

GIOVANI MARCOS ZUANAZZI

**COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE TÉCNICAS DESTINADAS À
DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**ALEGRETE
2016**

GIOVANI MARCOS ZUANAZZI

**COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE TÉCNICAS DESTINADAS À DETECÇÃO DE
FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Curso de graduação em Engenharia Eletrica, Área de Proteção de Sistemas Eletricos de Potencia, da Universidade Federal do Pampa (UNI-PAMPA, RS), como requisito parcial de Bacharel em Engenharia Eletrica.

Orientador: Eduardo Machado dos Santos

**ALEGRETE
2016**

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

Z512c Zuanazzi, Giovanni Marcos Zuanazzi
Comparação do Desempenho de Técnicas Destinadas à Detecção de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição De Energia Elétrica / Giovanni Marcos Zuanazzi Zuanazzi.
60 p.

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

1. Sistema Elétrico de Potência. 2. Falta de Alta Impedância. I. Título.

GIOVANI MARCOS ZUANAZZI

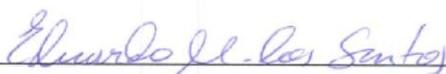
COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE TÉCNICAS DESTINADAS À DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

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

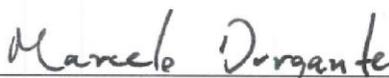
Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência

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

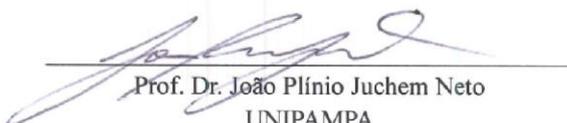
Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador



Prof. Me. Marcelo Hahn Durgante
UNIPAMPA



Prof. Dr. João Plínio Juchem Neto
UNIPAMPA

Dedico este trabalho a minha família, em especial ao meu filho
pelo incentivo sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar saúde, a minha família pelo apoio, aos amigos pelos inúmeros momentos de estudo e descontração, enfim a todos os professores e colegas que de uma maneira ou outra sempre me ajudaram.

Também queria agradecer ao meu orientador professor Dr. Eduardo pelo apoio e ajuda na elaboração deste trabalho.

“O acaso é o conhecimento de uma coisa
que até ali se não tinha conhecido”

Voltaire

RESUMO

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica, a interrupção do fornecimento de energia se dá pela atuação do sistema de proteção, seja por acidente, por descargas atmosféricas, por defeitos em equipamentos, entre outros. As proteções convencionais atuam sempre que detectam uma sobrecorrente no sistema, a qual pode ser causada por um curto-circuito, por fuga de corrente em isoladores ou por excesso de carga. Porém existe uma situação em que esses dispositivos não atuam. Isso ocorre quando um condutor da rede primária se rompe e entra em contato com alguma superfície que apresente uma resistência elétrica elevada. Esse evento é denominado Falta de Alta Impedância (FAI). Levando em consideração que essas faltas são de difícil detecção, neste trabalho são comparadas diferentes metodologias para identificação de FAIs nas redes elétricas de distribuição, com o propósito de determinar, dentre as metodologias analisadas, qual delas desempenha melhor a função para a qual está destinada.

Foram selecionadas três metodologias, sendo que o primeiro método, aqui chamado de método da Envoltória, conta com um detector de transitório que é capaz de classificar uma FAI através da característica de *buildup* da corrente, a qual é própria desse tipo de falta. A detecção de um transitório é feita com base no cálculo das distâncias euclidianas entre dois pontos no plano formado pelas amostras do sinal de corrente e o respectivo valor da primeira função-diferença desse sinal. Já o segundo método analisa a corrente de sequência negativa e as assinaturas nela refletidas pela ocorrência de uma falta de alta impedância à terra. Por fim, o terceiro método é baseado na morfologia matemática (MM), a qual é uma ferramenta de processamento não-linear do sinal no domínio do tempo.

Os resultados obtidos demonstram que tanto o método da MM quanto o da sequência negativa não atuaram de forma correta para todos os casos analisados. Em contrapartida, o método da envoltória foi relativamente rápido e eficaz para todos.

Palavras-chave: Arco Elétrico, Falta de Alta Impedância, Sistemas de Distribuição, Sobrecorrente, Transitórios.

ABSTRACT

In electricity distribution systems, the interruption of the power supply is given by the performance of the protection system, whether by accident, by atmospheric discharges, by defects in equipment, among others. Conventional protections act whenever they detect an overcurrent in the system, which can be caused by a short circuit, leakage of current in insulators or by overloading. But there is a situation in which these devices do not work. This occurs when a conductor of the primary network ruptures and comes into contact with any surface that has a high electrical resistance. This event is called High Impedance Fault (FAI). Taking into account that these faults are difficult to detect, in this work different methodologies for identifying FAIs in the distribution electric networks are compared, in order to determine, among the analyzed methodologies, which one performs better the function for which it is intended.

Three methodologies were selected, and the first method, here called the Envelop method, has a transient detector that is able to classify an FAI through the buildup characteristic of the current, which is characteristic of this type of fault. The detection of a transient is made based on the calculation of the Euclidean distances between two points in the plane formed by the samples of the current signal and the respective value of the first function-difference of that signal. The second method, however, analyzes the negative sequence current and the signatures reflected in it by the occurrence of lack of high impedance to ground. Finally, the third method is based on mathematical morphology (MM), which is a non-linear signal processing tool in the time domain.

The results obtained demonstrate that both the MM method and that of the negative sequence did not act correctly for all cases analyzed. In contrast, the envelope method was relatively quick and effective for all.

Keywords: Electric Arc, Lack of High Impedance, Distribution Systems, Overcurrent, Transient.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Característica de um transitório oscilatório.

Figura 2 – Forma de onda da corrente típica de uma FAI

Figura 3 – Forma de onda da corrente no ponto de ocorrência da falta de alta impedância.

Figura 4 – Detalhes dos shoulders

Figura 5 – Plano formado por del_1 e i_a antes da ocorrência do transitório

Figura 6 – Plano formado por del_1 e i_a no momento em que ocorre o transitório

Figura 7 – Método da Sequência Negativa

Figura 8 – Tensão e corrente do arco durante uma FAI

Figura 9 – V-I características durante FAI.

Figura 10 – Método da Sequência Negativa

Figura 11 – Sistema teste utilizado.

Figura 12 – Modelo para simulação de FAIs desenvolvido em Nakagomi (2006).

Figura 13 – Corrente na Fase A para FAI no ponto 6 do Sistema Teste

Figura 14 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano plano $del_1 \times i_a$. (b) Estado do detector. Para FAI no ponto 6 do Sistema Teste

Figura 15 – Atuação do Método da Envoltória para FAI no ponto 6 do Sistema Teste

Figura 16 – Atuação do Método da Sequência Negativa para FAI no ponto 6 do Sistema Teste

Figura 17 – Atuação do Metodo da Morfologia Matemática para FAI no ponto 6 do Sistema Teste.

Figura 18 – Corrente na Fase A para Energização de Transformadores no ponto 1 do Sistema Teste.

Figura 19 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano plano $\mathbf{del}_1 \times \mathbf{i}_a$. (b) Estado do detector. Para Energização de Transformadores no ponto 1 do Sistema Teste.

Figura 20 – Atuação do Método da Envoltória para Energização de Transformadores no ponto 1 do Sistema Teste.

Figura 21 – Atuação do Método da Sequência Negativa para Energização de Transformadores no ponto 1 do Sistema Teste.

Figura 22 – Atuação do Metodo da Morfologia Matemática para Energização de Transformadores no ponto 1 do Sistema Teste.

Figura 23 – Corrente na Fase A para Energização de Banco de Capacitores no ponto 5 do Sistema Teste.

Figura 24 – Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano plano $\mathbf{del}_1 \times \mathbf{i}_a$. (b) Estado do detector. Para Energização de Banco de Capacitores no ponto 5 do Sistema Teste.

Figura 25 – Atuação do Método da Envoltória para Energização de Banco de Capacitores no ponto 5 do Sistema Teste.

Figura 26 – Atuação do Método da Sequência Negativa para Energização de Banco de Capacitores no ponto 5 do Sistema Teste.

Figura 27 – Atuação do Metodo da Morfologia Matemática para Energização de Banco de Capacitores no ponto 5 do Sistema Teste.

Lista de tabelas

Tabela 1 – FAI no ponto 6 do Sistema Teste

Tabela 2 – Energização de Transformadores no ponto 1 do Sistema Teste

Tabela 3 – Energização de Banco de Capacitores no ponto 5 do Sistema Teste.

Tabela 4 – Resultados obtidos nas Simulações

Sumário

RESUMO.....	8
Abstract	9
1 Introdução	15
1.1 <i>Motivação</i>	15
1.2 <i>Objetivo geral.....</i>	16
1.3 <i>Objetivos específicos</i>	16
1.4 <i>Estrutura do Trabalho</i>	17
2 Revisão Bibliográfica.....	18
2.1 <i>Considerações Gerais</i>	18
2.2 <i>Revisão Bibliográfica</i>	18
3 Fundamentação Teórica	20
3.1 <i>Considerações Gerais.....</i>	20
3.2 <i>Transitórios em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.....</i>	20
3.3 <i>Falta de alta impedância (FAI).....</i>	21
3.4 <i>Arco Elétrico.....</i>	25
3.5 <i>Considerações Finais</i>	26
4 Metodologia	27
4.1 <i>Considerações Gerais.....</i>	27
4.2 <i>Método da Envoltória.....</i>	27
4.3 <i>Método da Sequência Negativa</i>	30
4.4 <i>Método da Morfologia Matemática.....</i>	31
4.5 <i>Considerações Finais</i>	35
5 Resultados e Simulações.....	36
5.1 <i>Considerações Gerais.....</i>	36
5.2 <i>Sistema Teste.....</i>	36
5.3 <i>Energização de Banco de Capacitores</i>	38
5.4 <i>Energização de Transformadores</i>	38
5.5 <i>Resultados.....</i>	39
5.5.1 <i>Caso 1 – FAI no ponto 6 do Sistema Teste</i>	39
5.5.2 <i>Caso 2 – Energização de Transformadores no ponto 1 do Sistema Teste.....</i>	43
5.5.3 <i>Caso 3 – Energização de Banco de Capacitores no ponto 5 do Sistema Teste</i>	46
5.6 <i>Considerações Finais</i>	49
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	50
6.1 <i>Conclusões.....</i>	50

6.2 <i>Sugestões para Trabalhos de Futuros</i>	51
Referências bibliográficas	52
Apêndices	54

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica estão sujeitos a diversos tipos de faltas, transitórias ou permanentes. Dentre estas, as de alta impedância estão entre as que mais preocupam as concessionárias de energia atualmente.

As faltas de alta impedância (FAIs) possuem como característica básica valores de corrente de baixa amplitude, que, na maioria dos casos, não é suficiente para sensibilizar os relés de sobrecorrente normalmente usados para proteção de sistemas de distribuição. Formas clássicas deste tipo de faltas estão relacionadas a galhos de árvores em contato com cabos de média tensão energizados, isoladores com fuga de corrente e cabos caídos ao solo em terrenos de alta impedância. Tendo em vista a segurança das pessoas, este último tipo de FAI é o mais crítico. Isso ocorre, pois, as mesmas podem ser vistas pelo sistema como carga e, desta forma, não há sensibilização das proteções de sobrecorrente.

Nesse contexto, com o advento dos relés numéricos, torna-se essencial o desenvolvimento de metodologias que sejam capazes de detectar FAIs, de modo que, aplicadas em relés de proteção, essas técnicas auxiliem os esquemas de proteção no desligamento de linhas vivas em contato com o solo. Geralmente, as metodologias existentes empregam técnicas computacionais para processamento de sinais, extraindo componentes harmônicas ou de sequência negativa para determinação da ocorrência de uma falta de alta impedância. Entretanto os valores ajustados para determinação da ocorrência dessas faltas não são universais. Além disso, as ferramentas matemáticas envolvidas apresentam cargas computacionais elevadas, podendo prejudicar a aplicação em tempo real.

Dessa forma, este trabalho tem por objetivo comparar métodos aplicados para a detecção de FAI, de modo a avaliá-los qualitativamente, em função da capacidade de detecção, e quantitativamente, a partir do tempo gasto até a detecção da FAI e o tempo de processamento da metodologia. Dessa forma, espera-se apontar vantagens e desvantagens da aplicação de cada metodologia estudada e determinar qual delas desempenha melhor a função de identificar FAIs.

1.1 Motivação

Como as FAIs possuem características muito peculiares, torna-se interessante o seu estudo. Além disso, este problema está mais associado com a segurança da população do que com a proteção do sistema elétrico, o que gera uma maior abordagem de supervisão e controle das redes de distribuição. As concessionárias responsáveis pela rede de distribuição,

quando não providas de técnicas para detecção de FAIs, só tomam conhecimento da situação através de terceiros, ocasionando uma demora na solução do problema.

Nessas últimas três décadas, as FAIs foram objeto de vários estudos, mas, infelizmente, o objetivo de criar uma técnica capaz de detectar as FAI em todas as condições operacionais do sistema ainda não foi atingido de forma eficiente até o presente momento. Por isso reforça-se ainda mais a necessidade da continuação do trabalho e da persistência na busca de melhorias de métodos de detecção, distinção e localização de faltas de alta impedância relacionadas, principalmente, à queda de condutores de circuitos primários de redes de distribuição aéreas (RDA).

1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral a comparação dos desempenhos de três técnicas apresentadas na literatura especializada, as quais são destinadas à detecção de FAIs.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são a realização das seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica para entendimento do fenômeno das FAIs e conhecimento de técnicas aplicadas para sua detecção.
- Análise do banco de dados existente, cujos sinais foram obtidos a partir da simulação de um sistema teste *software* EMTP-ATP®;
- Implementação de metodologias destinadas à detecção de FAIs;
- Determinação dos critérios de comparação dos desempenhos das metodologias implementadas;
- Simulação das metodologias implementadas para os sinais do banco de dados;
- Comparação dos desempenhos das técnicas implementadas para a detecção de FAIs;
- Análise dos resultados e conclusões acerca das vantagens e desvantagens de cada metodologia e o apontamento da técnica que melhor desempenha a função.

