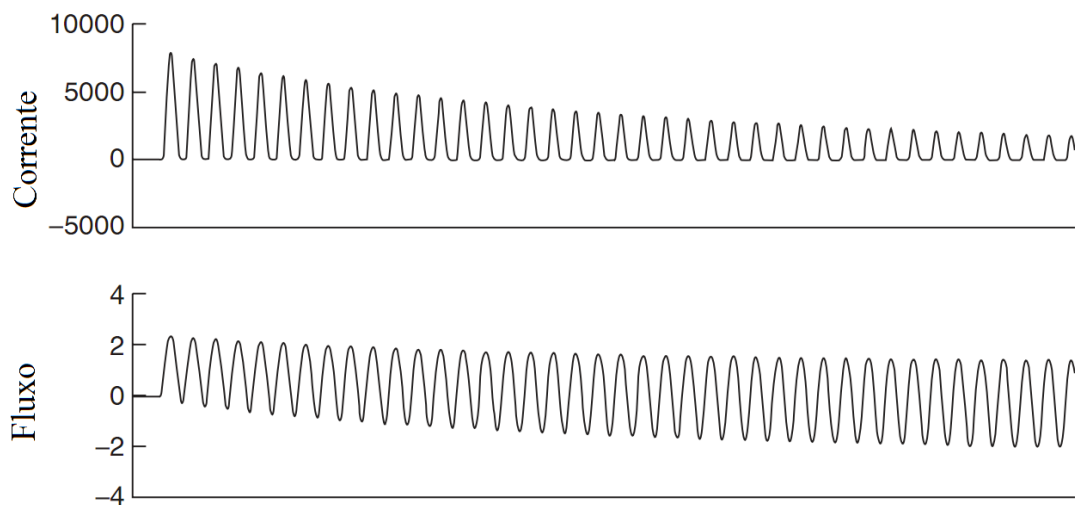


Fig. 10 – Corrente inrush do transformador e o fluxo no núcleo (SLUIS, 2001).

2.5 Curto-circuito

O curto-circuito consiste em um contato entre condutores sob potenciais diferentes. Tal contato pode ser direto (metálico) ou indireto (através de arco voltaico). Os curtos-circuitos são geralmente chamados de defeitos ou faltas. Além disso, ocorrem de maneira aleatória nos sistemas de potência. Suas consequências podem ser extremamente danosas ao sistema, se não forem eliminados pelos dispositivos de proteção. Normalmente, devem ser limitados entre 50 e 1000 ms. Para tanto, os dispositivos de proteção devem ser extremamente rápidos e os equipamentos de manobra, no caso os disjuntores e religadores, devem ter capacidade adequada para operar em condições extremas de corrente (FILHO; MAMEDE, 2011).

O estudo de curto-circuito permite o dimensionamento de diversos componentes do sistema, quando os mesmos estiverem susceptíveis a efeitos térmicos provenientes das correntes de curto-circuito. Além disso, possibilita a seleção adequada de disjuntores e

permite adequar a coordenação de relés de proteção. Também, possibilita a especificação de pára-raios que suportem uma descarga atmosférica, por exemplo.

Os curtos-circuitos podem ser classificados em quatro categorias distintas. São elas:

1. Curto-circuito trifásico ou simétrico (3ϕ ou $3\phi - g$)

Este tipo de curto-circuito envolve as 3 fases e não provoca desequilíbrio no sistema. Ou seja, admite-se que todos os condutores da rede conduzem o mesmo valor eficaz da corrente de curto. Seu cálculo pode ser efetuado por fase, considerando apenas o circuito equivalente de sequência positiva, sendo indiferente se o curto envolve ou não o condutor neutro ou a terra.

2. Curto-circuito bifásico (2ϕ)

É um curto assimétrico, ou seja, desequilibrado, envolvendo duas fases do sistema. Seu cálculo é realizado com o uso de componentes simétricas.

3. Curto-circuito bifásico-terra ($2\phi - g$)

Também é assimétrico, envolvendo contato com a terra e duas fases do sistema.

4. Curto-circuito monofásico (1ϕ)

Curto assimétrico, envolvendo uma das fases do sistema e a terra.

Os tipos de curtos-circuitos podem ser observados na Fig. 11.

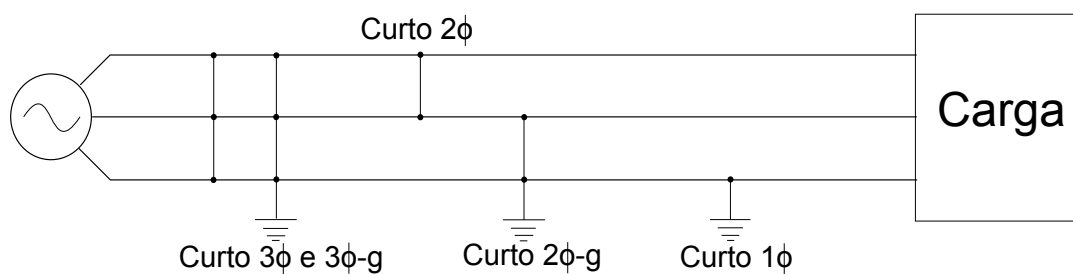


Fig. 11 – Tipos de curtos-circuitos.

Uma corrente de curto-circuito é simétrica quando suas envoltórias são simétricas em relação ao eixo zero, conforme visto na Fig. 12.

Uma corrente é dita assimétrica quando não existe simetria entre suas envoltórias em relação ao eixo zero, conforme representado na Fig. 13.

A corrente de curto-circuito é simétrica quando o curto ocorre no instante em que a tensão da fonte é máxima. Por outro lado, ela é totalmente assimétrica quando a falta ocorre no instante em que a tensão da fonte é nula. Na prática, as correntes de curto-circuito costumam ser parcialmente assimétricas, conforme a Fig. 14.

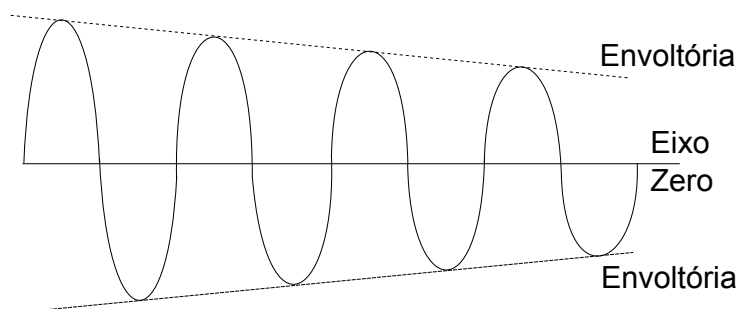


Fig. 12 – Forma de onda da corrente de curto-circuito simétrica e suas envoltórias.

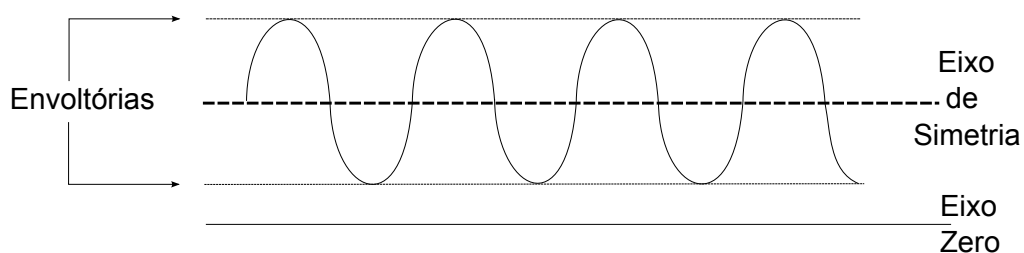


Fig. 13 – Corrente assimétrica de curto-circuito.

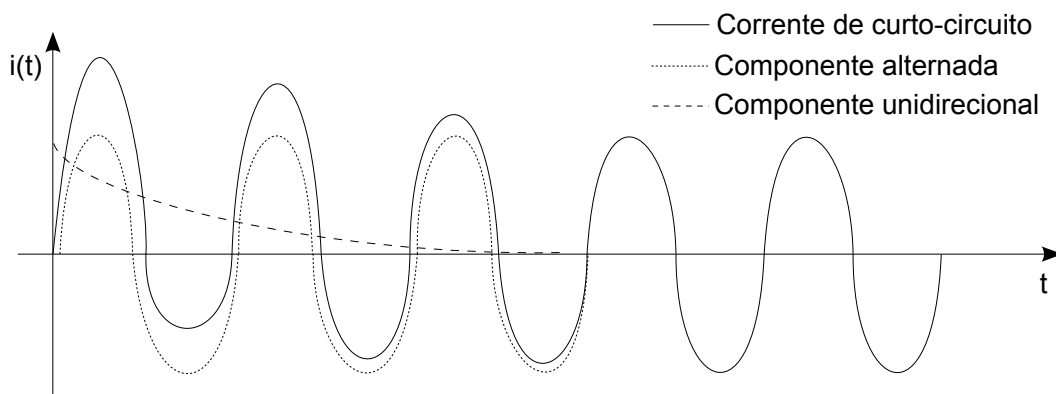


Fig. 14 – Corrente de curto-circuito.

Vale ressaltar, os sistemas de potência a reatância indutiva é muito maior do que a resistência, por isso, a corrente de curto-circuito está aproximadamente 90° atrasada em relação a tensão da fonte. O ângulo da corrente de curto-circuito é determinado pela relação X/R do circuito, que é predominantemente indutivo.

3 Proteção dos Sistemas Elétricos

Frequentemente, os sistemas elétricos de potência estão expostos à falhas que resultam em interrupções no fornecimento de energia. Essas falhas podem ser causadas tanto por defeitos nos componentes do sistema, como por eventos externos, dentre os quais podem-se citar: descargas atmosféricas, vendavais e queimadas. Desta forma, para que o SEP possa operar de forma segura e com o maior grau de confiabilidade possível, é necessária a utilização de um conjunto de proteções, cada uma específica para um determinado evento.

Neste trabalho, são abordados fenômenos que causam sobrecorrentes e sobretensões no sistema. Sendo assim, baseando-se em Mamede (2001), são apresentados os diferentes tipos de relés de proteção e suas respectivas lógicas de atuação.

3.1 Relés de proteção

Para um sistema de proteção ter um bom desempenho, o mesmo deve atender a alguns critérios como: seletividade, zonas de atuação, velocidade, sensibilidade e confiabilidade.

A seletividade é uma técnica utilizada na qual se estabelece que somente o elemento de proteção mais próximo da falta deverá atuar e desconectar a parte defeituosa do sistema. Já a zona de atuação, serve para designar se a ocorrência da falta é interna ou externa à zona protegida pelo dispositivo e, assim, atuar de maneira correta e eficaz. Além disso, as propriedades de velocidade e sensibilidade, definem um tempo mínimo de atuação do elemento protetor, bem como a capacidade de reconhecimento com precisão da faixa dos valores indicados para operação e não operação do elemento protetor. Por fim, um dispositivo de proteção deve atender à propriedade da confiabilidade, cumprindo com segurança e exatidão as suas funções.

Os relés vem acompanhando a evolução tecnológica desde que surgiu o primeiro dispositivo de proteção eletromecânico em 1901. Constava de um relé de proteção de sobrecorrente do tipo indução. Logo após, em 1908 foi aprimorada a proteção diferencial de corrente, seguindo-se em 1910, o desenvolvimento das proteções direcionais. Apenas duas décadas mais tarde, por volta de 1930, é que foi desenvolvida a proteção de distância. Ainda, na década de 1930, apareceram os primeiros relés desenvolvidos com tecnologia eletrônica. Porém, estes dispositivos não alcançaram boa reputação devido às suas sucessivas falhas. Já na década de 1980, a microeletrônica se encontrava em crescimento acelerado, foi aí que surgiram os primeiros relés utilizando tecnologia digital. Estes, por sua vez, muito mais

confiáveis e multifuncionais, cada vez mais difundidos na área da proteção de sistemas elétricos.

