

Igor Kursancew Khairalla

ALGORITMO ADAPTATIVO DE DETECÇÃO DE FALTAS DE
ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO USANDO
AS TRANSFORMADAS DE PARK E WAVELET

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Miguel Moreto.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

khairalla, igor kursanow
ALGORITMO ADAPTATIVO DE DETECÇÃO DE FALTAS DE
ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO USANDO AS
TRANSFORMADAS DE PARK E WAVELET / IGOR KURSANOW
khairalla ; orientador, Miguel Moreto, 2017.
106 p.

dissertação (mestrado) - universidade federal de
santa catarina, centro tecnológico, programa de pós
graduação em engenharia elétrica, Florianópolis, 2017.

inclui referências.

1. engenharia elétrica. 2. sistemas de
distribuição. 3. falta de alta impedância. 4. detecção
de falta de alta impedância. I. Moreto, Miguel. II.
universidade federal de santa catarina. programa de
pós-graduação em engenharia elétrica. III. título.

Igor Kursancew Khairalla

ALGORITMO ADAPTATIVO DE DETECÇÃO DE FALTAS DE
ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO USANDO
AS TRANSFORMADAS DE PARK E WAVELET

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de
“Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo
Programa Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade
Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de junho de 2017.

Prof. Marcelo Lobo Heldwein, Dr.Sc.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Orientador

Prof. Fernando Buzzulini Prioste, Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Hans Helmut Zurn, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

À Jacqueline Gisele Rolim (*in
memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Miguel Moreto, por aceitar o desafio e em pouco tempo ter contribuído fortemente para a elaboração deste trabalho.

À minha família, que se faz presente com muito amor e carinho, me apoiando e me motivando para cada conquista.

Aos colegas do projeto SIMFAL (P&D ANEEL CELESC nº 7110/2012), o qual foi muito importante para o desenvolvimento deste trabalho e acarretou em muito aprendizado acadêmico e em experiência profissional.

Aos amigos que me acompanharam e ajudaram ao longo da pós-graduação e principalmente na finalização deste trabalho de dissertação.

RESUMO

Este trabalho aborda a detecção de faltas de alta impedância em redes elétricas de distribuição. Propõe-se um método de detecção através de sinais de tensão, provenientes do equipamento de proteção do sistema elétrico, que utiliza a transformada de Park para agregação dos sinais das três fases em apenas um sinal (tensão de eixo direto) e posterior análise de transitório com a transformada *wavelet*. A partir deste ponto, o sinal em destaque é avaliado por um algoritmo adaptativo, o qual é responsável por determinar se há ou não a ocorrência de falta de alta impedância, diferenciando principalmente de transitórios envolvendo aspectos de qualidade de energia elétrica. Os sinais de correntes, provenientes do equipamento de proteção, também estão presentes no algoritmo para definir se a falta de alta impedância ocorreu no respectivo trecho de proteção em análise. Os resultados obtidos com a metodologia proposta indicam a correta detecção de falta de alta impedância e a capacidade de diferenciar dos demais transitórios devido principalmente às características intrínsecas do arco elétrico.

Palavras-chave: Sistemas de distribuição. Detecção de faltas de alta impedância. Transformada de Park. Transformada *wavelet*.

ABSTRACT

This work focuses on the detection of high impedance faults in electrical distribution networks. A method of detection is proposed through voltage signals from the protective device, that uses the Park transform to aggregate the signals of the three phases in only one signal (direct-axis voltage) and subsequent transient analysis with the wavelet transform. From this point, the signal is evaluated by an adaptive algorithm that is responsible for determining whether there is or not the occurrence of high impedance fault, differing mainly from transients involving aspects of electric power quality. The current signals from the protective equipment are also present in the algorithm to determine if the high impedance fault occurred in the respective protection section under analysis. The results obtained with the proposed methodology indicate the correct detection of high impedance fault and the capacity to differentiate from the other transients due mainly to the intrinsic characteristics of the electric arc.

