

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

Proposição de um Método de Detecção de FAI
Baseado nos Componentes Harmônicos de Baixa
Frequência

Érica Mangueira Lima

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Julho/2016

Érica Mangueira Lima

Proposição de um Método de Detecção de FAI Baseado
nos Componentes Harmônicos de Baixa Frequência

*Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento
às exigências para obtenção do grau de Mestre em Ciências
no domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Núbia Silva Dantas Brito, D.Sc.

Orientadora

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Julho/2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L732p

Lima, Érica Mangureira.

Proposição de um método de detecção de FAI baseado nos componentes harmônicos de baixa frequência / Érica Mangureira Lima. – Campina Grande, 2016.

60 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.

"Orientação: Prof.^ª. Dr.^ª. Núbia Silva Dantas Brito, Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza".

Referências.

1. Falhas de Alta Impedância. 2. *Short-time Fourier Transform*. 3. Componentes Harmônicos – Corrente de Fase. 4. Domínio da Frequência - Análise. 5. Falhas - Diagnóstico. I. Souza, Benemar Alencar de. II. Brito, Núbia Silva Dantas. III. Título.

CDU 621.3.011.21(043)

**"PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE DETECÇÃO DE FAI BASEADO NOS
COMPONENTES HARMÔNICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA"**

ÉRICA MANGUEIRA LIMA

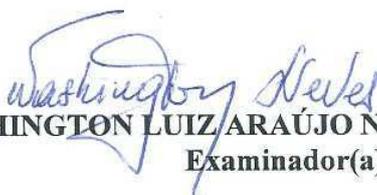
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/07/2016



NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Examinador(a)



TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Agradecimentos

Agradeço:

A Deus, pela vida, pela oportunidade de aprender, por ter me confortado e me dado coragem para continuar mesmo nos momentos mais difíceis.

A meus pais Graça e Tarcísio, pelo incentivo constante, o apoio incondicional, a paciência e pela confiança depositada em mim em todos os momentos. Também pela compreensão e por todo o esforço que tiveram para que eu alcançasse os meus objetivos.

Aos meus demais familiares, meu irmão, sobrinho, tias e tios, primos e primas pelo estímulo, a preocupação e por partilharem da minha alegria em cada uma das minhas conquistas.

Aos professores Núbia Brito e Benemar Alencar, pela grande dedicação aos orientandos, a competência, a paciência e os ensinamentos passados. Enfim, pela excelente orientação em cada uma das etapas deste trabalho. Aos professores Washington Neves e Tarso Vilela por terem aceitado participar da banca e pelas sugestões e contribuições para a melhoria dissertação.

Aos meus amigos Wellinsílvio, Laís, Jamile, Renata, Cecília, Selma, Daphne, Stefânia, Caio, Hotoniones e todos os demais colegas do LARCA e do LSP pelos conselhos, a paciência e a ajuda durante todo o mestrado.

Aos meus amigos Anna Beatriz, Vitória, Ilis, Talita, Hully (prima e amiga), Ramon e Guilherme, por sempre tentarem me auxiliar, pela companhia, o amparo, os momentos de distrações e pelo apoio em todas as circunstâncias.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo suporte técnico e aos seus funcionários, Ângela, Pedro e Felipe, pelas informações, a dedicação e o auxílio. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Enfim, a todos que me ajudaram e que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Resumo

Um método baseado nos harmônicos de baixa ordem para detecção de faltas de alta impedância (FAI) é proposto nessa dissertação. A *Short-Time Fourier Transform* (STFT) é empregada para extração dos principais componentes harmônicos da corrente de fase proveniente de uma FAI, os quais são utilizados para identificar a ocorrência desse tipo de falta. Adicionalmente apresenta-se uma análise do tamanho e tipo da janela utilizada na transformada e sua adequação à aplicação. Para validação do método, duas bases de dados foram utilizadas: uma base contendo sinais simulados de FAI, chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas, e outra base contendo apenas registros oscilográficos reais de FAI. O método proposto é capaz de detectar a ocorrência de FAI em diferentes pontos do sistema, para diversos tipos de superfícies de solo e conseguiu também distinguir FAI dos outros distúrbios. Além disso, o método é tolerante aos ruídos que são próprios dos sinais reais, uma vez que se mostrou eficaz em todos os casos aos quais foram aplicados.

Palavras-chave: Faltas de Alta Impedância, *Short-Time Fourier Transform*, Harmônicos, Análise no Domínio da Frequência, Diagnóstico de Faltas.

Abstract

A method to detect high impedance faults (HIF) based on the low order harmonics is proposed on this dissertation. The Short-Time Fourier Transform (STFT) is used to extract the main harmonic components of the phase current, which are used to identify a HIF occurrence. Additionally, the work presents an analysis on the window size and type used in the STFT and its suitability for the application. The method is validated using two databases: one containing HIF simulated signals mixed up with capacitor banks switching and feeder energizing signals, and another containing only actual HIF oscillograms. The proposed method is able to detect HIF occurring in various points of the test-system, as well as HIF happening on different types of soil surfaces. It is also able to distinguish HIF from the other tested disturbances. Furthermore, the method tolerates typical noises present on real signals, since it proved to be effective in all the applied cases.

Keywords: High Impedance Fault, Short-Time Fourier Transform, Harmonics, Frequency Domain Analysis, Fault Diagnosis.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Acidentes fatais nos sistemas de distribuição. (ABRADEE, 2015).	2
Figura 1.2 - Progressão anual do DEC e FEC para a Paraíba. (ANEEL, 2016).	3
Figura 2.1 - Diagrama unifilar de um SDEE típico. (OLIVEIRA, 2016).	7
Figura 2.2 - Níveis médios de correntes provenientes de uma FAI. (SANTOS, 2011).	9
Figura 2.3 - Características da forma de onda de um a corrente proveniente de uma FAI.	10
Figura 2.4 - Comparação dos resultados da FT e da STFT para o sinal apresentado na Figura 2.3.	12
Figura 2.5 - Análise tridimensional da STFT.	14
Figura 2.6 - Análises bidimensionais da STFT.	14
Figura 2.7 - Resposta no tempo e na frequência para as janelas de Blackman e Hamming.	17
Figura 2.8 - Espectrogramas de banda estreita e banda larga.	19
Figura 2.9 - Sobreposição de janelas (<i>overlap</i>).	19
Figura 2.10 - Inter-harmônico (321 Hz) na corrente de fase para um registro oscilográfico real de FAI.	21
Figura 2.11 - Conteúdo harmônico de uma FAI.	21
Figura 4.1 - Fluxograma para desenvolvimento do método de detecção.	30
Figura 4.2 - Modelo de FAI. (SANTOS, 2011)	31
Figura 4.3 - Diagrama unifilar do sistema-teste. (SANTOS, 2011).	33
Figura 4.4 - Configuração das cruzetas e estrutura dos postes. (SANTOS, 2011).	33
Figura 4.5 - Linha energizada (entre as barras 10 e 11).	34
Figura 4.6 - Modelo do banco de capacitores. (SANTOS, 2015).	35
Figura 4.7 - (a) Corrente de Fase proveniente de uma FAI; (b) Espectrograma da corrente apresentada em (a).	37
Figura 4.8 - Conteúdo harmônico em distúrbios comuns aos SDEE (Chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas).	38
Figura 4.9 - Fluxograma do método de detecção de FAI proposto.	41
Figura 5.3 - Atuação do método de detecção para FAI simulada na areia e no calçamento.	48
Figura 5.4 - Atuação do método de detecção para FAI aplicada na barra 79 do sistema-teste.	49
Figura 5.7 - Atuação do método de detecção nos solos areia e asfalto molhados.	52
Figura 5.8 - Resumo dos valores dos tempos de detecção de FAI obtidos para os registros oscilográficos reais.	53

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Conteúdo harmônico de uma FAI. _____	20
Tabela 3.1 - Síntese Bibliográfica. _____	29
Tabela 4.1 - Cenários da base de dados simulados. _____	36
Tabela 4.2 - Cenários da base de dados reais. _____	36
Tabela 4.3 - Limiares adotados. _____	40
Tabela 5.1 - Análise da variação do <i>overlap</i> e do tamanho da janela. _____	44
Tabela 5.2 - Principais características das funções janela selecionadas. _____	45
Tabela 5.3 - Diferença da amplitude 3º harmônico antes e após a FAI. _____	45
Tabela 5.3 - Tempo de detecção - Testes em dados simulados para seis tipos de solo. ____	47

Lista de Símbolos, Abreviaturas e Siglas

SEP	Sistemas elétricos de potência
SDEE	Sistema de distribuição de energia elétrica
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
FAI	Faltas de alta impedância
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por unidade consumidora
FEC	Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
FT	<i>Fourier Transform</i>
x	Sinal no domínio do tempo
X	Sinal no domínio da frequência
w	Função janela
N	Número total de amostras
PMU	<i>Phasor Measurement Units</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
DOE/EPRI	<i>National Database Repository of Power Events</i>
WT	<i>Wavelet Transform</i>
DHT	Distorção Harmônica Total
PQM	<i>Power Quality Meter</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
ST	<i>Stockwell Transform</i>
MLP	<i>Multi-layer perceptron</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
GSE	Grupo de Sistemas Elétricos
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
CSCT	Chave simples controlada por tempo
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
RVT	Resistência variante no tempo
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
RDP	Registrador Digital de Perturbação
ϕ	Ângulo de fase do 3º harmônico
L_ϕ	Limiar do ângulo de fase do 3º harmônico
M_{20}	Média das 20 primeiras amostras do sinal
H_3	Módulo do 3º harmônico
H_5	Módulo do 5º harmônico
H_2	Módulo do 2º harmônico
L_3	Limiar do módulo do 3º harmônico
L_2	Limiar do módulo do 2º harmônico
L_5	Limiar do módulo do 5º harmônico
Δf	Passo da frequência
Δt	Passo do tempo

Sumário

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Contribuições	4
1.4 Publicações	5
1.5 Organização da Dissertação.....	5
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica.....	6
2.1 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.....	6
2.2 Faltas de Alta Impedância.....	8
2.3 <i>Short-Time Fourier Transform</i>	11
2.3.1 Função Janela	15
2.4 Conteúdo Harmônico de uma FAI.....	20
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica.....	22
3.1 Retrospectiva Histórica.....	22
3.2 Trabalhos Relevantes	23
Capítulo 4 – Método Proposto.....	30
4.1 Modelagem da FAI.....	31
4.2 Modelagem do Sistema-Teste.....	32
4.3 Modelagem dos Distúrbios.....	34
4.4 Base de Dados	35
4.5 O Método Proposto.....	37
Capítulo 5 – Análise dos Resultados	42
5.1 Análise do Tamanho da Janela	42
5.2 Análise do Tipo da Janela.....	44
5.3 Validação do Método.....	47
Capítulo 6 – Conclusões	54
Referências Bibliográficas	57

Capítulo 1 – Introdução

Os sistemas elétricos de potência (SEP) têm como principal função entregar energia elétrica aos consumidores de forma confiável, com segurança e qualidade. Esses sistemas podem ser particionados em três grandes áreas: a **geração**, responsável pela produção de energia elétrica; a **transmissão**, encarregada de transportar grandes quantidades de energia provenientes das usinas geradoras e a **distribuição**, que recebe a energia do sistema de transmissão e a entrega para consumidores de médio e grande porte. O sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) conecta fisicamente o sistema de transmissão, ou mesmo unidades geradoras de médio e pequeno porte, aos consumidores finais. A conexão, o atendimento e a entrega da energia elétrica ao consumidor são de responsabilidade das distribuidoras de energia (ou concessionárias). Atualmente, o país conta com 64 concessionárias, responsáveis por mais de 77 milhões de unidades consumidoras, sendo 85% delas residenciais (ABRADEE, 2015).

Em virtude da crescente complexidade dos SDEE, a probabilidade de ocorrência de perturbações representa preocupação crescente para o setor, dentre as quais destaca-se neste trabalho, a denominada **falta de alta impedância (FAI)**, considerada como sendo uma das mais graves. A ocorrência de uma FAI resulta em uma corrente cuja amplitude é insuficiente para sensibilizar a proteção do sistema, constituída basicamente de relés de sobrecorrente (YEH *et al*, 2014). Como consequência, a população fica sob situação de risco devido à eventualidade de choques elétricos, além disso, há a possibilidade de incêndios devido à presença do arco elétrico, o que pode resultar em danos aos equipamentos do sistema e às propriedades privadas.

Portanto, a ocorrência de uma FAI representa um grande desafio para as distribuidoras de energia elétrica, pois além da dificuldade de detecção, ameaça a confiabilidade do sistema de energia e oferece risco à vida humana (MAI *et al*, 2012). Haja vista sua gravidade, estudos relacionados com FAI representam temas de

extrema relevância para o setor elétrico, em especial, para o segmento de distribuição de energia.

1.1 Motivação

Uma pesquisa sobre a segurança da população, realizada pela Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), relata que no ano de 2014, houve 299 mortes nos sistemas das distribuidoras do Brasil. Desse total, 18% se devem à ocorrência de FAI com rompimento do cabo, considerada a 2ª maior causa de mortes relacionadas com o SDEE no Brasil, conforme mostrado na Figura 1.1.

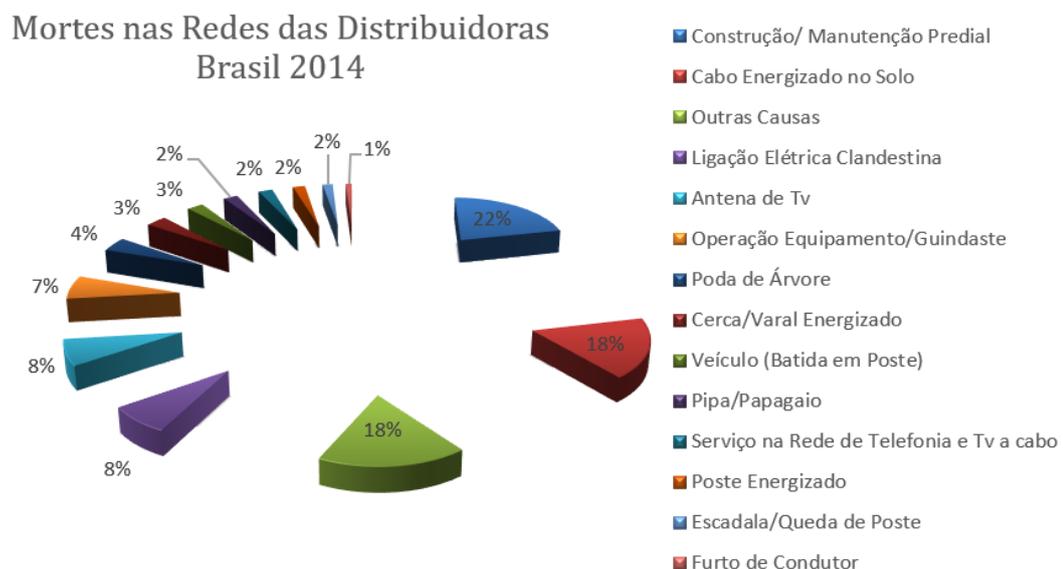


Figura 1.1 - Acidentes fatais nos sistemas de distribuição. (ABRADEE, 2015).

Isto posto, a extinção rápida de uma FAI pode ser considerada questão de segurança pública. Ademais, em relação ao aspecto financeiro, essa é uma questão capital, pois dentre os vários critérios utilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para avaliar a qualidade do fornecimento de energia elétrica de determinada distribuidora, um dos mais importantes é, sem dúvida, a interrupção de serviço, aferida principalmente pelos indicadores de Duração Equivalente de Interrupção por unidade consumidora (DEC) e de Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). De acordo com o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição

(PRODIST), o DEC indica o número de horas que, em média, as unidades consumidoras de determinado conjunto ficaram sem energia elétrica durante um determinado período: mensal, trimestral ou anual. O FEC indica quantas vezes, em média, as unidades consumidoras de determinado conjunto sofreram interrupção.

Para o estado da Paraíba, os indicadores DEC e FEC anuais são conforme mostrados na Figura 1.2 (ANEEL, 2016). Como se vê, a tendência é de queda dos limites para os indicadores ao longo dos anos, o que indica investimentos das distribuidoras na busca pela qualidade do serviço.

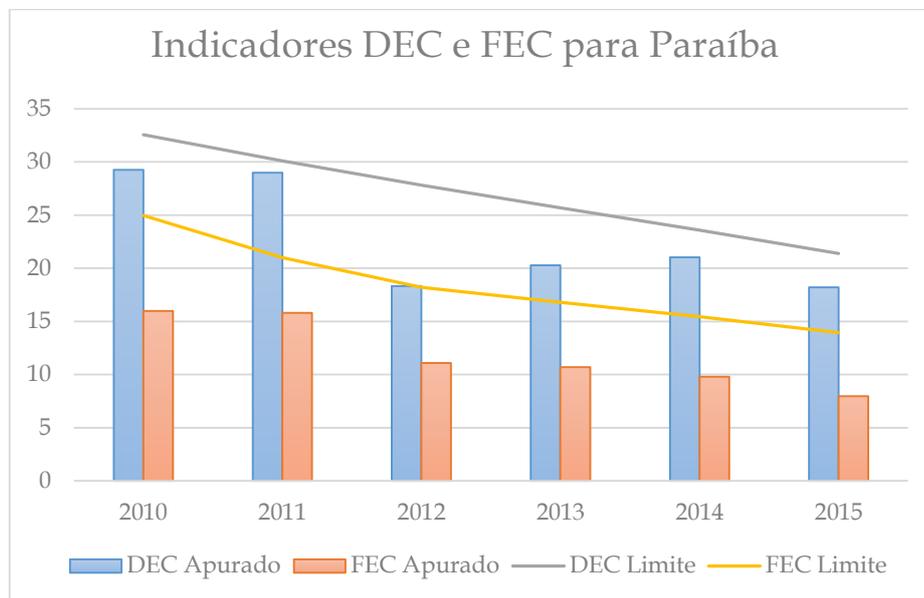


Figura 1.2 - Progressão anual do DEC e FEC para a Paraíba. (ANEEL, 2016).

Na grande maioria das distribuidoras nacionais, o informe sobre uma FAI ainda se dá por meio da reclamação dos clientes, o que resulta em um processo de extinção demorado, comprometendo os indicadores de qualidade e a segurança da população. Visando melhoria da qualidade do serviço, a investigação do uso de técnicas que automatizem esse processo constitui, atualmente, uma linha de pesquisa importante para o estado da arte.

A pesquisa apresentada neste trabalho insere-se neste contexto. A partir da avaliação do estado da arte e da análise minuciosa do espectro dos sinais resultantes de FAI, propõe-se um novo método de detecção baseado nos componentes harmônicos de baixa frequência.

1.2 Objetivos

A pesquisa realizada teve como objetivo geral a proposição de um método para detectar FAI baseando-se nas componentes de baixa frequência do sinal, e como objetivos específicos:

- Realizar análise crítica do estado da arte referente aos métodos de detecção de FAI utilizando o espectro de frequência.
- Estudar o fenômeno propriamente dito, focalizando o comportamento dos sinais de corrente provenientes de uma FAI, nos domínios do tempo e da frequência.
- Estudar e seleccionar a ferramenta matemática para análise dos sinais de FAI e para o desenvolvimento do método de detecção.
- Propor um método de detecção capaz de diferenciar FAI de outros distúrbios comuns nos SDEE.
- Validar o método usando sinais de FAI simulados e reais.

1.3 Contribuições

Considera-se como contribuições desta pesquisa as seguintes:

- Análise do comportamento da corrente resultante de uma FAI no domínio da frequência.
- Estudo da influência do tamanho e tipo da janela na *Short-Time Fourier Transform (STFT)*.
- Proposição de um método de detecção baseado na STFT capaz de identificar FAI e diferenciá-las de outros distúrbios.

1.4 Publicações

Durante o período em que esta pesquisa foi realizada os seguintes artigos foram produzidos:

- Artigos publicados

JUNQUEIRA, C.M.S.; BRITO, N.S.D.; SOUZA, B.A.; LIMA, É.M.; SANTOS, W.C.; SILVA, H.B.; MEIRA, R.N. *Proposta de melhoria de um modelo de Falta de Alta Impedância*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, Natal - RN. 2016.