3.1.1 Relé eletromecânico

O funcionamento de um relé eletromecânico está relacionado com as forças eletromagnéticas que atuam sob os materiais que compõe o dispositivo. A força eletromagnética provoca movimentos mecânicos que deslocam uma peça móvel do circuito, fechando os contatos correspondentes, deste modo, acionando o disjuntor. O relé eletromecânico pode atuar por indução ou atração eletromagnética. Na Fig. 15 está representado um relé do tipo alavanca. Este tipo de relé funciona por meio de atração eletromagnética.

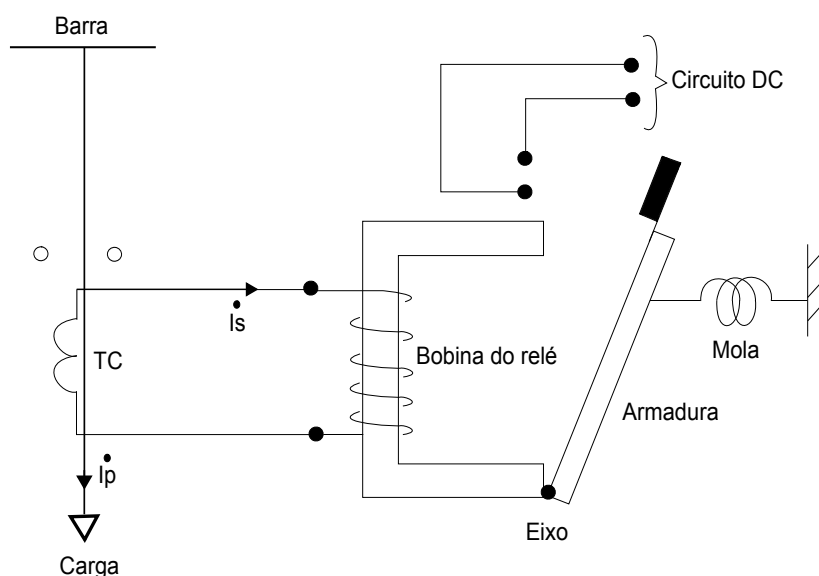


Fig. 15 – Relé de alavanca.

Na ocorrência de um evento anormal no sistema, uma corrente circula pelas bobinas do relé que está conectada em paralelo com o Transformador de Corrente. A circulação de corrente pela bobina induz um fluxo magnético no núcleo do material relacionado. Este, por sua vez, passa a atuar como um eletro-ímã e sua força eletromagnética tenderá a atrair a armadura. Então, os contatos são acoplados e um sinal de abertura é enviado ao disjuntor.

Na Fig. 16, pode ser observado um relé de disco de indução. Seu princípio de funcionamento é baseado na construção de um material ferro-magnético com um entreferro onde é inserido um disco. O entreferro é responsável pelo torque de acionamento do disco. O disco de indução possui um contato móvel, que, com movimento de rotação, atua sobre um contato fixo, fechando o circuito de controle e acionando o disjuntor.

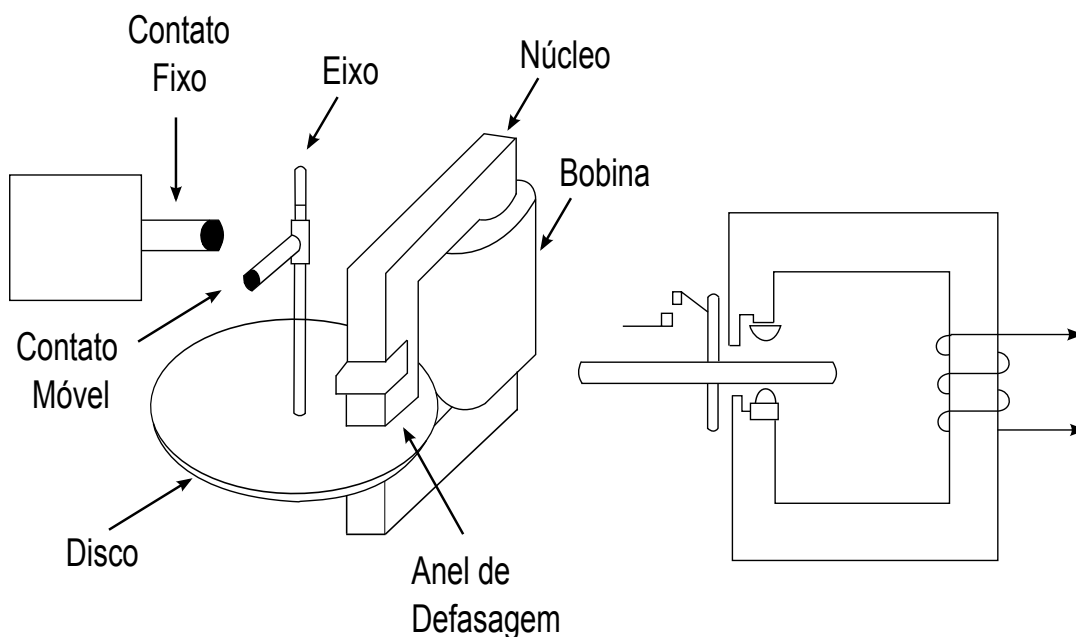


Fig. 16 – Relé de disco de indução.

3.1.2 Relé eletrônico

O relé eletrônico também pode ser chamado de relé estático, pois não há nenhum movimento mecânico presente neste dispositivo. Apresentam dimensões mais reduzidas do que os relés eletromecânicos. São constituídos de circuitos integrados que se destinam a cada função a ser realizada. Os ajustes de corrente, tensão e tempo de acionamento são efetuados pela mudança física no parâmetro de algum componente, através de diais fixados na parte frontal do relé. Suas principais vantagens são o baixo consumo de potência das fontes de alimentação (Transformadores de Corrente e Potencial), além de demonstrarem alta precisão e terem seus ajustes realizados de forma relativamente simples. Além disso, apresentam alta velocidade de operação.

3.1.3 Relé digital numérico

São desenvolvidos através de microprocessadores de alta velocidade. Operam através de algoritmos que processam as informações que chegam pelos transformadores de instrumentação (tensão e corrente). São capazes de simular todos os relés existentes em um só equipamento. Atuam por meio de contatos externos comandados pelo processo de avaliação microprocessado do relé.

Além da proteção, desempenham funções de comunicação, medidas elétricas, controle, sinalização e acesso remoto. Os relés digitais inovaram e revolucionaram os esquemas

de proteção, oferecendo vantagens que outros dispositivos de proteção antecessores não oferecem. Dentre as principais vantagens, destacam-se:

- Pequeno consumo de energia, reduzindo a capacidade dos transformadores de corrente;
- Elevada confiabilidade e precisão;
- Possibilidade de serem ajustados à distância e alta segurança operacional;
- Amplas faixas de ajustes.

3.2 Proteção de sobrecorrentes

Sobrecorrentes são os eventos mais comuns que ocorrem nos sistemas elétricos. Também submetem os componentes elétricos aos maiores níveis de desgaste e comprometimento de sua vida útil. As sobrecorrentes, em sua maioria, são causadas por sobrecargas e curtos-circuitos.

Em casos de sobrecargas, as variações da corrente que fluem no sistema são moderadas e, se limitadas no seu módulo e no tempo, não prejudicam os componentes elétricos do sistema. Muitas vezes, o sistema elétrico já é projetado para permitir sobrecargas por tempo limitado, como é o caso dos transformadores de potência que, dependendo da carga anterior à sobrecarga, podem suportá-la por um longo período de tempo. Também há sobrecargas que devem ser toleradas, já que são inerentes à operação do sistema elétrico. É o caso da partida dos motores elétricos de indução, cuja corrente de partida assume valores muito elevados e que devem ser tolerados pelos dispositivos de proteção dentro dos limites de suportabilidade dos motores e dos demais componentes do sistema elétrico.

Quando o valor da corrente de sobrecarga ultrapassa os limites permitidos de qualquer um dos componentes de um sistema elétrico, o valor da corrente deve ser reduzido ou o equipamento retirado de operação.

Os dispositivos mais utilizados para a proteção contra os eventos de sobrecarga são os relés térmicos. Também são utilizados outros tipos de relés: eletromecânicos, eletrônicos ou digitais com temporizações moderadas.

Em casos de curtos-circuitos, a corrente sofre variações extremas em sua amplitude. Por isso, devem ser extintas de maneira muito rápida, pois podem causar danos severos aos componentes do restante do sistema. Enquanto os tempos permitidos nos eventos de sobrecarga podem chegar a vários segundos, os tempos permitidos para a duração de um curto-circuito não devem superar os 2 segundos. Normalmente, devem ser limitados entre 50 e 1000 ms. Sendo assim, os dispositivos de proteção devem atuar com alta velocidade e os equipamentos de manobra (disjuntores e religadores), além de serem capazes de operar em condições extremas de corrente.

Os equipamentos de proteção devem possuir as duas seguintes características básicas de interrupção das correntes de curto-circuito:

1. Capacidade de interrupção

É a corrente máxima que o equipamento de manobra deve ser capaz de interromper em condições definidas por documentos normativos e está relacionada à tensão, à frequência natural do sistema, à relação X/R, ao ciclo de operação.

2. Capacidade de fechamento em curto-circuito

Os equipamentos de manobra, a princípio, devem ter o mesmo valor da capacidade de fechamento em curto-circuito do que a capacidade de interrupção. Em casos específicos, a capacidade de fechamento em curto-circuito deve ser superior à capacidade de interrupção.

Os dispositivos mais utilizados para a proteção contra os eventos de curto-circuito em sistemas de potência são os relés e podem ser eletromecânicos, eletrônicos e digitais, todos eles graduados com temporização muito pequenas.

3.3 Proteção de sobretensões

As sobretensões são tensões transitórias, variáveis com o tempo, cujo valor máximo é superior ao valor de pico das tensões máximas de operação do sistema. As sobretensões podem ser de origem interna ou externa ao sistema. As sobretensões de origem externa são originadas fora do sistema, sendo as descargas atmosféricas a principal causa. Já as sobretensões de origem interna, são causadas por eventos do próprio sistema, como, por exemplo, manobras de disjuntores ou curto-circuitos (ARAUJO; NEVES, 2005).

Os sistemas elétricos de potência tem como limite a tensão máxima de operação com que podem operar durante a ocorrência de uma falta. Até o regime permanente ser restabelecido, o limite de tensão não pode superar o valor de 110% da tensão nominal. Se o limite estipulado for superado, os relés de sobretensão, de atuação instantânea e temporizada, devem ter os seus dispositivos adequados de proteção atuando sobre os disjuntores. As principais causas das sobretensões nos sistemas elétricos são as descargas atmosféricas, chaveamentos e defeitos monopolares.

Para que se obtenha um esquema eficiente de proteção contra sobretensões, é preciso conciliar a integridade dos equipamentos sem afetar o fornecimento de energia de forma desnecessária. Desta forma, deve-se assegurar a proteção dos equipamentos sujeitos a sobretensões, de modo que os mesmos não necessitem ser desconectados do sistema após a ocorrência do evento. Em um sistema de geração e transmissão, a maior sobretensão está localizada no ponto em que ocorre o evento. À medida que se encaminha para o sentido da fonte, o nível de sobretensão decresce.

Para se obter uma proteção adequada contra sobretensões, são citados alguns critérios que devem ser seguidos:

- Desconectar as fontes de geração mais próximas do ponto em que ocorreu a sobretensão;
- Desconectar os bancos de capacitores;
- Bloquear o religamento automático de linhas de transmissão;
- Ajustar a unidade temporizada dos relés de proteção contra sobretensão de transformadores de potência;
- Os relés instantâneos devem ser ajustados com valores iguais ou superiores 120% da tensão nominal;
- Os relés de proteção contra sobretensões devem ser ajustados com valores iguais ou superiores a 115% da tensão nominal, deixando para os reguladores de tensão e comutadores de tapes a tarefa de reduzir a tensão ao nível máximo de 110% do valor nominal.