Keywords: Distribution system. High impedance fault detection. Park transform. Wavelet transform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condutor rompido energizado em contato com asfalto (FAI).	22
Figura 2 - Condutores rompidos energizados em contato direto a terra, porém de característica de alta impedância.	22
Figura 3 - Arquitetura básica do sistema elétrico de potência (SHORT, 2004).	25
Figura 4 - Componentes de uma subestação de distribuição.	26
Figura 5 - Estrutura da rede de distribuição.	28
Figura 6 - Estruturas dos condutores em alimentadores (KERSTING, 2001).	29
Figura 7 - Causas de perturbações no sistema elétrico.	32
Figura 8 - Causas de típicas faltas em SEP: a) árvore encostando na linha energizada; b) condutor caído no lado da fonte; c) condutor caído no lado da carga.	34
Figura 9 - Característica tensão-corrente de uma FAI (EMANUEL et al., 1990).	36
Figura 10 - Corrente em função do tempo de uma FAI típica (NAM et al., 2001).	37
Figura 11 - Modelo de FAI por diodos antiparalelos (EMANUEL et al., 1990).	39
Figura 12 - Modificações de diodos antiparalelos de EMANUEL et al. (1990): a) Modelo proposto por ZAMANAN et al. (2006); b) Modelo utilizado por SHARAF et al. (1993); c) Modelo proposto por SHENG et al. (2004).	40
Figura 13 - Modelo de FAI proposto por NAM et al. (2001).	40
Figura 14 - Característica tensão em função da corrente de uma FAI modelada por NAKAGOMI (2006).	41
Figura 15 - Parte resistiva da FAI que diminui com o tempo (URIARTE et al., 2003).	42
Figura 16 - Fluxograma para a resolução da equação de arco no programa ATP® (ELKALASHY, 2007).	44
Figura 17 - Arranjo de filtragem (PAOLONE et al., 2011).	46
Figura 18 - Fluxograma para detecção de FAI (KIM et al., 2002).	48
Figura 19 - Modelo de falta de alta impedância implementado.	56
Figura 20 - FAI implementada no ATP.	57
Figura 21 - Arquitetura do alimentador teste IEEE 34 barras simulado (KERSTING, 2001).	58
Figura 22 - Parte da arquitetura do alimentador teste IEEE 34 barras no ATP®.	58

Figura 23 - Destaques para barras com eventos simulados na rede IEEE 34 barras.....	60
Figura 24 - Decomposição da transformada wavelet.	66
Figura 25 – Exemplo de arquitetura da transformada wavelet via análise multiresolução.....	67
Figura 26 - Wavelet de Haar.	69
Figura 27 - Wavelet chapéu mexicano.....	69
Figura 28 - Wavelets da família Daubechies.	70
Figura 29 - Wavelet mãe db4.....	71
Figura 30 - Função de escalonamento da wavelet mãe db4.	72
Figura 31 - Algoritmo adaptativo proposto.....	74
Figura 32 - Obtenção da energia da janela da amostra.	77
Figura 33 – Análise do algoritmo através da energia da janela da amostra.	78
Figura 34 - Método para determinar se há falta no alimentador.	79
Figura 35 - Corrente de falta da simulação.	81
Figura 36 – (a) Tensão registrada na ocorrência de falta de baixa impedância; (b) Detalhamento do transitório no sinal de tensão.	82
Figura 37 – Tensão de eixo direto em falta de baixa impedância.	83
Figura 38 - Coeficiente de detalhe wavelet do sinal de tensão em falta de baixa impedância.	83
Figura 39 - Energias das janelas das amostras do sinal em falta de baixa impedância.	84
Figura 40 – (a) Tensão registrada na ocorrência de falta de alta impedância; (b) Detalhamento do transitório no sinal de tensão.	85
Figura 41 – Tensão de eixo direto em FAI.	85
Figura 42 - Coeficiente de detalhe wavelet do sinal de tensão em FAI.	86
Figura 43 - Energias das janelas das amostras do sinal em FAI.	86
Figura 44 - Coeficiente de detalhe wavelet do sinal de tensão em fechamento de banco de capacitores.....	87
Figura 45 - Energias das janelas das amostras do sinal em fechamento de banco de capacitores.	87
Figura 46 - Coeficiente de detalhe wavelet do sinal de tensão em energização de ramal.....	88
Figura 47 - Energias das janelas das amostras do sinal em energização de ramal de alimentador.....	89
Figura 48 - Imagem da arquitetura do alimentador IEEE 34 barras.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do modelo de FAI implementado no ATP®.	56
Tabela 2 - Pontos de simulação na rede teste IEEE 34 barras.....	59
Tabela 3 - Possibilidade de uso das famílias wavelets (TANNUS, 2015).	68
Tabela 4 - Resultados das simulações realizados do algoritmo proposto.	89
Tabela 5 - Comprimento e características das secções do alimentador IEEE 34 barras.	99
Tabela 6 - Cargas concentradas.....	102
Tabela 7 - Cargas distribuídas.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP®	<i>Alternative Transient Program®</i>
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
db	Daubechies
DC	<i>Direct Current</i>
FAI	Falta de Alta Impedância
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MatLab®	<i>Matrix Laboratory®</i>
pu	Sistema por Unidade
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	Root Mean Square
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TWD	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta
WT	<i>Wavelet Transform</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos.....	22
1.2	Estrutura da dissertação.....	23
2	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ...	25
2.1	Características dos sistemas de distribuição.....	25
2.1.1	Elementos da Rede de Distribuição.....	26
2.1.2	Estruturas da Rede Elétrica de Distribuição.....	27
2.1.3	Proteção da Rede Elétrica de Distribuição	29
2.2	Faltas e transitórios em sistemas de distribuição.....	31
2.2.1	Características das faltas de alta impedância.....	34
2.2.2	Modelos de faltas de alta impedância.....	38
2.2.2.1	Diodos Antiparalelos.....	39
2.2.2.2	Modelo baseado nas Curvas Tensão-Corrente	40
2.2.2.3	Arco Elétrico	42
3	DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	45
3.1	Métodos disponíveis na literatura.....	45
3.1.1	Aplicações de Filtros	45
3.1.2	Aplicações da Transformada Wavelet Discreta.....	47
3.1.3	Aplicações da Transformada de Park	49
3.1.4	Aplicações de Redes Neurais	50
3.2	Métodos disponíveis em equipamentos comerciais.....	51
3.2.1	General Electric (GE).....	52
3.2.2	Asea Brown Boveri (ABB)	53
3.2.3	Schweitzer Engineering Laboratories (SEL).....	53
4	MODELAGEM DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA E DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO TESTE	55
4.1	Modelagem da falta de alta impedância	55