- Artigos aceitos para publicação

LIMA, É.M.; BRITO, N.S.D.; SOUZA, B.A.; SANTOS, W.C.; FORTUNATO, L.M.A. *Analysis of the Influence of the Window Used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault Detection*. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Belo Horizonte – MG, Brazil. 2016.

1.5 Organização da Dissertação

A dissertação foi organizada em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório, conforme a seguir.

- Capítulo 2: apresentação da fundamentação teórica, onde se faz uma síntese dos temas mais relevantes para esta pesquisa, tais como: sistema de distribuição, principais características de uma FAI, STFT e análise do comportamento de uma FAI no domínio da frequência.
- Capítulo 3: revisão bibliográfica acerca do tema, na qual se apresenta: retrospectiva histórica do estudo de FAI e síntese dos trabalhos mais relevantes e atuais.
- Capítulo 4: apresentação do método de detecção proposto, do processo de construção da base de dados, do modelo de FAI utilizado e do sistema teste selecionado.
- Capítulo 5: apresentação e análise dos resultados.
- Capítulo 6: considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta uma síntese dos temas mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Inicialmente, apresenta-se um breve resumo sobre os SDEE, seguido de uma explanação sobre as FAI e suas principais características. Logo após, fundamentos da ferramenta matemática selecionada são apresentados. O capítulo é concluído com um resumo das principais características de uma FAI avaliadas no domínio do tempo e da frequência.

2.1 Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Resumidamente, um SDEE tem como responsabilidade o atendimento e a entrega da energia elétrica, conectando o sistema de transmissão aos consumidores finais. As linhas de distribuição são compostas por linhas de alta, média e baixa tensão, operando em tensões inferiores a 230 kV (ANEEL, 2016), as quais podem ser divididas nos seguintes subgrupos (SOUZA, 1997):

- **Subtransmissão:** linhas de transmissão com tensão entre 69 kV e 138 kV que suprem as subestações de distribuição a partir das subestações de subtransmissão. Os limiares entre a subtransmissão e a transmissão são mutáveis, conforme a evolução do sistema de potência, entretanto, é possível diferenciar os dois subgrupos pela extensão (comprimento das linhas), nível de tensão e nível de potência.
- **Distribuição Primária:** linhas de média tensão (entre 2,3 kV e 44 kV), geralmente compostas por três fios condutores aéreos em postes de concreto, visíveis em ruas e avenidas das grandes cidades. Supermercados, comércios e indústrias de médio porte adquirem a energia diretamente da distribuição primária, a qual é rebaixada internamente para tensões menores.

- **Distribuição Secundária:** linhas de baixa tensão, que podem variar entre 110 e 440V, responsáveis pela entrega da energia elétrica até as residências, pequenos comércios e indústrias, por meio dos ramais de ligação.

Um diagrama unifilar de um SDEE típico é exibido na Figura 2.1.

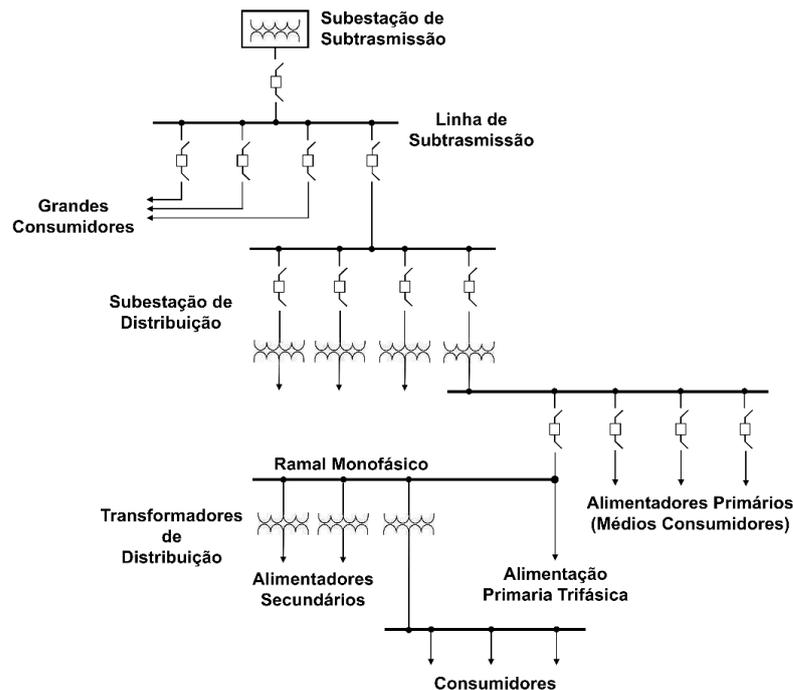


Figura 2.1 - Diagrama unifilar de um SDEE típico. (OLIVEIRA, 2016).

As principais configurações dos SDEE são: radial, anel e reticulado. No Brasil, o sistema radial é predominante, sendo caracterizado por um tronco trifásico estendido e ramais trifásicos ou monofásicos. Esta configuração requer baixo investimento e apresenta boa confiabilidade, quando materiais de boa qualidade são empregados (SOUZA, 1997).

Além disso, possuem como vantagens a facilidade para operação, manutenção e expansão. Entretanto, essa configuração não oferece garantia de continuidade do serviço, o que afeta os índices que medem a qualidade da energia estabelecidos pela ANEEL. O sistema radial, pode se apresentar de várias formas, são elas: simples, seccionado, interligado e seletivo. A primeira forma é a mais simples e as demais apresentam elevação gradativa na confiabilidade do sistema. A última, se aplica a

consumidores de grande porte ou importância, ligados normalmente ao alimentador primário, a exemplo de hospitais e centrais telefônicas. (OLIVEIRA, 2016).

Para efeito de proteção dos SDEE, os dispositivos usuais são os relés de sobrecorrente, que têm como grandeza de atuação, as correntes de fase ou a corrente de neutro do sistema. A atuação ocorrerá quando a corrente atingir um valor igual ou superior ao ajuste previamente estabelecido, podendo acontecer de forma instantânea (função ANSI 50) ou temporizada (função ANSI 51), dependendo da necessidade (ALMEIDA, 2008).

2.2 Falhas de Alta Impedância

Uma FAI é um curto-circuito que ocorre normalmente em sistemas de média tensão, quando um condutor energizado entra em contato com uma superfície de alto valor resistivo, como por exemplo: asfalto, brita, grama, areia, ou até mesmo galhos de uma árvore, sem que o cabo se parta. Normalmente, uma FAI não é extinta pelo sistema de proteção convencional dos SDEE, pois a amplitude da corrente é insuficiente para sensibilizar os relés de sobrecorrente (SANTOS *et al*, 2016).

Estudos mostram que a corrente resultante de uma FAI não ultrapassa 100 A (SANTOS, 2011), o que corresponde à mesma ordem de grandeza de outros fenômenos, tais como energização/desenergização de cargas e chaveamento de bancos de capacitores. Os níveis médios das correntes provenientes de uma FAI em diversos tipos de solo, considerando superfícies secas e molhadas, são apresentados na Figura 2.2 e como esperado, as superfícies molhadas apresentam níveis de corrente maiores.

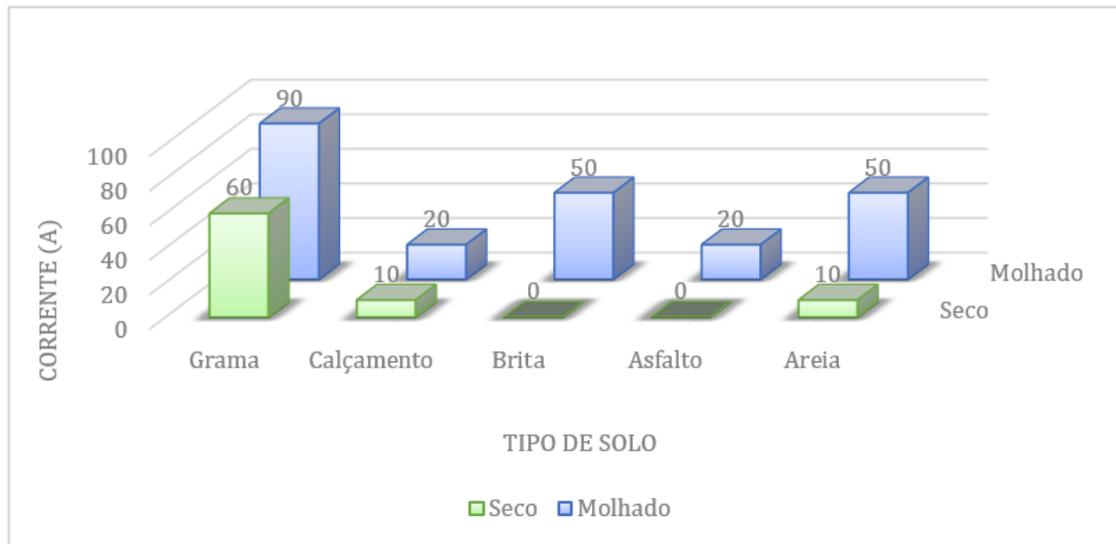


Figura 2.2 - Níveis médios de correntes provenientes de uma FAI. (SANTOS, 2011).

Além do baixo valor da corrente, a presença do arco elétrico é uma característica determinante em uma FAI. Sumarizando o fenômeno tem-se o seguinte: o contato elétrico entre o condutor rompido e a superfície não ocorre instantaneamente. Ele se intensifica à medida que os elétrons livres do ar são acelerados pelo campo elétrico. Ao atingir o limiar de energia cinética, as moléculas neutras do ar são ionizadas, liberando novos elétrons livres. Ocorre então, uma avalanche (série de colisões sucessivas entre elétrons e moléculas neutras num curto espaço de tempo) fazendo com que o ar se comporte como um condutor originando os arcos elétricos (NAKAGOMI, 2006). A presença do arco elétrico conduz então, ao surgimento de características peculiares na forma de onda da corrente proveniente de uma FAI, que são (SANTOS *et al.* 2013; SANTOS, 2011; EPRI, 1982):

- **Assimetria:** o semiciclo positivo da corrente é maior em amplitude do que o negativo. Segundo EMANUEL *et al.* (1990), essa característica aparece principalmente pela umidade e porosidade da superfície de contato. Também pode ser atribuída a presença da sílica na superfície, que uma vez aquecida forma uma “mancha catódica” capaz de emitir elétrons, facilitando o rompimento do dielétrico quando o condutor está submetido a uma tensão positiva.

- **Não-linearidade:** apesar da impedância deste tipo de falta ser predominantemente resistiva, as superfícies de contato não podem ser consideradas homogêneas, possuindo várias camadas com diferentes resistividades. Isso resulta em uma curva característica (tensão *versus* corrente) não-linear, o que provoca distorções na forma de onda.
- **Build-up:** crescimento gradual da amplitude da corrente, até atingir seu valor máximo. Esse fenômeno é resultado do tempo requerido para acomodação completa do cabo no solo, até que se estabeleça a resistência final da FAI.
- **Shoulder:** intervalos de constância com duração de alguns ciclos no crescimento da envoltória da corrente.
- **Intermitência:** descontinuidades na corrente provocadas pela extinção e reignição do arco no estágio inicial da falta.

Para ilustrar, apresenta-se na Figura 2.3 um registro oscilográfico real de uma FAI, no qual estão presentes essas características.

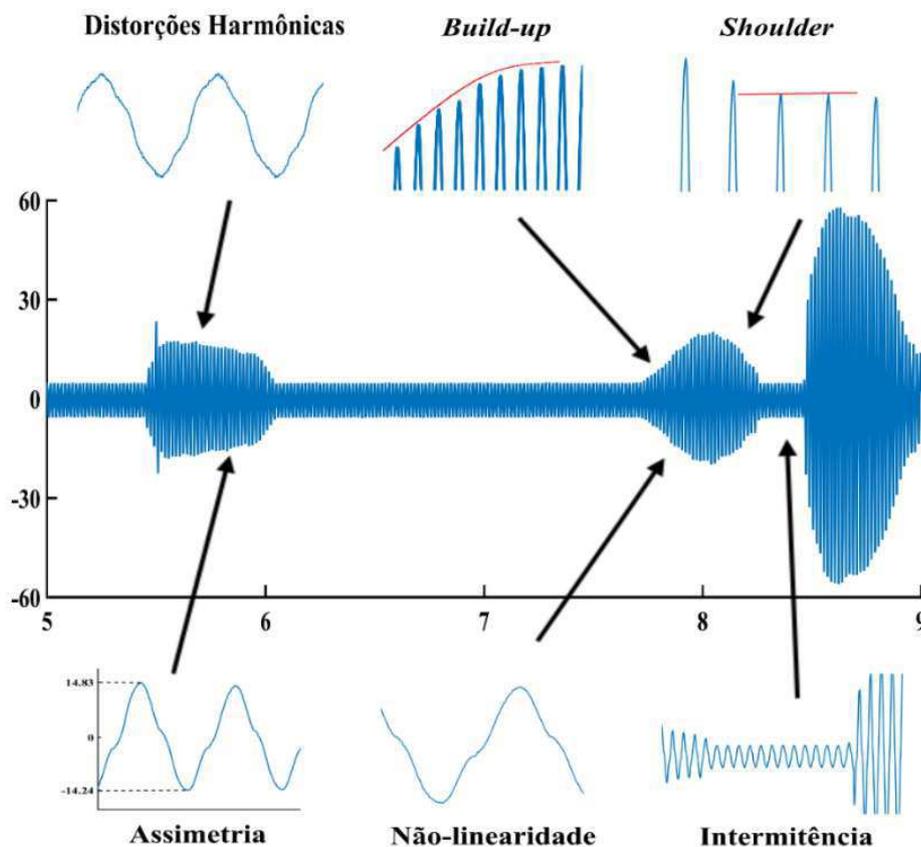


Figura 2.3 - Características da forma de onda de uma corrente proveniente de uma FAI.

Como resultado, o sinal da corrente de uma FAI apresenta harmônicos, inter-harmônicos (harmônicos intercalados que consistem em raias espectrais em frequências não múltiplas da fundamental) e componentes de alta frequência. Logo, o uso de ferramentas matemáticas que permitam uma análise mais apurada desse fenômeno em ambos os domínios (tempo e frequência) pode contribuir de forma relevante para o estado da arte referente ao tema.

2.3 *Short-Time Fourier Transform*

A transformada de Fourier (*Fourier Transform* – FT) é considerada uma das ferramentas matemáticas mais populares (tanto na forma contínua quanto discreta), porém só apresenta resultados satisfatórios quando o espectro do sinal é invariante no tempo, ou seja, se o sinal for estacionário¹. Isso se deve ao fato da FT não disponibilizar nenhuma informação a respeito da evolução do conteúdo espectral do sinal (BRITO, 2001). Portanto, não se aplica aos sinais provenientes de uma FAI, que são considerados não-estacionários. Para tais casos, uma alternativa seria o uso de uma variante da FT, denominada de *Short-Time Fourier Transform* (STFT), que fornece informações sobre os domínios do tempo e da frequência, simultaneamente.

A STFT possui uma implementação computacional mais simples e é mais difundida que outras transformadas utilizadas para sinais variantes no tempo, como a transformada *Wavelet*, além de ser naturalmente aplicável em tempo real.

Para ilustrar, apresenta-se na Figura 2.4 o resultado da aplicação da FT e da STFT ao sinal apresentado na Figura 2.3. Conforme se vê, a FT fornece informações apenas sobre o conteúdo harmônico do sinal, ou seja, sobre a característica do sinal no domínio da frequência. A STFT por sua vez, fornece um “espectrograma”: um gráfico planar no qual o eixo das ordenadas representa a frequência, o eixo das abcissas representa o tempo e a intensidade da densidade espectral de energia do sinal, em decibéis, é representada por diferentes cores variando de cores frias (violeta, azul) às cores

¹ Sinal estacionário é aquele cujas características não se modificam ao longo do tempo.

quentes (amarelo, laranja) à medida que a intensidade cresce (nesse caso aproximadamente de -100 dB a 0 dB).

Comparando o sinal apresentado na Figuras 2.3 e o seu espectrograma mostrado na Figura 2.4 nota-se o crescimento dos harmônicos, em especial o terceiro (180 Hz), nos instantes de tempo em que a falta ocorre (5,5, 7,8 e 8,5 segundos), um aumento mais significativo da corrente também pode ser observado pelo crescimento da componente fundamental (60 Hz) aos 8,5 segundos. Portanto, a STFT captura a variação temporal do espectro de frequência do sinal.

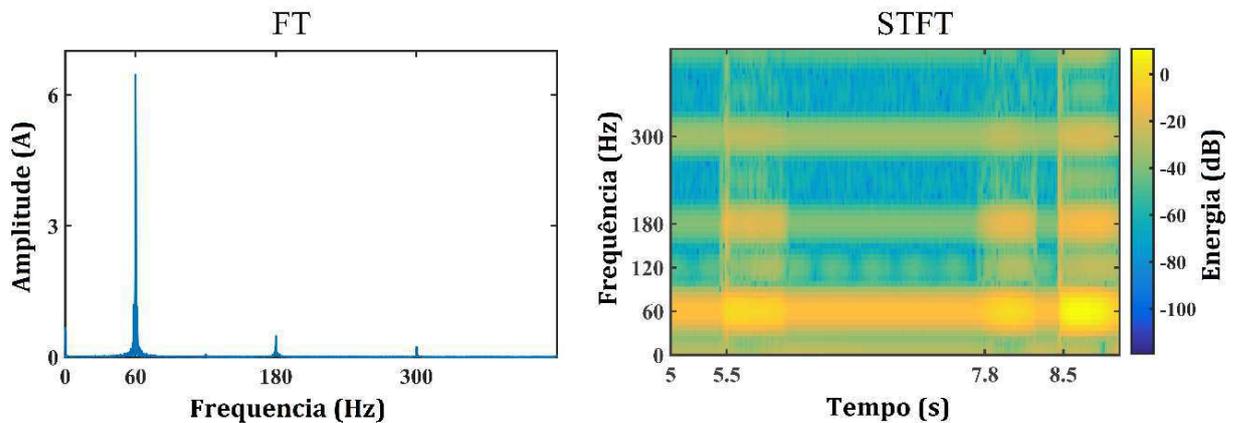


Figura 2.4 - Comparação dos resultados da FT e da STFT para o sinal apresentado na Figura 2.3.

Matematicamente, a STFT na forma contínua é computada conforme Equação (2.1) (HAN *et al.*, 2012), na qual x representa o sinal a ser analisado e ω é a função janela.

$$X_{STFT}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \omega(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.1)$$

Na forma discreta, a STFT é computada conforme Equação (2.2), na qual $x[n]$ representa o sinal no domínio do tempo, ω a função janela, N o número total de amostras, k as componentes de frequência e n o índice da amostra.

$$X_{STFT}[k, n] = \sum_{m=0}^{N-1} x[n + m] \omega[m] e^{\frac{-j2\pi km}{N}} \quad (2.2)$$

Portanto, a STFT consiste em dividir o sinal em segmentos, aos quais a FT é aplicada, visando determinação das frequências presentes em cada segmento. Esse processo no contexto de Processamento de Sinais é denominado de “janelamento” (HAN *et al.*, 2012). No caso da STFT, uma janela deslizante de tamanho constante é aplicada ao sinal a ser analisado. Esse processo é ilustrado na Figura 2.5, no qual pode-se observar o deslocamento da janela ao longo do sinal, resultando em um gráfico tridimensional tempo *vs.* frequência *vs.* densidade espectral da energia. Esse gráfico é uma alternativa menos usual para apresentação da variação temporal do espectro de frequência do sinal, dele podem ser extraídos os três gráficos apresentados na Figura 2.6 (a)-(c), cada um representando um dos pontos de vista da transformada da seguinte forma:

- (a) Observa-se a variação temporal da densidade espectral de energia, neste gráfico nota-se o aumento da energia em torno dos 2,5 segundos, porém, não é possível distinguir quais os componentes harmônicos presentes no sinal.
- (b) Este gráfico apresenta a transformada de Fourier do sinal como um todo, percebe-se então os harmônicos presentes no sinal, mas não é possível definir o instante de tempo em que ocorre alguma mudança no conteúdo espectral.
- (c) A partir da visão superior do gráfico obtêm-se o espectrograma, no qual observa-se os harmônicos presentes, o instante em que ocorrem as variações e a densidade espectral de energia através das cores.