4 Desenvolvimento

4.1 Metodologia

A simulação computacional de eventos transitórios ocorridos em determinados pontos da rede tem enorme importância no planejamento, projeto e exploração do sistema. Isso ocorre por permitir antever as consequências dos defeitos simulados, possibilitando a tomada das medidas necessárias para minimizar essas consequências, com a mínima perturbação possível no sistema. Isto inclui, não só a colocação e regulação de dispositivos que promovam a interrupção dos circuitos defeituosos, mas, também, garantam que todos os componentes da rede percorridos pelas correntes de defeito possam suportar os seus efeitos enquanto elas persistirem.

Para obtenção dos sinais utilizados para avaliação da metodologia de detecção e classificação de transiórios, um sistema elétrico de potência composto de uma linha de transmissão de 230 kV com 100 km de extensão, o qual interliga duas barras, sendo uma de geração e a outra de carga, respectivamente, foi simulado no EMTP-ATP. O sistema teste pode ser observado na Fig. 17.

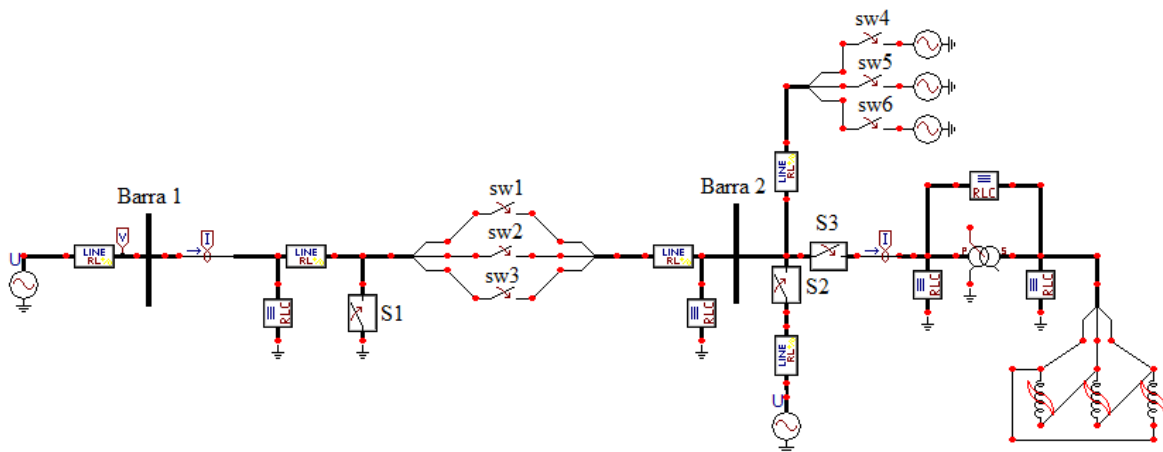


Fig. 17 – Sistema teste utilizado para as simulações.

No sistema da Fig. 17, a chave trifásica “S1” auxilia na simulação de faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas. No momento em que ela é fechada, ocorre um curto-circuito na linha de transmissão. Já as chaves “S2” e “S3”, servem apenas para distinguir qual ramo do sistema está sendo analisado. O fechamento da chave “S2” caracteriza a energização de um bloco de carga, enquanto que o da chave “S3” caracteriza a energização do transformador

com sua respectiva curva de magnetização. A chave “sw1”, quando aberta, representa uma abertura monopolar no sistema. Além disso, as chaves “sw4”, “sw5” e “sw6”, quando fechadas, promovem entradas de cargas no sistema, sendo uma para cada fase.

Cabe ressaltar que as simulações foram realizadas em sistemas com diferentes configurações e parâmetros e que os mesmos comportamentos foram observados. Os parâmetros do sistema teste utilizado estão expostos na Tabela 1, sendo que as impedâncias de sequência zero (Z_{S0}) e sequência positiva (Z_{S1}) das fontes e da linha de transmissão foram adotadas conforme Dos Santos (2013).

Tabela 1 – Parâmetros do sistema utilizados no projeto

Parâmetros do Sistema	
Z_{S0}	$3,681 + j25,515\Omega$
Z_{S1}	$0,819 + j7,757\Omega$
Transformador (T_1)	30 MVA
V_A	230 kV
V_B	$230\angle -30^\circ$
Z_{LT_0}	$0.1841 + j1.2258 \Omega/km$
Z_{LT_1}	$0.041 + j0.3878 \Omega/km$

Os casos foram simulados no *software Eletromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program* (EMTP-ATP) e consistem de curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos em pontos distintos da linha de transmissão, sendo estes localizados em 25%, 50%, 75% e 100% da LT. Ainda, foram simuladas aberturas monopolares, energizações de transformador e entradas de carga no sistema. Todos esses eventos causam transitórios nos sinais de tensão e corrente. Nesse contexto, a finalidade da proposta deste trabalho é detectar e classificar cada transitório simulado. Isto inclui, por exemplo, distinguir um curto-circuito dos demais eventos ocorridos no sistema.

A Fig. 18 apresenta o fluxograma do algoritmo de detecção e classificação de faltas. O algoritmo recebe os sinais de tensão e corrente de cada fase amostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo.

A partir dos dados amostrados são calculadas as funções diferença para cada sinal, conforme as Equações 4.1 e 4.2, onde a primeira representa a função diferença para os sinais de corrente e a segunda, para os sinais de tensão. Essas duas equações são aplicadas para todos os sinais amostrados, sendo que a análise é feita para cada fase e o subíndice “x” representa a fase que está sendo analisada (A, B ou C). A Fig. 19 demonstra como essas funções diferenças são calculadas.

$$del1x(n, 1) = Ix(n, 1) - Ix(n - 1, 1) \quad (4.1)$$

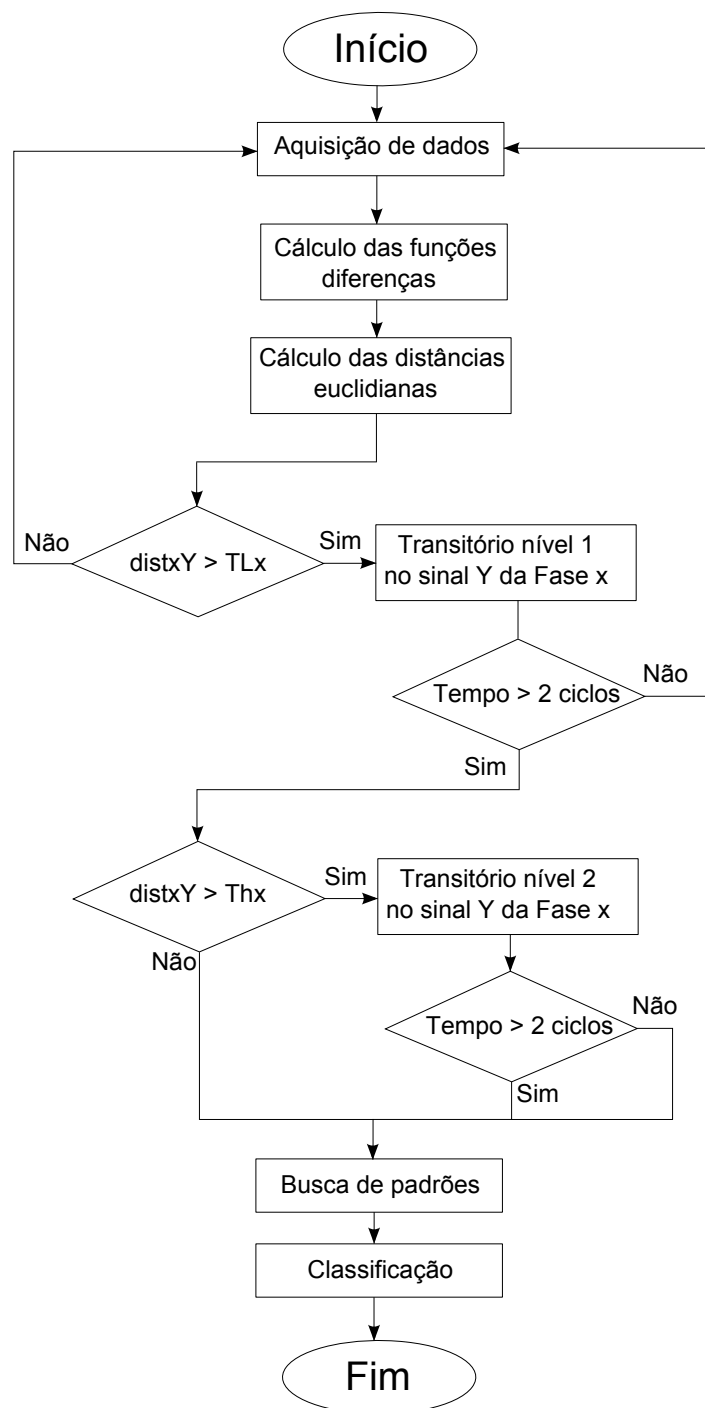


Fig. 18 – Fluxograma do algoritmo de detecção e classificação de transitórios.

$$del2x(n, 1) = Vx(n, 1) - Vx(n - 1, 1) \quad (4.2)$$

Posteriormente, de acordo com Dos Santos (2013), é calculada a distância euclidiana dos pontos resultantes da função transferência do sinal amostrado. A Fig. 20 e as Equações 4.3 e 4.4 deixam a ideia bem clara. Sendo que, a primeira equação representa a distâncias para os sinais de corrente e a segunda, para os sinais de tensão. Novamente, o subíndice

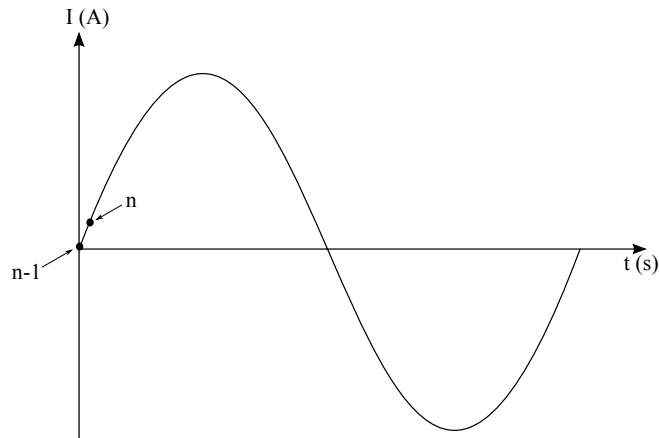


Fig. 19 – Diferença entre os pontos de um sinal de amostragem.

“x” indica qual é a fase que está sendo analisada.

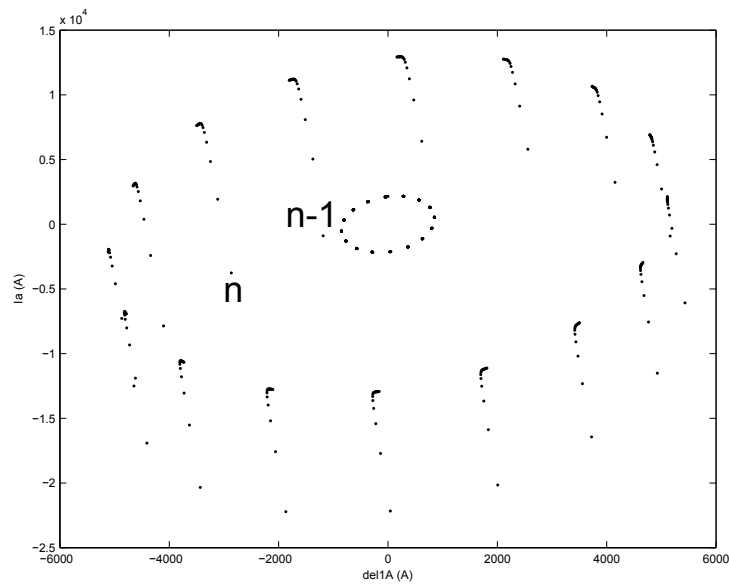


Fig. 20 – Pontos que resultam da função diferença calculada para a fase A de um sinal de corrente.

$$dist1x(n, 1) = \sqrt{(\text{del}1x(n, 1) - \text{del}1x(n - 1, 1))^2 + (Ix(n, 1) - Ix(n - 1, 1))^2} \quad (4.3)$$

$$dist2x(n, 1) = \sqrt{(\text{del}2x(n, 1) - \text{del}2x(n - 1, 1))^2 + (Ix(n, 1) - Ix(n - 1, 1))^2} \quad (4.4)$$

De acordo com a Fig. 20, percebe-se que em regime permanente, ou seja, antes da ocorrência do transitório, os pontos assumem um padrão e circulam em torno da origem

(0,0) de forma bem definida. Logo após a ocorrência do transitório, os pontos saltam para outra região do plano e o padrão com que circulam em torno da origem já não é mais o mesmo.