4.2	Modelagem dos sistemas de distribuição teste.....	57
4.2.1	Sistema IEEE 34 barras.....	57
4.2.1.1	Simulações realizadas.....	59
5	ALGORITMO DESENVOLVIDO PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	61
5.1	Transformada de Park	61
5.2	Transformada Wavelet	64
5.2.1	Transformada Wavelet Discreta.....	65
5.2.2	Famílias de Wavelet Mãe.....	67
5.2.2.1	Haar	69
5.2.2.2	Chapéu Mexicano	69
5.2.2.3	Daubechies.....	70
5.2.3	Escolha da wavelet mãe	70
5.3	Detecção da falta de alta impedância	72
5.3.1	Bloco 1 – Filtragem do Sinal	75
5.3.2	Bloco 2 – Algoritmo adaptativo	75
5.3.3	Bloco 3: Definição da seletividade.....	78
6	RESULTADOS OBTIDOS	81
6.1	Análise da falta de baixa impedância	82
6.2	Análise da falta de alta impedância.....	84
6.3	Análise de chaveamento de banco de capacitores	87
6.4	Análise em energização de ramal	88
6.5	Resumo dos resultados obtidos	89
7	CONCLUSÃO	91
7.1	Trabalhos futuros.....	92
	REFERÊNCIAS.....	93
	ANEXO A – ALIMENTADOR TESTE IEEE 34 BARRAS	99
	ANEXO B – MODELAGEM DE INDUTOR VIA MODELS	105

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEPs) encontram-se constantemente sujeitos a condições que possibilitam a ocorrência de faltas. Estas faltas comumente provocam um aumento considerável da corrente fornecida ao sistema que, em geral, pode ser detectado por relés convencionais (eletromecânicos e/ou digitais) de sobrecorrente. Porém, uma falta de alta impedância (FAI) consiste em um tipo particular de curto-circuito na rede elétrica, caracterizado pelo contato de um condutor energizado com uma superfície de elevada resistência elétrica, que resulta em correntes pouco significativas para a atuação dos dispositivos de proteção por sobrecorrente. A maior quantidade de FAIs ocorre em sistemas elétricos com tensões menores ou iguais a 15 kV. Os problemas relacionados à ocorrência de FAI são menores em sistemas elétricos com níveis de tensão superiores a 25 kV, mas podem ocorrer igualmente em sistemas elétricos com tensão superiores. Por esta razão, o escopo desta dissertação é dirigido aos sistemas de distribuição de energia elétrica, particularmente aos sistemas de média tensão de distribuição aéreos, cujos níveis de tensão no Brasil são de 13,8 a 34,5 kV.

A operação, o controle e a proteção dos sistemas de distribuição são geralmente feitos a partir dos sinais trifásicos de tensão e corrente, medidos na subestação ou em outros nós do sistema. Qualquer perturbação (rápida mudança do estado normal), tal como a ocorrência de curtos circuitos, produz transitórios eletromagnéticos nesses sinais monitorados, causando alterações substanciais nas magnitudes de tensão e corrente. Em específico, as FAIs apresentam características bastante peculiares, tais como pequenas distorções nas formas de ondas de tensão e corrente, presença de harmônicos de 2ª e 3ª ordem e transitórios de baixa energia, as quais podem ser facilmente equiparadas a um ruído. Como consequência, a detecção de faltas de alta impedância não pode ser realizada pelo sistema convencional de proteção baseado nos valores de sobrecorrente, o que pode comprometer as ações de proteção a serem realizadas.