A aplicação da STFT requer que o sinal seja estacionário dentro de cada janela, além disso, como o tamanho da janela é fixo, o uso da STFT implica num comprometimento no que diz respeito à resolução tempo *versus* frequência, a qual depende da escolha do tipo e do tamanho da janela selecionada. Portanto, o processo de escolha desses parâmetros constitui um ponto crucial no desempenho da STFT.

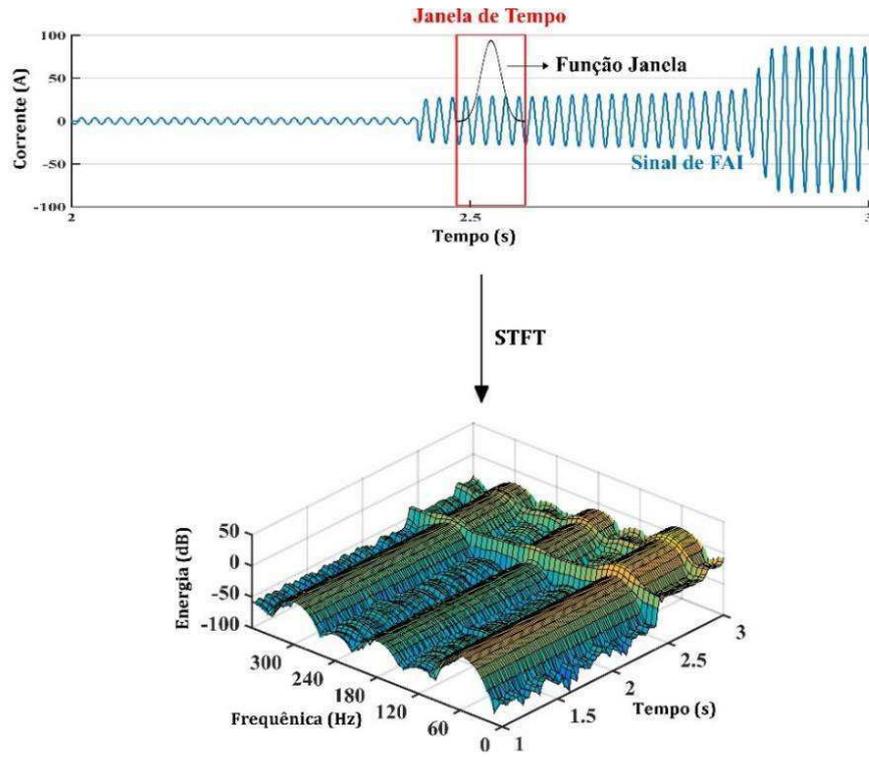


Figura 2.5 – Análise tridimensional da STFT.

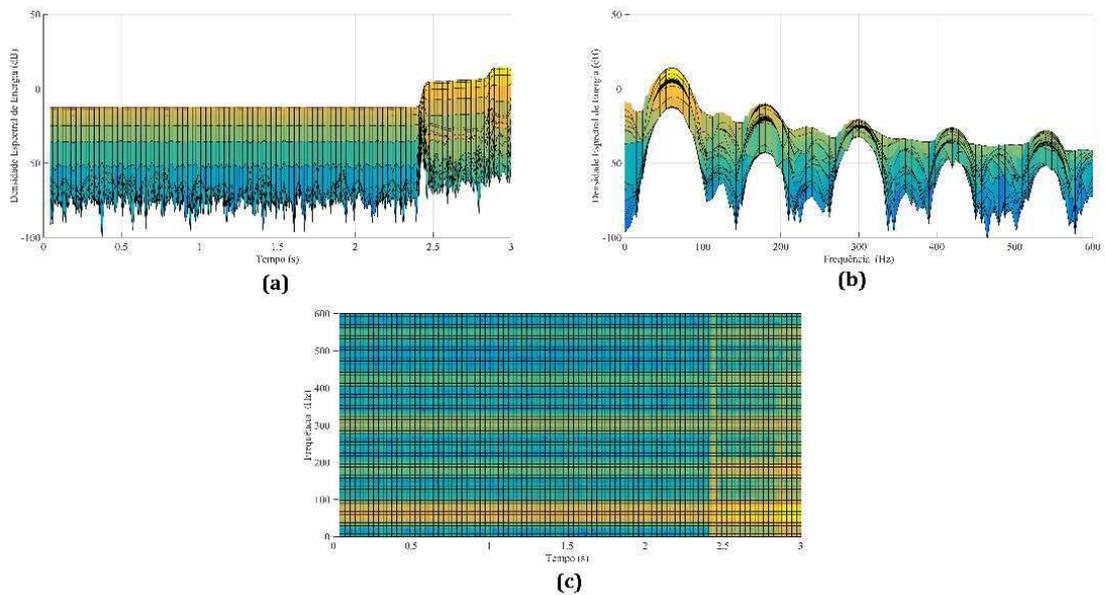


Figura 2.6 – Análises bidimensionais da STFT.

2.3.1 Função Janela

Uma janela é por definição uma função matemática cuja amplitude varia suavemente em direção ao zero nas bordas (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016), isto é, possui valor igual a zero fora do intervalo escolhido. Toda função janela e sua FT precisam ter as seguintes características (PRAHBU, 2013):

- A função janela $\omega(t)$ deve ser real e não negativa.
- A função janela $\omega(t)$ deve ser par, isto é, $\omega(t) = \omega(-t)$ e portanto $W(f)$ deve ser real.
- A função janela $\omega(t)$ deve atingir o máximo em $t = 0$, isto é, $|\omega(t)| \leq \omega(0)$, para todo t e $\omega(t) = 0$ para $|t| > \tau$, no qual τ representa metade da duração da janela.
- A função $W(f)$ deve possuir um lobo principal na origem e lobos secundários em cada lado.
- O lobo principal deve ser o mais estreito quanto for possível e deverá conter a maior parte da energia do sinal. Essas propriedades estão relacionadas com a seletividade da janela na identificação dos harmônicos.
- Se a derivada de ordem m da função janela $\omega(t)$ for impulsiva, então os picos dos lobos secundários da $|W(f)|$ decairão assintoticamente $6m$ dB por oitava. A prova para este teorema pode ser encontrada em PRAHBU (2013).

O lobo principal pode ser definido como a faixa de frequência entre o primeiro cruzamento por zero da resposta em frequência da janela, dos dois lados da origem. Os lobos secundários são regiões de transições individuais que surgem dos dois lados do lobo principal.

Como o uso da STFT consiste em aplicar a FT ao produto da função janela pelo segmento do sinal, a escolha da janela irá afetar decisivamente a estimação espectral, hajam vistos os harmônicos nela presentes. Isto posto, o objetivo da análise é buscar uma função que provoque a menor interferência no conteúdo harmônico do sinal.

A função janela ideal para uma dada aplicação seria aquela cuja FT resultasse na função impulso, ou seja, toda a energia do sinal estaria contida no lobo principal de largura infinitesimal e sem a presença de lobos secundários. Portanto, avaliação da

largura do lobo principal e da taxa de decaimento (atenuação) dos lobos secundários fornece informações sobre o quanto a FT da função se desvia da função impulso (PEREIRA & AZEVEDO, 2002).

Em casos reais, os valores dos picos dos lobos secundários podem interferir nas componentes de frequência do sinal. Isso ocorre quando a energia presente nesses lobos é maior do que a energia de algum componente harmônico significativo do sinal. Portanto, quanto menor o pico dos lobos secundários, menor a probabilidade de ocorrer vazamento espectral (*leakage*) após aplicação da FT ao sinal. No entanto, é preciso considerar que a atenuação dos lobos secundários está normalmente, relacionada com o aumento da largura de banda do lobo principal (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016). Devido ao fato de que após aplicação da janela, o lobo principal fica centralizado em cada componente de frequência do sinal, o alargamento desse atributo dificulta a extração correta dos harmônicos, ou seja, a janela será menos seletiva.

Na prática, existem diversos tipos de funções janelas, cada uma com características próprias e nenhuma pode ser considerada a melhor em todos os aspectos (PRAHBU, 2013). Portanto, a escolha deve ser feita com base nos requisitos do problema. Para exemplificar essa questão, selecionaram-se as janelas de Blackman e Hamming, cujas respostas no tempo e na frequência estão apresentadas na Figura 2.7.

Análise da Figura 2.7 demonstra que:

- A janela de Blackman oferece maior atenuação para os lobos secundários (aproximadamente **-58 dB**) que a janela de Hamming (aproximadamente **-48 dB**).
- O valor elevado do pico dos lobos secundários na janela de Hamming se dá pela variação abrupta para o 0 no domínio do tempo (SMITH, 2011).
- Na janela de Hamming os picos dos lobos secundários decaem aproximadamente **6 dB** por oitava, enquanto na de Blackman esse decaimento é de **18 dB** por oitava.

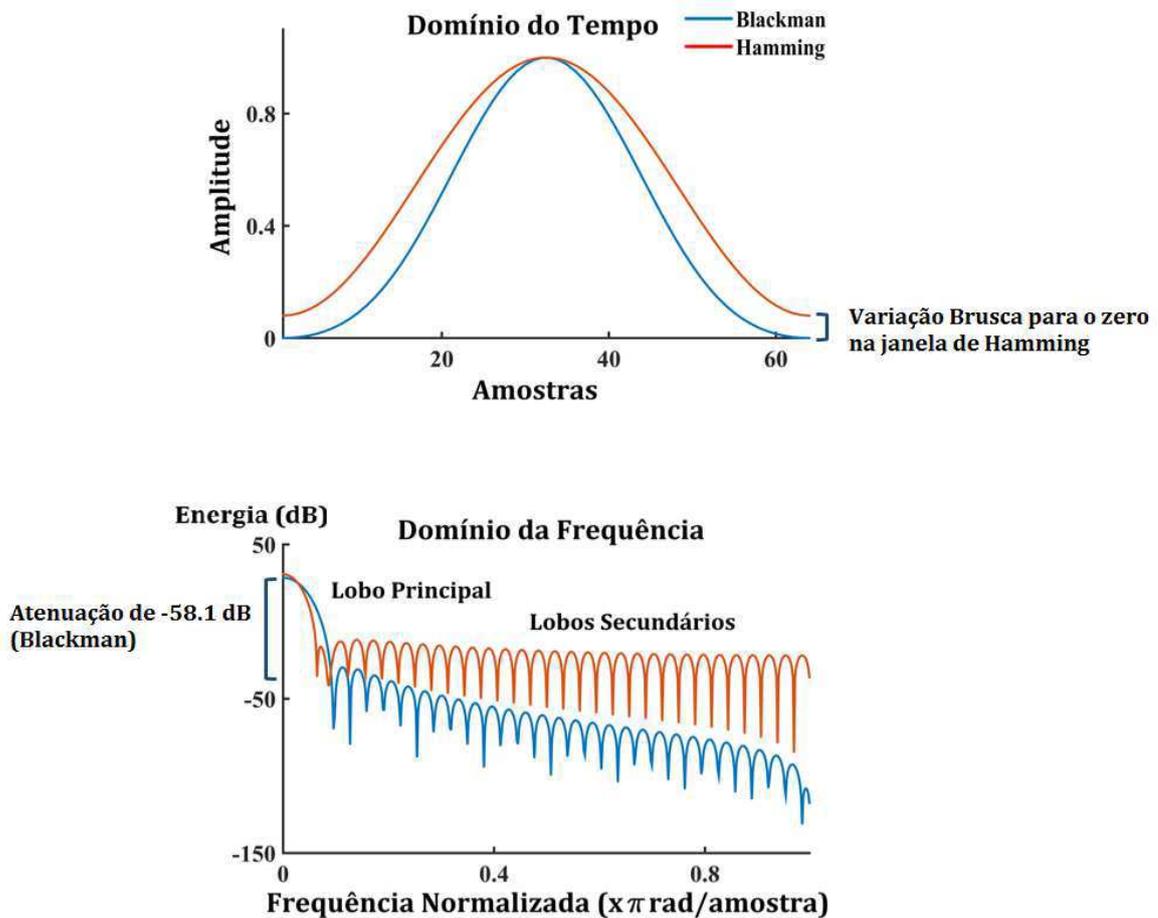


Figura 2.7 - Resposta no tempo e na frequência para as janelas de Blackman e Hamming.

Considerando apenas essas duas opções, conclui-se que se objetivo for:

- Identificar os componentes de frequência vizinhas, como por exemplo inter-harmônicos, a janela de Blackman seria a escolhida, visto que apresenta taxa de decaimento maior e valor de pico dos lobos secundários menor;
- Extrair componentes harmônicos, ou seja, se a resolução espectral for relevante, a janela de Hamming seria a escolhida, visto que a largura de banda do lobo principal é menor.

Portanto, pode-se inferir que a escolha do tipo de janela é função da aplicação, ou seja, dos componentes de frequência presentes no sinal.

Outra questão importante diz respeito ao tamanho da janela, visto este parâmetro é diretamente proporcional à resolução na frequência e inversamente proporcional à resolução temporal, conforme limitação imposta pelo princípio da incerteza de Heisenberg (BUSCH *et al.*, 2007), ou seja, quanto maior a janela menor a precisão no tempo e melhor a resolução na frequência. O maior desafio neste caso, é encontrar um comprimento para o qual a janela atenda às restrições de ambos os domínios. Se a janela for larga, o espectrograma aparecerá como linhas horizontais e será chamado de “espectrograma de banda estreita”. Neste caso, é muito difícil identificar a variação temporal do conteúdo espectral. Por outro lado, para uma janela muito estreita, linhas verticais surgem no espectrograma devido a resolução temporal exagerada, chamado de “espectrograma de banda larga”, nessas circunstâncias a precisão na frequência é perdida completamente e não é possível distinguir os componentes espectrais do sinal. Estas situações estão ilustradas na Figura 2.8 utilizando a janela de Blackman-Harris.

Usualmente, o número de amostras adotado para o tamanho da janela é escolhido baseando-se na frequência de operação do sistema, de modo a corresponder a um número inteiro de ciclos. Se essa condição não for satisfeita, ou seja, se ocorrer uma amostragem assíncrona, os pontos finais das janelas serão considerados descontinuidades, as quais aparecerão na FT como componentes de alta frequência, que poderão ser muito maiores que a frequência de Nyquist. Dessa forma, erros na estimação do conteúdo harmônico devido ao vazamento espectral poderão surgir (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016). Concluindo, o tamanho da janela deverá ser um múltiplo do número de amostras por ciclo (MENDONÇA *et al.*, 2015).

Outra técnica importante no uso da STFT é a superposição de janelas, ou *overlap*, a qual é utilizada para aumentar a resolução temporal. Como todas as funções janela tendem para o zero na borda do intervalo, os dados localizados entre duas janelas consecutivas podem ser perdidos. A fim de evitar a perda de informações do sinal, as janelas são superpostas como mostrado na Figura 2.9. Embora esse procedimento aumente a precisão no tempo, ele pode aumentar o esforço computacional (SILVA & OLIVEIRA, 2012).

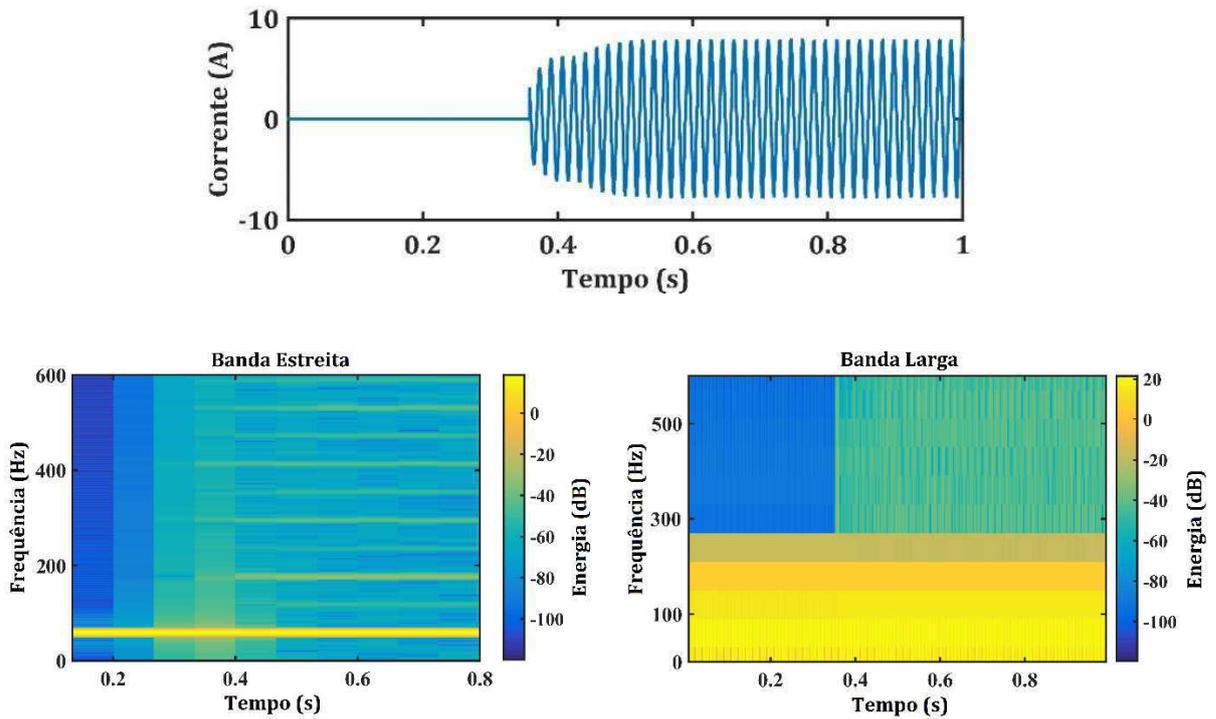


Figura 2.8 - Espectrogramas de banda estreita e banda larga.

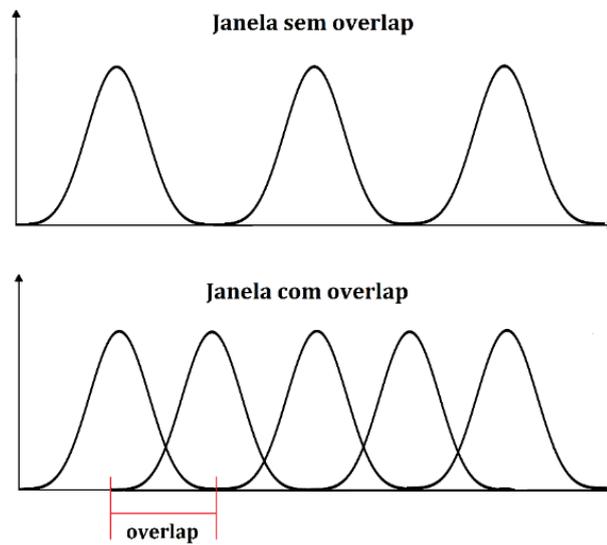


Figura 2.9 - Sobreposição de janelas (*overlap*).

2.4 Conteúdo Harmônico de uma FAI

O estudo apresentado nesta seção evidenciou a necessidade de uma análise mais aprofundada da variabilidade do sinal no domínio da frequência antes da aplicação da STFT, portanto, a análise do conteúdo harmônico de uma FAI constitui uma etapa essencial para o desenvolvimento de um método de detecção. Segundo NAKAGOMI (2006), as características da corrente de uma FAI estão intrinsecamente ligadas ao surgimento das seguintes componentes espectrais:

- A distorção na forma de onda, induzida pela não-linearidade da resistência do arco, produz harmônicos de baixa frequência, com predominância dos harmônicos ímpares, em particular o de 3^a e 5^a ordem.
- A assimetria entre semiciclos, ocasionada principalmente pela diferença de mobilidade dos portadores de carga positivos e negativos, é responsável pela produção de harmônicos pares (2^o, 4^o, 6^o, ...).
- A intermitência e descontinuidade da corrente durante o processo de estabelecimento e extinção do arco produzem harmônicos de alta frequência.
- A variação da amplitude da corrente ao longo do tempo graças aos fenômenos de *build-up* e *shoulder* produzem inter-harmônicos, resultantes do comportamento dinâmico da resistência de contato do defeito. A Figura 2.10 mostra o aparecimento de inter-harmônicos na corrente de fase em um registro oscilográfico real de FAI.