A detecção do transitório irá acontecer no instante em que o ponto salta do regime permanente para o estado transitório. Quando isso acontecer, obviamente a distância euclidiana entre dois pontos consecutivos sofre um incremento considerável. Então, a mudança brusca do valor da distância entre os pontos é o critério adotado para realizar a detecção.

Após a realização dos cálculos das distâncias euclidianas entre os pontos, são estabelecidos dois níveis de detecção, sendo um nível inferior representado pela função na cor verde e um nível superior representado pela função na cor vermelha, conforme Fig. 21. A função evidenciada na cor azul representa o resultado das distâncias euclidianas no respectivos planos.

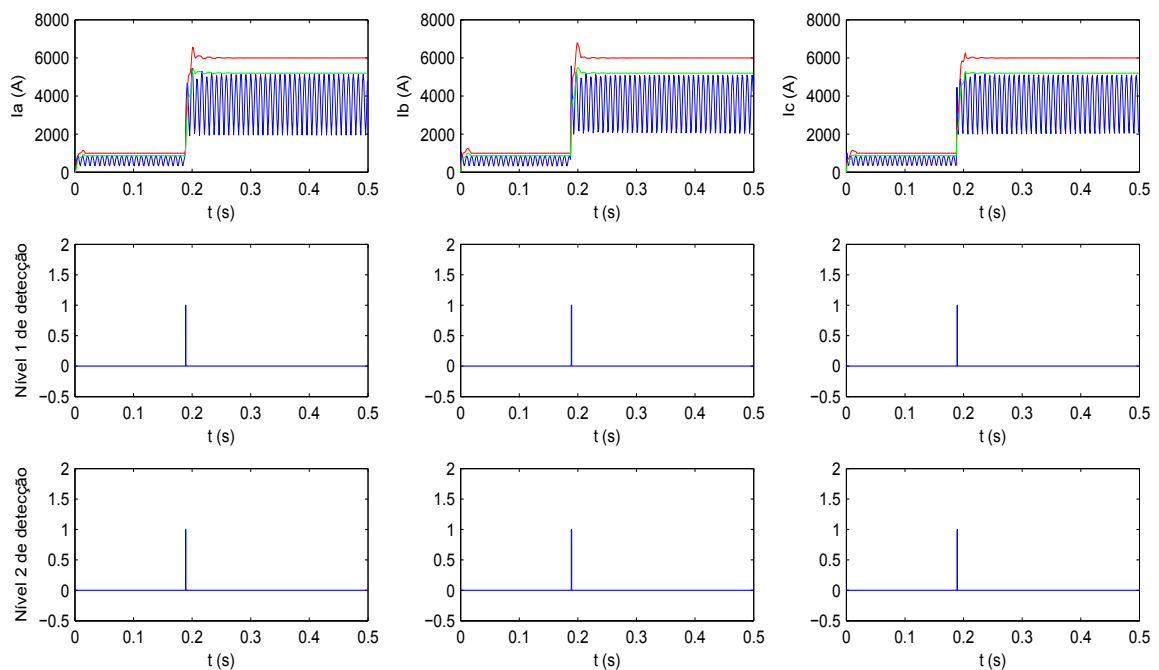


Fig. 21 – Níveis de detecção dos sinais amostrados.

Os níveis de detecção são calculados através da média de um conjunto de contendo 16 valores consecutivos de distância euclidiana, atualizado a cada nova amostra, acrescido da multiplicação do desvio padrão desse mesmo conjunto ponderado por um determinado peso. O nível superior de detecção para os sinais de corrente é estabelecido pela Equação 4.5, enquanto que o nível inferior é dado pela Equação 4.6. Já os níveis superior e inferior para os sinais de tensão são dados pelas Equações 4.7 e 4.8, respectivamente. O subíndice

“x” presente nas expressões, indica qual o sinal de fase que está sendo analisado. Sendo assim, a detecção de um transitório ocorre quando pelo menos um dos níveis de detecção for superado, para um pelo menos um dos sinais processados.

$$Thx(n, 1) = mean(janx(n, :)) + 2 * std(janx(n, :)) \quad (4.5)$$

$$TLx(n, 1) = mean(janx(n, :)) + 1.3 * std(janx(n, :)) \quad (4.6)$$

$$Th2x(n, 1) = mean(jan2x(n, :)) + 2 * std(jan2x(n, :)) \quad (4.7)$$

$$TL2x(n, 1) = mean(jan2x(n, :)) + 1.3 * std(jan2x(n, :)) \quad (4.8)$$

A classificação dos eventos ocorridos no sistema se dá de acordo com os comportamentos dos sinais observados na fase de detecção. O algoritmo aguarda por um tempo de 2 ciclos antes de realizar a classificação. Se neste espaço de tempo o sinal não retornar ao seu nível normal de operação, fica comprovada a ocorrência de um transitório. Quando um dos níveis mencionados anteriormente for ultrapassado, um sinal de nível lógico alto irá ativar uma *flag*, conforme observado na Fig. 21. Cada nível de detecção possui seis *flags*. Para o Nível 1 de detecção são três *flags* para sinais de corrente (uma para cada fase) e mais três para os sinais de tensão. Para o Nível 2 de detecção, são adotados os mesmos critérios.

Para cada fenômeno simulado foram observados padrões, ou seja, cada evento ocorrido no sistema possui um comportamento padrão e isso foi observado em várias simulações realizadas com diferentes configurações e parâmetros de sistema. Esse padrão de comportamento dos sinais, permite criar uma lógica de decisão que irá determinar o que está acontecendo no sistema no momento da ocorrência de um transitório.

Os padrões que foram observados estão representados nas Tabelas 2 à 5. Os “x” que aparecem nas tabelas, representam as *flags* que são ativadas quando um fenômeno anormal é detectado. A partir disso, é realizada a classificação do transitório.

Na Tabela 2, que é onde estão representados os padrões de curto-circuito trifásico, constatou-se que o Nível 2 de detecção para sinais de corrente envolvendo todas as fases sempre foi ultrapassado. Obviamente, o Nível 1 também foi ultrapassado, pois seu limite é menor quando comparado ao segundo. Já para os sinais de tensão, percebe-se que a Fase C foi a mais afetada no Nível 1, sendo que apenas no curto-circuito trifásico em 25% da LT houve um transitório de tensão na fase B.

Já na Tabela 3, onde aparecem os padrões de curto-circuito bifásico, o comportamento foi semelhante ao trifásico. Porém, não foi observado nenhuma detecção de

Tabela 2 – Detecção de curto-circuito 3ϕ

CC 3ϕ	Fases envolvidas	Corrente		Tensão	
		Nível 1	Nível 2	Nível 1	Nível 2
25% da LT	A	x	x		
	B	x	x	x	x
	C	x	x	x	x
50% da LT	A	x	x		
	B	x	x		
	C	x	x	x	x
75% da LT	A	x	x		
	B	x	x		
	C	x	x	x	x
100% da LT	A	x	x		
	B	x	x		
	C	x	x	x	

transitório na fase C para o sinal de corrente, pois o curto-circuito bifásico envolve apenas duas fases. Destaca-se assim, o bom funcionamento da lógica algorítmica implementada. Por outro lado, o comportamento dos sinais de tensão não são os mesmos. Isto é, num evento que envolve apenas duas fases, há um desbalanceamento nos sinais de tensão das três fases. Assim sendo, percebe-se que a Fase C foi novamente a mais afetada.

Tabela 3 – Detecção de curto-circuito 2ϕ

CC 2ϕ	Fases envolvidas	Corrente		Tensão	
		Nível 1	Nível 2	Nível 1	Nível 2
25% da LT	A	x	x		
	B	x	x	x	x
	C			x	
50% da LT	A	x	x		
	B	x	x		
	C			x	
75% da LT	A	x	x		
	B	x	x		
	C			x	
100% da LT	A	x	x		
	B	x	x		
	C			x	

Na ocorrência de um curto-circuito monofásico, que envolve apenas uma das fases do sistema, verificou-se que os dois níveis de detecção para sinais de corrente na Fase A foram ultrapassados, pois esta é exatamente a fase defeituosa. Nas outras duas fases não foram detectadas anomalias. Para os sinais de tensão, constata-se uma maior quantidade de detecções nas Fases B e C, fenômeno que não ocorreu com tanta frequência nos outros dois casos de curtos-circuitos analisados. Os padrões destacados em um curto-circuito monofásico podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Detecção de curto-circuito 1ϕ

CC 1ϕ	Fases envolvidas	Corrente		Tensão	
		Nível 1	Nível 2	Nível 1	Nível 2
25% da LT	A	x	x		
	B			x	
	C			x	
50% da LT	A	x	x		
	B			x	
	C			x	
75% da LT	A	x	x		
	B			x	
	C			x	
100% da LT	A	x	x		
	B				
	C			x	

Para os três casos de curtos-circuitos (monofásico, bifásico e trifásico), verifica-se um padrão bem definido nas detecções de transitórios dos sinais de corrente. Isso permite distinguir os curtos-circuitos de outros eventos causadores de transitórios.

Na Tabela 5, são apresentados os padrões de detecção para o restante dos casos analisados. Numa abertura monopolar, percebe-se a ocorrência de transitórios nos dois níveis de detecção para a tensão da fase defeituosa. Isso significa que quando ocorrer um defeito monopolar, será observado anomalia somente na fase em que o ocorreu o problema. Além disso, a corrente da fase aberta torna-se nula, tornando os valores de distância para a respectiva fase iguais a zero. Na energização de transformador, há a presença de sinais transitórios nos sinais de corrente das três fases, sendo os dois níveis de detecção ultrapassados. Nos sinais de tensão, observa-se a detecção de transitórios apenas no Nível 1 para as fases A e B. Para as entradas de carga, fica evidente o comportamento dos transitórios, sendo que foram verificados distúrbios no primeiro nível de detecção nas fases em que houveram carregamentos.

Tabela 5 – Detecção de transitórios

Tipo do evento	Fases envolvidas	Corrente		Tensão	
		Nível 1	Nível 2	Nível 1	Nível 2
Abertura monopolar	A			x	x
	B				
	C				
Energização de trafo	A	x	x		
	B	x	x	x	
	C	x	x	x	
Entrada carga monofásica	A				
	B				
	C	x			
Entrada carga bifásica	A				
	B	x	x		
	C	x			
Entrada carga trifásica	A	x			
	B	x			
	C	x			

4.2 Análise dos Resultados

4.2.1 Curto-circuito trifásico

Na Fig. 22 e na Fig. 23 são representados os sinais de corrente e tensão provenientes das simulações realizadas para um caso de curto-circuito trifásico no sistema. O tempo exato da ocorrência do curto-circuito foi de 0,18769 s. Este é o caso mais crítico, pois é o momento em que o sinal de tensão passa por zero. Então, a corrente de curto-circuito terá uma amplitude muito elevada.