1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1, é apresentado a introdução do tema juntamente com a motivação e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, é descrita a fundamentação teórica na qual foi fundamentado o trabalho. Também, é feita uma abordagem sobre transitórios em sistemas de distribuição, juntamente com a revisão bibliográfica.

A FAI e o arco elétrico são descritos no Capítulo 3, onde foram abordadas as características desses fenômenos e como os mesmos ocorrem.

Já no Capítulo 4 são apresentados os métodos implementados para comparação.

O Capítulo 5, apresenta os casos que foram simulados e os resultados obtidos, bem como a análise desses resultados.

Finalmente, no Capítulo 6, são feitas as conclusões e as sugestões para os trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Gerais

As FAIs têm sido um tema de interesse desde a década de 1970 com a pesquisa focada em investigação de características distintivas em formas de onda de corrente e tensão. FAIs ocorrem tipicamente em níveis de tensão menores ou iguais a 15 kV. Além disso, são caracterizadas, por valores baixos de correntes de falta, por comportamento aleatório com flutuação instável e ampla na corrente. Nas FAIs são encontrados grandes níveis de harmônicos e componentes de alta frequência. Durante a fase inicial, os pesquisadores estavam principalmente envolvidos com modelos laboratoriais e com estudos de falta.

No entanto, com uma melhor compreensão da natureza e as características das FAIs e os avanços em softwares de simulação, a tendência mudou para estudos utilizando essas ferramentas. Nesse contexto, pesquisadores propuseram métodos diferentes que compreendem algoritmos simples ou complexos para detectar FAIs em um sistema de distribuição. A maioria dos estudos nessa área foram relatados entre 1980 e 1990, mas os métodos de simulação e detecção ainda estão sendo desenvolvidos e aperfeiçoados.

2.2 Revisão Bibliográfica

As faltas no sistema de distribuição de energia causados por interrupções no fornecimento geram perdas econômicas e danos a equipamentos e pessoas. Com isso as concessionárias são forçadas a melhorar os índices de qualidade de seus serviços devido a estes acontecimentos, a fim de serem competitivas no mercado de fornecimento de energia (Mirzaei, 2009).

Hoje em dia, cerca de 80% das interrupções são causadas por falhas em redes de distribuição. Desenvolver e aplicar algoritmos que caracterizem as falhas no sistema de distribuição não é uma tarefa fácil devido à topologia e os princípios operacionais dos alimentadores, pois os mesmos não são homogêneos, possuem vários pontos de consumo laterais e o seu funcionamento é radial, com vários pontos de medição disponíveis (Stevenson, 1998). Tendo isso em vista, diversas metodologias computacionais vêm sendo desenvolvidas para detecção das FAI.

Assim, o método apresentado por Ko et al. (1989) detecta a FAI utilizando redes neurais do tipo PMC (Perceptron Multi-Camada), a qual opera dividindo um ciclo da forma de onda de corrente e tensão dentro de quatro janelas iguais, sendo duas localizadas em posição contendo

os valores mais altos de tensão, e as outras duas localizadas junto aos valores mais baixos de tensão. Daqing Hou (2006), apresenta o algoritmo que a SEL (*Schweitzer Engineering Laboratories*) usa para detecção de faltas de alta impedância em seus relés, o qual é fundamentado em lógica simples de análise de harmônicas.

Fanucci (2010) propôs em seu trabalho a utilização de dados de distorção harmônica das componentes ímpares e pares dos valores da corrente de fase, obtidos através de um algoritmo de FFT (*Fourier Fast Transform*) em conjunto com uma rede neural PMC (Perceptron Multi-Camada).

De acordo com Decanini (2011) o processo de diagnóstico da FAI é realizado baseando-se nos conceitos da transformada *wavelet* e da rede neural ARTMAP FUZZY. Esta ferramenta de auxílio à tomada de decisão acelera os procedimentos para restabelecimento das condições normais de operação propiciando maior segurança, confiabilidade e lucratividade às concessionárias. Já Torres et al. (2011) desenvolveram em seu trabalho uma técnica de detecção de FAIs que utiliza a Transformada Wavelet Discreta (TWD) para análises das características dos sinais de corrente. Também, foram feitas simulações em ATP/EMTP®, com o diferencial de que, ao invés de modelos computacionais, foram usados dados obtidos em campo. Nessa proposta, a FAI é detectada pela amplitude do somatório dos módulos dos coeficientes wavelet.

Também utilizando Transformada Wavelet Discreta (TWD), Huang (2011), elaborou um método fundamentado no reconhecimento da falha causada pela sobreposição de cobertura da janela de tempo flutuante para o valor absoluto dos coeficientes de wavelet.

Da mesma forma, Torres Garcia (2012) apresenta uma técnica baseada na Transformada TWD para detecção de faltas de alta impedância no sistema de distribuição de energia, no qual o comportamento da corrente no domínio da frequência é observado através das janelas da TWD.

Stein (2015) desenvolveu uma técnica fundamentada na detecção da FAI pela identificação da característica de *buildup* na corrente da fase em falta. A característica de *buildup* está sempre presente no sinal de corrente de uma FAI. Assim, após um afundamento na amplitude do sinal de corrente o referido método monitora o gradativo crescimento da amplitude do sinal de corrente para determinar a ocorrência da FAI.

Por fim, Farias (2013) elaborou um algoritmo que utiliza a TWD e PLL (*Phase-Locked Loop*) para detecção de transitórios. Já para a classificação dos transitórios, utiliza uma rede neural do tipo GRNN (*Generalized Regression Neural Network*).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Considerações Gerais

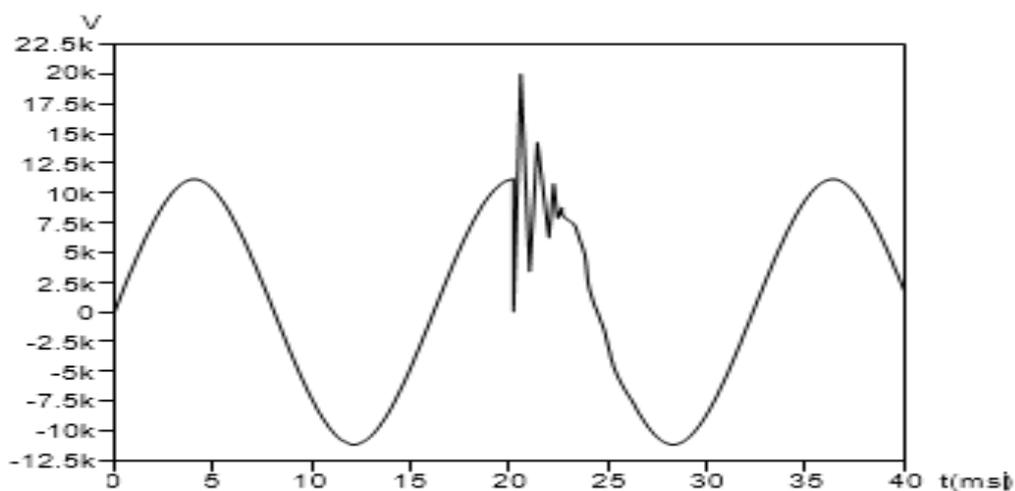
O presente Capítulo apresenta os conceitos básicos acerca das FAI, os quais foram a base para o entendimento do fenômeno e posterior análise do desempenho das metodologias testadas. Conceitos como transitórios em sistemas de distribuição e arco-elétrico são aqui abordados.

3.2 Transitórios em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Diversos fenômenos eletromagnéticos, tais como os transitórios, os desequilíbrios de tensão, as distorções das formas de onda de tensão e corrente, as flutuações de tensão e as variações de frequência, atingem o sistema de distribuição.

Existem dois tipos de transitórios, o impulsivo e o oscilatório. O primeiro acontece na ocorrência de uma descarga atmosférica, o qual provoca sobretensão na rede e, dependendo do caso, pode causar a atuação dos dispositivos de proteção. Esse transitório é de curta duração e se dá de forma unidirecional. Já no transitório oscilatório (Figura 1) a variação ocorre nos dois sentidos e é gerado por eventos comuns do sistema, tais como a energização de linhas, a saída de cargas indutivas, o chaveamento de banco de capacitores, a energização de transformadores ferromagnéticos e até mesmo a eliminação de faltas (Martinho, 2009).

Figura 1 – Característica de um transitório oscilatório.



Fonte: Proposição de uma Nova Técnica para Detecção de Faltas de Alta Impedância em Redes de Média Tensão.(2015)

No caso específico dos curtos-circuitos, os quais também provocam transitórios de corrente na rede, alterando sua magnitude e forma de onda, também existem classificações. Primeiramente, tais fenômenos podem ser classificados como permanentes ou transitórios, com relação à duração de sua ocorrência.

Além disso, curtos-circuitos podem ser classificados com relação ao meio que provocou a falta, segundo Horowitz e Phadke (2014), podendo ser:

- Metálico ou franco, quando a impedância do elemento causador pode ser considerada nula;
- Causado por Impedância, quando o elemento causador apresenta impedância não-desprezível; e
- De Alta Impedância, quando há a formação de arco-elétrico ou o contato entre condutor e superfície de alta impedância.

3.3 Falta de alta impedância (FAI)

Quando um condutor de um circuito primário de uma rede de distribuição aérea de média tensão se rompe e entra em contato com uma superfície que apresente alta resistência elétrica, fica caracterizada uma FAI.

Sua principal característica é apresentar uma corrente elétrica relativamente baixa, com amplitude próxima aos níveis de carga, cuja magnitude é de difícil previsão, pois a mesma já não depende apenas dos parâmetros da linha de transmissão, e sim, da resistência característica do terreno onde esse condutor venha a cair. Condições climáticas também afetam de forma significativa a corrente resultante desse tipo de falta, uma vez que a mesma depende do arco-elétrico formado e de parâmetros como a umidade do solo e do ar.

Além disso, como a corrente que surge durante uma FAI possui como característica a baixa amplitude, a falta é difícil de ser detectada e eliminada. Como elas apresentam valores próximos ou abaixo do nominal para o respectivo alimentador, os dispositivos de proteção convencionais acabam por não serem sensibilizados, pois não são projetados para atuar em situações onde a corrente é ligeiramente superior a nominal. Com isso o condutor permanece energizado e oferecendo riscos às pessoas e aos animais que percorram o local.

Os métodos para análise do comportamento das FAIs podem ser amplamente classificados em dois grupos com base nos dados usados para desenvolver o método: um que utiliza dados obtidos a partir de faltas reais e o outro que utiliza dados gerados por simulações. Os

métodos de detecção desenvolvidos utilizando os resultados de faltas reais tendem a ser de um sistema de rede mais específico, não sendo aplicáveis a outros sistemas (redes). Além disso, faltas reais requerem cuidados especiais, envolvem um risco de desconexão de serviço.

Já os métodos desenvolvidos utilizando resultados de simulação, por outro lado, podem ser testados extensivamente e, portanto, são mais adaptáveis a vários sistemas com nenhuma ou poucas modificações. Uma grande variedade de eventos pode ser estudada por meio de métodos baseados em simulação, uma vez que as formas de onda resultantes se assemelham bem com as formas de onda de FAIs reais relatadas na literatura.

Uma extensa literatura especializada em FAIs pode ser encontrada. Os métodos de detecção de FAIs podem ser amplamente classificados em algoritmos de domínio de frequência, algoritmos de domínio do tempo, algoritmos híbridos e sistemas peritos. Técnicas estatísticas, usando componentes de sequência e seus harmônicos e componentes de alta frequência (2-10 kHz) são alguns dos métodos com base no domínio da frequência. Algoritmos no domínio do tempo incluem métodos como a retransmissão proporcional (Carr, 1983) a razão do relé de terra (Lee e Bishop, 1983) o algoritmo de aleatoriedade (Benner *et al.*, 1989), o uso da corrente nominal (Sultan *et al.*, 1994), as técnicas fractais (Mamishhev *et al.*, 1996) e metodologias fundamentadas nos sinais de superposição. Métodos híbridos envolvendo o domínio da frequência e o domínio do tempo, como os que utilizam a transformada wavelet discreta (Decanini, 2011) também têm sido propostos. Por causa da aleatoriedade de FAIs, métodos usando combinações de vários algoritmos, várias ferramentas computacionais, filtros de Kalman (Wai e Yibin, 1998), bem como métodos de formação de base, tais como a decisão árvore (Benner *et al.*, 1989), as redes neurais artificiais (Fanucci, 2010 e Decanini, 2011), e métodos neuro-fuzzy com base em algoritmo genético (Decanini, 2011) têm sido amplamente divulgados na literatura especializada

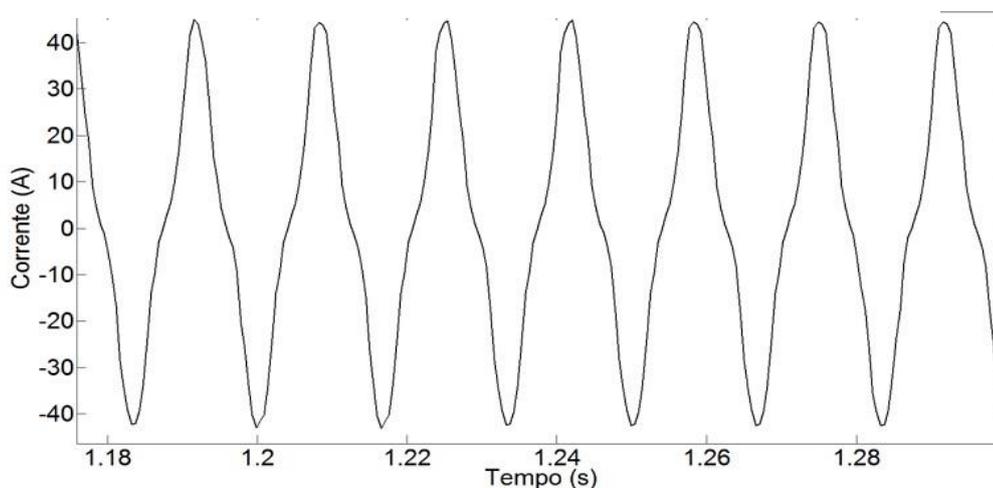
FAIs são quase sempre acompanhadas pela formação de arco, o que faz com que a corrente de falta seja imprevisível e aleatória. Dependendo do tipo de superfície envolvida no percurso de falta, a resistência pode mudar devido ao calor produzido pelo arco, mudando a amplitude da corrente de falta. Assim, a FAI é um fenômeno aleatório, e resulta em uma ampla variação na forma de onda de corrente, tanto em magnitude como em conteúdo harmônico (Nakagomi, 2006).