A identificação de uma FAI, em especial às associadas ao rompimento e queda de cabos energizados em sistemas aéreos de distribuição, é um tema bastante recorrente no setor elétrico. A queda de cabos energizados constitui-se em um grande problema de segurança para os seres vivos, que podem ser atingidos ou que podem entrar inadvertidamente em contato com estes cabos caídos, caso não ocorra a isolação desta ocorrência pelo equipamento de proteção, o que faz esta a

principal motivação do desenvolvimento deste trabalho. A relevância do tema em estudo é ilustrada na Figura 1 e Figura 2:



Figura 1 - Condutor rompido energizado em contato com asfalto (FAI).



Figura 2 - Condutores rompidos energizados em contato direto a terra, porém de característica de alta impedância.

1.1 Objetivos

O objetivo desta dissertação é desenvolver e implementar um método de detecção de falta de alta impedância em sistemas de distribuição a partir das medições de tensão e corrente de um equipamento de proteção presente na rede elétrica de distribuição.

Como objetivos específicos, este trabalho deverá contemplar ainda os seguintes aspectos:

- Modelar uma rede de distribuição de teste em um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos;
- Modelar adequadamente as faltas de alta impedância;

- Avalizar o uso das transformadas de Park e *wavelet* para detectar as FAIs.

1.2 Estrutura da dissertação

O capítulo 2 desta dissertação contém uma introdução a importantes conceitos dos sistemas de distribuição de energia elétrica, discorrendo sobre as ocorrências de faltas e transitórios. No capítulo 3 é abordada uma revisão bibliográfica sobre detecção de faltas de alta impedância existentes na literatura técnica, da mesma forma que são apresentadas no capítulo 4 os tipos de modelagens existentes de FAI para aperfeiçoamento de simulações computacionais. A partir deste ponto, no capítulo 5 são abordados conceitos fundamentais deste trabalho, dividido em três partes: o primeiro sobre a transformada de Park, o segundo sobre a transformada *wavelet* e por último, o algoritmo adaptativo desenvolvido para detecção da FAI. Os resultados estão expostos no capítulo 6 enquanto as considerações finais e proposições de trabalhos futuros são expostas no capítulo 7.

2 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 Características dos sistemas de distribuição

Os principais componentes de um sistema elétrico de potência são mostrados na Figura 3. Dentre estes componentes, o mais abundante e presente em todo o sistema de potência é o sistema de distribuição de energia, cujo principal objetivo é possibilitar o acesso de energia elétrica a todo cidadão, situado tanto em pequenas áreas rurais com pouco consumo como em grandes centros urbanos com grandes demandas.

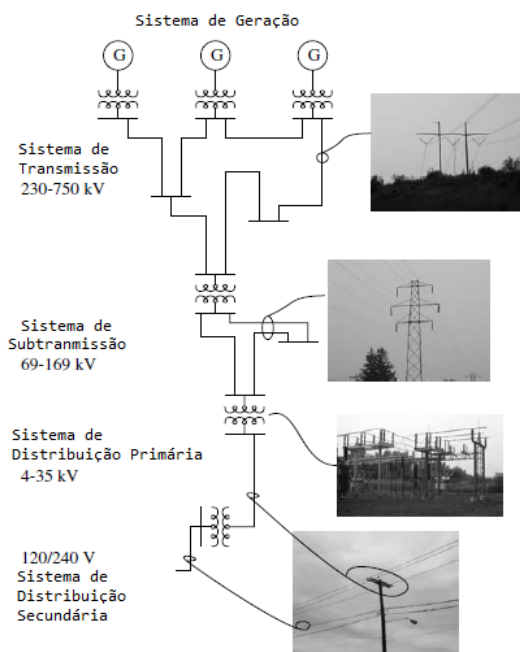


Figura 3 - Arquitetura básica do sistema elétrico de potência (SHORT, 2004).

O sistema de distribuição de energia é composto tipicamente por uma subestação de distribuição, a qual é alimentada por uma ou mais linhas de sub e/ou transmissão, possuindo uma faixa de tensão definida entre a classe de 15 a 35 kV, a critério da necessidade de cada concessionária de energia. Essa subestação de distribuição dispõe de um ou mais alimentadores, que são caracterizados, em sua grande maioria,

por uma topologia radial, e com o fluxo de potência no sentido da subestação até o usuário final. Em crescentes casos, com a implantação da geração distribuída no sistema elétrico, o fluxo de potência pode ocorrer nos dois sentidos ao longo do alimentador, dependendo das cargas e do despacho da geração distribuída em paralelo.

2.1.1 Elementos da Rede de Distribuição

A Figura 4 ilustra um diagrama simplificado de uma subestação de distribuição e seus principais componentes. O principal objetivo de uma subestação de distribuição é reduzir o nível de tensão proveniente das linhas de sub e/ou transmissão à tensão de distribuição, que é de menor magnitude para facilitar a instalação do sistema de distribuição nos mais variados e improváveis ambientes, além de diminuir os riscos de acidentes devido à alta tensão. Em todo o mundo, há vários níveis de tensão de distribuição arbitrados para operação, porém vale referenciar os valores mais empregados no Brasil e principalmente no estado de Santa Catarina, que são: 13800, 23000 e 34500 V.