Resumidamente, o conteúdo harmônico de uma FAI é apresentado na Tabela 2.1 e ilustrado na Figura 2.11.

Tabela 2.1 - Conteúdo harmônico de uma FAI.

Características	Conteúdo Harmônico
Não linearidade da resistência do arco	Baixa frequência (3 ^o ao 10 ^o)
Assimetria	Harmônicos pares
Intermitência	Alta frequência
<i>Build-up</i> e <i>Shoulder</i>	Inter-harmônicos

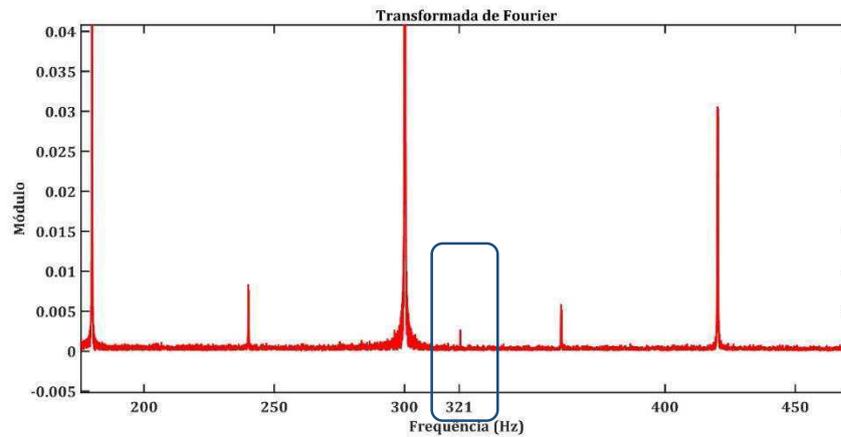


Figura 2.10 – Inter-harmônico (321 Hz) na corrente de fase para um registro oscilográfico real de FAI.

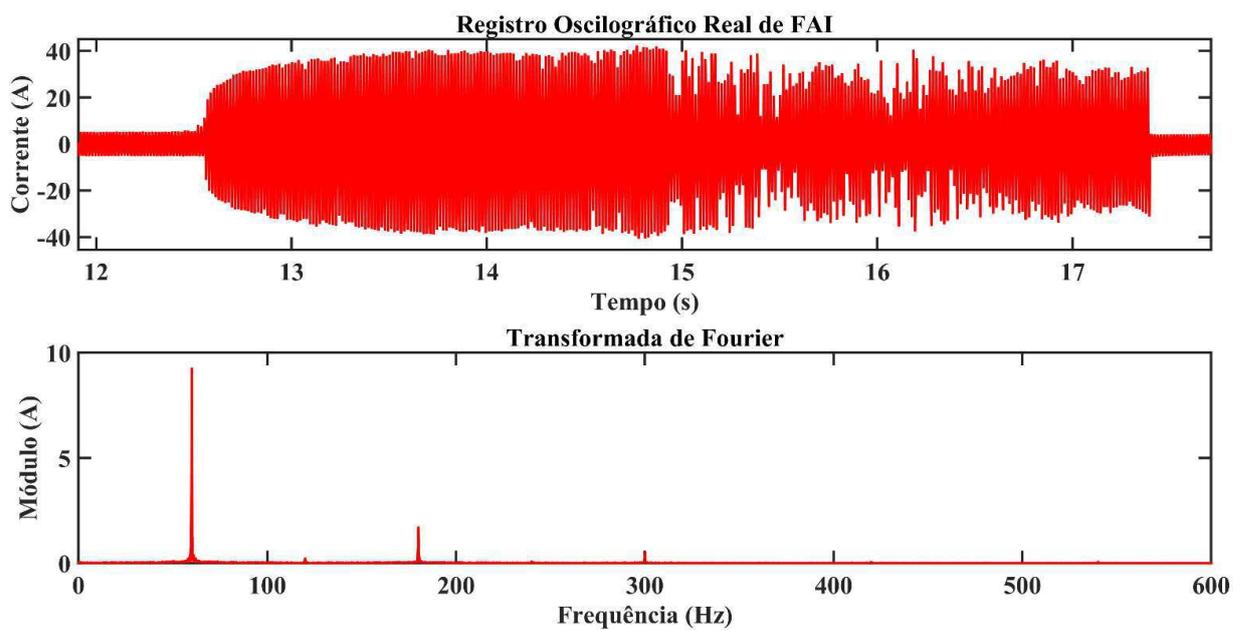


Figura 2.11 – Conteúdo harmônico de uma FAI.

Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, uma análise minuciosa do estado da arte concernente ao tema foi realizada. Um resumo desta etapa é apresentado a seguir.

3.1 Retrospectiva Histórica

Segundo CHEN *et al* (2013), os primeiros estudos sobre detecção de FAI remontam ao fim dos anos 40. Entretanto, foi apenas na década de 70 que se teve início os estudos visando encontrar as características principais nas formas de onda da corrente e da tensão de uma FAI, de modo que sua detecção fosse possível e praticável (ADAMIAK *et al*, 2006).

No início dos anos 80, trabalhos importantes propondo a análise dos sinais provenientes de FAI no domínio do tempo foram publicados (CALHOUN *et al*, 1982). Também nesta década, foram publicados trabalhos recomendando o uso dos componentes harmônicos de baixa frequência, em especial o 3º e o 5º (BALSER *et al*, 1986) e até mesmo, a combinação destes com o 2º harmônico (HUANG *et al*, 1988). O estudo realizado por LINDERS & JEERINGS (1989) sobre os principais aspectos das FAI no domínio da frequência consolidou o uso dos componentes harmônicos para detecção de FAI e após sua publicação, vários trabalhos datados dos anos 90 utilizando os componentes harmônicos de baixa ordem foram publicados ((GIRGIS *et al*, 1990), (KWON *et al*, 1991), (SHARAF *et al*, 1993) e (YU & KHAN, 1994)). Outros trabalhos utilizaram também o espectro de alta frequência ((AUCION & RUSSEL, 1982), (RUSSEL, 1984)).

Outra ferramenta importante passou a ser aplicada na análise dos transitórios de FAI em ambos os domínios: a *Wavelet Transform* ((AUCION & JONES, 1996), (HUANG & HSIEH, 1999), (MING-TA *et al*, 2007), (ELDIN *et al*, 2007), (SHAABAN, 2010)).

Levando em consideração o comportamento aleatório das FAI, métodos utilizando inteligência artificial também foram sugeridos, como lógica *fuzzy* (JOTA & JOTA, 1998), redes neurais artificiais (RNA) (SARLAK & SHAHRTASH, 2011), bem como sistemas adaptativos neuro-*fuzzy* (ABDEL AZIZ *et al*, 2011).

Dentre os trabalhos analisados, selecionaram-se os seis que foram considerados os mais relevantes para o escopo desta Proposta de Dissertação.

3.2 Trabalhos Relevantes

ZANJANI *et al* (2013) propuseram um método para detecção de FAI baseado na mudança dos fasores da corrente, utilizando Unidades de Medição Fasorial (do inglês *Phasor Measurement Units* - PMU). A detecção foi feita em duas etapas. Na 1ª etapa a PMU analisa o erro entre os fasores de corrente de fase real e estimado. Em condições normais do sistema, as amostras reais e estimadas são iguais. Quando ocorre uma falta, o fasor muda e a fase se torna candidata a uma FAI.

Os autores afirmam que, quanto maior a frequência de amostragem, maior o crescimento do indicador de falta associado ao erro, o que gera informações incoerentes sobre a ocorrência da falta. Para minimizar o problema, o limiar com o qual o indicador é comparado deve ser dependente da frequência. Um aspecto relevante desta etapa é a possibilidade da adaptação da proteção para novas condições do sistema. Por exemplo, se ocorre mudança na carga, o indicador será comparado com um novo limiar associado à variação ocorrida.

A 2ª etapa consistiu em distinguir uma FAI de condições normais de operação (por exemplo, chaveamento de cargas). Para isso, um índice associado ao ângulo de fase do 3º harmônico da corrente de fase com relação a tensão foi usado. Este índice mostrou-se adequado, visto que o ângulo se estabilizou em um valor entre 50° e 90°, após aproximadamente 0,02 s.

Segundo os autores, o método proposto mostrou bom desempenho, visto que detectou vários tipos de FAI (com o cabo se partindo e indo ao solo ou apenas tocando superfícies de alta impedância), como também distinguiu facilmente uma FAI de um chaveamento de carga. Constatou-se, porém, que em caso de ruído no sistema, o fasor estimado será diferente do fasor real, podendo tornar confuso o indicador de faltas na primeira etapa. Além disso, como as PMU utilizam informações via janelas no tempo, nos instantes seguintes à ocorrência de uma falta, a janela de dados pode conter informações pré-falta e pós-falta. Neste caso é necessário o uso de técnicas para descarte dos fasores provenientes de janelas com dados mistos. Por fim, o trabalho não apresenta testes que diferenciam FAI de outros distúrbios comuns ao SDEE, como, por exemplo, chaveamento de banco de capacitores.

YEH *et al* (2014) propuseram o uso de duas transformadas: a *Fast Fourier Transform* (FFT) e *Walsh Hadamard Transform*, com o objetivo de detectar FAI através do conteúdo harmônico de baixa frequência da corrente de fase. Os autores analisaram o espectro como um todo e não apenas um componente harmônico por vez. Os métodos foram testados utilizando dados obtidos da base DOE/EPRI (*National Database Repository of Power Events*) dos Estados Unidos. Foram analisados dois grupos de FAI causadas por árvores, separados pelas características da forma de onda de corrente.

O trabalho apresentou resultados de um evento de cada grupo. No primeiro grupo a corrente cresce apenas na fase afetada, enquanto no segundo grupo, a amplitude da corrente cresce nas três fases, porém de forma menos significativa. Apenas informações sobre a amplitude no domínio da frequência foram necessárias para a detecção no evento pertencente ao primeiro grupo. A FAI foi detectada em 0,033 s tanto para a FFT quanto para a *Walsh Hadamard Transform*.

O segundo evento, porém, não obteve resultados contundentes utilizando apenas a amplitude. Neste caso, foi necessário analisar: i) o cruzamento por zero do positivo para o negativo da fase no caso da FFT; ii) a amplitude normalizada com relação a dois limiares para a *Walsh Hadamard Transform*. Os autores destacaram o fato de que métodos com a WT não foram capazes de detectar FAI neste tipo de evento. Foram realizados testes com outros transitórios, embora o trabalho não especifique quais,

nem se o método foi capaz de diferenciá-los de uma FAI. Segundo os autores, os métodos propostos demonstraram eficiência para os testes realizados, entretanto, observou-se que os limiares foram escolhidos com base no grupo de casos estudados.

GARCIA *et al* (2014) propuseram um método de detecção de FAI utilizando índices para descrever a da corrente de fase relacionados com componentes harmônicos, componentes de sequência e a distorção harmônica total (DHT), calculados internamente a um medidor de qualidade de energia (Do inglês *Power Quality Meter – PQM*). O procedimento proposto pode ser dividido em três etapas:

- Na 1ª etapa ocorre a detecção de um evento no sistema com base nos 2º, 12º e 14º harmônicos. Segundo os autores, estes componentes harmônicos surgem no momento inicial do contato do cabo com o solo e também, são afetados por chaveamento de cargas e de capacitores. A detecção é feita observando o erro entre o componente harmônico desejado e um componente harmônico referencial. Esse valor é comparado com um limiar escolhido com base na sensibilidade desejada, sendo sugerido a escolha de acordo com o comportamento do sistema onde o método será implementado. Limitações para esta etapa são destacadas no trabalho, como por exemplo, a detecção é prejudicada em sistemas reais que são normalmente muito afetados pela presença de componentes harmônicos e também, quando a FAI ocorre no fim do alimentador. Este último pode ser contornado instalando-se outra PQM no local.
- Na 2ª etapa são calculados 14 índices para classificação do evento detectado anteriormente, os quais estão relacionados com o 3º, 5º e 7º harmônicos, as componentes de sequência positiva negativa e zero bem como a distorção harmônica total. Podem ainda ser referentes a amplitude e a variação destes índices antes e após a falta, bem como a DHT no momento da falta.
- Por fim, na última etapa, os indicadores são aplicados a uma RNA, que classificará os eventos previamente detectados.

Segundo os testes apresentados no trabalho, o método mostrou bom desempenho, especialmente quando a classificação obtida pelas RNA foi feita considerando apenas

dois aspectos: o evento é uma FAI ou outro distúrbio. Além disso, o método foi capaz de diferenciar a FAI de chaveamentos de cargas e capacitores. Porém, é preciso destacar que as RNA exigem treinamentos, dificultando a aplicação do método em sistemas que sofram modificações em tempo real.

SUBRAMANIAN & VENKATARAMAN (2012) avaliaram três métodos de detecção de FAI individualmente, bem como propuseram a integração desses métodos para aumentar a confiabilidade da proteção para este tipo de falta. O método integrado baseia-se nas características mais relevantes da corrente de FAI: i) presença do arco, responsável pela distorção na forma de onda e existência de componentes harmônicos de alta frequência; ii) não linearidade da impedância de falta, provocando o aparecimento de componentes harmônicos de baixa frequência; iii) aleatoriedade da corrente no início e no fim do processo. É importante destacar que os autores fizeram uso da corrente de neutro e não de fase.

No contexto de espectro de baixa frequência, o método propôs o uso do 3º harmônico da corrente e sua comparação com a componente fundamental. Para detecção da FAI foram utilizados quatro critérios: i) o primeiro avalia se a amplitude da fundamental está acima de um limiar; ii) o segundo avalia a fase do 3º harmônico com relação a componente fundamental da corrente, que deve se manter em torno de 180°; iii) o terceiro avalia a razão entre a amplitude do 3º harmônico e da componente fundamental; iv) o quarto avalia se os três primeiros pontos permanecem por um tempo de duração maior que um limiar. Caso positivo, uma FAI é detectada.

Os testes apresentados foram aplicados em cada método individualmente e mostraram que os métodos de alta frequência e do 3º harmônico detectaram FAI sem nenhuma restrição, além de distinguir essas faltas de cargas não lineares e transitórios capacitivos. Porém, não foram capazes de diferenciar da saturação de transformadores de corrente. O método da componente fundamental falhou em detectar FAI em algumas situações. Uma das principais contribuições do trabalho foi realiza uma comparação entre três métodos importantes para detecção de FAI. Entretanto, embora os autores proponham a junção dos três métodos, não apresentaram resultados utilizando os métodos combinados.

ROUTRAY et al. (2015) propuseram o uso da *Stockwell Transform* (ST) para detectar FAI, essa ferramenta matemática é uma versão estendida da transformada *Wavelet*, podendo ser apresentada como a transformada *wavelet* contínua com uma *wavelet* mãe precisa multiplicada por um fator de fase. Dessa forma, a ST fornece informações no domínio do tempo e da frequência simultaneamente e corrige tanto a resolução fixa da STFT como a ausência de informações sobre a fase da transformada *wavelet*.

A transformada do sinal de corrente é utilizada para a extração de nove atributos relacionados com os valores máximo e mínimo das matrizes de amplitude-tempo e amplitude-frequência, bem como desvio padrão e valor eficaz dessas matrizes. Essas características são aplicadas a uma RNA a fim de distinguir uma FAI de outros fenômenos transitórios como chaveamento de bancos de capacitores e de cargas, além de faltas comuns e condições normais de operação (sem faltas), realizando testes também com a adição de ruído ao sinal.

Foram utilizados um total de 4010 eventos diferentes entre FAI e outros distúrbios, sendo 60% utilizado para treinamento da RNA (do tipo *multi-layer perceptron* - MLP) e 40% para os testes. Os autores destacaram que, para classificação apropriada dos eventos (FAI e não-FAI), é necessário escolher o vetor de atributos ideal dentre os nove extraídos pela *Stockwell Transform*. Os resultados mostraram que a detecção utilizando as características relacionadas com a amplitude não apresentou bom desempenho, devido principalmente, à baixa amplitude da corrente de FAI.

Ao final, constatou-se que os atributos mais determinantes para detecção e distinção de FAI foram o valor eficaz do desvio padrão da matriz amplitude-frequência e o desvio padrão da matriz amplitude-frequência, que quando combinados apresentam melhores resultados. Segundo os autores, o método proposto apresentou bom desempenho, com precisão entre 92,6% (sinais com ruído) e 100% (sem ruído). Entretanto, os autores não informaram se o método é capaz de distinguir uma FAI de energizações de linhas e/ou transformadores. O aspecto inovador do trabalho foi o uso da *Stockwell Transform* para análise de sinais de FAI.

SANTOS *et al.* (2016) propõe um algoritmo baseado nos transitórios provenientes de FAI para identificar esse tipo de falta e promover a redução do espaço de busca da falta fornecendo a área mais provável para a ocorrência. Para tal, os autores sugeriram o uso da *Wavelet Transform* no monitoramento dos componentes de baixa e alta frequência das tensões em vários pontos do sistema. O algoritmo foi validado usando simulações de FAI aplicadas a um sistema-teste baseado em um SDEE brasileiro real. O método foi submetido a outros distúrbios como faltas de baixa impedância, chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas, considerando o sistema com e sem geração distribuída.

A etapa de detecção da FAI baseou-se na identificação do crescimento da energia dos coeficientes *wavelet* bem como o período em que a energia desse transitório se mantém acima de limiar auto adaptável, dessa forma, o método não detecta faltas de baixa impedância e chaveamentos comuns em SDEE. Os testes foram realizados em seis partes: analisando a influência da frequência de amostragem; identificação da FAI utilizando diferentes pontos de monitoramento; identificação da FAI considerando diferentes quantidades de dispositivos de monitoramento com e sem geração distribuída; performance do método durante faltas sólidas, energização de linhas e chaveamento de bancos; e FAI com faltas sólidas simultaneamente.

Os testes mostraram que o método proposto apresentou bom desempenho, visto que em todos os casos testados, as FAI foram detectadas corretamente e foi possível reduzir em até 70% o espaço de busca utilizando o método de localização baseado nas energias dos coeficientes *wavelet* em vários pontos do sistema. Os autores destacaram que o algoritmo é aplicável em tempo real, não necessita de informações sobre os parâmetros dos alimentadores e cargas e não necessita sincronização com os dispositivos de monitoramento.

Uma síntese dos trabalhos relatados nesta seção são apresentados na Tabela 3.1, onde se destacou: o tipo de sinal, a técnica adotada, o componente harmônico analisado, as possibilidades de aplicação ou não em tempo real e por fim, as principais características.

Tendo como base o que foi exposto, conclui-se que:

- O estudo do comportamento de uma FAI no domínio da frequência constitui fator determinante para o sucesso de qualquer que seja o método de detecção.
- O 3º harmônico, componente predominante na corrente proveniente de FAI, tem sido o parâmetro mais utilizado nos métodos de detecção de FAI propostos até então.
- Apesar do 3º harmônico ser um ótimo indicador da ocorrência de uma FAI, apenas ele não é capaz de distinguir uma FAI de outros distúrbios.

Posto isto, propõe-se neste trabalho um método de detecção alternativo, que faz uso dos principais componentes harmônicos presentes na corrente de fase resultante de uma FAI, em especial a amplitude e a fase do 3º harmônico.

Tabela 3.1 – Síntese Bibliográfica.