Vários modelos foram propostos para a simulação de FAIs no domínio do tempo. Uma resistência fixa no ponto de falta é o modelo mais simples (Lee e Bishop, 1985), que foi posteriormente modificado através da inclusão de impedâncias não-lineares para incorporar a não

linearidade da corrente de falta (Yu e Khan,1994). Ainda, existem modelos que contam com a inclusão de duas fontes de corrente contínua antiparalelas, ligadas por meio de dois diodos modelando a natureza assimétrica da corrente de falta, bem como a extinção de arco em torno de zero de corrente (Emanuel *et al.*,1990). Este último, também foi modificado pela adição de uma (Eissa *et al.*,2006) ou duas (Etemadi e Sanaye-Pasand, 2008), resistências variáveis em série com as fontes de corrente contínua para modelar a aleatoriedade da impedância efetiva e, assim, conseguir a aleatoriedade da corrente de falta resultante. Outros modelos utilizam TACS (*análise transiente de sistemas de controle*) como interruptor controlado para ligar e desligar a falta ou, aleatoriamente, variar a resistência efetiva da FAI, (Wai e Yibin,1998).

Ressalta-se ainda que estudos realizados em laboratório permitiram verificar o comportamento da tensão e da corrente, resultantes do arco-elétrico em um solo arenoso, e concluíram que a corrente em um arco-elétrico é distorcida, assimétrica, aleatoriamente interrompida e progressivamente variável a cada ciclo como verificado na Figura 2 (Nakagomi, 2006).

Figura 2 - Forma de onda da corrente típica de uma FAI (FARIAS,2013).



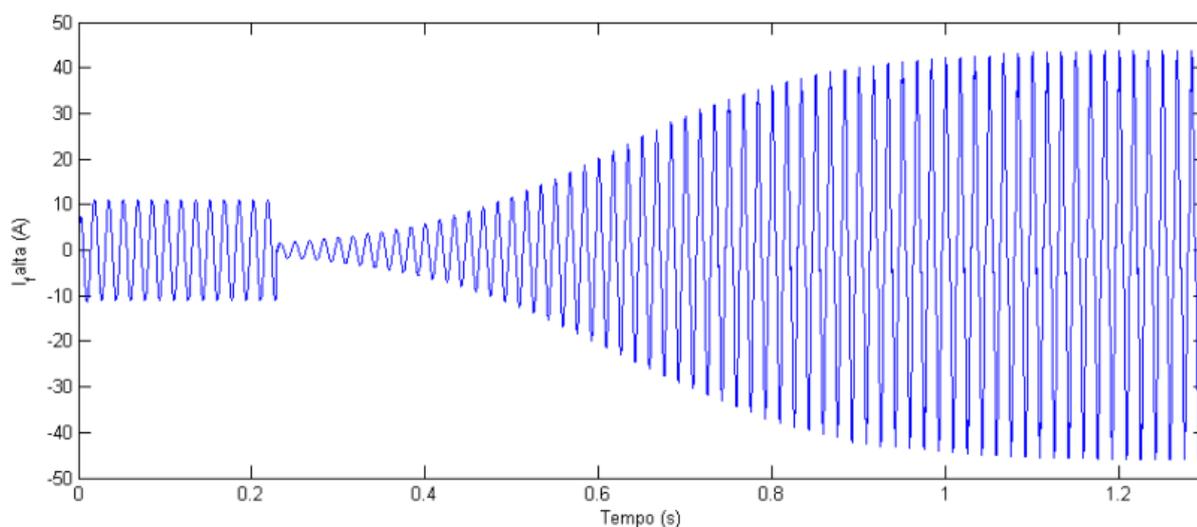
Fonte: Detecção e Classificação de transitórios em redes de distribuição para identificação de faltas de alta impedância. (2013)

É importante ressaltar que o conteúdo harmônico gerado pela FAI é bastante amplo. A distorção da forma de onda, resultante da não-linearidade da resistência do arco, gera harmônicos de baixa ordem no sinal de corrente. A diferença de amplitude entre os semi-ciclos positivos e negativos é o principal fator que ocasiona o surgimento de harmônicos de ordem par da fundamental. A intermitência aleatória e a descontinuidade das correntes geradas pela ignição e

reignição do arco, provocam o aparecimento de harmônicos de alta frequência. Por fim, as variações de amplitude de corrente ao longo do tempo provocam aparecimento de harmônicos intercalados (Nakagomi, 2006).

Essa variação de amplitude está relacionada a diversos fatores. Um deles é a acomodação do condutor ao solo. Outro fator se dá pelo fato de que, quando o condutor entra em contato com a superfície, surgem pequenos arcos. Com isso, a geração de calor provoca a carbonização e a vitrificação nos pontos de contato com o solo, criando um caminho de ionização. Sendo assim, as regiões de centelhamento migram para os limites desse caminho, o que se alastra e constrói uma espécie de eletrodo de aterramento para a corrente de defeito, distribuindo-a no solo progressivamente. Isso produz um crescimento da amplitude da corrente de defeito que acontece de forma aleatória. Essa fase de crescimento da corrente em uma FAI é conhecida como fase de *buildup* e pode ser visualizado na Figura 3 (Nakagomi, 2006).

Figura 3 - Forma de onda da corrente no ponto de ocorrência da falta de alta impedância.



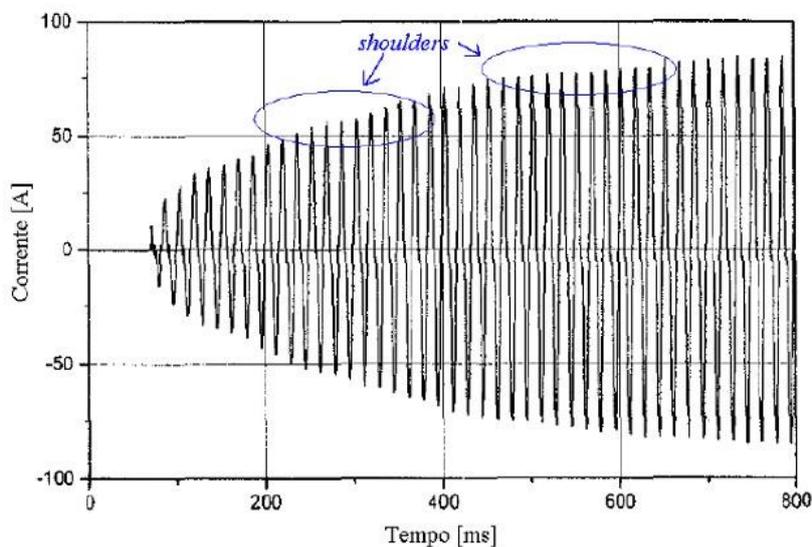
Fonte: Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição.(2015)

Outra característica que acontece nesta fase é um fenômeno chamado de *shoulders* nos quais a amplitude de corrente se mantém constante por alguns ciclos.

Em um ensaio realizado pela Companhia Energética de São Paulo (CESP) em 1985, foi possível observar de forma clara a fase de *buildup* e os trechos onde ocorrem os *shoulders* através de uma oscilografia, a qual pode ser observada na Figura 4. Tal ensaio, foi realizado

lançando-se um cabo energizado ao solo a partir e um veículo de manutenção de linhas vivas. Em todos os testes a corrente de falta apresentou comportamento semelhante.

Figura 4 - Detalhes dos shoulders



Fonte: Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição.(2015)

3.4 Arco Elétrico

O arco elétrico resulta da não existência de um contato firme do condutor com a superfície. Enquanto há uma pequena distância com uma pequena diferença de potencial, o ar se comporta como um bom isolante. Com o aumento da diferença de potencial, a resistência elétrica do ar diminui. Ultrapassado um certo limiar, ocorre o rompimento do dielétrico, o que resulta na passagem de corrente entre o condutor e o solo.

Após ocorrer o rompimento do dielétrico ocorre um fenômeno chamado avalanche. Esse fenômeno se inicia quando elétrons livres são acelerados pelo campo elétrico que, com energia cinética suficiente, ionizam moléculas do ar quando em colisão com estas, liberando assim novos elétrons.

A avalanche é responsável pela capacidade repentina do ar conduzir corrente, essa condução de corrente de forma contínua é chamada de arco elétrico. Se a diferença de potencial aplicada for suficientemente alta e a resistência associada ao arco suficientemente baixa, ocorrerá o arco. Ressalta-se que isso não acontece imediatamente, pois, antes, ocorrem centelhas que nada mais são do que uma sequência rápida de rompimentos momentâneos do dielétrico até o estabelecimento de um arco estável.

Por fim, ressalta-se que, em uma FAI, a corrente gerada no arco elétrico é assimétrica, distorcida, aleatoriamente interrompida e progressivamente variável a cada ciclo. A distorção na forma de onda, induzida pela não linearidade da resistência do arco elétrico, promove o aparecimento de um conteúdo harmônico de baixa ordem na corrente (3^a a 10^a harmônica). A intermitência aleatória (faíscamento) e a descontinuidade da corrente durante o estabelecimento e a extinção do arco levam ao surgimento de um espectro de harmônicos de alta frequência. (Nakagomi, 2006).

3.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou algumas das técnicas desenvolvidas ao longo dos tempos para detecção das FAIs, também foi mostrado alguns dos modelos usados para simulação das mesmas. Ainda foi descrito as principais características do arco elétrico e da FAI.

4 METODOLOGIA

4.1 Considerações Gerais

Neste trabalho, foram implementados três métodos destinados à detecção de FAIs, recentemente propostos na literatura especializada. Os mesmos tiveram seus desempenhos avaliados em termos da capacidade de detecção das FAIs, do intervalo até a detecção e do tempo de processamento dos algoritmos. Os respectivos resultados foram obtidos a partir da simulação da atuação dos métodos para o processamento de sinais provenientes de um banco de sinais, o qual foi obtido a partir da simulação de FAIs em um sistema teste no *software* EMTP-ATP®. A partir da comparação dos resultados, foram apontadas as vantagens e desvantagens de cada uma das metodologias analisadas, bem como foi determinada, dentre elas, qual a que melhor desempenha a tarefa de detecção de FAIs.

Nesse contexto, três métodos foram analisados, sendo um baseado na característica de envoltória da forma de onda, um baseado na corrente de sequência negativa gerada e, por fim, um que utiliza a morfologia matemática processando a forma de onda da tensão. Tais metodologias são detalhadas nas subseções seguintes.

4.2 Método da Envoltória

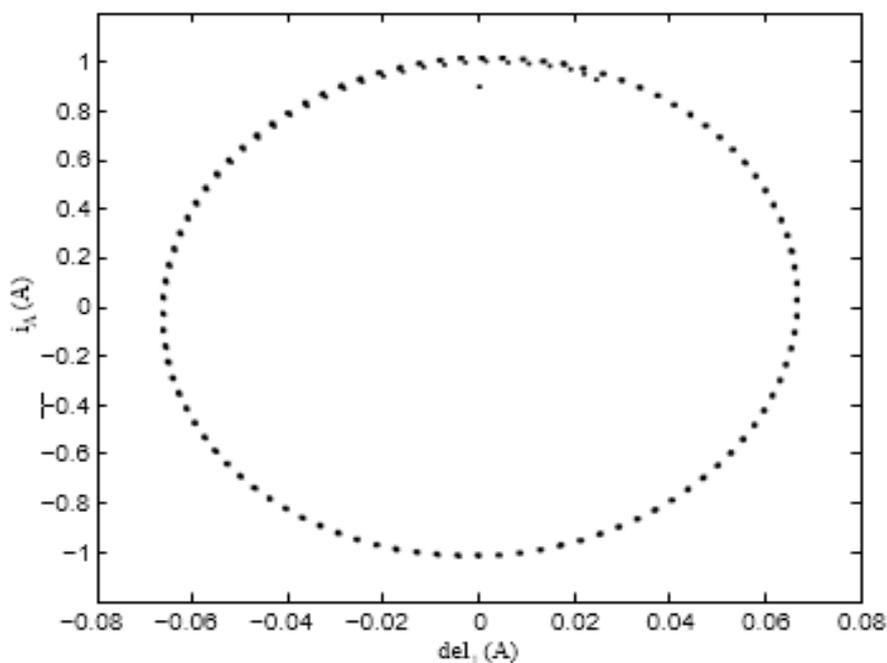
Proposto por Stein (2015), fundamenta-se na detecção da FAI pela identificação da característica de *buildup* na corrente da fase em falta. Essa técnica é bastante promissora, pois a característica de *buildup* está sempre presente no sinal de corrente de uma FAI. Assim, após um afundamento na amplitude do sinal de corrente o referido método monitora o gradativo crescimento da amplitude do sinal de corrente para determinar a ocorrência da FAI. Ressalta-se que esse método somente verifica se existe uma FAI quando um transitório é detectado (Stein, 2015).