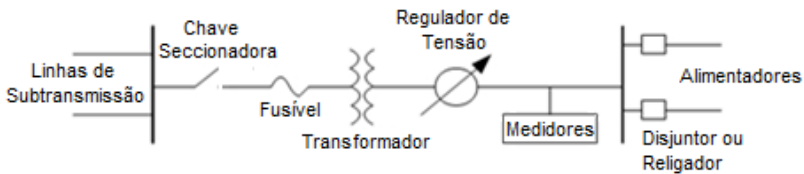


Figura 4 - Componentes de uma subestação de distribuição.

Basicamente, a subestação de distribuição começa com a entrada de uma ou mais linhas de sub e/ou transmissão através de chaves seccionadoras para habilitação ou não da interligação entre a subestação e as linhas.

O próximo e primordial elemento é o transformador, responsável pela transformação do nível de tensão em alta (sub e/ou transmissão) para média tensão (de distribuição). Este equipamento, através da comutação de TAP, também é responsável pela regulação da tensão adequada dos alimentadores, que durante um dia sofrem grandes variações de tensão, com a variação das cargas. Vale ressaltar caso o transformador não permita comutação automática, podem ser utilizados reguladores de tensão individuais em cada fase no lado de baixa tensão do transformador e para casos ainda mais específicos, nos próprios alimentadores.

Outro componente importante é o sistema de proteção que se caracteriza por proteger e prevenir danos aos equipamentos, não só da subestação, mas também de todos os equipamentos interligados a seu sistema, em caso de qualquer tipo e intensidade de falta. As arquiteturas do sistema de proteção em subestações variam conforme a complexidade e a quantidade de equipamentos existentes.

A subestação de distribuição conta também com sistema de monitoramento, que inclui, dentre outras variáveis, a monitoração das grandezas de corrente e tensão que percorrem o sistema elétrico, assim como o registro das extrapolações (perturbações) destas grandezas, incluindo a frequência do sistema para posteriores análises de desempenho. Atualmente, a Agência Nacional de Energia Elétrica – a ANEEL e as concessionárias de energia têm visado o aprimoramento das características dos sistemas de medição de suas subestações, abrangendo as grandezas e os fenômenos de qualidade da energia elétrica (ANEEL, 2016).

Por fim, a subestação de distribuição engloba o barramento de média tensão mais os disjuntores e as chaves seccionadoras, dispondo os alimentadores para a distribuição e disponibilidade de energia elétrica a qualquer cidadão. Vale ressaltar que com o avanço da tecnologia, os disjuntores de média tensão estão sendo trocados por equipamentos chamados religadores, com as mesmas funcionalidades, porém em uma estrutura mais compacta e de fácil instalação.

2.1.2 Estruturas da Rede Elétrica de Distribuição

Os circuitos alimentadores dos sistemas de distribuição de energia são caracterizados por um sistema radial, onde os respectivos fluxos de potência em geral seguem apenas no sentido da subestação até cada consumidor. Percorrendo a rede de distribuição, Figura 5, desde a subestação até a última ramificação do sistema, há os seguintes elementos:

- Alimentador trifásico (primário);
- Derivações laterais (trifásicas, bifásicas e monofásicas);
- Reguladores de tensão;
- Banco de capacitores;
- Transformadores de distribuição;
- Circuitos secundários (baixa tensão);
- Cargas (trifásicas, bifásicas e monofásicas).

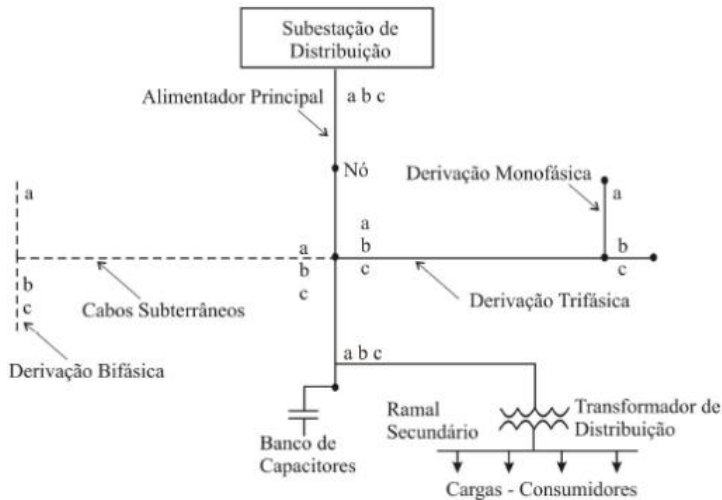


Figura 5 - Estrutura da rede de distribuição.