ARTIGOS	SINAL UTILIZADO	TÉCNICA	HARMÔNICOS	APLICÁVEL EM TEMPO REAL?	CARACTERÍSTICAS
Zanjani et al.	Corrente de Fase	PMUs	Fase do 3º harmônico	Sim	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diferenciação de chaveamento de cargas ▪ Detecção com cabo se partindo ou não ▪ Afetado por ruídos do sistema
Yeh et al.	Corrente de Fase	FFT e WHT Deslizantes	Espectro de BF (Amplitude e cruzamento por zero da fase)	Não	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Detecção em dois ciclos ▪ Limiares dependentes do sistema onde será aplicado
García et al.	Corrente de Fase	PQMs e RNAs	2º, 12º e 14º (detecção) e 3º, 5º, 7º e DHT (identificação)	Não	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distinção de chaveamento de cargas e bancos de capacitores ▪ RNAs exigem treinamento ▪ Problemas em sistemas reais
Subramanian & venkataraman	Corrente de Neutro	Extração de Harmônicos (BF)	3º Harmônico (Fase, razão com a fundamental)	Sim	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diferenciação de cargas não lineares e transitórios capacitivos ▪ Não apresenta teste dos métodos combinados
Routray et al	Corrente de Fase	Transformada S e RNA	Todo o espectro	Não	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distinção do chaveamento de bancos de capacitores, chaveamento de cargas e faltas comuns ▪ RNAs exigem treinamento
Santos et al	Tensão	Transformada Wavelet	Energia dos coeficientes de baixa e alta frequência	Sim	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distinção do chaveamento de bancos de capacitores, energização de linhas e faltas sólidas ▪ Detecção mesmo na presença de ruído ▪ Redução do espaço de busca pela localização da falta
MÉTODO PROPOSTO	Corrente de Fase	STFT	3º (módulo e fase), 2º e 5º	Sim	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distinção do chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas ▪ Exige um único ponto de observação do sistema (subestação) ▪ Limiares adaptáveis de acordo com as condições normais de operação do sistema

Capítulo 4 – Método Proposto

O método de detecção proposto neste trabalho utiliza a STFT a fim de extrair informações sobre os componentes de baixa frequência da corrente de fase, utilizando como ponto de observação a subestação. Para implementação computacional foram utilizados dois *softwares*:

- ATP (*Alternative Transients Program*): usado nas etapas de modelagem do fenômeno, simulação do sistema-teste e criação da base de dados de registros simulados (sinais de corrente no ponto de ocorrência da FAI e na subestação para diversos tipos de solo).
- Matlab®: usado nas etapas de implementação computacional da STFT, processamento dos sinais, geração dos gráficos no domínio do tempo e da frequência (espectrograma), implementação e validação do método de detecção.

O fluxograma de dados para desenvolvimento do método de detecção é apresentado de forma sucinta na Figura 4.1 e detalhada ao longo deste capítulo.

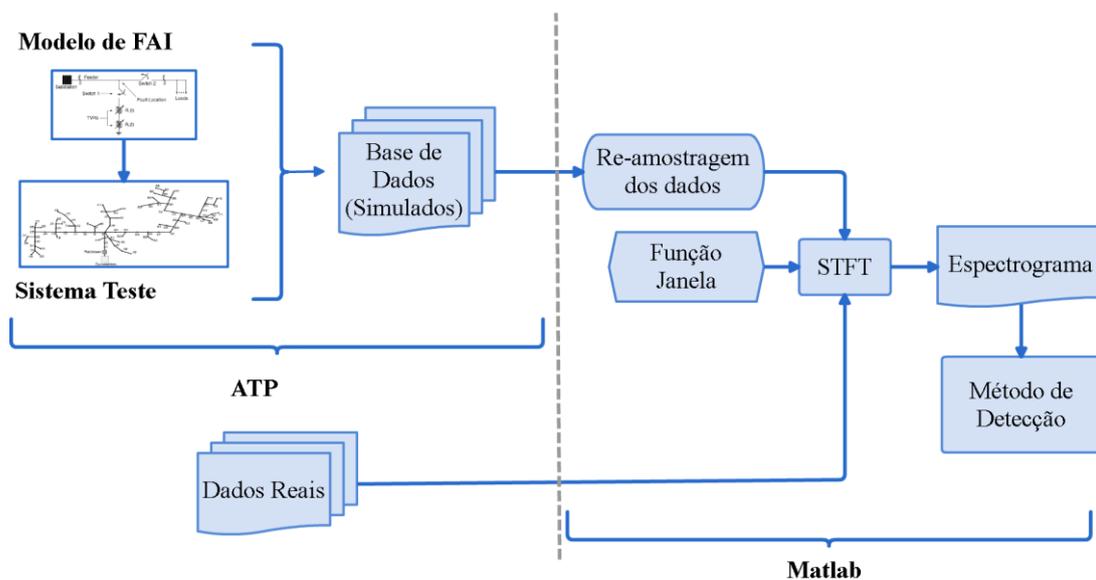


Figura 4.1 – Fluxograma para desenvolvimento do método de detecção.

4.1 Modelagem da FAI

A simulação da FAI foi realizada utilizando o modelo proposto por SANTOS (2011), o qual foi escolhido devido à duas razões: (i) o modelo é capaz de reproduzir as principais características de uma FAI, ou seja: não-linearidade, assimetria, intermitência, *build-up* e *shoulder*; (ii) o trabalho de SANTOS (2011) integra a mesma linha de pesquisa deste trabalho (Diagnóstico de Distúrbios em Sistemas de Potência), a qual vem sendo desenvolvida pelo Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Para construção do modelo, SANTOS (2011) utilizou registros oscilográficos resultantes de ensaios de campo, considerando seis tipos de solos (secos e molhados): areia, asfalto, calçamento, grama, brita e terra local. A base de dados real utilizada na validação do método de detecção aqui proposto, também é proveniente desses ensaios.

O modelo de SANTOS (2011) é apresentado na Figura 4.2 e possui os seguintes elementos:

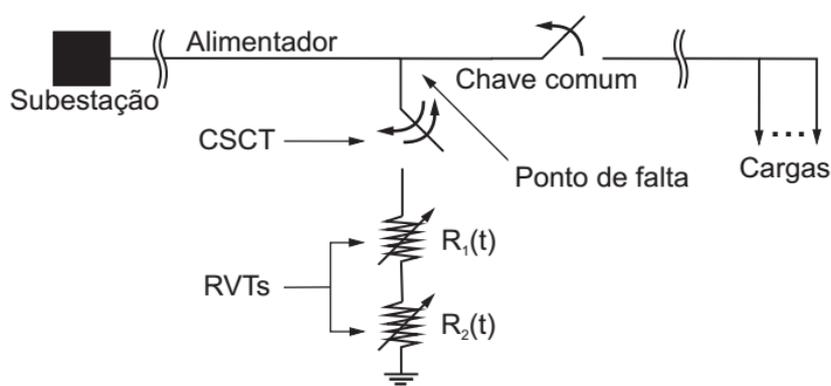


Figura 4.2 - Modelo de FAI. (SANTOS, 2011)

- Uma chave simples (CSCT), controlada pela rotina TACS (*Transient Analysis of Control Systems*), que tem como finalidade iniciar a falta e simular as descontinuidades na corrente. Essa chave foi criada considerando que, nos casos em que ocorre intermitência, o arco elétrico costuma cessar no zero da tensão e após alguns ciclos, ocorre a reignição próxima ao pico da tensão.

- Uma chave comum, à jusante do ponto de ocorrência da FAI e que simula o rompimento do condutor.
- Duas resistências variantes no tempo (RVT) em série, também controladas pela TACS:
 - R_1 : Simula as características de não-linearidade e assimetria da FAI, atuando nos regimes transitório e permanente. Seu valor é praticamente constante durante o período de falta e relaciona-se com o formato da onda da corrente.
 - R_2 : simula os fenômenos de *build-up* e *shoulder*. Essa resistência relaciona-se com a variação da amplitude da corrente e praticamente, não influencia no regime permanente correspondente ao período de ocorrência da falta.

As resistências foram ajustadas considerando as formas de onda obtidas nos ensaios de campo. A resistência R_1 foi estimada como sendo a razão entre a tensão e a corrente considerando um ciclo do regime permanente da falta e a resistência R_2 é obtida a partir da resistência total R , resultante da divisão entre os valores de pico de tensão e corrente, subtraindo-a da resistência R_1 .

4.2 Modelagem do Sistema-Teste

Para realização do estudo, selecionou-se o sistema-teste apresentado na Figura 4.3, que representa um alimentador de distribuição real da concessionária local. Todas as informações sobre as características elétricas e espaciais do alimentador foram fornecidas pela empresa, como também as cargas distribuídas ao longo dos transformadores. A modelagem do sistema-teste foi feita considerando (SANTOS, 2013):

- Linhas trifásicas não transpostas a parâmetros distribuídos e constantes com a frequência.
- Trechos compostos por um único tipo de cabo: cabo 4 AWG.

- Cargas de pontos próximos ao longo do alimentador, agrupadas em uma única barra, resultando em um alimentador com 90 barras.
- Fator *skin* para os cabos de 0,33.
- Resistividade da terra de 350 Ωm .
- Modelo de impedância constante para as cargas.
- Cargas modeladas como circuitos RL paralelos conectados entre cada fase de cada barra e a terra.
- Fator de potência médio de 0,955.
- Configuração do alimentador para obtenção dos parâmetros, conforme mostrado nas Figura 4.3 e 4.4.

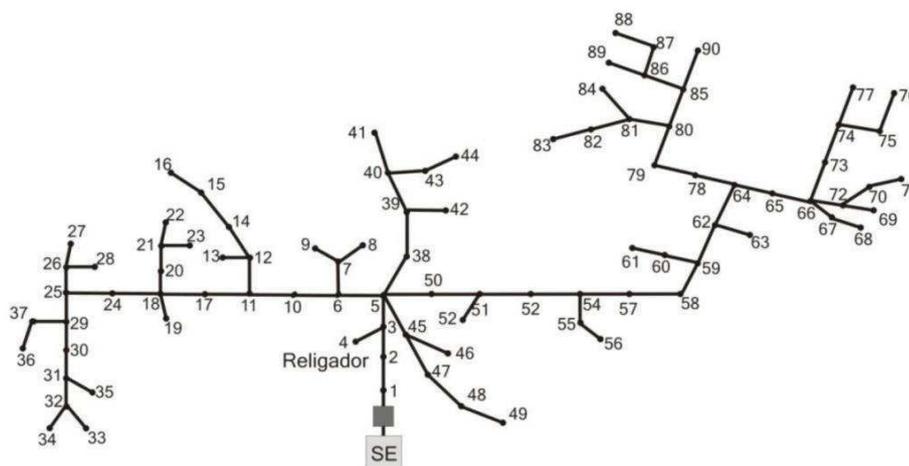


Figura 4.3 - Diagrama unifilar do sistema-teste. (SANTOS, 2011).

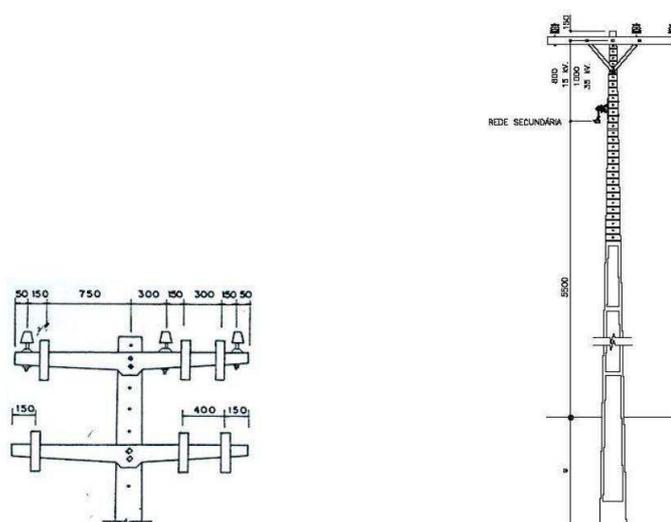


Figura 4.4 - Configuração das cruzetas e estrutura dos postes. (SANTOS, 2011).

4.3 Modelagem dos Distúrbios

Visando avaliar a capacidade de seletividade do método de detecção de FAI proposto neste trabalho, foram simulados dois tipos de distúrbios usuais nos SDEE: chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas. Os eventos foram simulados no mesmo sistema-teste conforme feito por SANTOS (2016):

- A energização de linhas foi simulada adicionando uma chave entre as barras 10 e 11 do sistema-teste. Com a operação de fechamento da chave foi possível analisar o comportamento do método submetido aos transitórios produzidos pela energização da linha mostrada na Figura 4.5.

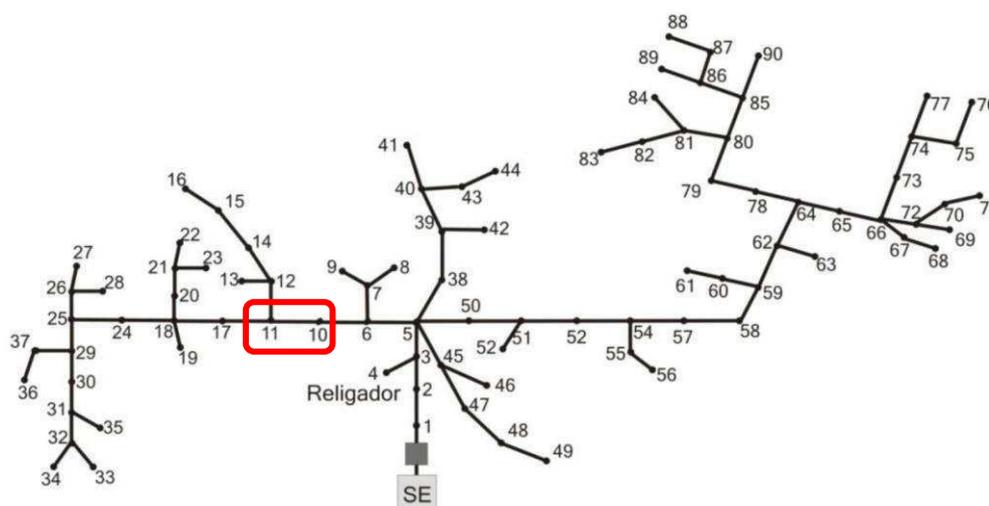


Figura 4.5 – Linha energizada (entre as barras 10 e 11).

- O chaveamento de bancos de capacitores foi simulado considerando um banco de 1,8 Mvar, que é um valor usual da concessionária local. Considerou-se que o banco foi instalado na subestação. O modelo está representado na Figura 4.6 e foi implementado considerando os seguintes parâmetros:
 - A capacitância C foi obtida a partir do valor da potência reativa nominal do banco.
 - A indutância L é indutância equivalente obtida a partir da indutância interna do banco (5 mH) e da indutância do reator limitante de corrente (100mH).
 - A resistência R_{ESR} representa as perdas do banco de capacitores.

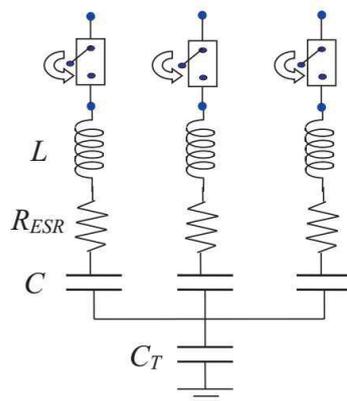


Figura 4.6 - Modelo do banco de capacitores. (SANTOS, 2015).

4.4 Base de Dados

A validação do método proposto foi feita em duas etapas. Na primeira, construiu-se uma base de dados simulados com diferentes cenários no programa ATP, baseada no trabalho realizado por SANTOS *et al* (2015) e aplicando os modelos mostrados nas seções anteriores ao sistema da Figura 4.3. Foram simulados 13 cenários contemplando FAI em diferentes solos para um mesmo ponto de falta, bem como diferentes localizações para o mesmo tipo de solo. Também, foram simulados distúrbios como chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas, completando um total de 15 cenários. Os registros simulados foram re-amostrados para a frequência de 15360 Hz, que é a frequência de amostragem típica adotada pelos registradores digitais de perturbação (RDP). Os cenários desta etapa estão apresentados resumidamente, na Tabela 4.1.

A segunda etapa consistiu em utilizar uma base de dados real obtida a partir de experimentos em campo realizados por SANTOS (2011). Os registros oscilográficos reais escolhidos foram provenientes de um RDP localizado a 11 km do ponto de falta. Para cada tipo de solo testado, 02 (dois) registros foram escolhidos. Os cenários desta etapa estão apresentados resumidamente, na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 - Cenários da base de dados simulados.

<i>Tipo de distúrbio</i>	Cenário	Barra	Tipo de Solo	Instante do distúrbio
<i>FAI</i>	1	10	Areia	0,3575 s
	2	10	Asfalto	
	3	10	Brita	
	4	10	Calçamento	
	5	10	Gramma	
	6	10	Terra	
	7	19	Areia	
	8	30	Areia	
	9	39	Areia	
	10	47	Areia	
	11	63	Areia	
	12	74	Areia	
	13	79	Areia	
<i>Chaveamento de banco de capacitores</i>	14	SE	-	0,3333 s
<i>Energização de linhas</i>	15	10-11	-	
TOTAL			15	

Tabela 4.2 - Cenários da base de dados reais.

<i>Tipo de Solo</i>	Situação	Registro	Instante de Falta (s)
<i>Areia</i>	Seco	1	0,892
		2	13,800
	Molhado	1	2,400
		2	2,500
<i>Asfalto</i>	Seco	1	1,858
		2	9,400
	Molhado	1	1,825
		2	2,587
<i>Brita</i>	Seco	1	4,992
		2	2,000
	Molhado	1	1,750
		2	4,450
<i>Calçamento</i>	Seco	1	2,742
		2	2,500
	Molhado	1	2,420
		2	6,180
<i>Gramma</i>	Seco	1	3,258
		2	3,127
	Molhado	1	4,750
		2	3,819
TOTAL		20	

4.5 O Método Proposto

O método de detecção proposto neste trabalho tem como finalidade identificar uma FAI a partir do monitoramento da corrente de fase. Inicialmente a STFT é aplicada ao sinal e ainda nesta etapa é calculado também, o tamanho da janela mais adequada à aplicação. Como resultado, obteve-se o espectrograma do sinal de corrente da Figura 4.7.

Conforme se vê, no domínio do tempo, a corrente não apresenta alterações significativas. Porém, análise do espectrograma, mostra que nos instantes pré-falta (anteriores a 0,3575 segundos) o predomínio é da componente fundamental (60 Hz), representada pela faixa de cor mais forte (amarela). Após a ocorrência da FAI, aumento da energia dos componentes harmônicos ocorre, em especial do 3º harmônico (180 Hz), o qual está na cor mais clara que os demais.

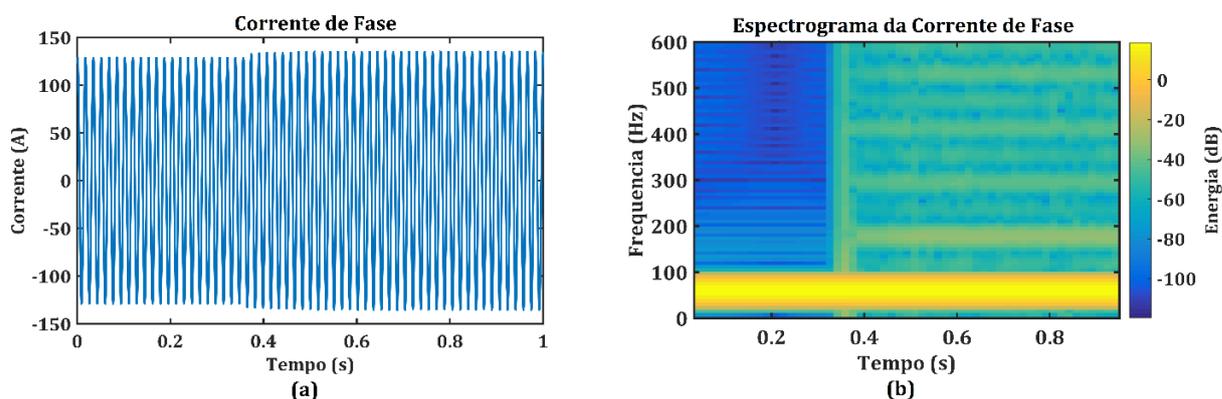


Figura 4.7 - (a) Corrente de Fase proveniente de uma FAI; (b) Espectrograma da corrente apresentada em (a).

Análise minuciosa do espectrograma em conjunto com a revisão do estado da arte e da fundamentação teórica foram fundamentais para identificação das principais características que podem ser utilizadas na elaboração de um método de detecção de FAI, as quais são enumeradas a seguir.

- **Amplitude do 3º harmônico:** esse é o componente harmônico predominante após a ocorrência de uma FAI (crescimento em torno de 10 dB), porém, sozinho não é capaz de distinguir uma FAI de outros distúrbios.