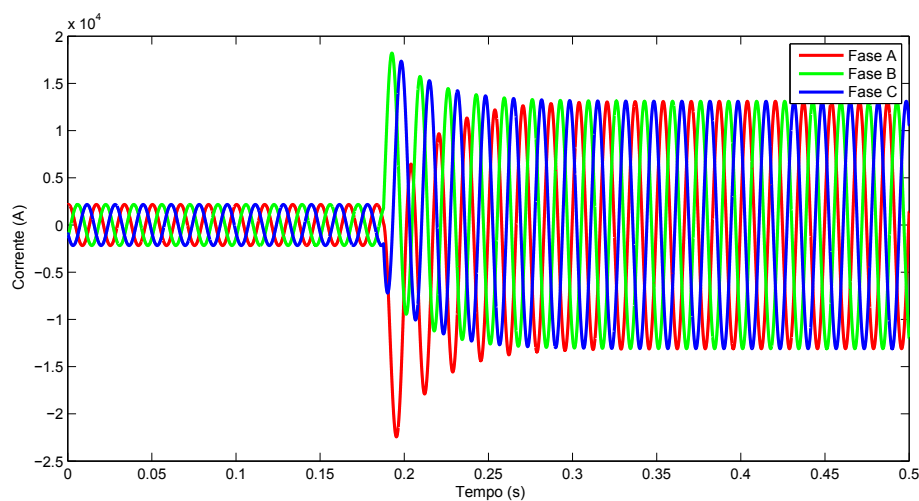


Fig. 22 – Sinais de corrente para um curto-circuito trifásico em 25% da linha de transmissão.

Durante as condições normais de funcionamento, as amplitudes das correntes não

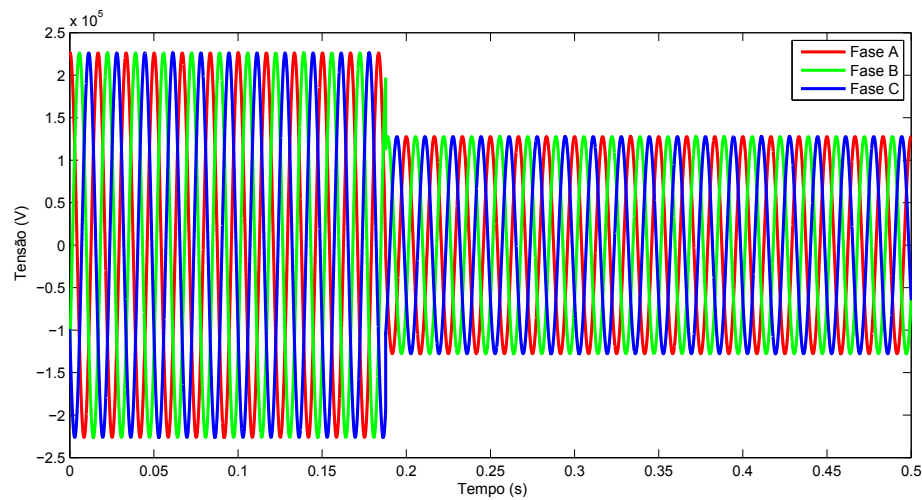


Fig. 23 – Sinais de tensão para um curto-circuito trifásico em 25% da linha de transmissão.

chegam a 2,2 kA, já na ocorrência de um curto-circuito as amplitudes podem alcançar valores de 18,2 kA. O início da falta em 0,18769 s, que é quando a onda de tensão passa por zero e se tem o pior caso de curto-circuito, introduz mudanças bruscas na amplitude e fase dos sinais. As amplitudes das correntes de curto-circuito tendem a diminuir à medida que estes ocorrem mais afastados da barra de geração. Um sinal de falta pode carregar diferentes componentes transitórias, como exponenciais decrescentes ou nível DC (principalmente em sinais de corrente como observado na Fig. 22). Por outro lado, em sinais de tensão se observa um afundamento de tensão (Fig. 23). Estas alterações de amplitude, são utilizadas para detectar o começo de uma falta, bem como realizar a classificação da mesma.

De acordo com a Tabela 2, as detecções de transitórios nos sinais de corrente ocorreram nas três fases, ultrapassando os dois níveis de detecção. Neste caso, o tempo de detecção foi de 0,1886 s. Nos sinais de tensão, ocorreram transitórios nas fases B e C nos dois níveis de detecção. O tempo de detecção foi o mesmo que o observado nos sinais de corrente. Isso pode ser comprovado através das Figs. 24 e 25, respectivamente. O instante de classificação deste evento transitório foi em 0,22194 s, o que caracteriza um tempo total, incluindo detecção e classificação do transitório, igual 33,34 ms.

Para o restante dos casos de curtos-circuitos analisados, sendo eles bifásicos e monofásicos, o comportamento transitório nos sinais de corrente foram semelhantes, observando-se somente alterações nas amplitudes. Além disso, os sinais de tensão observados tiveram um desbalanceamento significativo nas fases A, B e C.

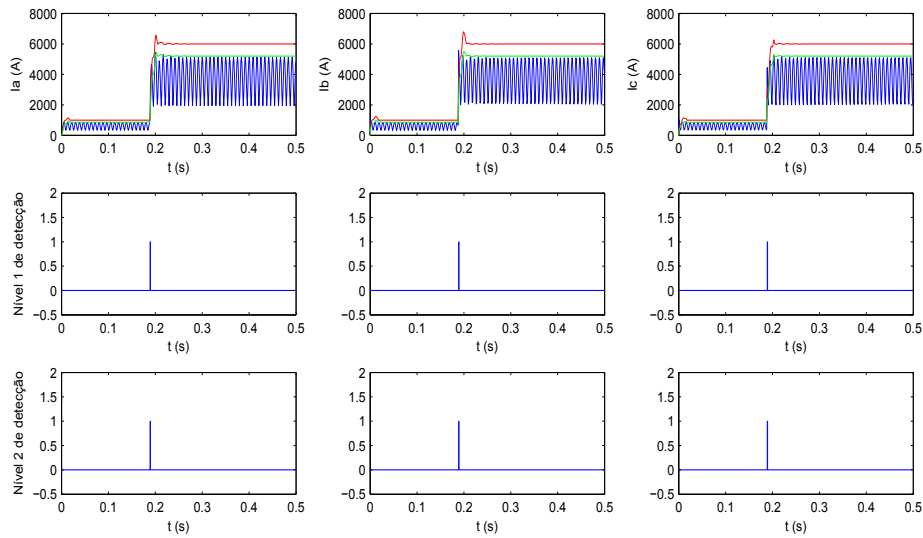


Fig. 24 – Níveis de detecção dos sinais de corrente de um curto-circuito trifásico.

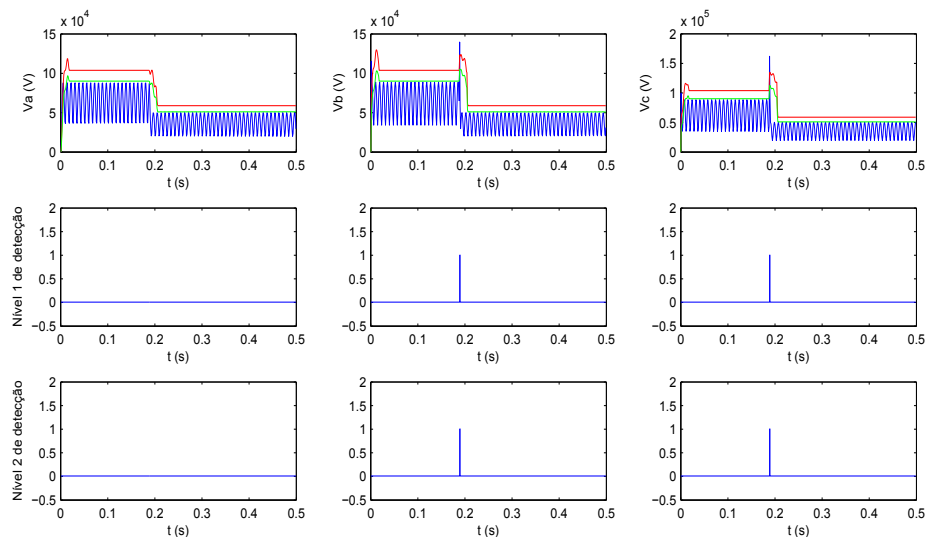


Fig. 25 – Níveis de detecção dos sinais de tensão de um curto-circuito trifásico.

4.2.2 Curto-circuito bifásico

Na Fig. 26 e na Fig. 27 são representados os sinais de corrente e tensão provenientes das simulações realizadas para um caso de curto-circuito bifásico no sistema.

Durante o regime permanente, o comportamento dos sinais de corrente e tensão permanecem os mesmos. Na ocorrência do curto-circuito bifásico, percebe-se que há sobrecorrentes nas fases que são afetadas pelo evento. O início do transitório ocorre no mesmo instante de tempo do que o curto-circuito trifásico. Neste caso, foi observado que o nível de sobrecorrente alcançou o valor de $22,44kA$ no semiciclo negativo.

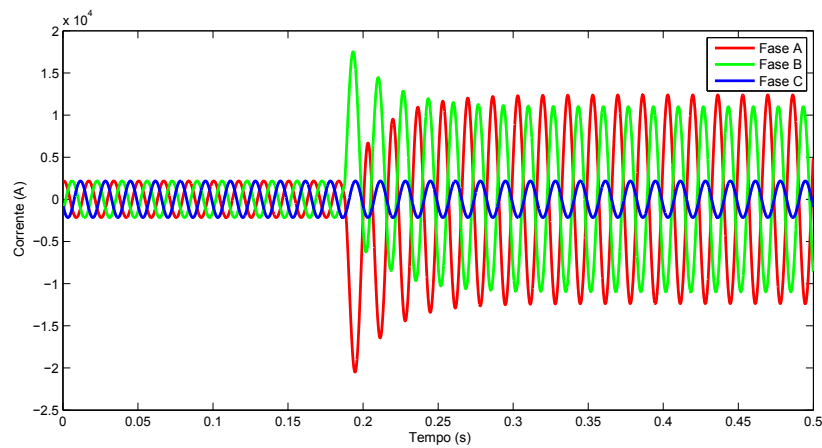


Fig. 26 – Sinais de corrente para um curto-circuito bifásico em 25% da linha de transmissão.

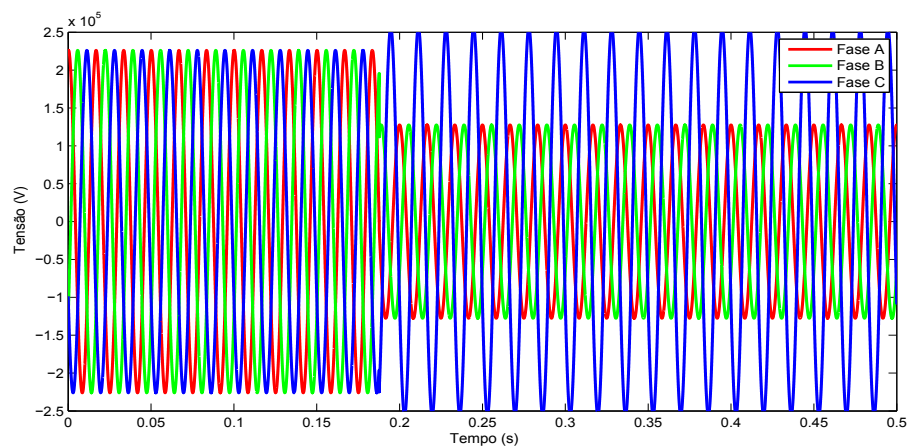


Fig. 27 – Sinais de tensão para um curto-circuito bifásico em 25% da linha de transmissão.

Observando a Fig. 27, detecta-se um afundamento de tensão das fases envolvidas no curto-circuito e a fase restante não foi afetada. Desta forma, as tensões e correntes encontram-se completamente desbalanceadas.