O carregamento das redes de distribuição é desbalanceado, o que dificulta sua análise. As principais causas do desbalanceamento são:

- O sistema de distribuição tem que atender a diversas cargas monofásicas, impossibilitando o ajuste ideal de potência em cada uma das fases;
- O espaçamento dos circuitos dos alimentadores (trifásicos), tanto aéreo como subterrâneo, não equidistante;
- Os alimentadores são não-transpostos e também são dimensionados com condutores de diferentes diâmetros ao longo de toda sua extensão.

A respeito do espaçamento e disposição dos alimentadores nas redes de distribuição, a Figura 6 ilustra três configurações possíveis empregadas para cada situação (trifásica, bifásica e monofásica), em sistemas de distribuição aéreos. Observa-se que quando é determinada a impedância equivalente do alimentador, incluindo o cálculo dos acoplamentos mútuos magnéticos das três fases envolvidas na primeira estrutura, há uma discrepância entre os respectivos valores de indutância mútua das fases.

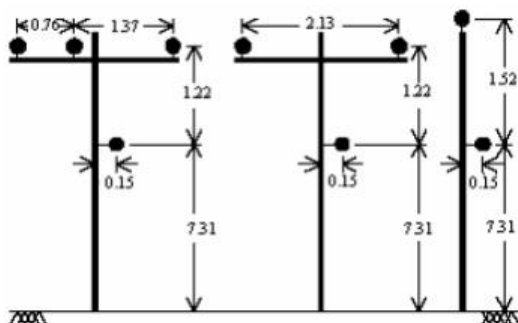


Figura 6 - Estruturas dos condutores em alimentadores (KERSTING, 2001).

2.1.3 Proteção da Rede Elétrica de Distribuição

Os sistemas de distribuição de energia elétrica são responsáveis pela conexão entre os diversos tipos de consumidores e o Sistema Interligado Nacional (SIN), entregando energia elétrica com os padrões regulamentados pela ANEEL. Porém, as redes elétricas estão sujeitas a várias perturbações, prejudicando os consumidores na falta de energia elétrica e/ou na má qualidade do produto e as próprias concessionárias de energia elétrica em seus indicadores de qualidade da energia elétrica. Logo, há a necessidade de implantar um sistema eficiente de proteção, para reduzir os danos no sistema elétrico e para fornecer energia para os consumidores de forma confiável, segura e com qualidade, prevenindo maiores prejuízos tanto aos consumidores como às concessionárias.

Os principais requisitos para a adequada proteção de sistemas elétricos de potência são detalhados abaixo:

- Seletividade: deve ser isolada somente a parte defeituosa do sistema, mantendo as demais partes em operação;
- Rapidez: as sobrecorrentes geradas pelas faltas devem ser extintas no menor tempo possível, evitando possíveis danos aos demais elementos do SEP;
- Sensibilidade: os equipamentos de proteção devem ser sensíveis aos defeitos que possam ocorrer;
- Segurança: a proteção não pode deixar de atuar em casos faltosos, bem como não atuar de forma errônea em casos onde não houver falta;

- Economia: a implementação de todo o sistema de proteção deve ser viável economicamente.

Para redes de distribuição, a proteção deve levar em conta a existência das cargas e ramificações presentes no percurso da linha de distribuição, também chamado de alimentador. Vale ressaltar que mesmo não pertencendo à classe de equipamentos de proteção, os alimentadores contam com chaves de manobra espalhadas ao longo de sua extensão para alterações de topologia, seja para isolar trechos em falta ou evitar sobrecargas, logo, o sistema de proteção da distribuição deverá prever a ocorrência destas situações.

A proteção de sistemas de distribuição conta com os seguintes dispositivos:

- Elo fusível: mais utilizado para a proteção de sistemas de distribuição, devido à fácil instalação e baixo custo. O elo fusível atua quando uma corrente superior a sua capacidade de condução percorre pelo elemento fusível, provocando sua fusão e interrompendo assim a circulação de corrente no circuito a jusante, devido à abertura do porta fusível na chave fusível;
- Religador: equipamento de valor comercial mais elevado, porém cada ano mais comum nas concessionárias de energia elétrica. É um dispositivo que pode ser trifásico ou monofásico, constituído por chaves submersas em óleo ou a vácuo controladas eletricamente por um relé, o qual exerce todas as funções de proteções através de lógicas digitais. O grande ganho do equipamento é a capacidade de realizar religamentos do circuito elétrico logo após a abertura do circuito na ocorrência de falta, desta forma, as faltas transitórias são extintas em poucos segundos;
- Seccionalizador automático: equipamento projetado para trabalhar em conjunto com os religadores, sendo basicamente composto por uma chave a óleo monofásica ou trifásica. A cada abertura do circuito pelo equipamento religador, o seccionalizador automático poderá abrir os seus contatos para isolar menor área em falta;
- Disjuntor: dispositivo mecânico, comandado através de relés ou chaves de comando remoto ou local, destinado a fechar ou interromper um circuito de corrente alternada em condições normais, anormais ou de emergência, assim como o dispositivo religador.