- **Ângulo de fase do 3º harmônico:** esse parâmetro é afetado consideravelmente, após a ocorrência de FAI e por essa razão, é muito utilizado nos métodos de detecção propostos na literatura (ZANJANI *et al.*, 2013). Quando se compara a fase do 3º harmônico da corrente de fase em relação à fase da componente fundamental da tensão, observa-se uma queda brusca em torno de 100º no seu valor após a ocorrência da FAI.
- **Amplitude do 2º harmônico:** a presença de componentes harmônicos pares, em especial do 2º harmônico, representa mais um indicativo da ocorrência de uma FAI (crescimento em torno de 5 dB), haja visto que sua presença não é significativa no conteúdo harmônico da corrente nos demais distúrbios, como mostra a Figura 4.8.
- **Amplitude do 5º harmônico:** após o 3º harmônico, esse é o segundo componente harmônico predominante após a ocorrência de uma FAI (crescimento em torno de 5 dB).

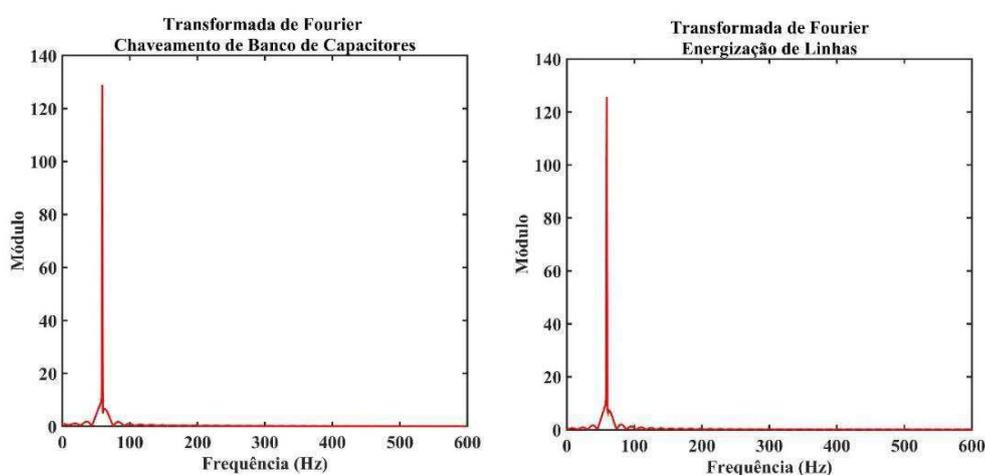


Figura 4.8 – Conteúdo harmônico em distúrbios comuns aos SDEE (Chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas).

O método de detecção proposto considera todas essas características através do monitoramento dos seguintes parâmetros:

- Crescimento da amplitude do 3º harmônico em conjunto com o 2º e o 5º harmônico;
- Comportamento do ângulo de fase do 3º harmônico em relação à fase da componente fundamental da tensão.

Para que o evento seja identificado como uma FAI, uma dessas duas características deverá ser satisfeita por uma quantidade de ciclos correspondente ao tamanho da janela calculado previamente. Dessa forma, evita-se atuação indevida do método quando submetido a outros distúrbios, em especial, ao chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas. Além disso, esse atraso tem como função contornar possíveis erros provocados pela transformação do sinal para o domínio da frequência, pois, a STFT tem como característica o uso de uma janela de tamanho fixo, ou seja, a resolução no tempo e na frequência são as mesmas ao longo de todo o sinal, sendo assim nos pontos em que a frequência instantânea do sinal aumenta a janela fixa poderá ocasionar pequenos erros na amplitude e fase dos componentes harmônicos.

Cada uma dessas características foi comparada com limiares baseados nas condições normais de operação do sistema. Para a base de dados simulada, os limiares foram calculados avaliando o sistema nas condições normais de operação, ou seja, no estado de não ocorrência de uma FAI. Nesse caso observou-se que:

- O ângulo do 3º harmônico varia suavemente entre 150° e -150° . Desta forma, adotou-se o limiar (L_ϕ) de -200° .
- O módulo do 3º harmônico não é maior que -50dB .
- O módulo do 2º harmônico não é maior que -80 dB .
- O módulo do 5º harmônico não é maior que -60 dB .

Ao final, foram estabelecidos os limiares dispostos na Tabela 4.3.

Em relação à base de registros oscilográficos reais, os limiares foram calculados considerando as primeiras amostras do registro, ou seja, na condição de pré-falta. Neste caso, foi necessário verificar que a falta não ocorre nas primeiras amostras dos registros escolhidos para o teste, ou seja, todas as amostras utilizadas para o cálculo do limiar representavam a condição de operação normal do sistema.

Tabela 4.3 – Limiares adotados.

Simulados	Reais
$L_\phi = -200^\circ$	$L_\phi = M_{20} - 100^\circ$
$L_3 = -50 \text{ dB}$	$L_3 = M_{20} + 5$
$L_2 = -80 \text{ dB}$	$L_2 = M_{20} + 5$
$L_5 = -60 \text{ dB}$	$L_5 = M_{20} + 2$

O método de detecção calcula a média das primeiras 20 amostras do sinal (M_{20}) conforme Equação (4.1), na qual x representa o sinal, i o número da amostra e N o total de amostras utilizado.

$$M_N = \frac{\sum_{i=1}^N x[i]}{N}. \quad (4.1)$$

A média é computada para cada um dos indicadores de FAI (modulo e fase do 3º harmônico, 2º harmônico e 5º harmônico) e, com base nos valores obtidos, são estabelecidos os limiares apresentados na Tabela 4.3. Esses valores são empíricos e baseados nos registros observados, mas, em uma aplicação real podem ser ajustados a partir do monitoramento do sinal da corrente.

Em ambos os casos (dados reais ou simulados), o método avalia se o ângulo de fase é menor que L_ϕ , ou se o módulo do 3º, 2º e 5º harmônicos é maior que L_3 , L_2 e L_5 , respectivamente. Resumidamente, o método de detecção de FAI é apresentado no Algoritmo 1 e ilustrado no fluxograma da Figura 4.9.

Algoritmo 1

1. Obtenção dos dados (reais ou simulados).
2. Reamostragem dos dados visando adequação ao padrão adotado pelos Registradores Digitais de Perturbação (15360 Hz).
3. Aplicação da STFT.
 - a. Construção e análise do espectrograma.
4. Cálculo dos indicadores de FAI:
 - a. Diferença entre a fase do 3º harmônico da corrente e a fase da componente fundamental da tensão (ϕ).
 - b. Amplitude do 3º harmônico (H_3).
 - c. Amplitude do 5º harmônico (H_5).
 - d. Amplitude do 2º harmônico (H_2).
5. Comparação dos indicadores com os limiares. A detecção de uma FAI ocorre se uma das seguintes alternativas ocorrer:
 - a. O valor de ϕ for menor que L_ϕ por pelo menos 5 ciclos;
 - b. O valor de H_3 for maior que o limiar para o 3º harmônico (L_3) por pelo menos, 5 ciclos e H_5 e H_2 ultrapassarem seus liminares (L_2 e L_5) pelo mesmo período.

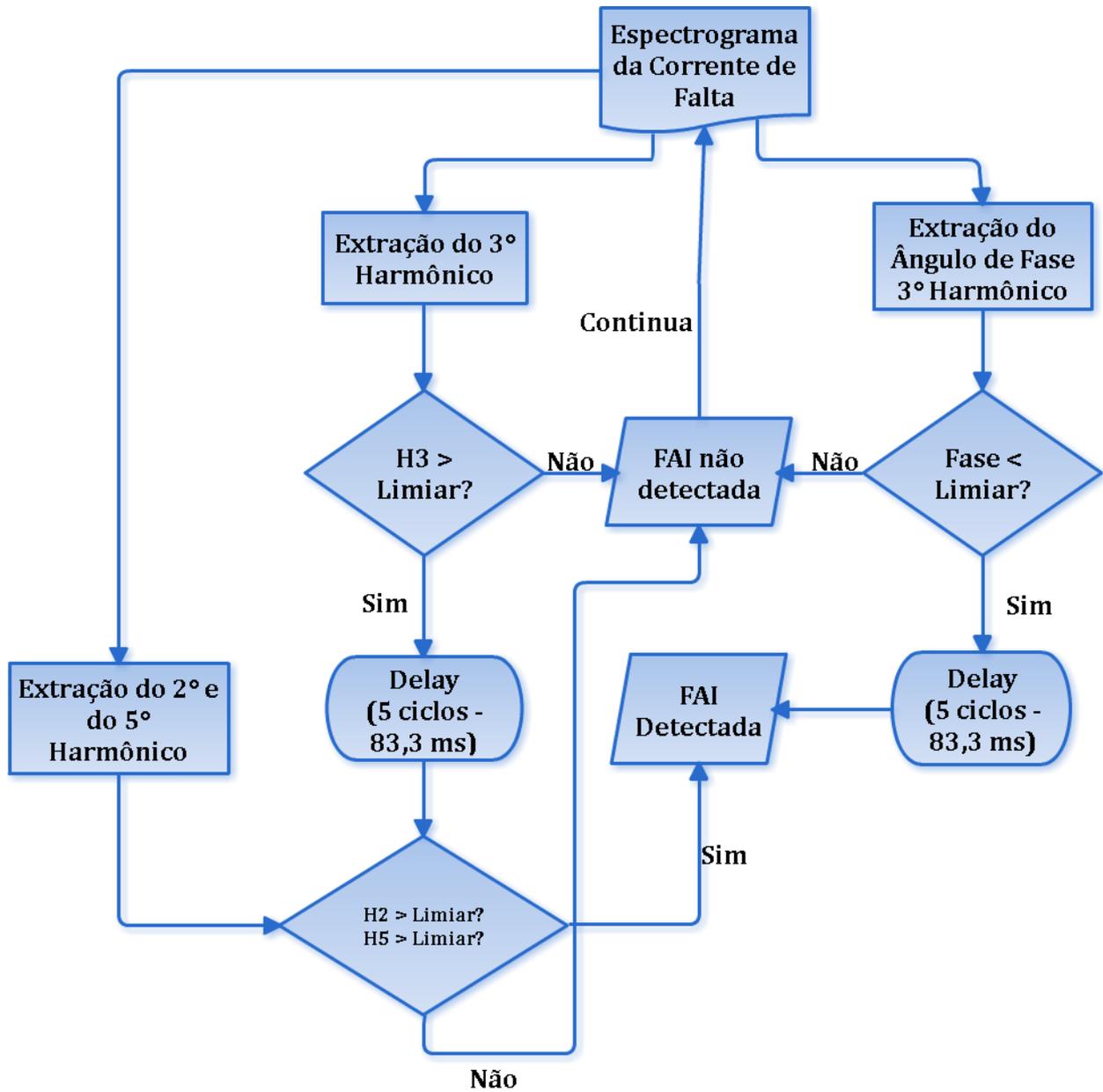


Figura 4.9 – Fluxograma do método de detecção de FAI proposto.

Capítulo 5 – Análise dos Resultados

Este capítulo tem como objetivo principal analisar o desempenho do método proposto. Antes, entretanto, apresenta-se uma análise sobre o tamanho e o tipo da janela mais adequados para se aplicar a STFT aos sinais de corrente provenientes de uma FAI.

5.1 Análise do Tamanho da Janela

A elaboração do método de detecção de FAI proposto levou em consideração que a extração dos componentes harmônicos de interesse deveria ser realizada sem sofrer interferência dos demais e que a FAI deveria ser detectada o mais rápido possível. Segundo tal premissa, o tamanho da janela deve ser tal que:

- A resolução na frequência seja suficiente para que cada componente harmônico seja extraído sem sofrer interferência do componente harmônico seguinte (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).
- A resolução temporal deve ser tal que o evento FAI possa ser detectado em menos de 300 milissegundos, o que corresponde ao dobro do limiar máximo de tempo adotado no Brasil para detecção de distúrbios transitórios (150 milissegundos) (ANEEL, 2011).

A decisão sobre o tamanho da janela foi tomada baseando-se na análise da resolução tempo *versus* frequência, o que foi feito variando gradualmente o tamanho da janela em ciclos e o *overlap*. Considerou-se passo máximo para a frequência de 10 Hz e passo máximo para o tempo de 30 ms (10% do limiar máximo adotado).

Inicialmente, variou-se o tamanho da janela no intervalo de 1 (um) a 10 ciclos de 60 Hz (um ciclo equivale a aproximadamente 0,0167 segundos ou 256 amostras). Cada valor foi testado para quatro valores de *overlap*: 0,25; 0,50; 0,75 e 0,80 ou seja, a janela no tempo “desliza” sobre o sinal 75%, 50%, 25% e 20%, respectivamente.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.1, na qual a cor cinza representa os valores que não obedecem ao passo máximo de tempo, a cor amarela indica os valores que obedecem tanto ao passo de tempo quanto ao da frequência e a cor verde, mostra a melhor relação entre os passos (tempo *versus* frequência). Análise da tabela mostrou que:

- Aumento do *overlap* resultou em aumento da resolução no tempo, mantendo fixa a resolução na frequência.
- Com o *Overlap* de 0,25 e de 0,5 não foi possível obter uma resolução adequada no tempo e na frequência simultaneamente. Portanto, esses valores foram descartados.
- Redução do tamanho da janela pode conduzir ao cruzamento de informações entre os componentes harmônicos subsequentes.
- Janelas de tamanhos até 8 (oito) ciclos podem manter a resolução na frequência, mas podem comprometer a resolução temporal.
- Janelas de tamanhos maiores que 8 (oito) ciclos podem resultar em um espectrograma com banda estreita.

Conclui-se então, que o tamanho da janela não deve ultrapassar 8 (oito) ciclos, nem deve ser menor que 5 (cinco) ciclos. Analisando as janelas com tamanhos entre 5 (cinco) e 8 (oito) ciclos, nota-se que o passo de frequência escolhido foi de 7,5 Hz, portanto, basta escolher o menor passo no tempo. Sendo assim, a janela de 5 (cinco) ciclos com *overlap* de 0,8 apresentou uma resolução satisfatória em ambos os domínios fornecendo um passo de tempo de um ciclo ou 16,7 milissegundos.

É importante destacar que esta análise foi feita “automaticamente” pelo método. Embora o tamanho da janela de 5 (cinco) ciclos tenha sido o escolhido para os sinais de FAI, esse algoritmo pode ser reutilizado para outros sinais.

Tabela 5.1 – Análise da variação do *overlap* e do tamanho da janela.

<i>Overlap</i>	Ciclos	Δf (Hz)	Δt (ms)	<i>Overlap</i>	Ciclos	Δf (Hz)	Δt (ms)
0,25	1	60	12,5	0,5	1	60	8,3
	2	30	25,0		2	30	16,7
	3	15	37,5		3	15	25,0
	4	15	50,0		4	15	33,3
	5	7,5	62,5		5	7,5	41,7
	6	7,5	75,0		6	7,5	50,0
	7	7,5	87,5		7	7,5	58,3
	8	7,5	100,0		8	7,5	66,7
	9	3,75	112,5		9	3,75	75,0
	10	3,75	125,0		10	3,75	83,3
0,75	1	60	4,2	0,8	1	60	3,4
	2	30	8,3		2	30	6,7
	3	15	12,5		3	15	10,0
	4	15	16,7		4	15	13,3
	5	7,5	20,8		5	7,5	16,7
	6	7,5	25,0		6	7,5	20,1
	7	7,5	29,2		7	7,5	23,4
	8	7,5	33,3		8	7,5	26,7
	9	3,75	37,5		9	3,75	30,0
	10	3,75	41,7		10	3,75	33,3

5.2 Análise do Tipo da Janela

Considerando o conteúdo harmônico presente na corrente de uma fase afetada por uma FAI e sabendo que o método de detecção tem como objetivo a extração de harmônicos específicos (2º, 3º e 5º harmônicos), o comportamento de vários tipos de janela foi analisado visando escolha de uma janela com lobo principal estreito e com boa atenuação entre o lobo principal e os lobos secundários, a fim de evitar interferências indevidas de outros componentes de frequência no conteúdo harmônico necessário para detecção da FAI.

As janelas foram aplicadas aos sinais simulados da corrente de FAI para os seis tipos de solo mencionados anteriormente. Dentre as janelas analisadas, seis tipos apresentaram os melhores resultados, que foram: Nuttall, Blackman-Harris, Gaussiana,

Chebyshev, Kaiser e Blackman. As principais características dessas janelas no domínio da frequência estão resumidas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Principais características das funções janela selecionadas.

<i>Janela</i>	Atenuação dos Lobos Secundários (dB)	Largura do Lobo Principal	Parâmetros
<i>Nuttal</i>	-98.2	2.808×10^{-3}	-
<i>Blackman-Harris</i>	-92	2.293×10^{-3}	-
<i>Gauss</i>	-87.7	3.296×10^{-3}	$\alpha = 4$
<i>Chebyshev</i>	-60	2.197×10^{-3}	-
<i>Kaiser</i>	-69.6	2.564×10^{-3}	$\beta = 3\pi$
<i>Blackman</i>	-58.1	2.564×10^{-3}	-

Para ilustrar, apresenta-se na Figura 5.1 o espectrograma obtido para as seis janelas selecionadas, considerando que a superfície de contato é a areia, além disso destaca-se o terceiro harmônico para todas as janelas. A Tabela 5.3 apresenta a diferença entre os valores do 3º harmônico antes e depois da FAI. Nota-se, que a janela de **Blackman-Harris** mostrou a melhor resposta de amplitude, ou seja, a maior diferença de amplitude antes e após a falta. Portanto, essa foi a janela selecionada.

Tabela 5.3 – Diferença da amplitude 3º harmônico antes e após a FAI.

<i>Janela</i>	Diferença do 3º harmônico antes e após a falta
<i>Nuttal</i>	-53,99
<i>Blackman-Harris</i>	-56,68
<i>Gauss</i>	-47,01
<i>Chebyshev</i>	-48,95
<i>Kaiser</i>	-34,07
<i>Blackman</i>	-33,65

A janela de Blackman-Harris é definida como uma soma de quatro termos como apresentado na Equação 5.1. A Figura 5.2 apresenta a função janela no domínio do tempo e da frequência.

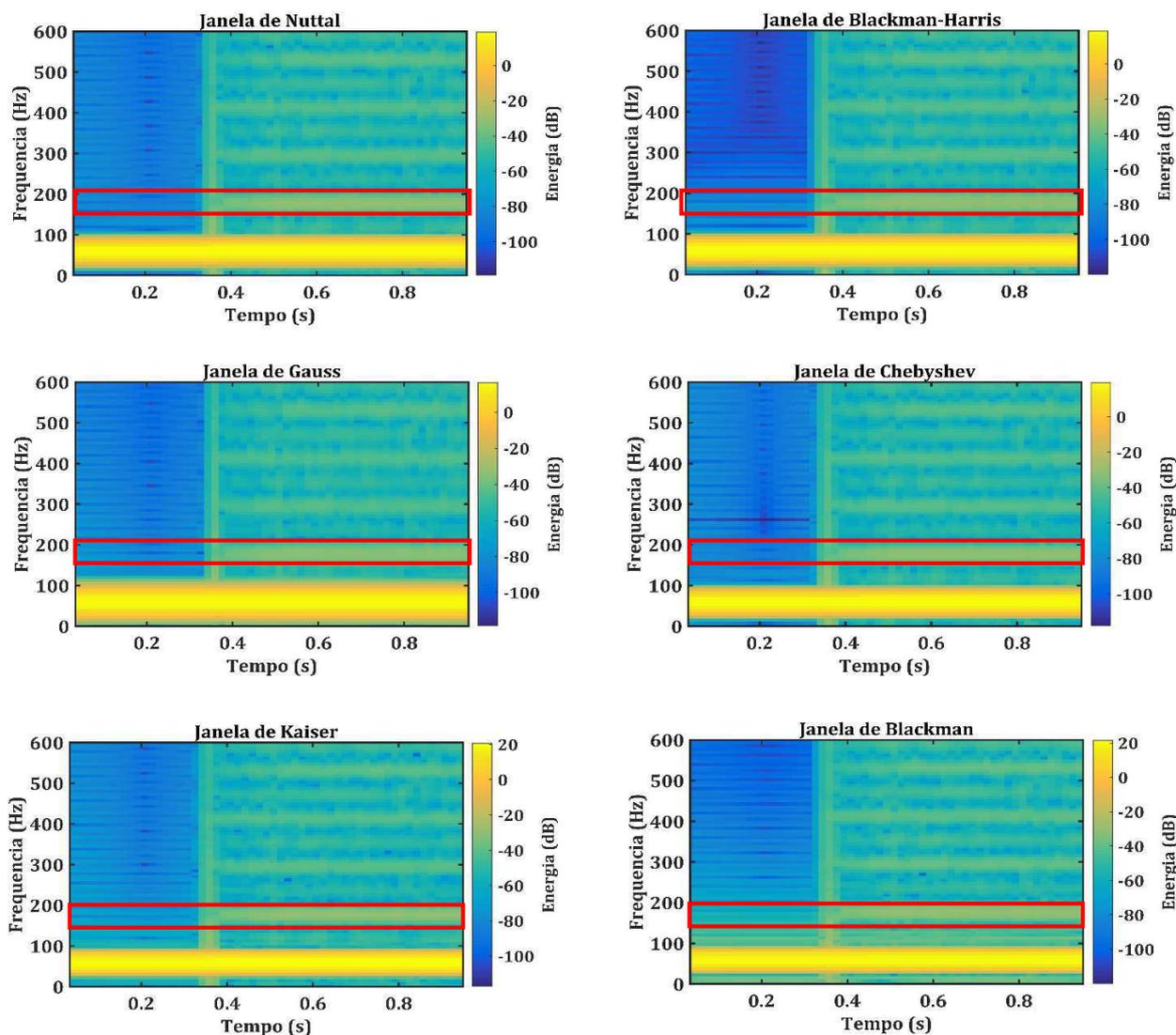


Figura 5.1 – Espectrograma da corrente de FAI para as seis janelas selecionadas.