Na Tabela 3, onde estão representados os padrões de comportamentos de curtos-circuitos bifásicos, observa-se que as detecções de transitórios nos sinais de corrente ocorreram nas fases A e B, ultrapassando os dois níveis de detecção. Já para os sinais de tensão, foram observados transitórios na fase B, ultrapassando os dois níveis de detecção. Na fase C foi detectado um transitório de tensão apenas no primeiro nível. Isso pode ser comprovado através das Figs. 28 e 29, respectivamente.

Neste caso, o transitório foi detectado no instante 0,1886 s, sendo classificado no instante 0,22194 s.

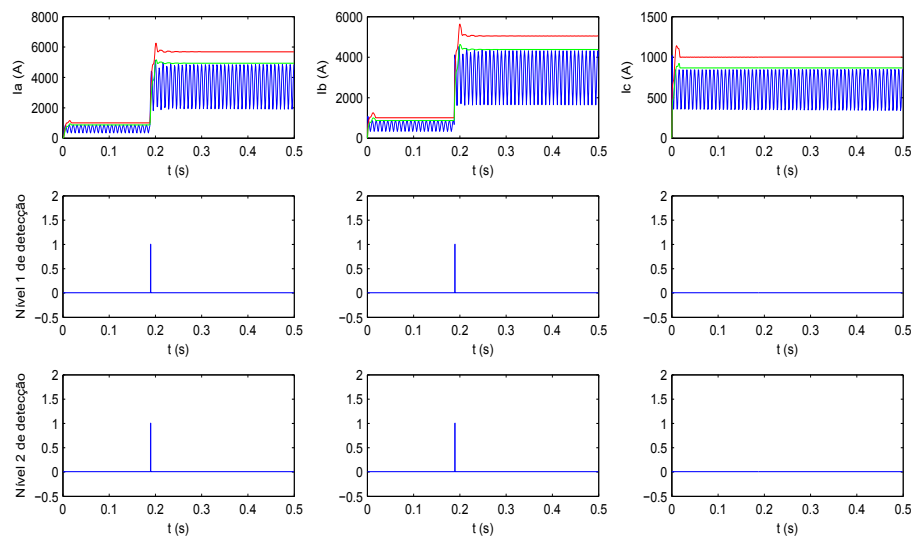


Fig. 28 – Níveis de detecção dos sinais de corrente de um curto-circuito bifásico.

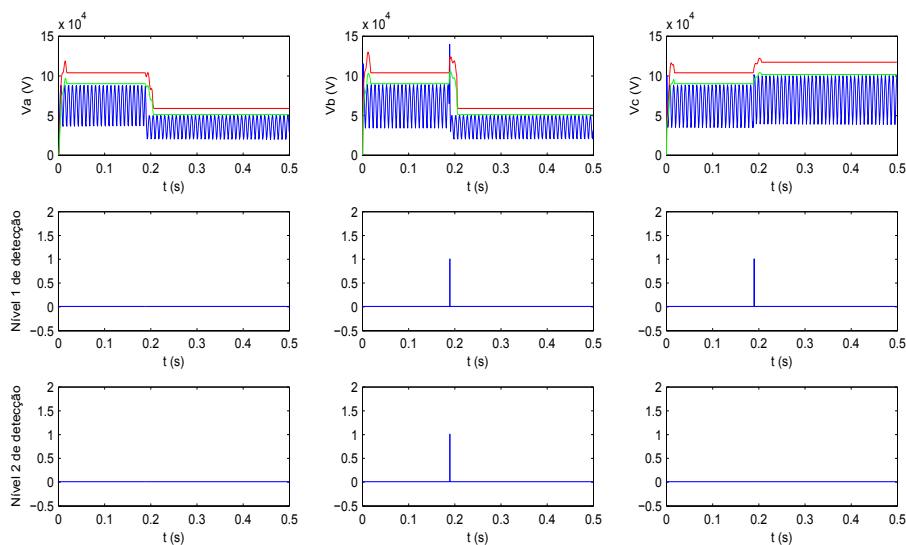


Fig. 29 – Níveis de detecção dos sinais de tensão de um curto-circuito bifásico.

4.2.3 Curto-circuito monofásico

Na Fig. 30 e na Fig. 31 são representados os sinais de corrente e tensão provenientes das simulações realizadas para um caso de curto-circuito monofásico no sistema.

Em um curto-circuito monofásico, o nível de sobrecorrente foi o menor registrado, chegando ao valor de $12,81kA$ no pico do semi-ciclo negativo logo após a ocorrência da falta. Analisando os sinais de tensão, detecta-se um afundamento do sinal da fase envolvida, enquanto que nas outras duas, percebe-se níveis de sobretensão.

Na fase de detecção, foram constatados transitórios nos sinais de corrente apenas na fase A, sendo que os dois níveis de detecção foram ultrapassados. Já para os sinais de

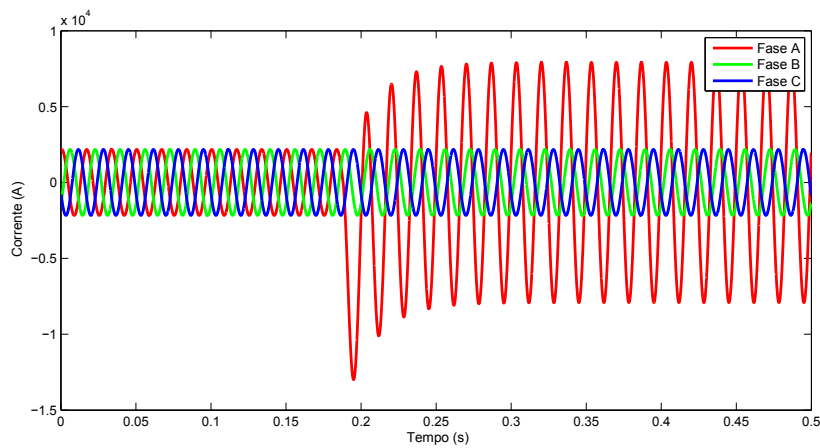


Fig. 30 – Sinais de corrente para um curto-circuito monofásico em 25% da linha de transmissão.

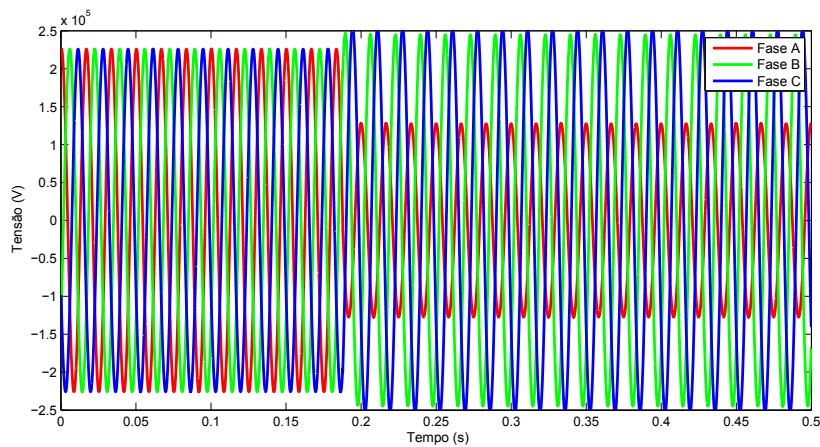


Fig. 31 – Sinais de tensão para um curto-circuito monofásico em 25% da linha de transmissão.

tensão, foram observados transitórios nas fases B e C, ultrapassando apenas o primeiro nível de detecção. Os padrões de detecção podem ser observados na Tabela 4 e comprovados através das Figs. 32 e 33. O instante de detecção do transitório de corrente para este caso foi de 0,1886s. Enquanto que, o tempo de detecção dos transitórios de tensão, foi de 0,19381s. O curto foi classificado no instante 0,22194 s.

Ainda, constata-se que para todos os casos de curtos-circuitos analisados há a presença da componente DC no sinal. Essa componente está diretamente relacionada com os parâmetros X/R do sistema.

4.2.4 Energização de transformador

Na Fig. 34 estão representados os sinais de correntes trifásicos no momento de energização do transformador.

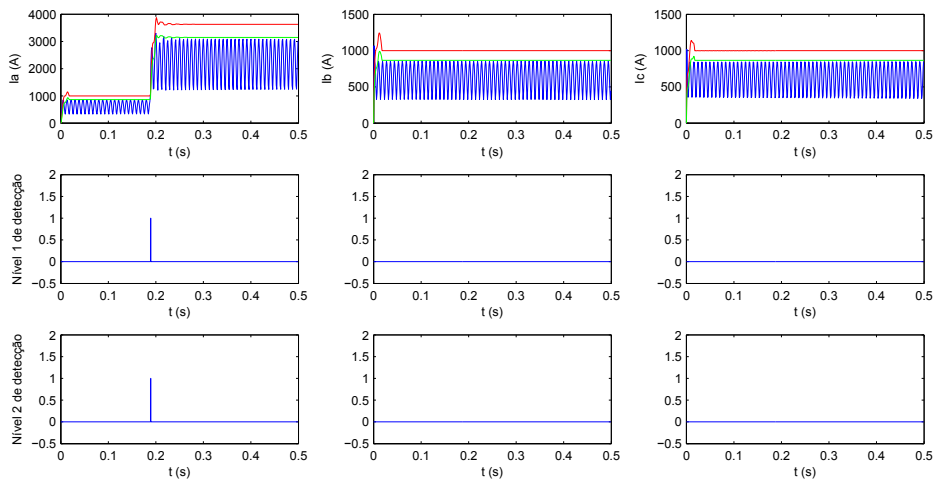


Fig. 32 – Níveis de detecção dos sinais de corrente de um curto-circuito monofásico.

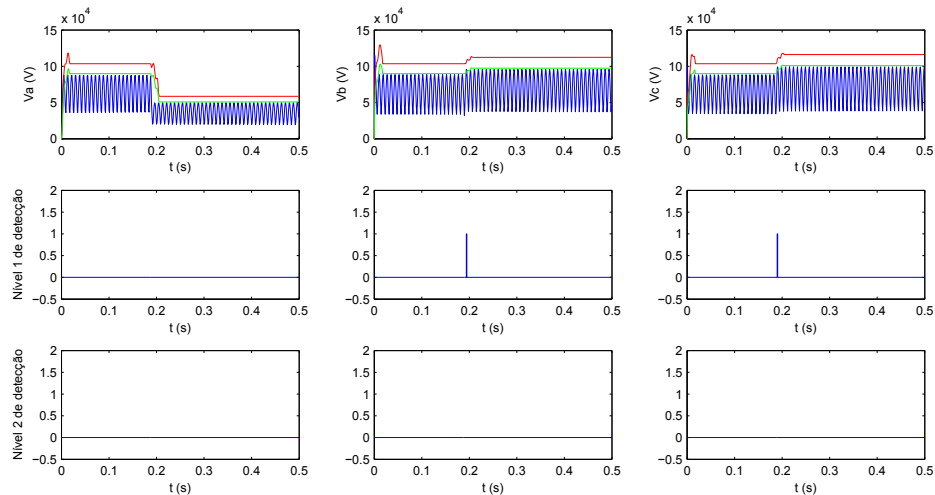


Fig. 33 – Níveis de detecção dos sinais de tensão de um curto-circuito monofásico.

O fenômeno observado mostrou que, quando um transformador é conectado à rede, há o aparecimento de uma grande corrente transitória de magnetização. O efeito da referida corrente é causar momentaneamente uma queda de tensão alimentadora. O valor atingido nesse regime transitório depende de fatores como o ponto do ciclo da tensão, no qual a chave fecha para a energização do transformador, bem como, das condições magnéticas do núcleo, incluindo a intensidade e polaridade do fluxo residual. Nas simulações realizadas, isto é representado pela inserção da curva de magnetização do transformador.

De acordo com os padrões de detecção para energização de transformador observados na Tabela 5, ocorreram transitórios nos sinais de corrente das três fases, ultrapassando os dois níveis de detecção. Também, foram observados transitórios nas fases B e C dos sinais de tensão, porém, foram detectados apenas no nível 1. Isso pode ser comprovado através das Figs. 35 e 36, respectivamente.