Stein (2015) utiliza a técnica de detecção de eventos transitórios, a qual fundamenta-se no cálculo contínuo das distâncias euclidianas entre dois pontos consecutivos no plano formado pelas amostras do sinal de corrente e o respectivo valor da primeira função-diferença desse sinal. Inicialmente, é calculado o valor da 1ª função-diferença do sinal de corrente (i_a) para a amostra atual (n) através da equação (1).

$$del_1(n) = i_a(n) - i_a(n - 1) \quad (1)$$

Os valores de $del_1(n)$ e $i_a(n)$ são colocados como pares ordenados num plano cartesiano dado por $del_1 \times i_a$. Nesse plano, o movimento dos pontos $P(n) = (del_1(n), i_a(n))$ descreve uma trajetória bem definida em torno da origem do referido plano durante a operação normal do sistema, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Plano formado por del_1 e i_a antes da ocorrência do transitório



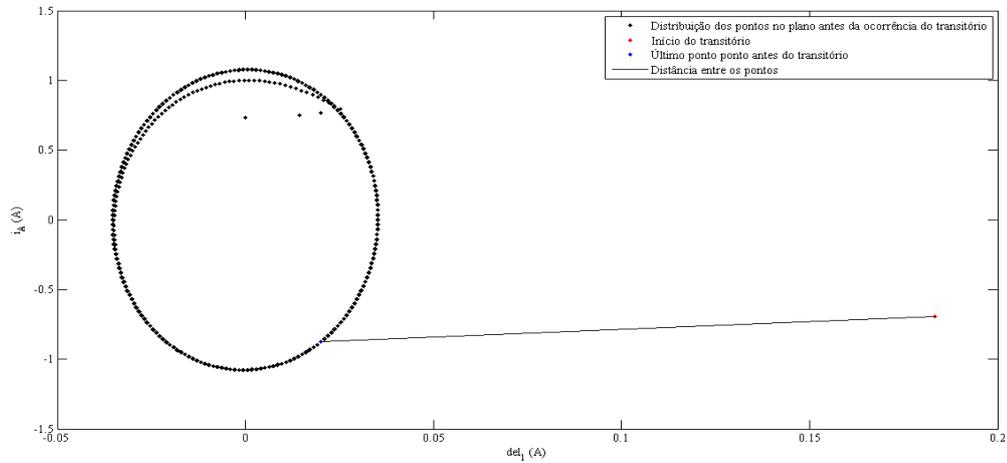
Fonte: Proposição de uma Nova Técnica para Detecção de Falhas de Alta Impedância em Redes de Média Tensão.(2015)

Com isso a distância entre dois pontos consecutivos é relativamente pequena. Entretanto, quando ocorre um transitório no sistema elétrico que altere bruscamente a forma de onda da corrente amostrada, os pontos são desviados da trajetória de operação normal. No instante que ocorre essa variação brusca, a distância entre pontos consecutivos sofre um incremento elevado de forma súbita. Essa variação pode ser observada na Figura 6, onde a reta traçada entre os pontos $P(n-1)$ e $P(n)$ representa a distância entre, respectivamente, o último ponto antes da ocorrência do transitório e o primeiro ponto após a ocorrência do mesmo.

De posse disso, calculando a distância euclidiana entre pontos consecutivos no plano $del_1 \times i_a$, pode-se determinar a ocorrência de um transitório. A distância é calculada pela equação (2).

$$dist_1 = \sqrt{(del_1(n) - del_1(n-1))^2 + i_a(n) - i_a(n-1))^2} \quad (2)$$

Figura 6 - Plano formado por del_1 e i_a no momento em que ocorre o transitório.



Fonte: Elaborado pelo autor

O valor de ajuste para detecção de um transitório (Th_{trans}) é calculado conforme equação (3) e é atualizado a cada nova amostra.

$$Th_{trans}(n) = \mu(janela(n)) + 1,2 \times \sigma(janela(n)) \quad (3)$$

Onde μ e σ representam a média e o desvio padrão, respectivamente, da janela de dados, a qual contém um número de amostras equivalente a um ciclo (N), segundo a respectiva amostragem. A cada novo valor de $dist_1$, a primeira amostra da janela é descartada e os termos restantes são alocados para a esquerda. Assim, o novo valor de $dist_1$ é colocado na última posição, ou seja, a mesma é alocada na extremidade direita da janela.

Assim, um transitório é detectado quando a condição da expressão em (4) for satisfeita.

$$dist_1(n) > Th_{trans} \quad (4)$$

Stein (2015) classifica a FAI baseado na característica da fase de buildup da corrente de falta. Para todo sinal amostrado é retirada a característica da envoltória do mesmo. Obtém-se isso através do valor máximo de uma janela de dados contendo N amostras de corrente i_a , a qual é aplicada de forma semelhante à janela descrita anteriormente de acordo com a expressão em (5)

$$env_1(n) = \max(janela_2(n)) \quad (5)$$

O sinal obtido é filtrado em um filtro de média para uma janela contendo N valores de env_1 conforme a equação:

$$env_2(n) = \mu(janela_3(n)) \quad (6)$$

Depois de eliminado o resíduo do filtro de valores máximos, o qual mantém o valor máximo do sinal de corrente no momento da ocorrência do transitório por um ciclo, e da estabilização do sinal de env_2 , fica caracterizado o valor de Th_{FAI} . Assim, uma falta de alta impedância será classificada sempre que, após a detecção de um transitório, as condições em (7) e (8) forem satisfeitas por pelo menos 5 ciclos

$$env_1(n) > Th_{FAI} \quad (7)$$

$$env_2(n) > env_2(n - 1) \quad (8)$$

4.3 Método da Sequência Negativa

Proposto por Oliveira (2013), esse método trata a detecção de FAIs através da corrente de sequência negativa e as assinaturas nela referenciadas. Toda vez que um valor limítrofe para a corrente de sequência negativa é ultrapassado, fica caracterizada uma FAI. Acredita-se que a necessidade do conhecimento prévio das características de carga e dos níveis de desbalanço da rede em questão sejam uma desvantagem deste método, visto que esse conhecimento prévio é indispensável para determinação do valor limítrofe de corrente de sequência negativa.

Segundo Oliveira (2013), o modelo de FAI aplicado é baseado nos trabalhos de (Park, 2001) e (Nakagomi,2006), os quais modelam com sucesso as FAIs.

Conforme referido anteriormente, a detecção da FAI é feita com base na medição da corrente de sequência negativa, a qual se apresenta quando sistemas trifásicos encontram-se desequilibrados. Essa componente não surge em curto-circuitos trifásicos, tão pouco surgem de maneira expressiva quando cargas não-lineares trifásicas são ligadas à rede.

Oliveira (2013) desenvolveu um modelo no qual as entradas são as leituras dos TCs de cada fase. Elas são amostradas com taxas equivalentes a 24 amostras por ciclo, quantizadas em 8 bits e usadas para o cálculo dos fasores de cada fase. Através desses fasores, é calculada conforme a equação 9 a componente de sequência negativa dos respectivos sinais de corrente.

$$\begin{bmatrix} I0 \\ I1 \\ I2 \end{bmatrix} = [F]^{-1} \times \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} \quad (9)$$

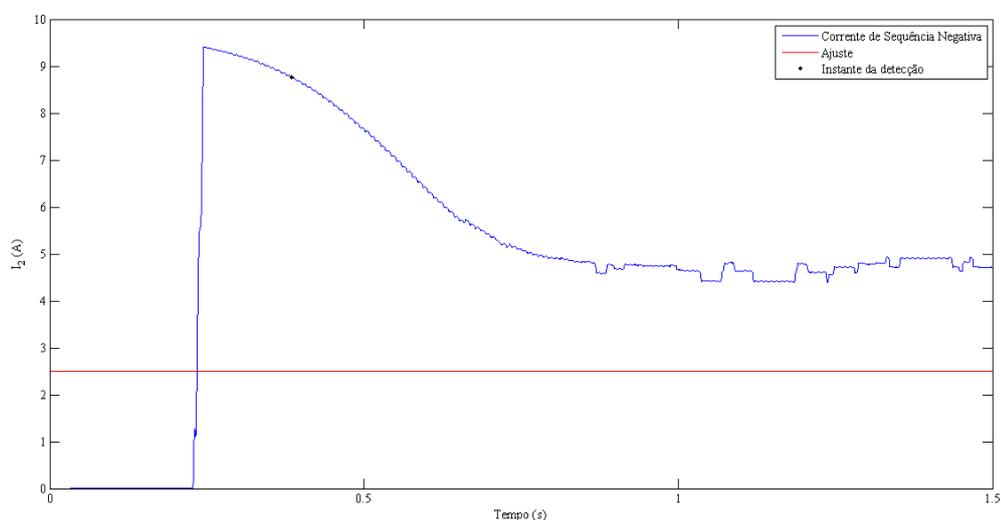
O algoritmo desenvolvido por Oliveira (2013) não utiliza o comportamento transitório, mas sim através do regime permanente, pelo fato de que, dificilmente, num sistema de distribuição, uma variação de carga normal se dará de maneira tão brusca que insira 30A de corrente

de sequência negativa no sistema, por exemplo, em um curto espaço de tempo. (Anderson, 1998).

Segundo Oliveira (2013), grandes cargas não-lineares, como indústrias por exemplo, ligam e desligam suas cargas do sistema de maneira trifásica e efetivamente simultânea, o que causa transientes de corrente de sequência negativa que logo são sanados, ou não se mantêm num nível constante (Anderson, 1998), (Dias et al, 2005). Falhas que desliguem um ramo particularmente denso de um alimentador poderiam, subitamente, injetar uma grande quantidade de corrente de sequência negativa no sistema. Todavia, para isso, essa falta deve ser desbalanceada e, se não disparar a atuação de nenhuma das proteções na subestação, é muito provável que tal falta seja uma FAI.

Para atuação deste método, como mostrado na figura 7, dois ajustes são necessários: a corrente de pick-up (I_p) e o tempo de temporização (t_t). Para ambos os ajustes é necessário que se conheça o comportamento da FAI no alimentador. Assim, para o ajuste desses parâmetros, testes e estudos se tornam necessários por parte da concessionária. No caso de I_p , este deve ser um ajuste variável de acordo com a carga do alimentador.

Figura 7- Método da Sequência Negativa



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Método da Morfologia Matemática

Segundo Gautam e Brahma (2013) as vantagens de técnicas fundamentadas em Morfologia Matemática (MM) consistem no fato de que elas podem detectar e distinguir variações muito pequenas em uma forma de onda. Assim, a Figura 8 mostra as formas de onda de tensão e

corrente para uma FAI. Nessa Figura, o detalhe ampliado mostra que há uma ligeira distorção na forma de onda da tensão no ponto em falta. Esta pequena distorção é obviamente refletida na subestação, como pode ser visto na Figura 9. Ressalta-se que é possível que a forma de onda de corrente na subestação também contenha uma ligeira perturbação, mas a extensão de tal distorção pode variar para diferentes condições de pré-falta. Em geral, as distorções na forma de onda de tensão não dependem das correntes de pré-falta, apresentando uma assinatura mais consistente quando processada por MM. Devido a algumas propriedades únicas da MM, esta ferramenta possui meios de detectar pequenas distorções e, esta metodologia processa os sinais de tensão para classificar as FAIs

A classificação de FAI por MM utiliza as operações elementares de dilatação e erosão. Com base nestas duas, várias outras transformações são definidas, como as operações de abertura e fechamento. A Equação 10 define a dilatação entre um sinal $f(n)$ e um elemento estruturante $g(m)$.

$$y_d(n) = (f \oplus g)(n) = \max\{f(n - m) - g(m)\} \quad (10)$$

Onde:

$$0 \leq (n - m) \leq n \text{ e } m \geq 0$$

Da mesma forma, (11) define a erosão entre $f(n)$ e $g(m)$:

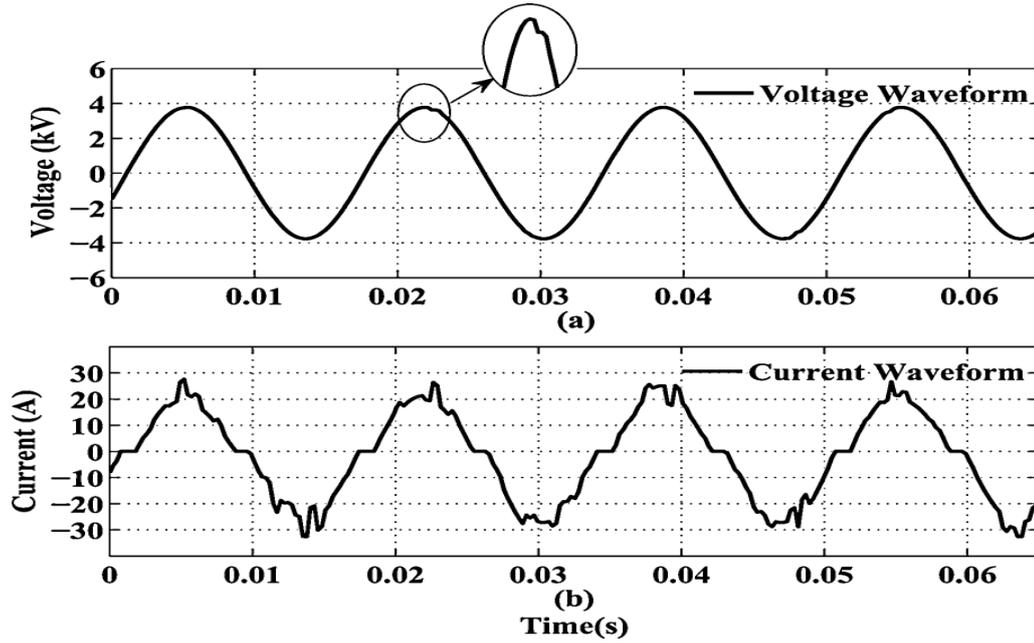
$$y_e(n) = (f \ominus g)(n) = \min\{f(n + m) - g(m)\} \quad (11)$$

Onde:

$$0 \leq (n + m) \leq n \text{ e } m \geq 0$$

Nestas equações, $f(n)$ é o sinal a ser transformado, no domínio definido $Df = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ e $g(m)$ é o elemento estruturante, definido no domínio $Dg = \{y_0, y_1, \dots, y_n\}$, sendo n e m inteiros tal que $n > m$.

Figura 8 - Tensão e corrente do arco durante uma FAI.