Com a utilização destes vários dispositivos de proteção ao longo das redes de distribuição, a coordenação da proteção deverá ser levada em consideração pelos especialistas das concessionárias, ou seja, o dispositivo de proteção mais próximo à falta deverá atuar sempre,

isolando a menor área possível, proporcionando assim maior confiabilidade à rede elétrica de distribuição (MORETO, 2005).

2.2 Faltas e transitórios em sistemas de distribuição

Há diversas maneiras em que as faltas podem acontecer no SEP, as quais exercem condições extremas anormais sobre os componentes do sistema elétrico e podem originar-se de diversas fontes, tais como ventos de tempestades, choques de veículos em postes, sobretensões devido a raios, queda de árvores ou galhos sobre os condutores e incêndios próximos à rede elétrica. As ocorrências de faltas impactam negativamente em equipamentos da rede elétrica, diminuindo a vida útil dos componentes e, caso apresentem-se em estados deteriorados, podem causar faltas permanentes no sistema elétrico. Outras causas podem ser o contato acidental de seres vivos com partes energizadas da rede elétrica, atos de vandalismo ou manobras erradas por parte de equipes de manutenção. Independente dos motivos de uma falta, estas sempre ocasionam prejuízos à concessionária e condições inseguras à comunidade. Na Figura 7, são ilustradas algumas destas situações de origem externa.

As faltas são conexões acidentais entre fases, fases e neutro ou fases e terra, sendo a magnitude da corrente de falta limitada unicamente pela impedância do sistema e pela impedância de falta. A impedância do sistema está composta pelas impedâncias das linhas e transformadores a montante do ponto da falta, em direção à fonte de energia e pela impedância do solo, no caso deste estar envolvido. Por outro lado, a impedância da falta constitui o caminho elétrico que conecta as fases, fases e terra ou neutro no local da falta. De acordo com o comportamento desta impedância de falta, a mesma pode ser classificada como de baixa ou de alta impedância. Uma falta de baixa impedância gera um aumento substancial da corrente no sistema, por conseguinte pode ser detectada adequadamente pelo equipamento de proteção convencional, geralmente constituído por relés de sobrecorrente. No entanto, uma FAI é constituída por uma impedância suficientemente elevada capaz de limitar a corrente de falta dentro de uma zona não protegida pela proteção por sobrecorrente.

No caso de faltas permanentes de baixa impedância, uma suposição válida e consagrada na comunidade científica é a de atribuir à resistência de falta um comportamento linear. Pelo contrário, uma FAI possui sempre um comportamento resistivo não linear, inerente das suas características físicas.



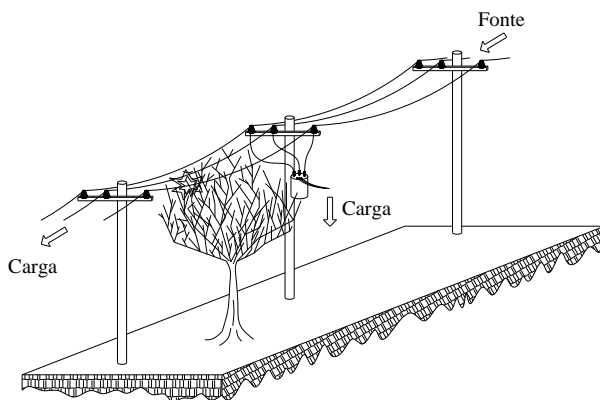
Figura 7 - Causas de perturbações no sistema elétrico.

As faltas podem localizar-se nos principais dispositivos de um sistema de distribuição, tais como transformadores de distribuição, reguladores de tensão, capacitores, condutores e isoladores. Não obstante, as linhas de distribuição que conectam os diferentes nós para formar a rede de distribuição abrangem uma grande superfície terrestre e se encontram diretamente expostas às severidades de intempéries. Por estas razões, os também chamados alimentadores possuem uma alta probabilidade de serem submetidos a uma falta.