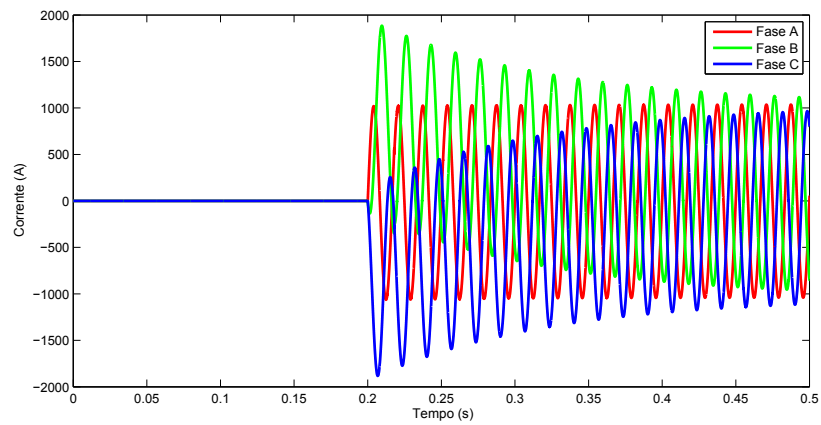


Fig. 34 – Sinais de corrente para a energização de uma transformador em uma linha de transmissão.

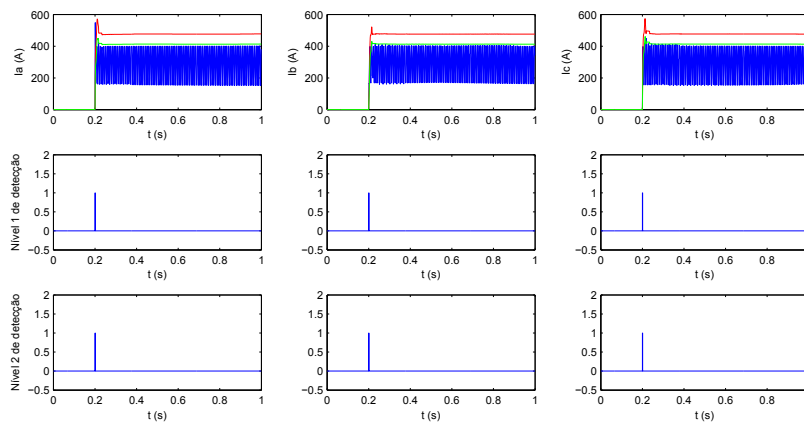


Fig. 35 – Níveis de detecção dos sinais de corrente para a energização de transformador.

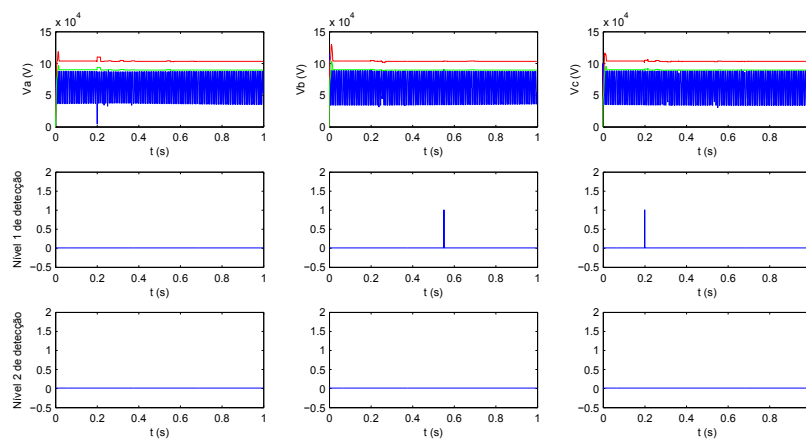


Fig. 36 – Níveis de detecção dos sinais de tensão para a energização de transformador.

É importante salientar que, a energização do transformador ocorreu no tempo 0,2 s da simulação. Desta maneira, o instante de detecção dos transitórios de corrente foi de

0,20006 s e para os transitórios de tensão foi de 0,2011 s. O evento foi classificado no instante 0,2334 s.

4.2.5 Abertura monopolar

Numa abertura monopolar (Fig. 37), ocorrida no tempo de 0,2s, a corrente da fase com defeito cai para zero instantaneamente, enquanto que nas outras duas fases verifica-se um afundamento no nível de corrente.

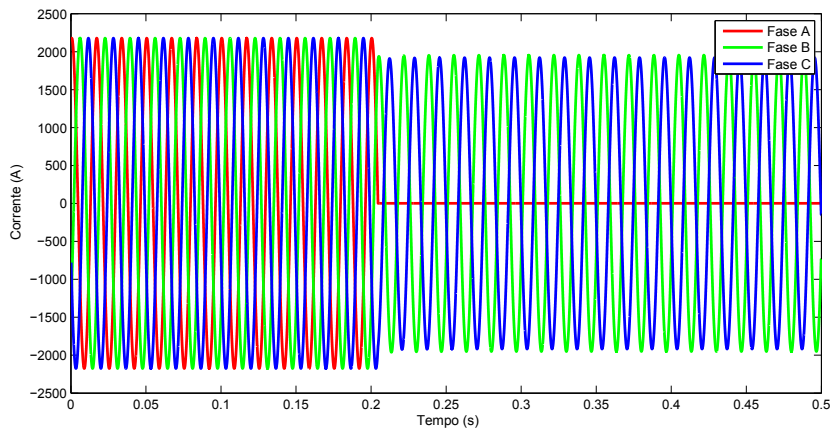


Fig. 37 – Sinais de corrente para uma abertura monopolar no sistema.

Já para os sinais de tensão num defeito monopolar (Fig. 38), observam-se transitórios de alta frequência nas três fases, sendo que na fase defeituosa esses distúrbios aparecem com maior significância.

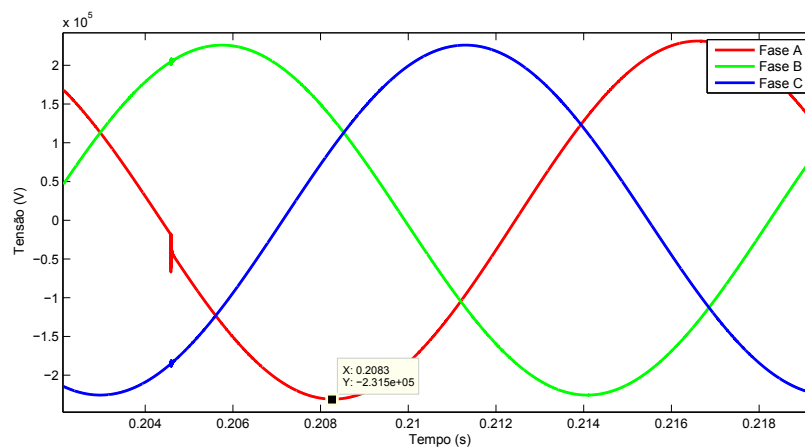


Fig. 38 – Sinais de tensão para uma abertura monopolar no sistema.

Logo após transcorrido o defeito, observou-se uma sobretensão na fase defeituosa, porém sem ultrapassar os níveis de segurança que são estabelecidos em 110% da tensão

nominal. O valor de sobretensão verificado foi de $231,5kV$, sabendo que a tensão nominal de operação do sistema é de $230kV$.

Para uma abertura monopolar não foram detectados transitórios no sinais de corrente. Porém, como o esperado, foram observados transitórios nos níveis de tensão da fase A, que é justamente a qual apresentou o defeito. Os padrões de detecção de um defeito monopolar podem ser observados na Tabela 5 e são comprovados pelas Figs. 39 e 40, respectivamente. O transitório é detectado no instante $0,20527$ s e classificado no instante $0,23861$ s.

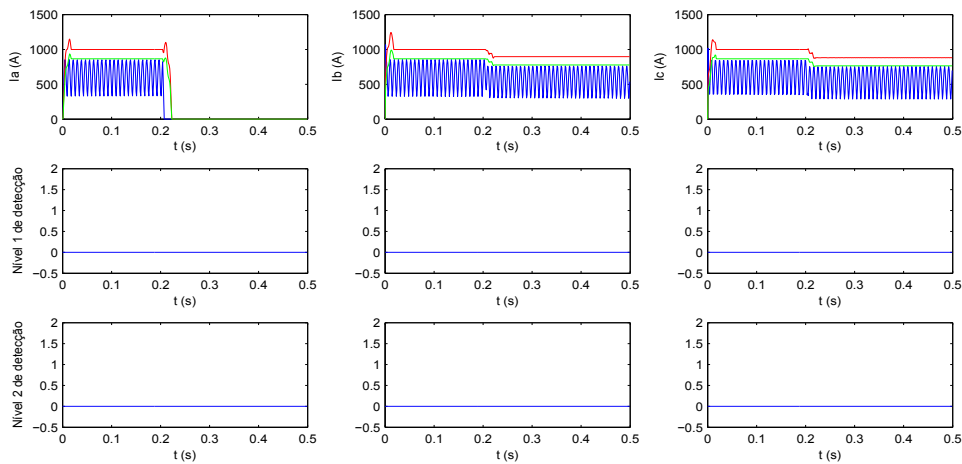


Fig. 39 – Níveis de detecção dos sinais de corrente para uma abertura monopolar.

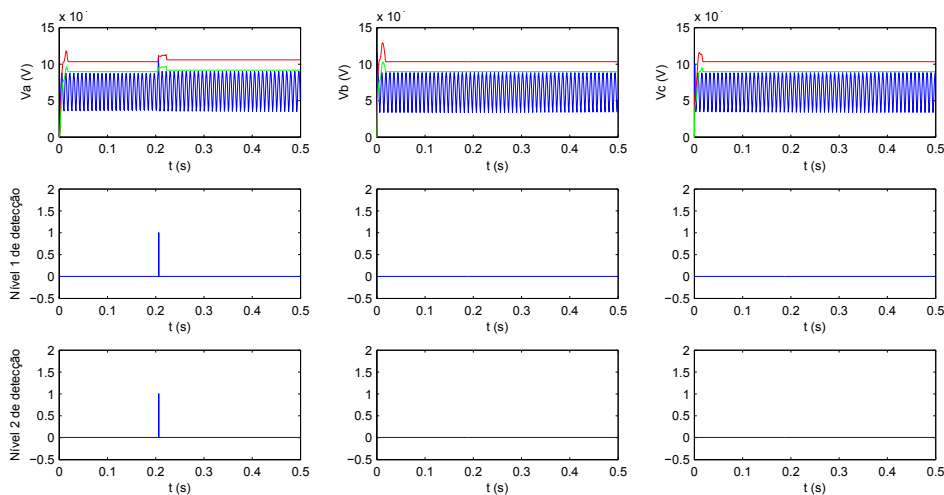


Fig. 40 – Níveis de detecção dos sinais de tensão para uma abertura monopolar.

4.2.6 Entrada de carga trifásica

Na Fig. 41 e na Fig. 42, destacam-se os sinais de corrente e tensão para uma entrada de carga trifásica no sistema.

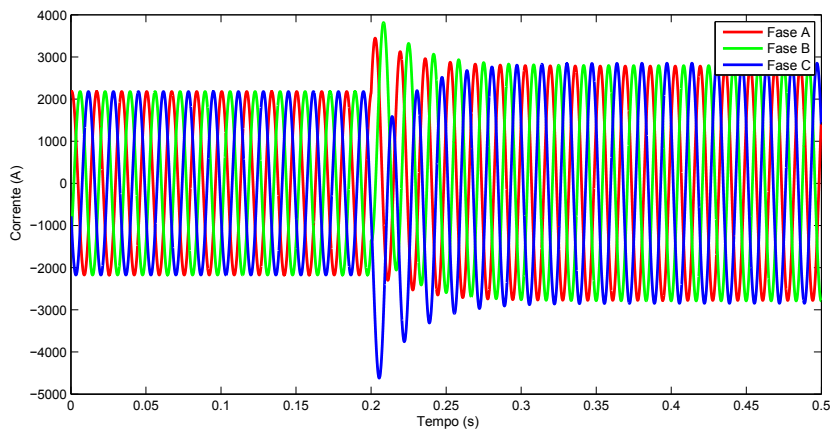


Fig. 41 – Sinais de corrente para uma entrada de carga no sistema.