Fonte: Detection of High Impedance Fault in Power Distribution Systems Using Mathematical Morphology. (2013)

Com base nestas duas operações elementares, os operadores abertura e fechamento são definidos, conforme (11) e (12):

$$y_0(n) = (f \circ g)(n) = (y_e \oplus g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (12)$$

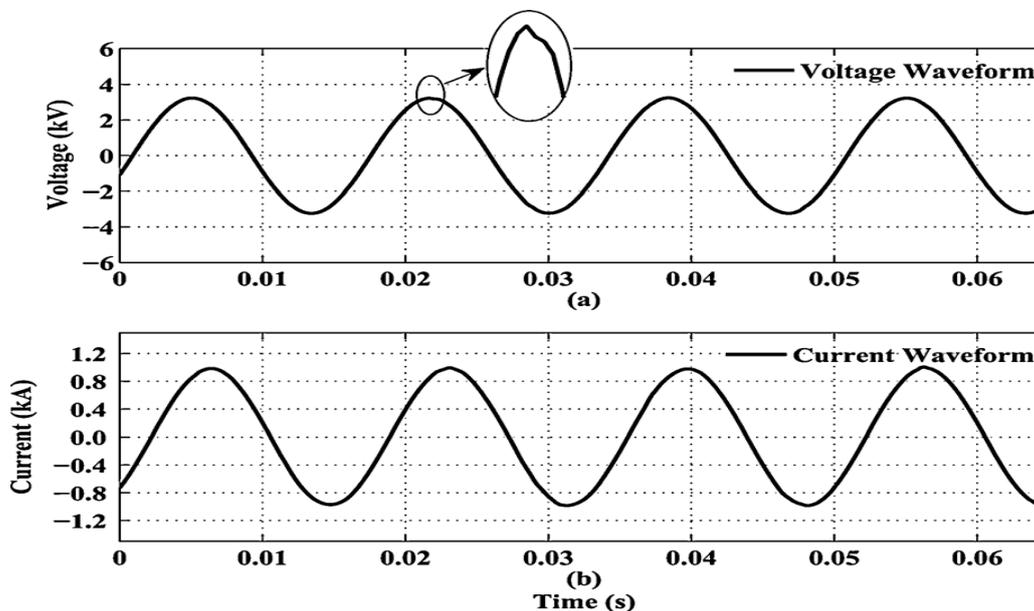
$$y_e(n) = (f \bullet g)(n) = (y_0 \ominus g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (13)$$

Pode ser observado a partir de (10) e (13) que estas transformações requerem apenas a adição e a comparação. Então, tais operadores impõem uma carga computacional muito baixa, o que é uma grande vantagem para aplicações em tempo real.

Os elementos estruturantes são a base de todas as operações em MM e são usados como sondas para extração de características. Podem ter comprimentos diferentes, e podem ser lineares, senoidais, quadradas, circulares ou com outras formas geométricas. A frequência de interesse desempenha um papel importante na seleção de um elemento de estruturação para uma aplicação particular, embora a escolha seja influenciada por outros fatores, tais como o tipo de

sinal, espectro de frequência e a taxa de amostragem. A escolha ideal seria aquela que captura a característica de interesse, enquanto suprime outras funcionalidades.

Figura 9 - V-I características durante FAI.



Fonte: Detection of High Impedance Fault in Power Distribution Systems Using Mathematical Morphology. (2013)

Além disso, a Equação 14 define a Diferença entre as Operações de Abertura e Fechamento (CODO, do inglês *Closing Openig Difference Output*). Esta operação é muito eficaz na detecção de qualquer perturbação em formas de onda. A aplicação proposta usa a operação CODO para detectar e classificar FAIs. Uma baixa taxa de amostragem de 3840 Hz (64 amostras por ciclo) foi escolhida de modo que a carga de cálculo é baixa, mantendo, contudo, a capacidade de capturar a assinatura perturbação.

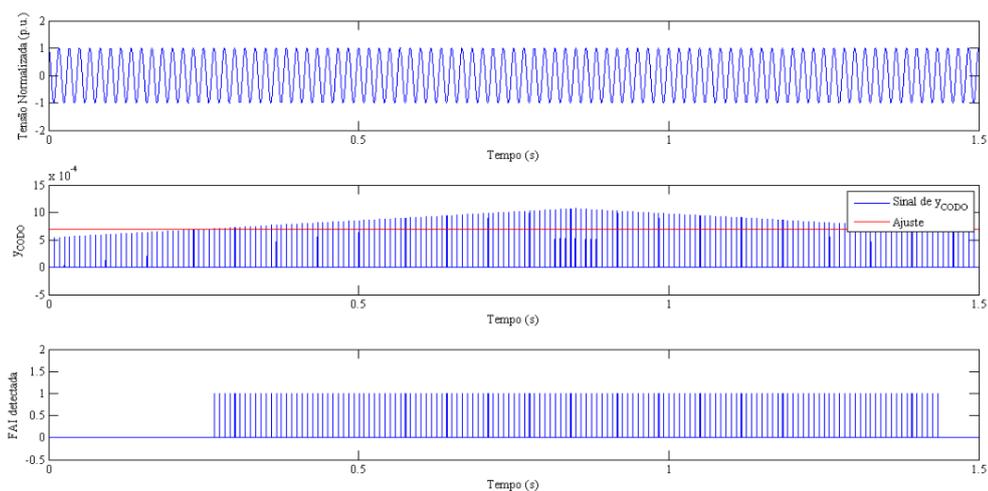
$$y_{CODO}(n) = y_e(n) - y_0(n) = (f \bullet g)(n) - (f \circ g)(n) \quad (14)$$

Gautam e Brahma (2013) apresentam uma análise detalhada que leva a algumas diretrizes na seleção de um elemento estruturante ideal para detectar distúrbios no sistema de energia. Com base nestas orientações, amostras de formas de onda de tensão do secundário do transformador de tensão (TP) são selecionadas para serem tratadas com o CODO. As formas de onda são normalizadas pelo valor de pico e seu valor nominal antes do tratamento com o CODO para tornar a aplicação geral e aplicável a todos os níveis de tensão.

Uma vez que as formas de onda são normalizadas, a altura (dimensão) de cada elemento estruturante é igual 0,01. As diretrizes também recomendam a utilização de elementos estruturantes com menor comprimento para a detecção de perturbação. Assim, um processo iterativo

foi adotado para determinar um comprimento ideal. Elementos estruturantes com comprimentos de duas a cinco amostras foram implementadas e o desempenho foi observado. Por fim, foi verificado que todos os elementos estruturantes eram capazes de detectar as faltas, mas o mais curto resultou no menor atraso. Portanto, um elemento estruturante de comprimento dois foi selecionado para esta aplicação. A figura 10 mostra a atuação do método.

Figura 10- Método da Morfologia Matemática



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram descritos os três métodos implementados, assim como segundo seus autores suas vantagens. Os métodos foram analisados com base nos desempenhos em termos da capacidade de detecção das FAIs, do intervalo até a detecção.

5 RESULTADOS E SIMULAÇÕES

5.1 Considerações Gerais

O presente capítulo descreve o sistema teste utilizado neste estudo, o qual simula uma subestação contendo dois alimentadores com características distintas, sendo um rural e outro urbano. Além disso, é apresentado o modelo computacional usado para simular as faltas de alta impedância. Serão demonstrados três casos com o objetivo de comprovar a eficácia dos métodos implementados.

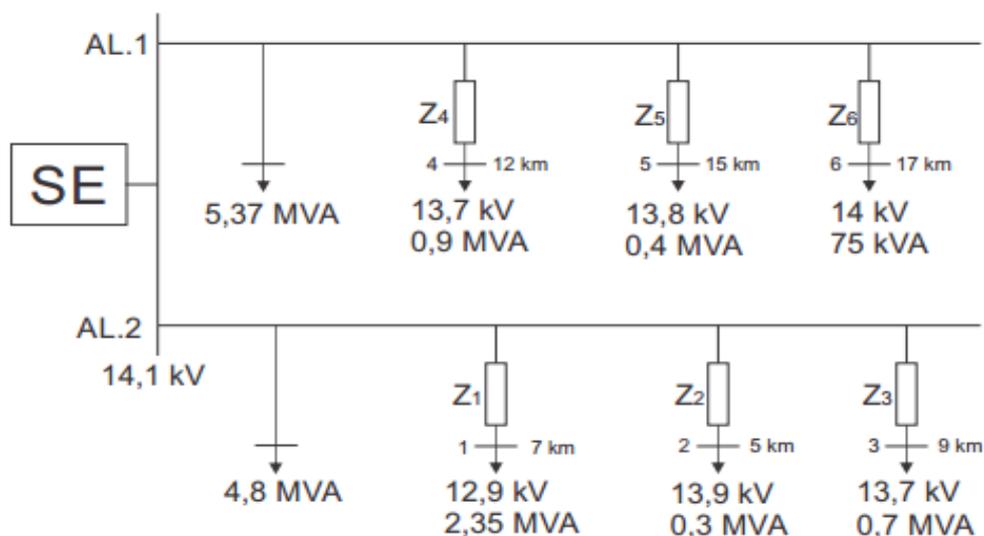
5.2 Sistema Teste

Ressalta-se que os sinais do banco de dados foram obtidos a partir da simulação de FAIs no sistema teste da Figura 11, conforme Farias (2013) a uma taxa de 192 amostras por ciclo durante 5 ciclos. Esse sistema foi implementado no software EMTP-ATP[®]. O mesmo é composto por dois alimentadores principais, sendo que o primeiro possui extensões de linhas menores e cargas mais concentradas, representando um alimentador urbano. O segundo possui extensões de linhas mais prolongadas e alocação de cargas mais espalhadas, representando um alimentador rural. Os alimentadores são da classe de alimentação de 15kV ligados a uma subestação rebaixadora (69/13,8kV). Destaca-se que as FAIs foram simuladas em todas as barras do sistema e também em pontos estratégicos, de modo a criar casos de FAI com correntes de variadas magnitudes e diferentes durações das fases de *buildup* nas formas de onda.

O modelo de arco-elétrico para os testes é o mesmo apresentado por Nakagomi (2006), o qual é constituído por duas resistências variáveis, HZR1 e HZR2, conectadas em série. Sendo assim, HZR1 é responsável por produzir as distorções e assimetrias características das FAIs, durante todos os ciclos da corrente de falta. Já HZR2 apresenta um valor inicialmente elevado, que vai diminuindo ao longo do tempo, fazendo com que a corrente cresça, caracterizando assim, a fase de *buildup* do sinal de corrente. Ambas as resistências são controladas por MODELS implementadas no EMTP-ATP[®].

O modelo desenvolvido por Nakagomi (2006) conta ainda com três chaves controladas por TACS, as quais são funções programadas no EMTP-ATP[®]. Uma representação desse arranjo é mostrada na Figura 12, onde as chaves $t1$ e $t2$ definem, respectivamente, se a falta ocorre do lado da fonte ou do lado da carga, característica essa previamente configurada pelo usuário antes da simulação.

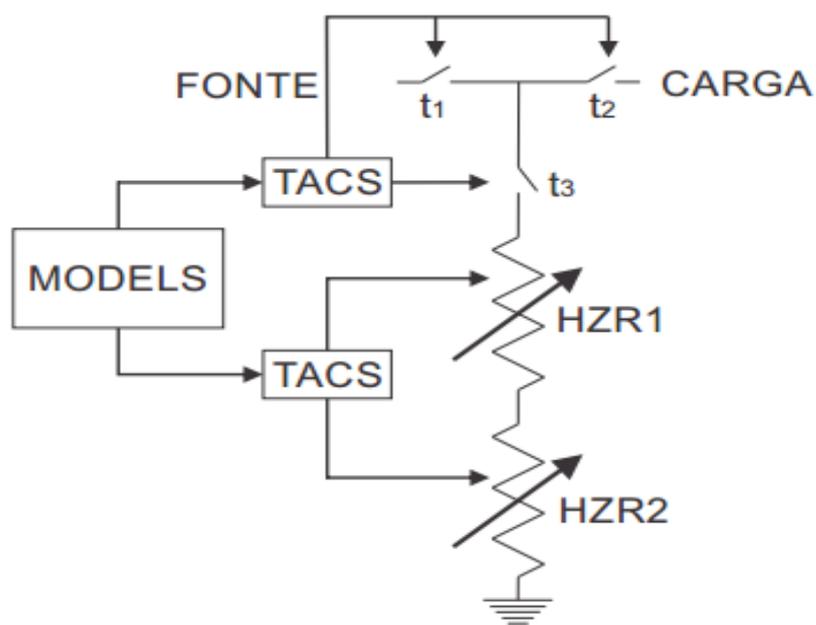
Figura 11 - Sistema teste utilizado.



Fonte: Detecção e Classificação de transitórios em redes de distribuição para identificação de faltas de alta impedância. (2013)

Além disso, a resistência inicial de HZR2 deve ser configurada antes da simulação. Por fim, a chave t_3 controla o tempo que o condutor leva para tocar o solo. Esse tempo equivale a 1,3 segundos, não podendo ser modificado pelo usuário (Nakagomi, 2006).

Figura 12 - Modelo para simulação de FAIs desenvolvido em Nakagomi (2006).



Fonte: Proposição de uma Nova Técnica para Detecção de Faltas de Alta Impedância em Redes de Média Tensão. (2015)

5.3 Energização de Banco de Capacitores

Para diminuir perdas ocasionadas por baixo fator de potência e aumentar a capacidade do sistema, as concessionárias utilizam banco de capacitores. Esses equipamentos são instalados nas subestações ou no decorrer dos alimentadores e sua potência e posição de instalação dependem de estudos por parte da concessionária.

Na energização de um banco de capacitores, ocorrem transitórios que se traduzem pelo aumento dos valores de corrente e de frequência. Os valores desses transitórios e suas durações dependem de vários fatores, dentre eles, do valor instantâneo da tensão no momento do chaveamento, da capacitância inserida e da carga inicial do banco de capacitores.

Neste trabalho foram modelados dois bancos de capacitores trifásicos, um de 600 kVAR e outro de 900 kVAR conectados em estrela não aterrada, os quais eram chaveados a um dos alimentadores do sistema teste. Tais eventos foram simulados de modo a verificar a capacidade dos métodos analisados de diferenciar o chaveamento dos bancos de capacitores das FAIs, sendo que as metodologias não devem atuar para qualquer evento que não seja uma FAI.

5.4 Energização de Transformadores

Os transformadores utilizados nos sistemas de distribuição requerem, em regime permanente, correntes de excitação da ordem de 0,5% a 2% da corrente nominal. Entretanto, durante o processo de energização, os surtos de corrente com valor de pico inicial podem superar vinte vezes o valor de pico da corrente nominal. Este efeito é conhecido como *inrush*. Os surtos de corrente podem durar vários ciclos e gerar componentes de alta frequência.

A impedância da carga ligada ao secundário, as características magnéticas e geométricas do núcleo, a magnitude e a polaridade do fluxo residual no núcleo magnético, além do valor de tensão aplicada ao transformador, são responsáveis pela intensidade e duração dessas correntes.

As correntes de *inrush* têm, entre algumas consequências, o afundamento temporário da tensão que afeta a qualidade de energia e a deterioração dos componentes do sistema devido ao sobreaquecimento causado pelo aumento da corrente, podendo ocorrer a atuação indevida de fusíveis e relés de proteção. Além disso, devido ao elevado nível de conteúdo harmônico e, conseqüentemente, o elevado índice de distorção dos sinais gerados, as metodologias para detecção e classificação de FAIs podem atuar indevidamente durante a energização destes componentes.