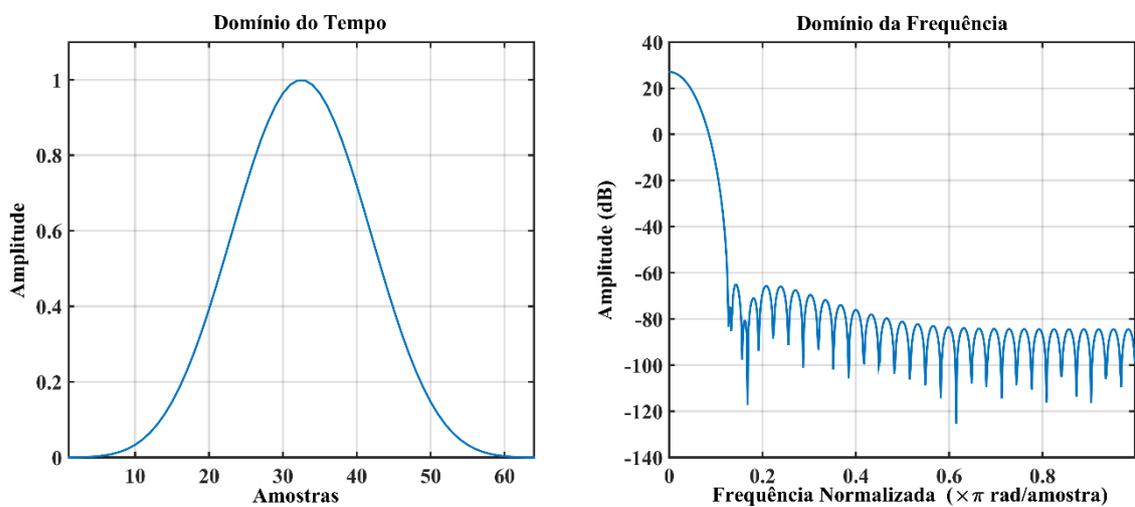


Figura 5.2 – Janela de Blackman-Harris.

5.3 Validação do Método

Concluída a escolha do tipo e do tamanho da janela e a implementação/validação do método, a próxima etapa consistiu em avaliar o desempenho do método com os dados simulados. Inicialmente avaliou-se o comportamento do método de detecção para uma FAI aplicada na barra 10 e considerando os seis tipos de solo: areia, asfalto, calçamento, grama, brita e terra local.

Para ilustrar, apresenta-se na Figura 5.3: (i) a variação temporal do ângulo de fase do 3º harmônico e da amplitude do 2º, 3º e 5º harmônicos no tempo em azul; (ii) os limiares adotados em vermelho; (iii) a atuação do indicador de FAI em rosa (a FAI foi detectada quando o indicador muda de valor). Na figura estão destacados dois tipos de solo: areia e calçamento.

Em seguida, avaliou-se o tempo de detecção da FAI para os seis tipos de solo (Tabela 5.4). Constatou-se que o tempo de detecção máximo foi de 150,8 milissegundos, que corresponde a um valor muito abaixo do limite de 300 milissegundos adotado neste trabalho. Nestes primeiros testes, o 3º harmônico em conjunto com o 2º e 5º harmônicos foram determinantes para a detecção da FAI, visto que ultrapassaram os respectivos limiares mais rapidamente que o ângulo de fase.

Tabela 5.3 – Tempo de detecção – Testes em dados simulados para seis tipos de solo.

<i>Solo</i>	Tempo de Detecção	
	ms	Ciclos
<i>Areia</i>	117,5	7
<i>Asfalto</i>	150,8	9
<i>Brita</i>	117,5	7
<i>Calçamento</i>	117,5	7
<i>Grama</i>	117,5	7
<i>Terra</i>	117,5	7

O próximo passo consistiu em aplicar uma FAI em barras diferentes do sistema-teste, mais especificamente, nas barras: 19, 30, 39, 47, 63, 74 e 79 e considerando a superfície de contato areia. O objetivo desse estudo foi avaliar a capacidade do método em identificar uma FAI aplicada em locais distantes da subestação. Essa análise é ilustrada na Figura 5.4, na qual os dados estão apresentados da mesma forma que na Figura 5.2

A FAI foi aplicada na barra 79, considerado o local mais distante dentre os testados. Conforme se vê, a detecção ocorreu a partir do módulo do 3º harmônico e o tempo de detecção obtido foi de 117,5 segundos, para todas as barras testadas.

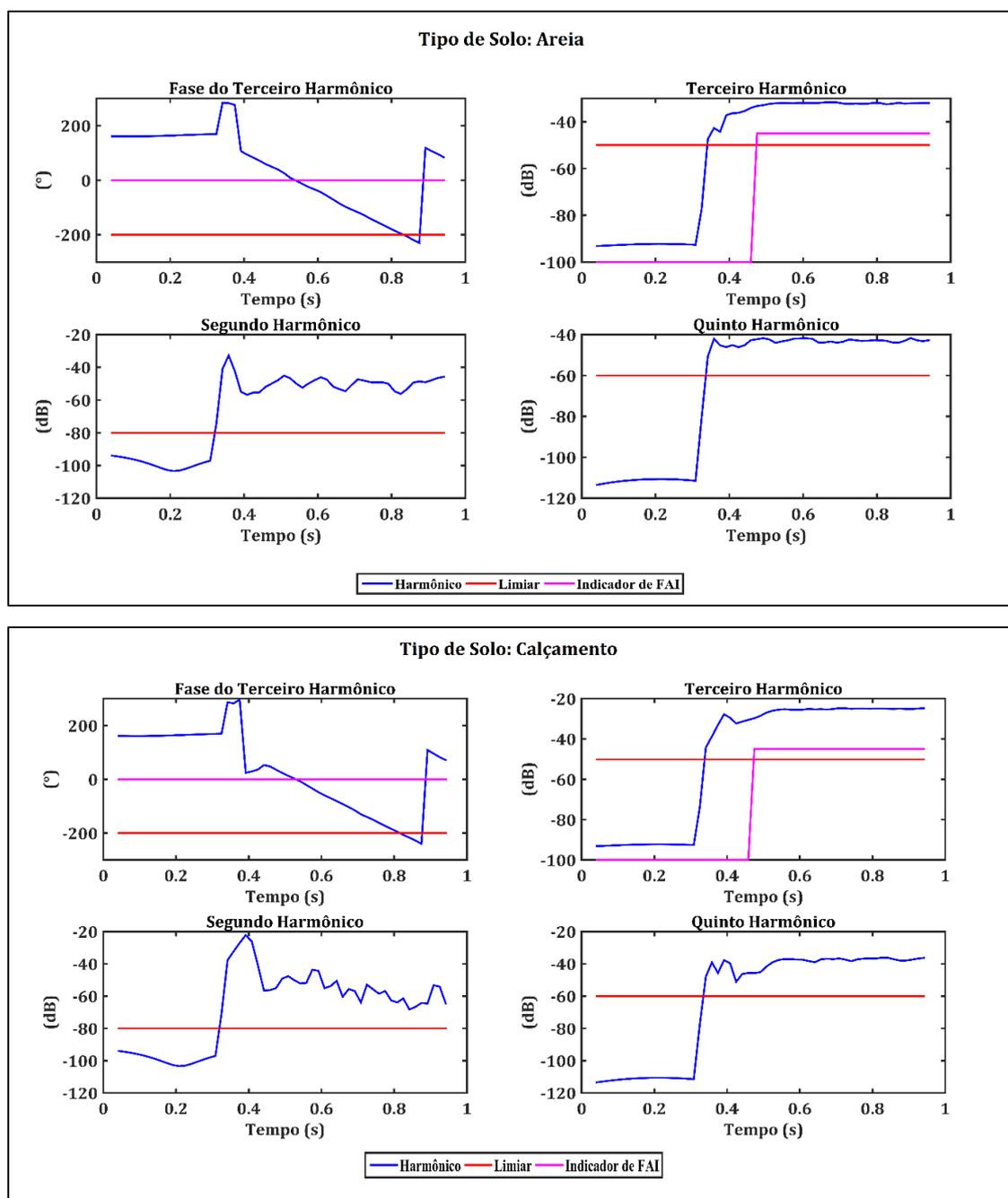


Figura 5.3 – Atuação do método de detecção para FAI simulada na areia e no calçamento.

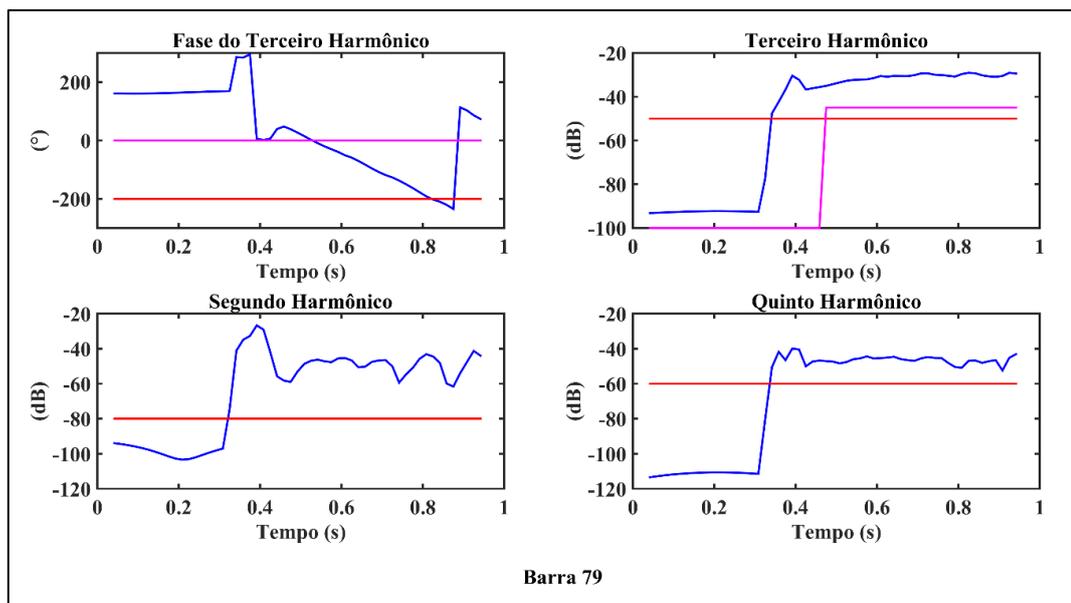


Figura 5.4 – Atuação do método de detecção para FAI aplicada na barra 79 do sistema-teste.

Visando avaliar a capacidade de seletividade do método de detecção de FAI, ocorrências de chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas foram testadas. Para ilustrar, apresenta-se na Figura 5.5 o ângulo de fase do 3º harmônico e a amplitude dos 2º, 3º e 5º harmônicos no tempo, bem como os limiares adotados, conforme realizado nas figuras anteriores. Embora a ocorrência do distúrbio provoque alterações nesses indicadores, constatou-se que elas não se mantêm por mais de 5 (cinco) ciclos e, portanto, os distúrbios não foram detectados.

Por fim, o método foi avaliado quando aplicado a registros oscilográficos reais de FAI. O ângulo de fase do 3º harmônico e a amplitude dos 2º, 3º e 5º harmônicos no tempo, bem como os limiares adotados e a atuação do indicador de FAI para os solos brita e grama seca estão apresentados na Figura 5.6. Na Figura 5.7 estão apresentados os resultados para os solos areia e asfalto molhado.

Nota-se que para os solos brita seca e asfalto molhado, a detecção ocorreu por meio do ângulo de fase, enquanto na grama seca e areia molhada, o método atuou pelo conjunto dos módulos dos 2º, 3º e 5º harmônicos.

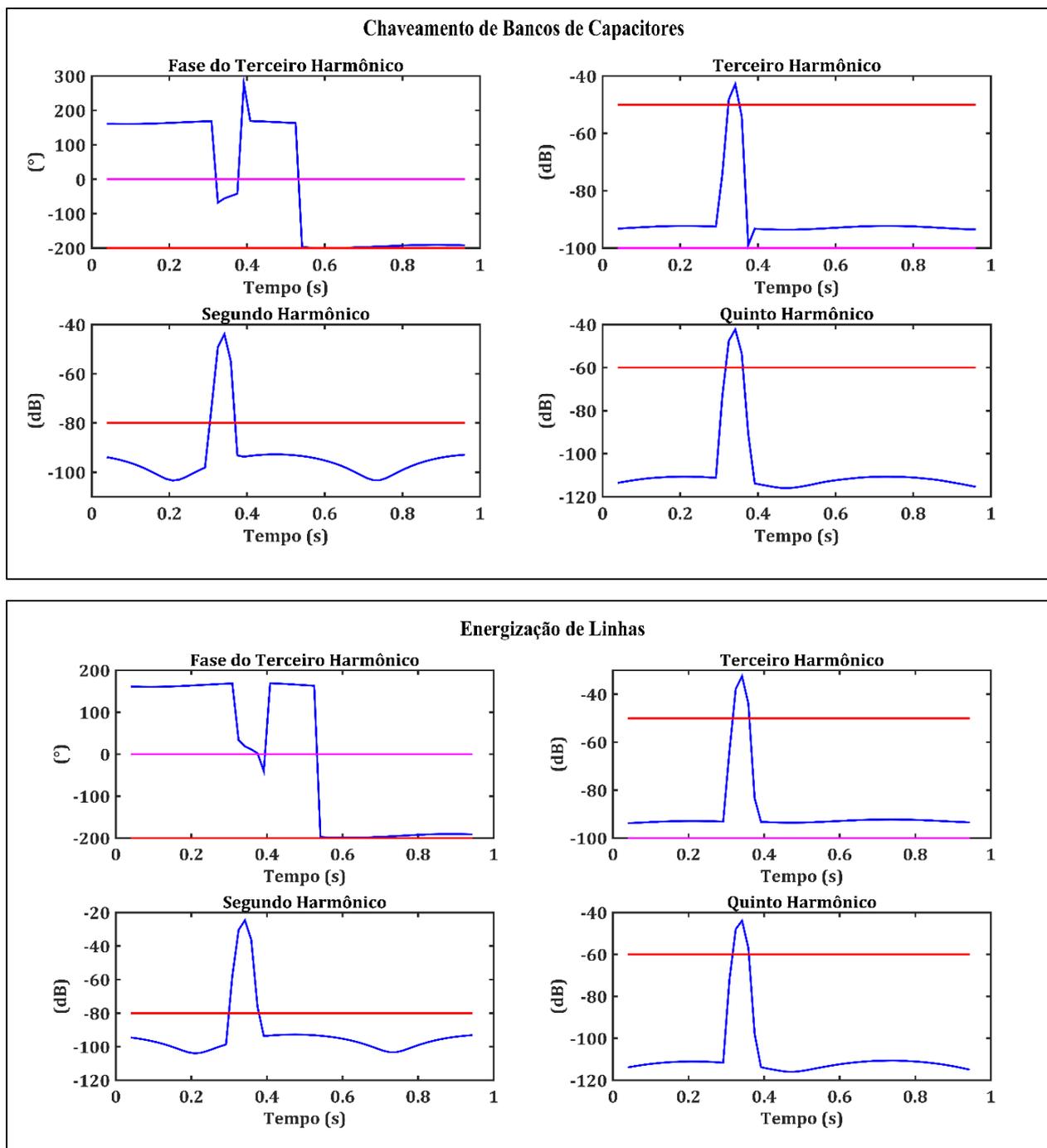


Figura 5.5 – Análise do desempenho do método de detecção de FAI para outros distúrbios.

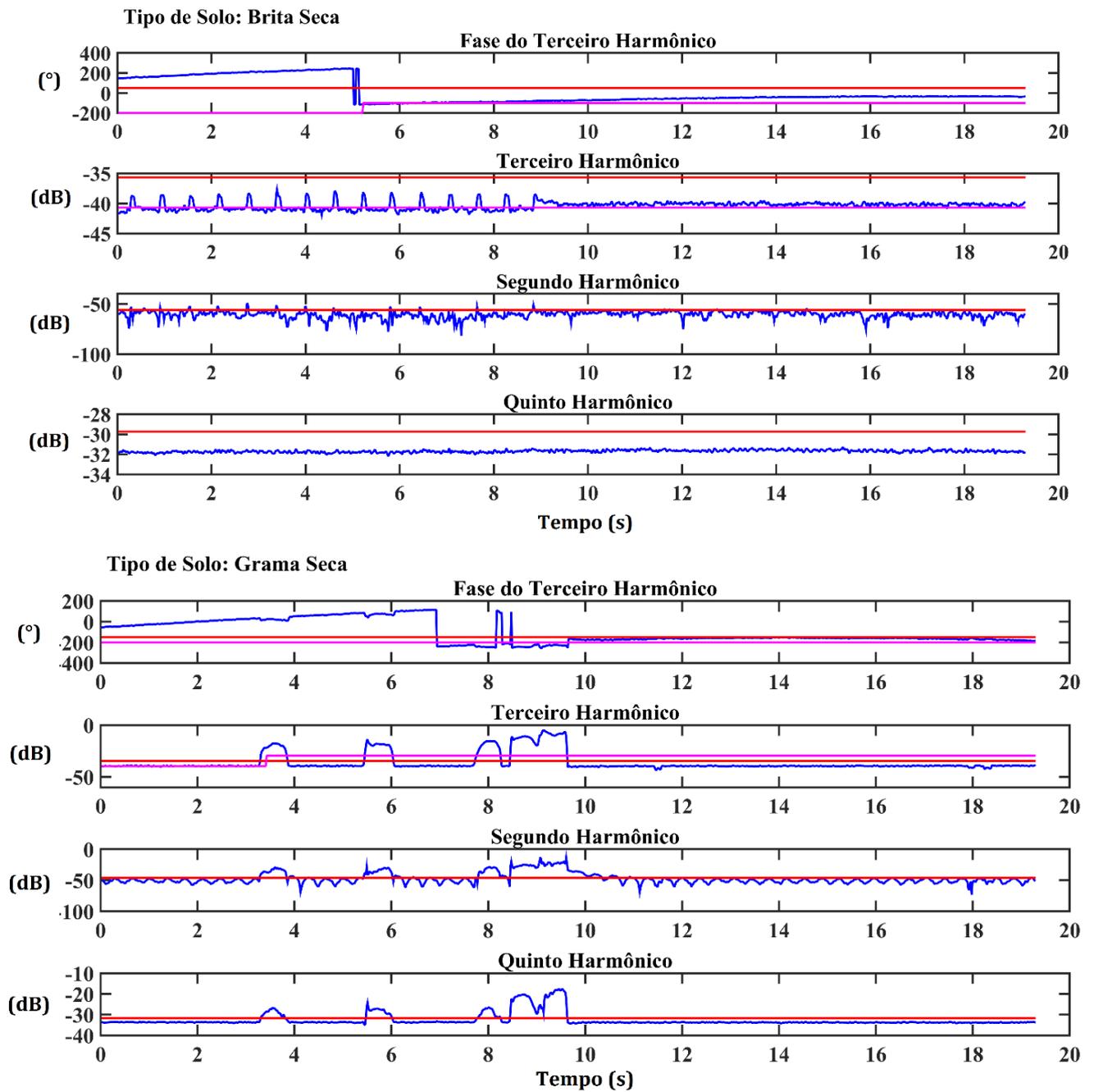


Figura 5.6 – Atuação do método de detecção de FAI nos solos brita e grama secas.