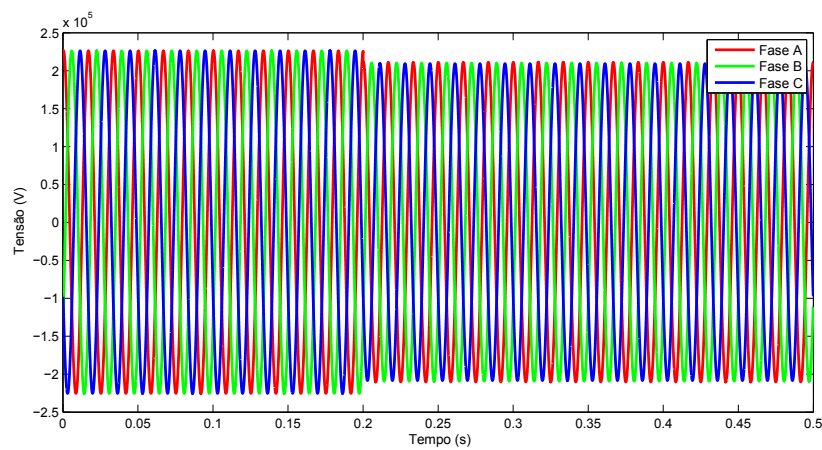


Fig. 42 – Sinais de tensão para uma entrada de carga no sistema.

Quando foram simuladas entradas de cargas no sistema, os fenômenos observados foram semelhantes aos de curtos-circuitos, porém com amplitudes de correntes menores e afundamentos de tensão menos bruscos. É na observação desses fenômenos que se destaca a importância de detectar os diversos tipos de distúrbios que acontecem no sistema, pois desta maneira são evitadas as atuações indevidas de relés de proteção.

Na entrada de carga trifásica foram constatados transitórios dos sinais de corrente apenas no nível 1 de detecção. Já para sinais de tensão não foram detectados transitórios. Os padrões de detecção para entrada de carga trifásica podem ser observados na Tabela 5 e são comprovados pelas Figs. 43 e 44, respectivamente.

Para esse caso, o transitório foi detectado no instante 0,20111 s e sua classificação foi determinada no instante 0,23444 s.

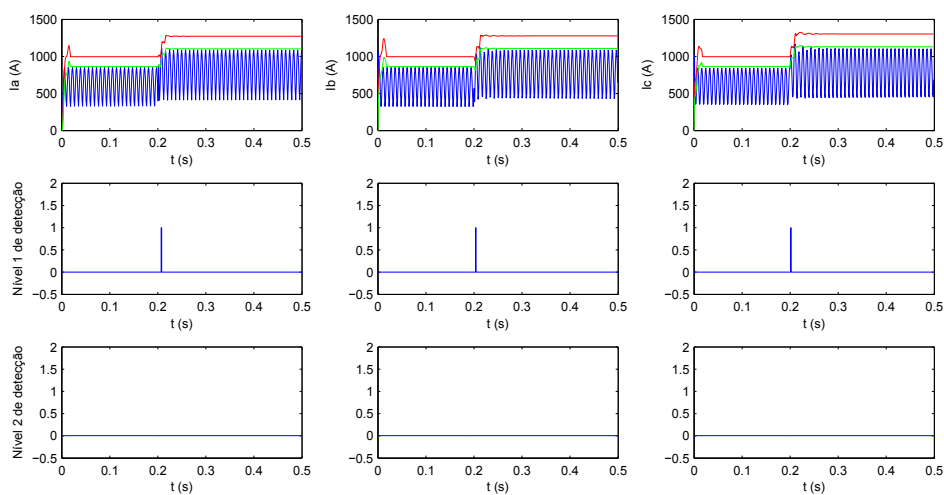


Fig. 43 – Níveis de detecção dos sinais de corrente para uma entrada de carga trifásica.

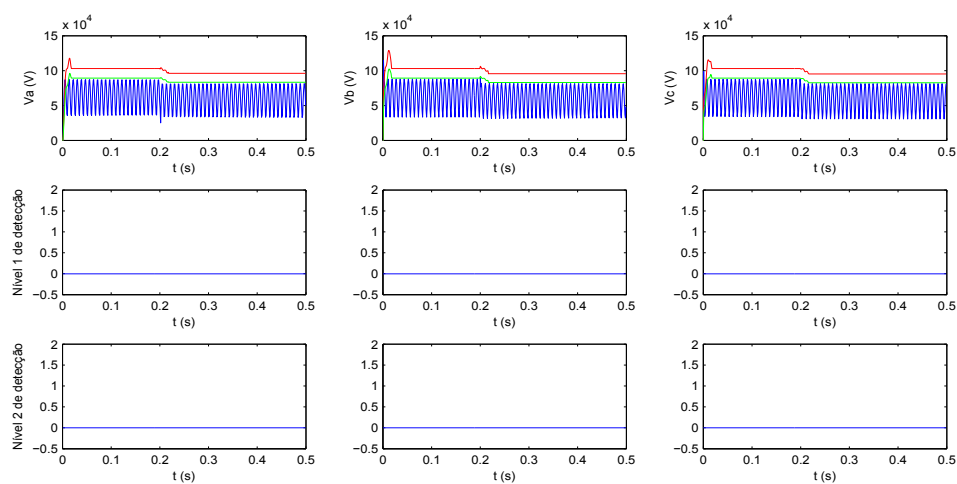


Fig. 44 – Níveis de detecção dos sinais de tensão para uma entrada de carga trifásica.

Conclusão

Neste trabalho foram apresentados os resultados obtidos para detectar e classificar distúrbios transitórios causados em um sistema elétrico de potência, a partir de uma nova metodologia proposta. Um sistema teste foi criado, consistindo de uma linha de transmissão com extensão de 100km e duas barras, uma de geração e outra de carga. Foram simulados inúmeros eventos transitórios, destacando-se entre eles, curtos-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos, aberturas monopolares, energização de transformadores e ações de comutação de entrada de carga no sistema.

Os diferentes eventos analisados mostraram variados comportamentos. Nos curtos-circuitos, as fases envolvidas mostraram elevados níveis de sobrecorrentes. Por outro lado, verificou-se níveis de subtensões nas fases envolvidas e sobretensões nas fases em que não ocorreu o defeito. A entrada de carga no sistema teve variações moderadas nas amplitudes de corrente e tensão. Na energização de transformador, verificou-se níveis de sobrecorrentes no momento do chaveamento, mas com amplitudes que não chegam a comprometer o sistema. Também, foram observadas sobretensões não ultrapassando o limite de 110% da tensão nominal. Para defeitos monopolares, constatou-se níveis significativos de subcorrentes.

Tendo em vista os diferentes tipos de transitórios ocorridos no sistema, a importância da detecção e classificação dos mesmos se resume a atuação do relé não ocorrer de forma equivocada. Ou seja, os elementos de proteção devem atuar apenas em casos de curtos-circuitos e aberturas monopolares, ou em situações de sobrelevação de carga muito além das condições operacionais do sistema. Para entradas de cargas e energização de transformadores, os níveis de sobrecorrente ou sobretensão devem ser ajustados por reguladores presentes ao longo do sistema, pois as amplitudes nos sinais geradas por esses fenômenos são relativamente baixas. Desta forma, pretende-se que o sistema elétrico de potência opere de forma confiável e que os dispositivos de proteção atuem de forma adequada.

Por fim, os resultados obtidos mostraram que a metodologia para detecção de transitórios proposta nesse trabalho é robusta e precisa. Além disso, a classificação, apesar de atrasada em 2 ciclos após a detecção do transitório, é extremamente eficaz, classificando corretamente cem por cento dos casos analisados. Sendo assim, a nova técnica para detecção e classificação de eventos constitui uma ferramenta poderosa para este fim, além de ter fácil implementação e alta precisão na determinação dos transitórios elétricos, podendo ser aplicada para processamento em tempo real.

Trabalhos Futuros

As sugestões de trabalhos futuros são as que seguem:

- Desenvolver um localizador de falta;
- Verificar o desempenho da técnica frente a condições de falta evolutiva;
- Comparar a metodologia proposta com outras já existentes;
- Verificar o desempenho da metodologia frente a condições de saída de carga e geração;
- Analisar o comportamento da nova metodologia em situações de abertura bipolar e oscilações de potência no sistema.

Referências

- ADEWOLE, A. C.; TZONEVA, R. Fault Detection and Classification in a Distribution Network Integrated with Distributed Generators. *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa (PowerAfrica)*, p. 9–13, July 2012. Citado na página 19.
- AL-KABABJIE, M. F.; AL-DURZI, F.; AL-NUAIMI, N. H. A Fault Detection and Classification using New Distance Relay. *First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET)*, p. 237–243, March 2012. Citado na página 19.
- ARAUJO, A. E. A. de; NEVES, W. L. A. *Cálculos de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. 1st. ed. Belo Horizonte, Minas Gerais: UFMG, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 40.
- CAMARGO, C. C. de B. *Transmissão de Energia Elétrica*. 3ª. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006. Citado na página 23.
- FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.
- GIOVANINI, R.; COURY, D. V. Classificação Rápida de Faltas em Sistemas Elétricos Utilizando Redes Neurais Artificiais. *IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, p. 281–286, Julho 1999. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- JAMEHBOZORG, A.; SHAHRTASH, S. M. A Decision-Tree-Based Method for Fault Classification in Single-Circuit Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 4, p. 2190–2196, October 2010. Citado na página 20.
- KINDERMANN, G. *Curto Circuito*. 2ª. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997. Nenhuma citação no texto.
- MO, E.; KINSNER, W. Review of Diagnostic Techniques of Power System Transients. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, v. 2, p. 1008–1011, May 1996. Citado na página 15.
- OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; AGGARWAL, R. K. A Complete Scheme for Fault Detection Classification and Location in Transmission Lines using Neural Networks. *Developments in Power System Protection Seventh International Conference on (IEE)*, v. 41, n. 11, p. 335–338, April 2001. Citado na página 18.
- PANIGRAHI, B. K.; MAHESHWARI, R. P. Transmission Line Fault Detection and Classification. *International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)*, p. 15–22, March 2011. Citado na página 19.
- SANTOS, E. M. dos; CARDOSO, G.; FARIAS, P. E.; MORAIS, A. P. de. CT Saturation Detection Based on the Distance Between Consecutive Points in the Plans Formed by the Secondary Current Samples and Their Difference Functions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 29–37, January 2013. Nenhuma citação no texto.

- SARAVANABABU, K.; BALAKRISHNAN, P.; SATHIYASEKAR, K. Transmission Line Faults Detection Classification and Location Using Discrete Wavelet Transform. *International Conference on Power Energy and Control (ICPEC)*, p. 233–238, February 2013. Citado na página 20.
- SILVA, D. T. *Detecção e Localização de Distúrbios Transitórios em Linhas de Transmissão de Energia Utilizando Sensores sem Fio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. Citado na página 23.
- SILVA, K. M.; SOUZA, B. A.; DANTAS, N. S. Detecção e Classificação de Faltas a partir da Análise de Registros Oscilográficos via Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet. *Sba Controle & Automação*, v. 18, n. 2, Abril 2007. Citado na página 19.
- SLUIS, L. van der. *Transients in Power Systems*. 1st. ed. Arnhem, Netherlands: John Wiley & Sons, 2001. Citado 11 vezes nas páginas 9, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 e 33.
- SOARES, L. R.; OLIVEIRA, H. M. de; JÚNIOR, M. A. de C. Detecção e Classificação de Faltas Utilizando a Transformada de Wavelets. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNTPEE*, Outubro 2003. Citado na página 21.