Assim, a energização de três transformadores, sendo um monofásico de 25kVA e dois trifásicos, um de 75 kVA e outro de 300 kVA, foram simuladas no sistema teste da Figura 9. Os sinais gerados nessas simulações também foram processados pelas metodologias de detecção de FAIs com o intuito de verificar possíveis atuações indevidas para a respectiva energização de transformador.

5.5 Resultados

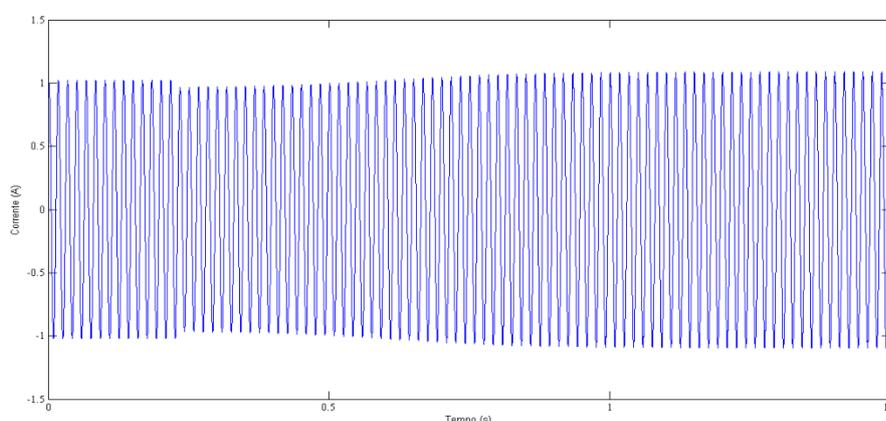
Para verificar e analisar o desempenho das técnicas implementadas foram simulados 41 casos utilizando os sinais de corrente e de tensão gerados no EMTP/ATP, com base no sistema teste da figura 11. Foram simulados casos de falta de alta impedância do lado da fonte com resistência R_{Falta} de 250Ω no instante 0,22s nos seis pontos do sistema teste, casos de energização de transformadores, sendo um monofásico e dois trifásicos em todos os pontos do sistema teste. Ainda, foram simulados casos de energização de banco de capacitores, também em todos os pontos, um com 600 kVAR e outro com 900 kVAR.

Com base nos resultados, foram verificadas semelhanças nas atuações de cada método para cada tipo de evento simulado. Assim, as seções seguintes apresentam os resultados obtidos para uma FAI, um caso de energização de transformadores e um caso de energização de banco de capacitores.

5.5.1 Caso 1 – FAI no ponto 6 do Sistema Teste

O caso simulado envolve uma falta de alta impedância que ocorre no ponto 6 do sistema teste, onde a resistência de falta é de 250Ω , ocorrida no instante 0,22 s.

Figura 13-Corrente na Fase A



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse ponto encontra-se muito distante da subestação e possui uma carga pequena (75 kVA) se comparada com as demais. Neste caso a detecção torna-se difícil, pois haverá uma pequena diminuição na corrente total do alimentador, tornando-a quase imperceptível como mostrado na Figura 13.

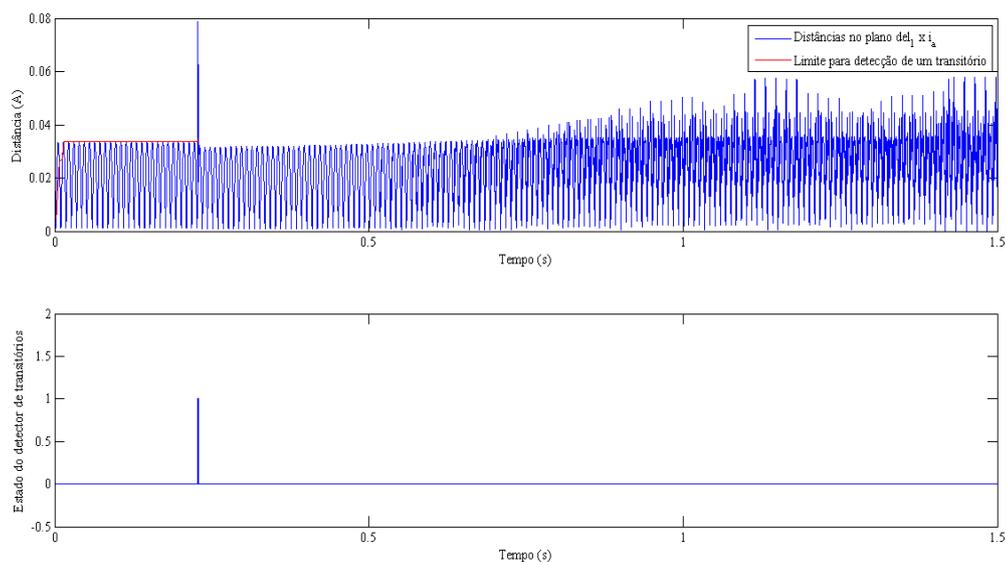
Na Tabela 1, encontram-se os valores dos tempos obtidos por cada método para classificação da falta.

Tabela 1- FAI no ponto 6 do Sistema Teste

Método	Tempo de detecção
Método da Envoltória	0,35965 s
Método da Seq. Negativa	0,38622 s
Método da Morf. Matemática	0,2672 s

Na figura 14, a qual mostra a atuação do detector de transitórios, é possível observar que, no instante em que ocorre a falta, a distância entre os respectivos pontos no plano $del_1 \times i_a$, apresenta um incremento considerável em relação aos valores anteriores, mesmo com a pequena variação da corrente ocorrida no instante da falta.

Figura 14- Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano plano $del_1 \times i_a$. (b) Estado do detector.

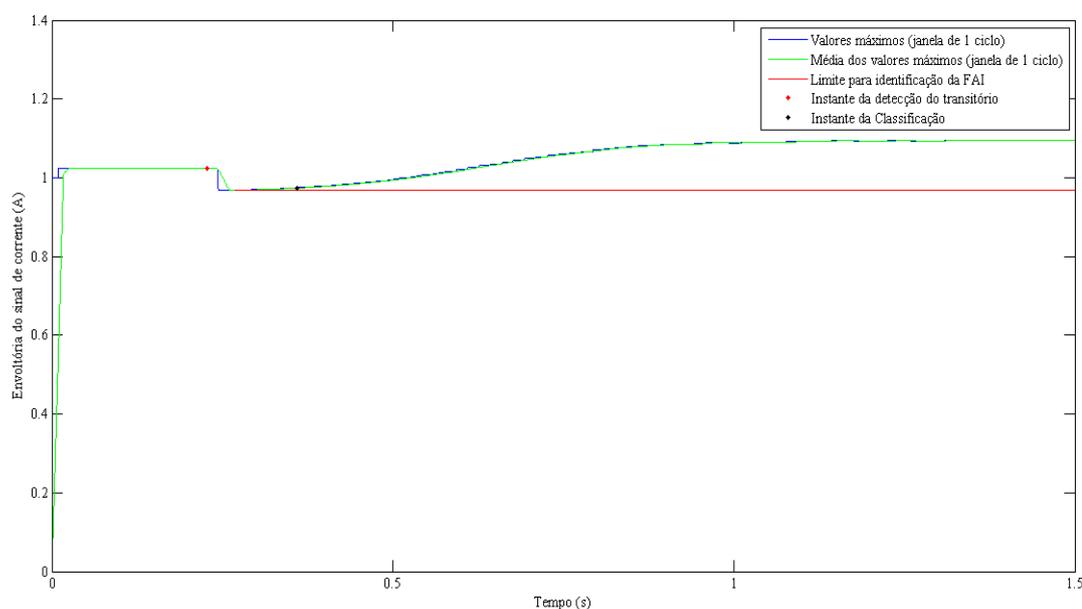


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, o detector consegue identificar esse transitório. Como essa corrente varia pouco na queda do condutor devido a carga desconectada ser baixa, a distância entre os pontos no plano no momento da detecção é muito pequena.

Após ser detectado o transitório, ocorre a classificação da falta, a qual é feita pela característica de *buildup*. Na figura 15, os pontos em vermelho e em preto mostados representam, respectivamente, o instante da detecção do transitório e da classificação do evento.

Figura 15- Atuação do Método da Envoltória

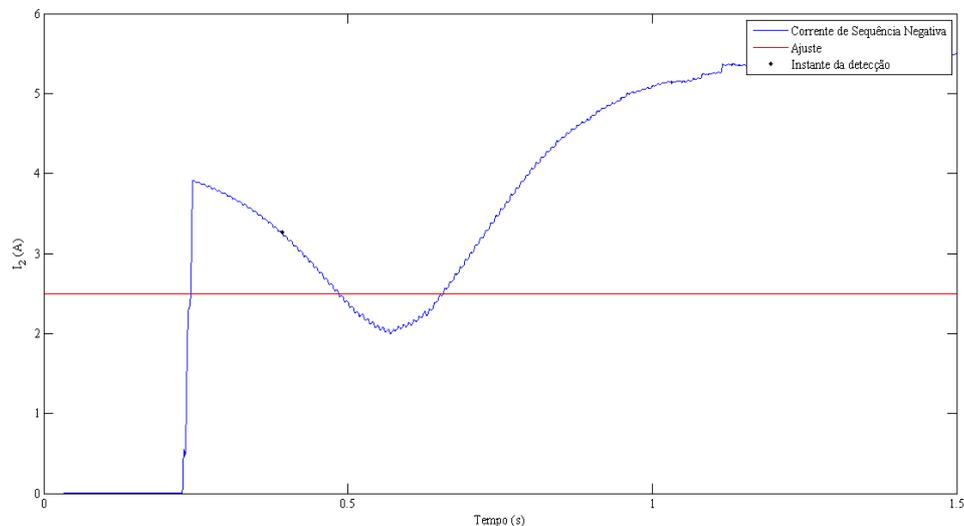


Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 16 representa o comportamento da metodologia de sequência negativa frente ao caso proposto, pode ser observado que a corrente de sequência começa a sofrer uma oscilação mais significativa a partir de 0,22 s após a ocorrência da falta, ultrapassando a corrente de ajuste no instante 0,24s. O método detecta a falta em $t=0,39s$, de acordo com a temporização ajustada.

Para faltas de alta impedância, este método mostra-se eficiente mesmo no ponto analisado, onde a detecção se torna difícil devido aos valores muito baixos da corrente de sequência negativa, tendo em vista que o mesmo se encontra muito distante da subestação.

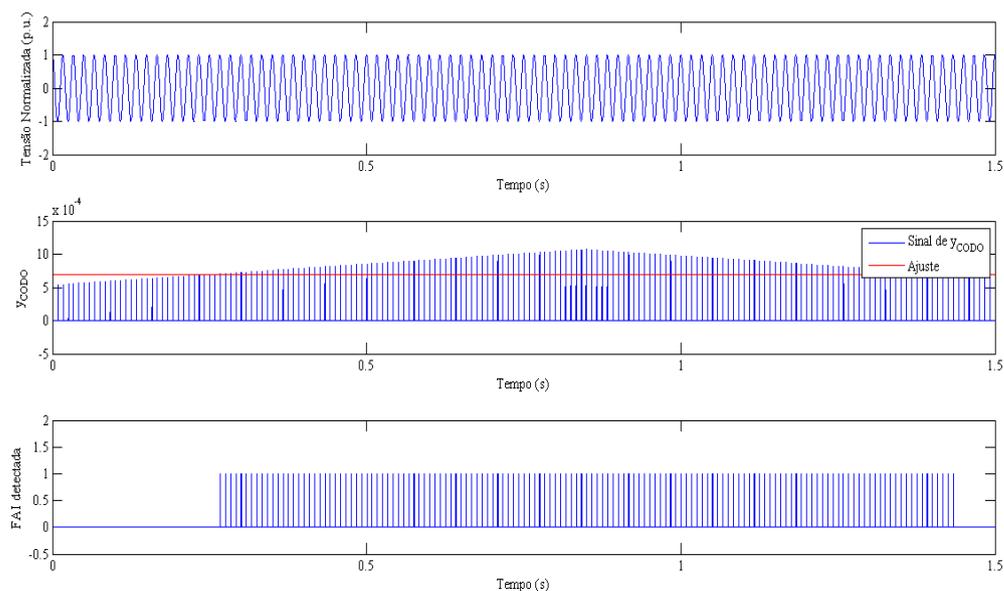
Figura 16- Atuação do Método da Sequência Negativa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a metodologia da morfologia matemática mostrou-se mais rápida na detecção da falta. Na figura 17 podemos ver o instante em que o sinal do CODO ultrapassa o valor de ajuste, fazendo com que seja detectada a falta. A grande vantagem da aplicação em tempo real da metodologia baseada na MM está na baixa carga de cálculo utilizada.

Figura 17- Atuação do Metodo da Morfologia Matemática

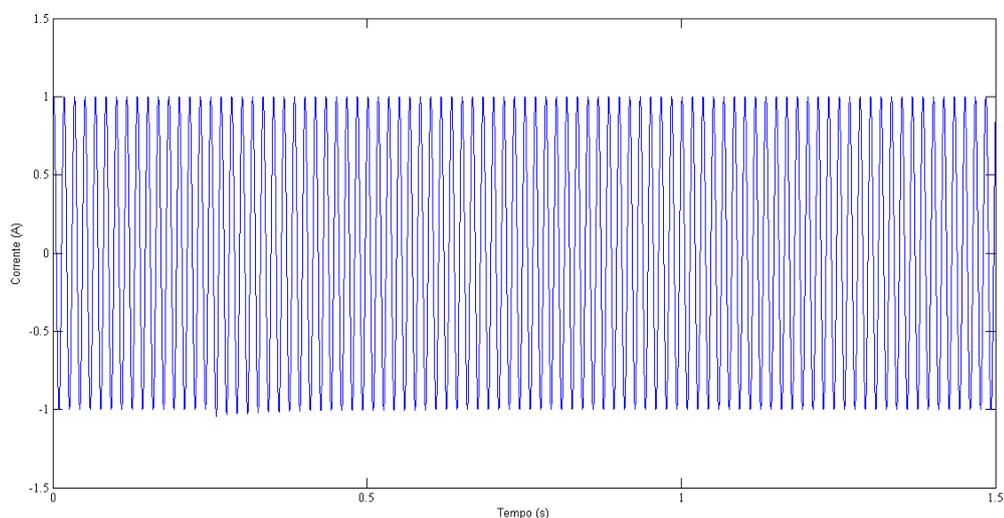


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.2 Caso 2 – Energização de Transformadores no ponto 1 do Sistema Teste

O caso 2 envolve uma energização de transformador (300kVA). Durante eventos deste tipo, provocam surtos de corrente com valor de pico inicial que podem superar vinte vezes o valor de pico da corrente nominal. Este efeito é conhecido como *inrush*. Os surtos de corrente podem durar vários ciclos e gerar componentes de alta frequência podendo causar a atuação indevida dos dispositivos de proteção. Os métodos de detecção de FAIs não devem atuar para este tipo de transitório. Na figura 18 pode-se observar uma variação pouco significativa no sinal de corrente.