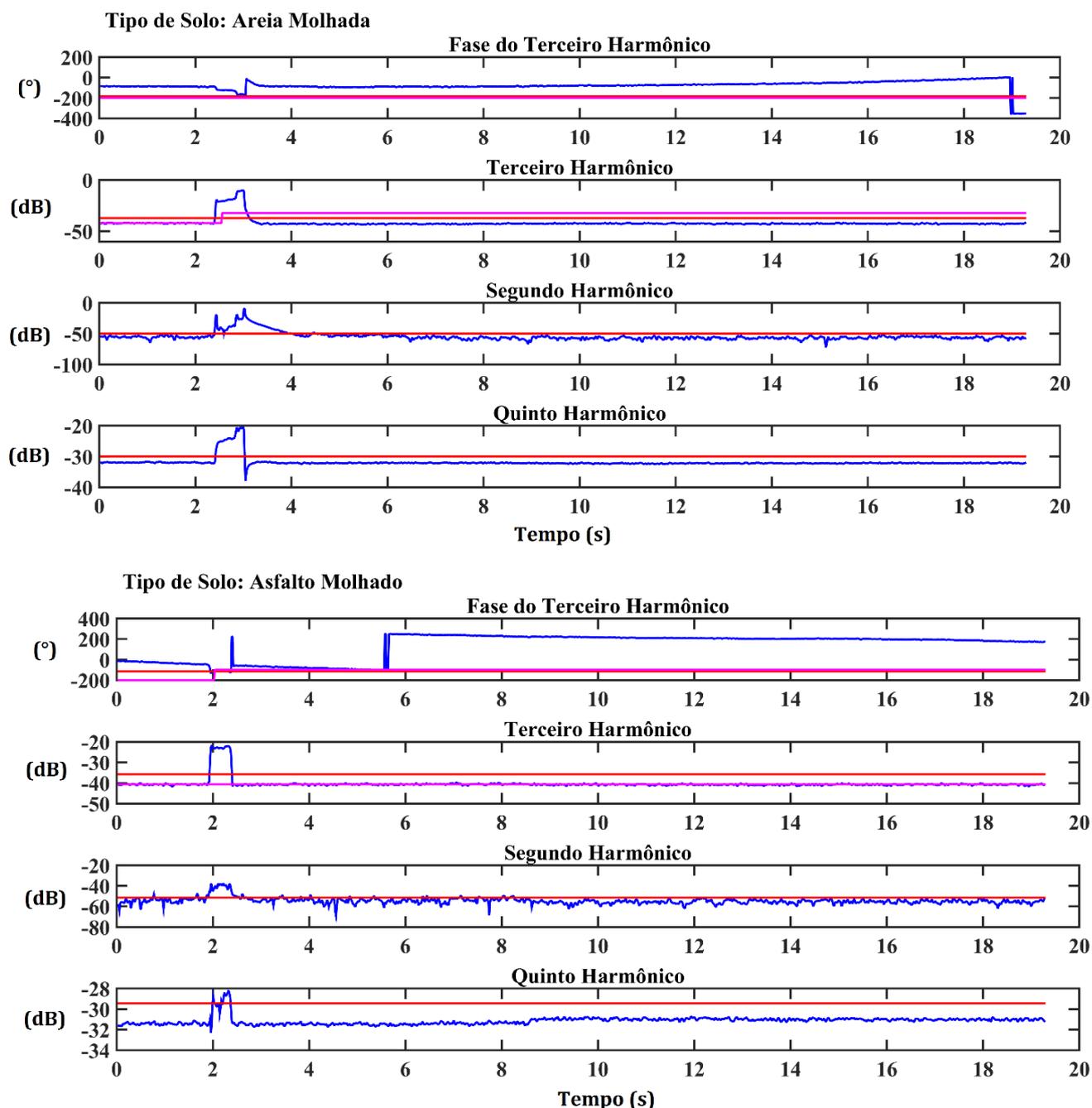


Figura 5.7 – Atuação do método de detecção nos solos areia e asfalto molhados.

O método foi testado ainda, com dois registros (R1 e R2) para cada tipo de solo em cada situação (seco ou molhado). O gráfico apresentado na Figura 5.8 ilustra os tempos de detecção para todos os testes realizados com a base de dados reais.

Nota-se que o tempo máximo de detecção foi pouco maior que 200 milissegundos, ou seja, 12 ciclos de 60 Hz. Apesar de ser um tempo mais elevado do que o apresentado na base de dados simuladas, ainda é inferior ao limite adotado de 300 milissegundos.

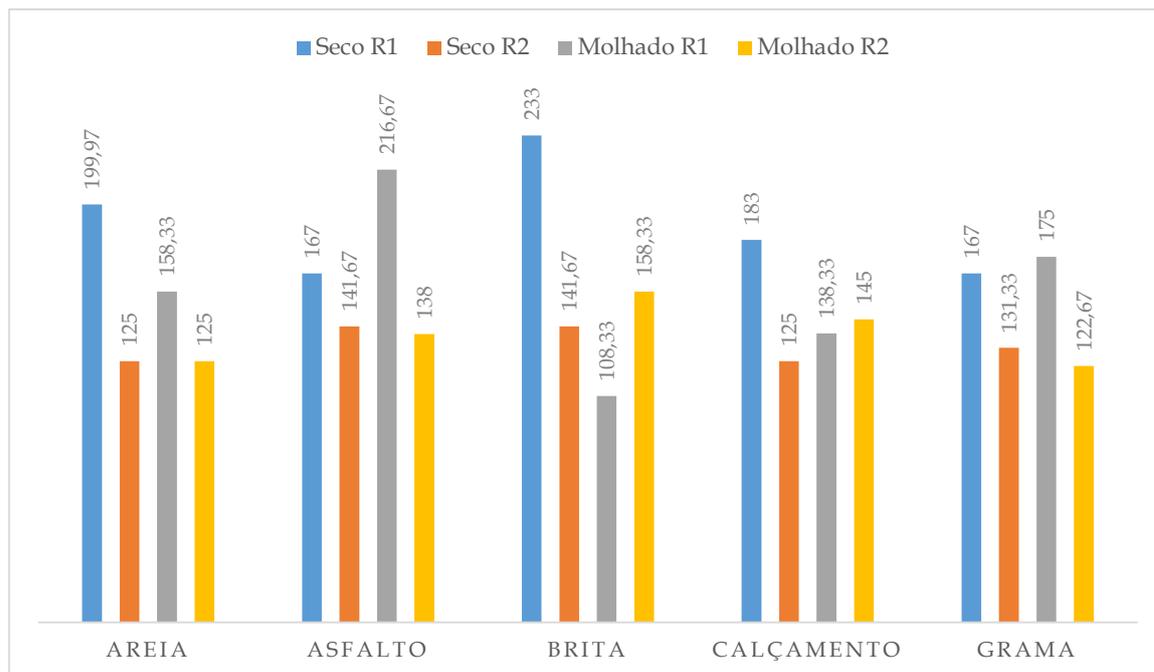


Figura 5.8 – Resumo dos valores dos tempos de detecção de FAI obtidos para os registros oscilográficos reais.

Ao final, concluiu-se que o método de detecção de FAI proposto neste trabalho atuou satisfatoriamente em todos os casos, mostrando-se eficaz na detecção das FAI, mesmo nos casos nos quais não houve crescimento pronunciado da corrente de falta. Até mesmo nos solos secos, a atuação ocorreu, principalmente devido a variação do ângulo de fase do 3º harmônico. Além disso, o método proposto foi seletivo, diferenciando FAI de chaveamentos de capacitores e de energizações de linhas. Os testes com registros oscilográficos reais validou em definitivo, o método proposto.

Capítulo 6 – Conclusões

Nesta pesquisa um método para detecção de faltas de alta impedância (FAI) foi proposto utilizando como base o conteúdo harmônico apresentado pela corrente da fase envolvida. Visando analisar os sinais de corrente provenientes de FAI no domínio da frequência, propôs-se o uso da *Short-Time Fourier Transform* (STFT).

O estudo realizado mostrou que o uso dessa transformada exige uma atenção especial na escolha da janela a ser utilizada, que é função da aplicação. Nesse sentido, análise minuciosa da influência do tipo e do tamanho da janela foi efetuada. A escolha do tamanho da janela baseou-se na análise tempo versus frequência, considerando a variação do número de ciclos da janela. A superposição de janelas (*overlap*) também foi testada visando aumentar a precisão no tempo. Os resultados mostraram que a janela de 5 ciclos de 60 Hz (ou 1280 amostras) é a mais adequada para esta aplicação. Em relação ao tipo, buscou-se escolher uma janela com um lobo principal estreito, a fim de evitar imprecisões na frequência de interesse, bem como uma função com boa atenuação entre os lobos principais e secundários, para prevenir o vazamento (*leakage*) no espectro de frequências. Ao final, a janela de Blackman-Harris foi a que apresentou melhor precisão na amplitude do 3º harmônico, que é o mais afetado em casos de FAI.

A análise do espectrograma da corrente proveniente de FAI corroborou os estudos realizados e a análise do estado da arte no que diz respeito as principais características no domínio da frequência dos sinais provenientes de FAI. Destaca-se a importância das amplitudes dos 2º, 3º e 5º harmônicos, bem como a diferença entre a fase do 3º harmônico da corrente e a fase da componente fundamental da tensão.

Em relação ao método propriamente dito, a ideia principal foi monitorar a corrente de fase do sistema e analisar inicialmente, o crescimento do módulo do 3º harmônico ou a variação brusca (queda) do ângulo de fase, ambos da corrente proveniente da FAI. Caso a primeira característica seja identificada, analisam-se ainda, os módulos dos 2º e 5º harmônicos, uma vez que a amplitude do 3º harmônico, apesar de ser predominante não é exclusiva de uma FAI. O método verifica ainda se as

características se mantêm por 5 ciclos de 60 Hz ou aproximadamente 83,3 milissegundos. Esta etapa é determinante na diferenciação de uma FAI de outros distúrbios presentes nos SDEE.

A validação do método foi feita via registros oscilográficos simulados e reais. Para avaliar a seletividade, o método foi testado com situações de chaveamento de bancos de capacitores e energização de linhas.

Os resultados indicaram que o método atuou devidamente em todas as situações avaliadas. Observou-se ainda, que a análise do ângulo de fase do 3º harmônico foi essencial para detecção nos casos mais complicados, em especial nos solos secos, nos quais a corrente de falta é menor, ou seja, a amplitude da corrente de fase não sofre grandes alterações após a ocorrência da FAI e, portanto, a amplitude dos componentes harmônicos não cresce o suficiente. Por outro lado, nos solos molhados o terceiro harmônico foi o fator determinante na maioria dos casos testados devido a amplitude maior da corrente de falta.

Por fim, pode-se afirmar que o método proposto apresentou bons resultados, principalmente no uso da variação temporal do conteúdo harmônico dos sinais de FAI, a fim de detectar este tipo de falta, mostrando-se rápido e seletivo.

Como trabalhos futuros, sugere-se:

- Implementação da STFT com janela adaptativa dependente da frequência instantânea do sinal a fim de obter resoluções no tempo e na frequência variáveis de acordo com as características do sinal.
- Análise pormenorizada da capacidade de seletividade do método, ou seja, distinção das FAI dos demais distúrbios. Para isso, o método deve ser aplicado a outros tipos de distúrbios, tais como: energização de transformadores e chaveamento de cargas.
- Validação do método quando aplicado em tempo real, através da utilização de simuladores de tempo real como, por exemplo, o RTDS[®].

- Adaptação do método visando ampliação do espectro de distúrbios a serem detectados, ou seja, verificar a possibilidade de utilização do método quando aplicado a outros distúrbios relacionados com a qualidade da energia.
- Aplicar uma análise estatística aos limiares utilizados nos indicadores para detecção de FAI, a fim de remover o empirismo dos valores utilizados.
- Verificação do desempenho do método quando na ocorrência de FAI em cada uma das barras do sistema teste.
- Análise do desempenho do método considerando a presença dos religadores no sistema teste.

Referências Bibliográficas

ABDEL AZIZ, M.S.; MOUSTAFA HASSAN, M.A.; ZAHAB, E.A. *Applications of ANFIS in high impedance faults detection and classification in distribution networks*. IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drivers (SDEMPED). Bologna, 2011.

ABRADEE. Disponível em: <http://www.abradee.com.br>. Acesso em maio de 2016.

ADAMIAK, M.; WESTER, C.; THAKUR, M.; JENSEN, C. *High impedance fault detection on distribution feeders*. Protection and Control Journal, 2006.

ALMEIDA, A. L. V. *Ajuste e Coordenação de Relés de Sobrecorrente*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 2008.

ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em abril de 2016.

ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST*. Módulos 1 a 8. 2011.

AUCOIN, B. M.; RUSSELL, B. D. *Distribution high impedance fault detection utilizing high frequency current components*, 1982.

AUCOIN, B. M.; JONES, R. H. *High Impedance Fault Detection Implementation Issues*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No 1, 1996.

BALSER, S. J.; CLEMENTS, K. A.; LAWRENCE, D. J. *A microprocessor-Based technique for detection of high impedance faults*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 1, n. 3., 1986.

BRITO, N. S. D. *Teoria das wavelets - estudo e aplicação na análise de transitórios em sistemas de potência*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. 2001.

BUSCH, P.; HEINONEN, T.; LAHTI, P. *Heisenberg's uncertainty principle*. Physics Reports, v. 452, n. 6, 2007.

CALHOUN, T. B.; BISHOP, M. T.; EICHLER, C. H.; LEE, R. E. *Development and testing of an electro-mechanical relay to detect fallen distribution conductors*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982.

CHEN, J. C.; PHUNG, B. T.; ZHANG, D. M.; BLACKBURN, T.; AMBIKAI RAJAH, E. *Study on high impedance fault arcing current characteristics*. Australian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2013.

- ELDIN, E. S. T.; IBRAHIM, D. K.; ABDUL-ZAHAB, E. M. *High Impedance Faults Detection in EHV Transmission Lines using the wavelet transform*. The Proceedings of the IEEE Power Engineering Society, General Meeting, Tampa, FL, USA, 2007.
- EMANUEL, A. E.; CYGANSKI, D.; ORR, J. A.; SHILLER, S.; GULACHENSKI, E. M. *High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kv distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 2, 1990.
- EPRI REPORT. *Detection of arcing faults on distribution feeders*. Palo Alto, 1982.
- GARCIA, J. C.; GARCIA, V. V.; KAGAN, N. *Detection of high impedance faults in overhead multi grounded networks*. 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), Juiz de Fora - MG, 2014.
- GIRGIS, A. A.; CHANG, W.; MAKRAM, E. B. *Analysis of high impedance fault generated signals using a Kalman filtering approach*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990.
- HAN, J.; KIM, W.; LEE, H.; KIM, C. *Fault type classification in transmission line using STFT*. 11th International Conference on Developments in Power Systems Protection, 2012.
- HUANG, C.; CHU, H.; CHEN, M. *Algorithm comparison for high impedance fault detection based on staged fault test*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988.
- HUANG, S.; HSIEH, C. *High impedance fault detection utilizing a Morlet wavelet transform approach*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999.
- JOTA, F. G.; JOTA, P. R. S. *High-impedance fault identification using a fuzzy reasoning system*. IEEE Proceedings-GTD, 1998
- KWON, W. H., LEE, G. W.; PARK, Y. M.; YOON, M. C.; YOO, M. H. *High impedance fault detection utilizing incremental variance of normalized even order harmonic power*. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 6, No. 2, 1991.
- LINDERS, J. R. U. S., JEERINGS, D. I. U. S. *High impedance fault analyzer in electric power distribution*. US Patent 4851782, 1989
- MAI, W.; PHUNG, B.T.; AMBIKAI RAJAH, E. *Detection of high impedance faults in medium voltage distribution networks*. 10th International Power & Energy Conference, Ho Chi Minh, VIE, 2012.
- MENDONÇA, T. R.; MARTINS, C. H.; PINTO, M. F.; DUQUE, C. A. *Variable window length applied to a modified Hanning filter for optimal amplitude estimation of power systems signals*. IEE Power & Energy General Meeting, 2011.
- MING-TA, Y.; JIN-LUNG G.; JHY-CHERNG G. *High impedance faults detection technique based on wavelet transform*. Grécia, 2007.

NAKAGOMI, R. M. Proposição de um sistema de faltas de alta impedância em redes de distribuição. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo -USP, São Paulo, 2006.

NATIONAL INSTRUMENTS TUTORIALS. *Understanding FFTs and Windowing*. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/4844/en/>. Acesso em Março de 2016.

OLIVEIRA, S. A. *Geração Distribuída Fotovoltaica: Avaliação dos Impactos Técnicos e um Breve Estudo de Viabilidade Econômica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2016.

PEREIRA, M. D. C. V.; AZEVEDO, F. M. *Análise para um janelamento adequado para sinais biolétricos*. XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomecânica, São José dos Campos, 2002.

PRABHU, K. M. M. *Window Functions and their applications in signal processing*. CRC Press. 2013.

ROUTRAY, P.; MISHRA, M.; ROUT, P. K. *High Impedance Fault Detection in Radial Distribution System Using S-Transform and Neural Network*. IEEE Power Communication and Information Technology Conference, 2015.

RUSSELL, J. B. D. *High impedance fault detection apparatus and method*. US Patent 4466071, 1984.

SANTOS, W. C. *Uma revisão de modelos clássicos de faltas de alta impedância para efeito de melhoramento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2011.

SANTOS, W. C.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D., COSTA, F. B. C., PAES, M. R. C. *High Impedance Faults: From Field Tests to Modeling*. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. V. 24, No. 5. 2013.

SANTOS, W. C.; LOPES, F. V.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. *High impedance fault identification on distribution networks*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016.

SARLAK, M.; SHAHRTASH, S.M. *High impedance fault detection using combination of multi-layer perceptron neural networks based on multi-resolution morphological gradient features of current waveform*. IET Generation, Transmission & Distribution. Vol. 5. No. 5. 2011.

SHAABAN, S. A.; HIYAMA, T; *Transmission Line Faults Classification Using Wavelet Transform*. The 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Cairo University, 2010.

SHARAF, A.M; SNIDER, L. A.; DEBNATH, K. *A third harmonic sequence ANN based detection scheme for high impedance faults*. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1993.

SILVA, W.; OLIVEIRA, A. *Influência da duração da janela da STFT e do uso da CZT no método sensorless que utiliza as componentes de frequência relacionadas as ranhuras de rotor para estimação da velocidade no eixo de indução trifásico*. XIX Congresso Brasileiro de Automática – CBA, 2012.

SMITH, J. O. *Spectral áudio signal processing*. Disponível em: https://www.dsprelated.com/freebooks/sasp/Spectrum_Analysis_Windows.html. Acesso em março, 2016.

SOUSA, B.A. *Distribuição de Energia Elétrica*. Apostila. Universidade Federal da Paraíba. 1997.

SUBRAMANIAN, S.; ALSTOM GRID, UK; VENKATARAMAN, K. *Detection of high impedance fault in MV distribution system*. Developments in Power Systems Protection, 2012.

YEH, H. G., TRAN, D. H.; YINGER, R. *High impedance fault detection using orthogonal transforms*. IEEE Green Energy and Systems Conference (IGESC), Long Beach - CA, 2014.

YU, D. C., KHAN, S. H. *An adaptative high and low impedance fault detection method*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4. 1994.

ZANJANI, M. G. M.; KARGAR, H. K.; ZANJANI, M. G. M. *High Impedance Fault Detection of Distribution Network by Phasor Measurements Units*. SGRÉ, 2013