Figura 18- Corrente na Fase A



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 2 apresenta a atuação dos métodos para este caso.

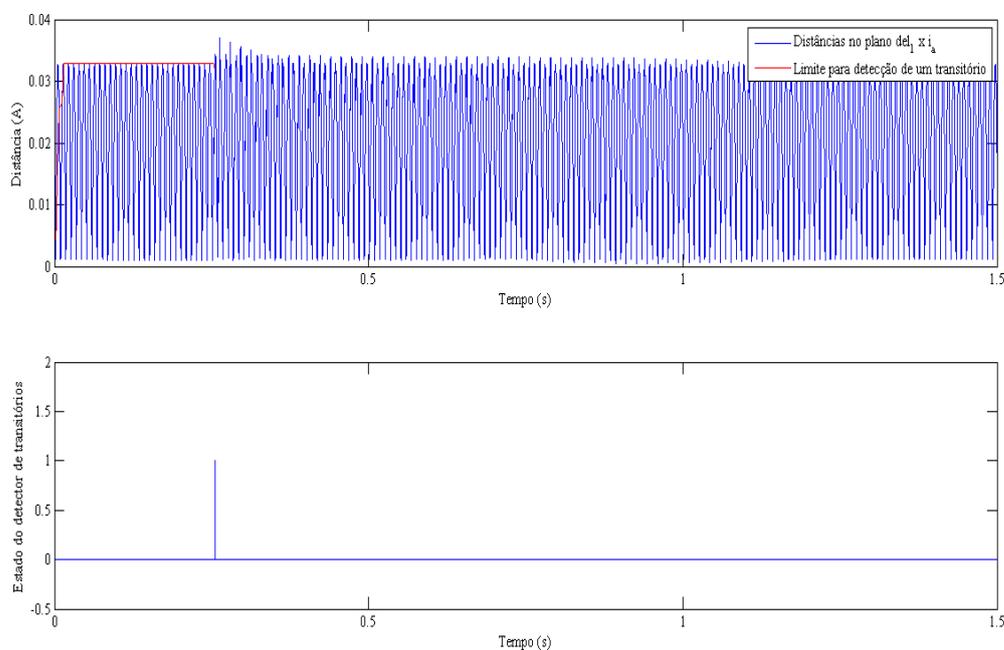
Tabela 2- Energização de Transformadores no ponto 1 do Sistema Teste

Método	Tempo de detecção
Método da Envoltória	Não atuou
Método da Seq. Negativa	Não atuou
Método da Morf. Matemática	0,2672 s

O Método da envoltória e o da Sequência Negativa atuaram adequadamente, não identificando a energização do transformador como uma Falta de Alta Impedância. Em contrapartida, o método da Morfologia Matemática classificou indevidamente a energização do transformador como FAI no instante 0,2672 s.

Na figura 19, é mostrada a atuação do detector de transitórios do Método da Envoltória, onde é possível observar que o transitório é detectado no instante correspondente a amostra consecutiva à ocorrência do evento.

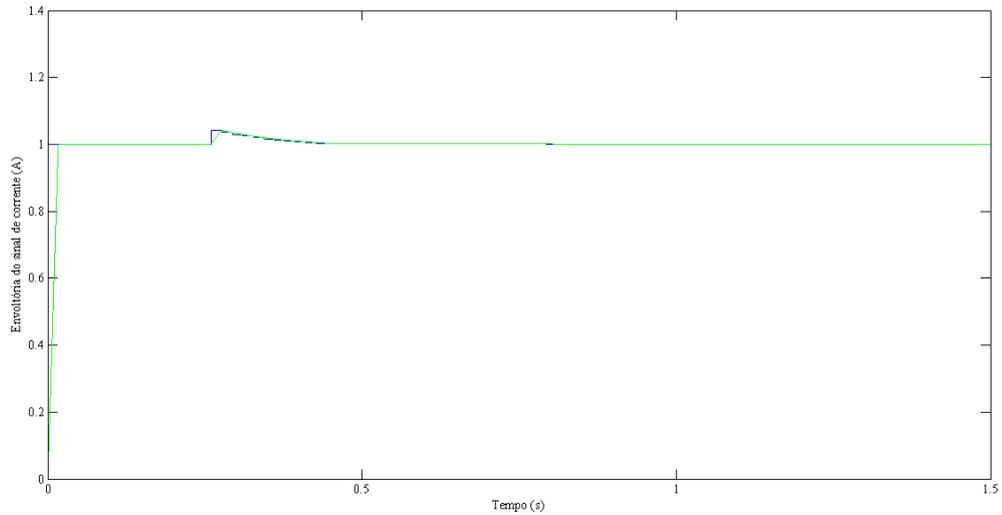
Figura 19- Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivo no plano plano $del_1 \times i_a$. (b) Estado do detector.



Fonte: Elaborado pelo autor.

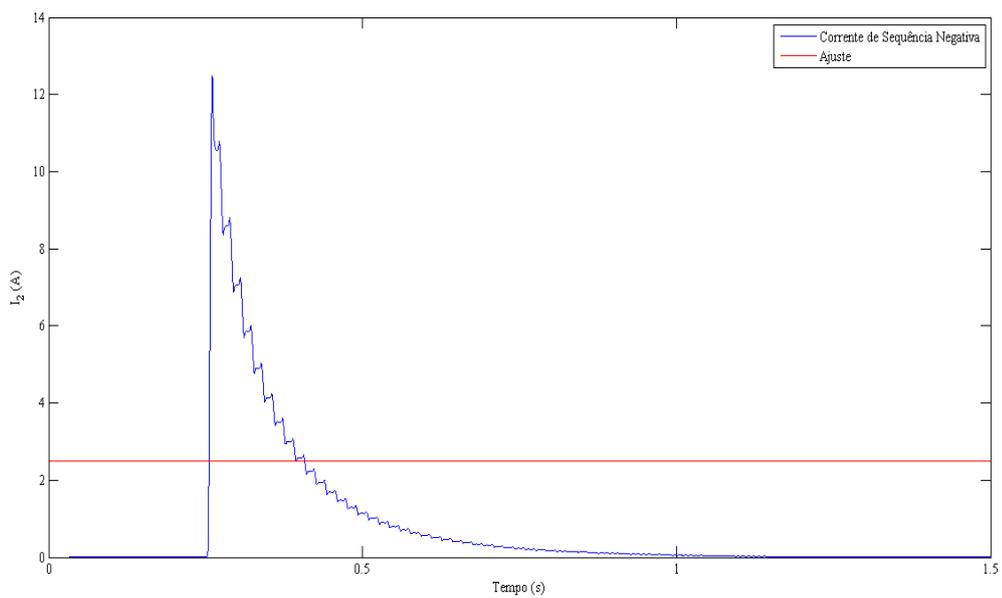
O método não classifica como FAI a energização de transformadores porque a característica de *buildup* não é verificada na respectiva envoltória, conseqüentemente, não satisfazendo as condições para a classificação conforme pode ser visto na figura 20.

Já a Figura 21 apresenta a atuação da metodologia de Sequência Negativa para a energização do transformador em questão. Nessa Figura, pode ser observado que a corrente de sequência negativa sofre uma variação significativa, ultrapassando o valor de ajuste por um tempo menor do que o ajustado para detecção da FAI. Por isso, o método da Sequência Negativa atuou corretamente, pois não classificou a energização do transformador como FAI.

Figura 20- Atuação do Método da Envoltória

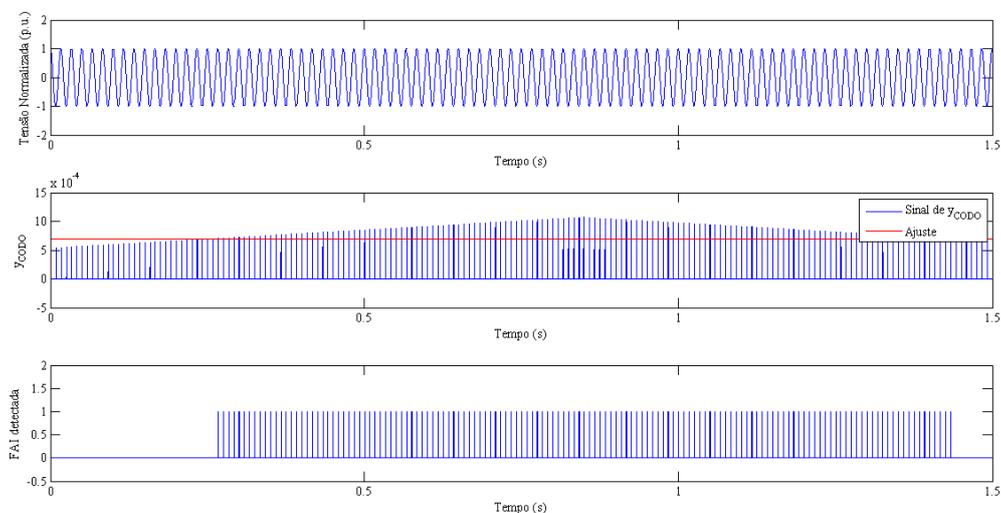
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o Método da Morfologia Matemática, na Figura 22, pode-se perceber que o sinal do CODO ultrapassa o valor de ajuste, fazendo com que seja detectada indevidamente uma FAI para uma energização de transformador.

Figura 21- Atuação do Método da Sequência Negativa

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22- Atuação do Metodo da Morfologia Matemática



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.3 Caso 3 – Energização de Banco de Capacitores no ponto 5 do Sistema Teste

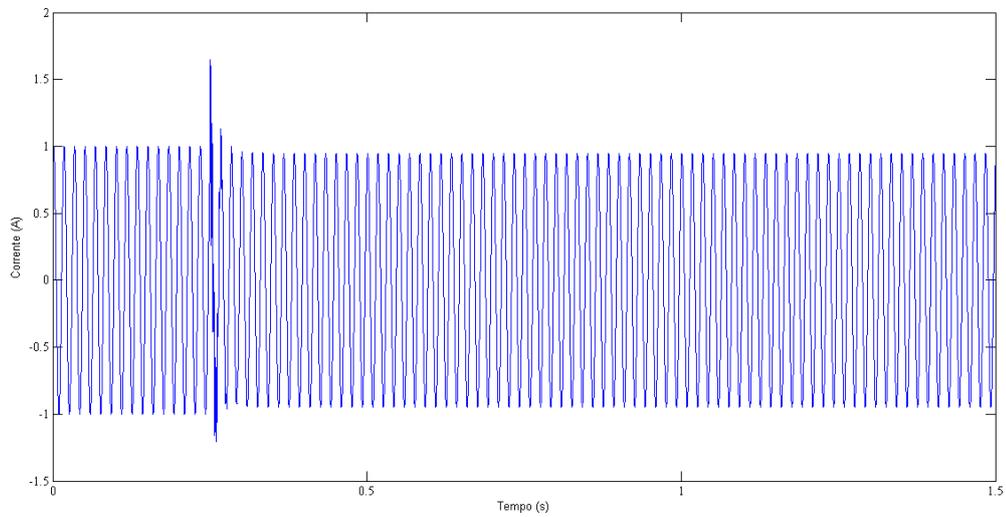
Na ocorrência de baixo fator de potência, as concessionárias instalam bancos de capacitores ao longo das linhas para sua correção e diminuição de perdas. Entretanto, na sua energização, ocorrem transitórios que se traduzem em aumento dos valores de corrente e de frequência. Na Figura 23, pode-se observar que acontece uma variação brusca, provocando um pico de corrente. Assim como para a energização de transformadores, a classificação da energização de um banco de capacitores como FAI representa uma atuação indevida dos métodos analisados.

Nesse contexto, a Tabela 3 resume a atuação dos três métodos para detecção de FAIs para a energização do banco de capacitores 900 kVA no ponto 5 do sistema teste.

Tabela 3- Energização de Banco de Capacitores no ponto 5 do Sistema Teste

Método	Tempo de detecção
Método da Envoltória	Não atuou
Método da Seq. Negativa	Não atuou
Método da Morf. Matemática	0,2672 s

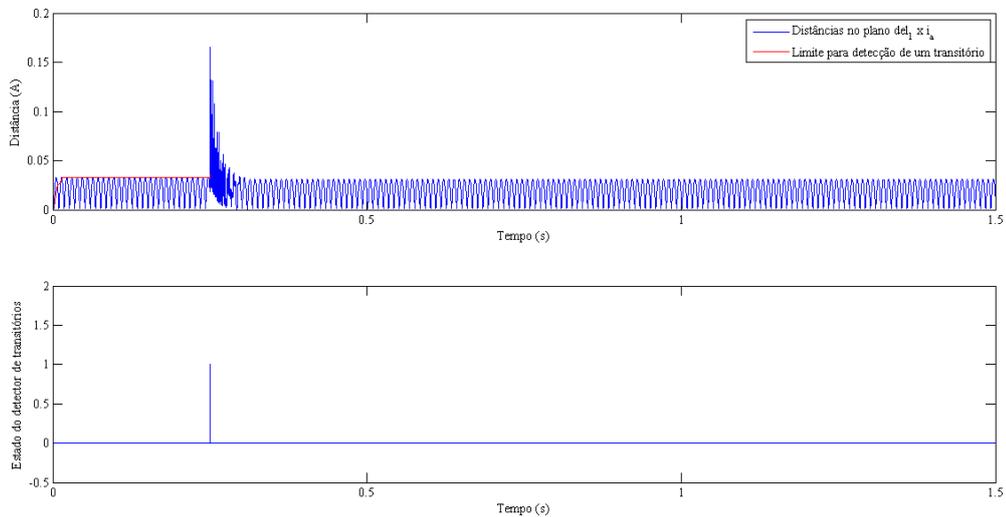
Figura 23- Corrente na Fase A



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, a Figura 24 mostra que o detector de transitórios do Método da Envoltória atuou corretamente no instante equivalente à primeira amostra após a ocorrência da energização do banco de capacitores.

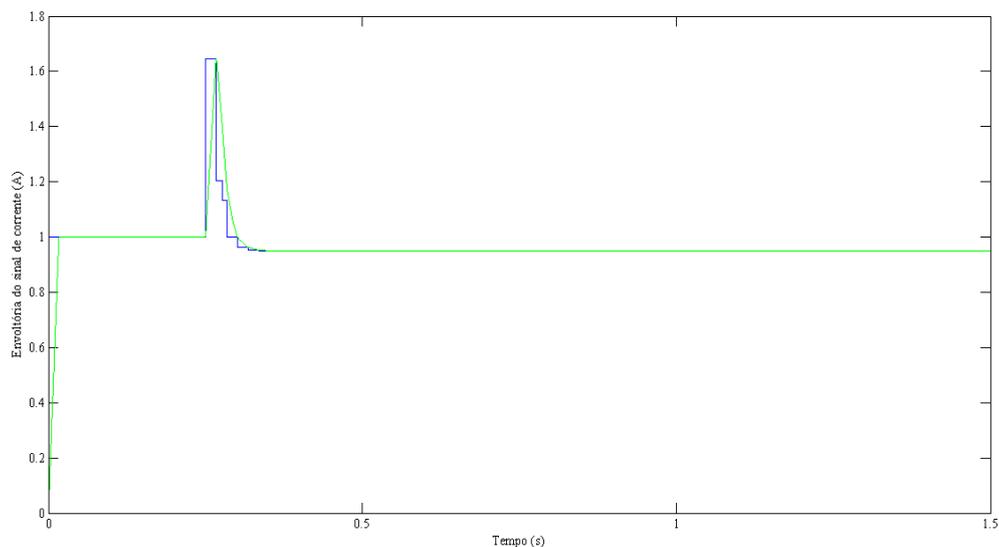
Figura 24- Atuação do detector de transitórios. (a) Distância entre pontos consecutivos no plano plano $del_1 \times i_a$. (b) Estado do detector.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 25, nota-se que, apesar da variação de corrente causar variação significativa na envoltória do sinal de corrente, a característica de *buildup* não se verifica. Logo, o método não classifica o evento como FAI, atuando corretamente.

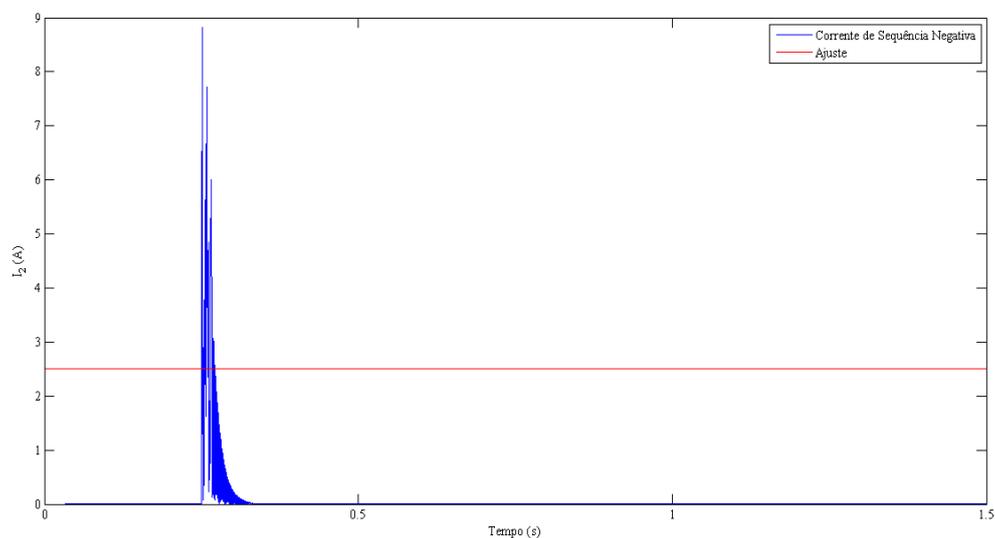
Figura 25- Atuação do Método da Envoltória



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 26 mostra a atuação da metodologia da Sequência Negativa. Nota-se um crescimento considerável na corrente de sequência negativa. Entretanto, a corrente de sequência negativa permanece acima do valor limítrofe por um tempo menor do que o ajustado.

Figura 26- Atuação do Método da Sequência Negativa

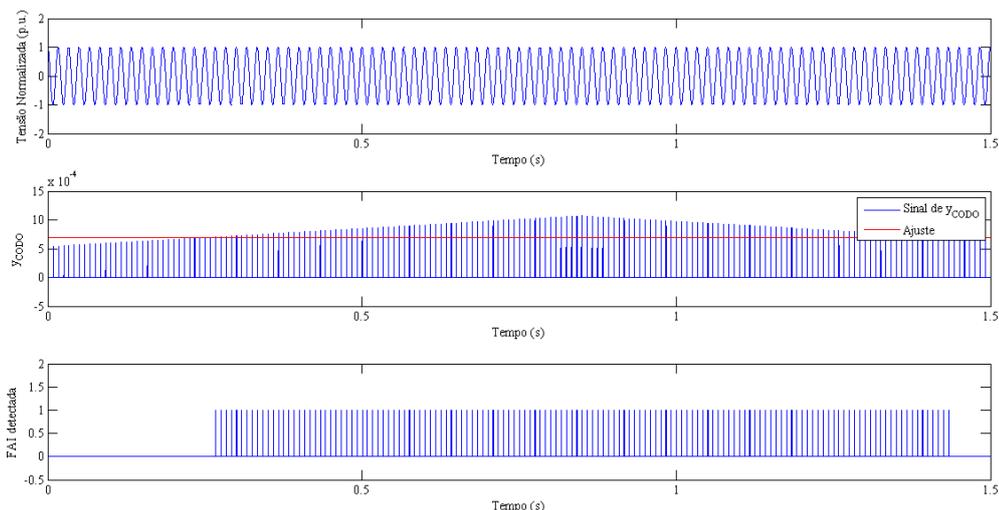


Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, o método atua corretamente, não classificando o evento de energização de banco de capacitores como FAI.

Por fim, a Figura 27 mostra a atuação do Método da Morfologia Matemática, no qual o valor de saída do CODO ultrapassar o ajuste, fazendo com que o método atue de forma incorreta, classificando o evento em questão como uma Falta de Alta Impedância.

Figura 27- Atuação do Metodo da Morfologia Matemática



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Considerações Finais

Os métodos implementados foram testados em todos os casos, sendo que o método da envoltória e o método da sequência negativa atuaram corretamente em todos os casos, já método da morfologia matemática falhou na maior parte deles. Como os resultados apresentaram similaridades apresentamos somente três casos e os outros resultados podem ser vistos na tabela 4 do apêndice, a qual mostra o tempo de detecção da FAI.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

As faltas de alta impedância, comumente chamadas na literatura de FAI, são fenômenos de difícil detecção e que colocam em perigo a vida circundante, humana ou não.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica, principalmente os sistemas aéreos, estão sujeitos à ocorrência de eventos transitórios. Esses transitórios podem ser normais do sistema, como os ocorridos devido ao chaveamento de cargas e energização de máquinas, ou inesperados, tais como os que ocorrem em consequência das descargas atmosféricas, faltas e falhas de equipamentos.

Diante disso necessita-se de uma proteção robusta para esses sistemas, que permita salvaguardar os equipamentos e contribuir para a continuidade do serviço de distribuição. As FAIs fazem parte de um conjunto de transitórios que afetam os sistemas de distribuição, não existindo ainda um método de proteção específico que seja confiável e viável para implementar em todo o sistema.

Como apresentado, os dispositivos de proteção convencionais dos sistemas de distribuição não conseguem detectar as FAIs, por terem seu funcionamento visando sempre uma sobre-corrente. Dentre os métodos existentes, os baseados em redes neurais apresentam carga computacional elevada. Já os métodos aqui comparados são de baixa carga computacional e de fácil implementação.

O método baseado na Morfologia Matemática (MM) mostrou-se não confiável, pois atuou de forma incorreta em muitos casos. Apesar de atuar de forma rápida na detecção das FAIs, ele não distingue outros eventos normais do sistema, classificando todos como faltas de alta impedância.

Já o Método da Sequência Negativa atuou de forma correta em todos os casos. Mesmo assim, apresenta como desvantagem depender de dados previamente obtidos da concessionária de energia para que atue corretamente, sendo que qualquer alteração nesses dados pode afetar o desempenho do mesmo.

Por fim, constatou-se a robustez do Método da Envoltória que atuou de forma correta e rápida em todos os casos, mostrando-se ser altamente eficaz na detecção das FAIs, além de não

apresentar atuações indevidas para outros tipos de transitório. Dessa forma, conclui-se que o Método da Envoltória é o melhor dentre os analisados, tendo em vista seu desempenho e a facilidade de implementação.

6.2 Sugestões para Trabalhos de Futuros

- Analisar o comportamento das metodologias frente a outros eventos transitórios
- Comparar o método da Envoltória com metodologias baseadas em redes neurais
- Desenvolver um localizador de faltas de alta impedância

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Farias, P. E. Detecção e Classificação de transitórios em redes de distribuição para identificação de faltas de alta impedância, 2013
- Martinho, E. Distúrbios da Energia Elétrica. Editora Erica, 2009.
- Nakagomi, R. M. Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006
- Stein, H. Proposição de uma Nova Técnica para Detecção de Faltas de Alta Impedância em Redes de Media Tensão, 2015.
- Horowitz, S. H. e Phadke, A. G., *Power System Relaying*, 4^a ed., John Wiley and Sons, 2014.
- Park, J. K. - A Modeling Method of a High Impedance Fault in a Distribution System Using Two Series Time-Varying Resistances in EMTP – 2001, IEEE
- A. Emanuel *et al.*, “High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kv distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 2, pp. 676–686, Apr. 1990.
- Anderson, P. M. – *Power Systems Protection*, Willey-IEEE Press, 1998
- Dias, Marcos Pereira et al. – *Proteção de Sistemas Elétricos*, Interciência, Rio de Janeiro, 2005
- S. Gautam and S. M. Brahma, *Detection of High Impedance Fault in Power Distribution Systems Using Mathematical Morphology*, 2013.
- R. Lee and M. Bishop, “A comparison of measured high impedance fault data to digital computer modeling results,” *IEEE Trans. PowerApp. Syst.*, vol. PAS-104, no. 10, pp. 2754–2758, Oct. 1985.
- D. Yu and S. Khan, “An adaptive high and low impedance fault detection method,” *IEEE-Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 4, pp. 1812–1821 Oct. 1994.
- M. Eissa *et al.*, “A new protection detection technique for high impedance fault using neural network,” in *Proc. Large Engineering Systems Conf. Power Engineering, 2006*, Jul. 2006, pp. 146–151.

A. Etemadi and M. Sanaye-Pasand, "High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system," *IET Gener., Transm. Distrib.*, vol. 2, no. 1, pp.110–118, Jan. 2008.

J. Carr, "Detection of high impedance faults on multi-grounded primary distribution systems," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-100, no. 4, pp. 2008–2016, Apr. 1981.

R. Lee and M. Bishop, "Performance testing of the ratio ground relay on a four-wire distribution feeder," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 2943–2949, Sep. 1983.

C. Benner *et al.*, "Improved algorithm for detecting arcing faults using random fault behavior," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 17, no. 1, pp.49–56, 1989.

A. Sultan *et al.*, "Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no.1, pp. 461–470, Jan. 1994.

A. Mamishev *et al.*, "Analysis of high impedance faults using fractal techniques," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 435–440, Feb.1996

D. C. T. Wai and X. Yibin, "A novel technique for high impedance fault identification," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, no. 3, pp. 738–744, Jul. 1998.

S. R. Samantaray and P. K. Dash, "High impedance fault detection in distribution feeders using extended Kalman filter and support vector machine," *Eur. Trans. Elect. Power*, 2009.

Decanii, José. Detecção de faltas de alta impedância em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando transformada *wavelet* e uma rede neural artmap *fuzzy*, 2011.

Fanucci, Rodrigo, Análise da detecção de faltas de alta impedância utilizando redes neurais artificiais com topologias baseadas em perceptron multicamadas. 2010.

Hou, Daqing -Detection of High-Impedance Faults in Power Distribution Systems – Schweitzer Engineering Laboratories Inc., 2006

APÊNDICES

Tabela 4- Resultados obtidos nas simulações

Casos Do Sistema Teste	Método da Envoltória	Método da Sequên- cia Negativa	Método da Morfolo- gia Matemática
	Tempo de Detecção		
FAI no Ponto 1	0,35965s	0,3791s	0,2672s
FAI no Ponto 2	0,35965s	0,3913s	0,2672s
FAI no Ponto 3	0,35965s	0,3843s	0,2672s
FAI no Ponto 4	0,35965s	0,3837s	0,2672s
FAI no Ponto 5	0,35965s	0,3862s	0,2672s
FAI no Ponto 6	0,35965s	0,7148s	0,2672s
FAI no Ponto 2 R100Ω	0,35965s	0,6194s	0,2672s
FAI no Ponto 2 R350Ω	0,35965s	0,3911s	0,2672s
FAI no Ponto 2 R350Ω	0,35965s	0,3909s	0,2672s
Energização Trafo ponto 1, 25kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 1, 75kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 1, 300kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 1, 600kVAR	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 1, 900kVAR	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s

Energização Trafo ponto 2, 25kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 2, 75kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 2, 300kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 2, 600kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 2, 900kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 3, 25kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 3, 75kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 3, 300kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 3, 600kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 3, 900kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 4, 45kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 4, 75kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 4, 300kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 4, 600kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 4, 900kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 5, 25kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 5, 75kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s

Energização Trafo ponto 5, 300kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 5, 600kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 5, 900kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 6, 25kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 6, 75kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização Trafo ponto 6, 300kVa	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 6, 600kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s
Energização BC ponto 6, 900kVAr	Não Atuou	Não Atuou	0,2672s