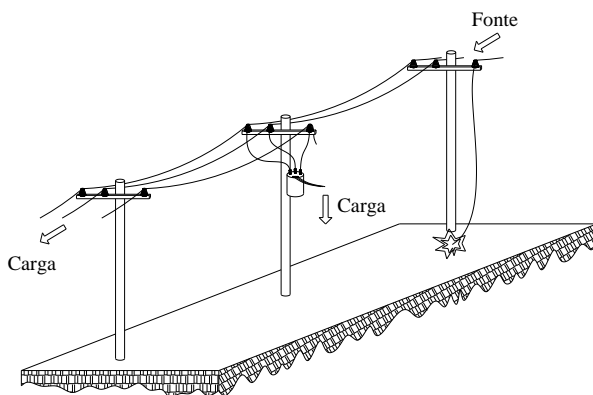
Para dirigir a atenção em casos concretos e comuns em sistemas de distribuição, onde são produzidas a maioria das FAIs, salientam-se os seguintes cenários possíveis:

- Contato de um galho de árvore em um condutor energizado: neste caso a linha continua transmitindo energia elétrica, mas, no entanto, existe uma impedância acidental que conecta uma ou mais fases a terra ou entre fases e a terra, como mostra a Figura 8 (a);

- Rompimento de condutores e contato destes com o solo no lado da fonte de energia do sistema: neste caso, um ou mais condutores de fase caem no solo, como mostra a Figura 8 (b). A fonte alimenta a falta de forma direta, sendo que a corrente é limitada pela impedância de falta;
- Rompimento de condutores e contato destes com o solo no lado da carga: um ou mais condutores de fase caem no solo, como mostra a Figura 8 (c). Neste caso a corrente de falta vai depender da indução entre a fase faltosa e a corrente nas outras fases, do efeito capacitivo da linha de distribuição ou do carregamento de algum transformador a jusante.



(a)



(b)

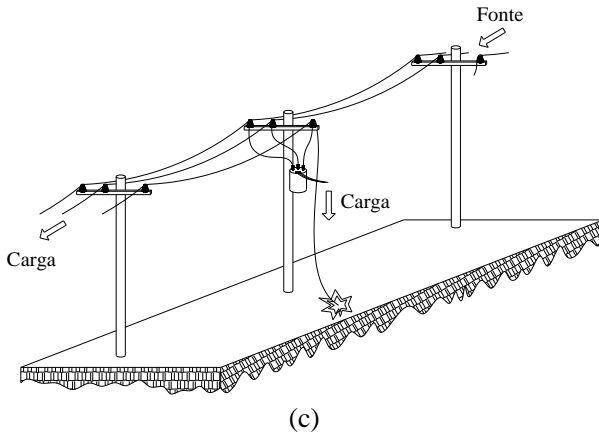


Figura 8 - Causas de típicas faltas em SEP: a) árvore encostando na linha energizada; b) condutor caído no lado da fonte; c) condutor caído no lado da carga.

Efetivamente podem acontecer outras situações ou combinações entre os eventos acima mencionados. No entanto, os casos “b” e “c” podem ser considerados como os mais perigosos para os seres vivos pelo risco de contato direto, já para o risco associado ao caso “a” pode ser mais ou menos fatal, conforme a resistividade da árvore ou elemento em contato.

2.2.1 Características das faltas de alta impedância

A física relacionada à falta de alta impedância gera um comportamento característico da tensão em função da corrente que se propaga no sistema de distribuição a partir do ponto da falta. Estas características foram bem documentadas por vários pesquisadores (JEERINGS e LINDERS, 1989; EMANUEL, *et al.*, 1990; SULTAN *et al.*, 1994; NAM *et al.*, 2001; NAKAGOMI, 2006), que registraram as seguintes características medidas no ponto da falta:

- *Buildup*: a corrente de falta cresce de forma gradual;
- *Shoulder*: o *buildup* cessa por alguns ciclos e depois continua;
- Não linearidade: a curva característica tensão-corrente da FAI não é linear;
- Assimetria: a corrente de falta possui formas de onda diferentes para o semiciclo positivo e para o semiciclo negativo.

A não linearidade e assimetria das FAI devido à queda de um condutor energizado foram registradas primeiramente por JEERINGS e LINDERS (1989). EMANUEL *et al.* (1990) estudaram as FAI mediante testes de campo em um sistema de distribuição com uma tensão nominal de 13,8 kV e uma frequência nominal de 60 Hz. Também analisaram o comportamento das FAI mediante ensaios de laboratório, aplicando uma tensão de 7,9 kV com frequência de 60 Hz sobre uma configuração de recipiente cilíndrico metálico cheio de areia. Mediante os ensaios realizados no laboratório, chegaram às seguintes conclusões:

- A corrente de falta não é simétrica já que o semiciclo positivo apresenta uma amplitude maior do que o semiciclo negativo;
- Uma assimetria também é notada na tensão de arco, sendo sua amplitude menor no semiciclo positivo do que no semiciclo negativo;
- Sempre que a presença de arco elétrico no solo foi detectada, estas características são mantidas para quaisquer valores de corrente.

Na Figura 9 pode ser vista a curva Característica Tensão-Corrente dos experimentos realizados com a utilização de tensão sinusoidal em 60 Hz, na qual se observa claramente a relação não linear da tensão em função da corrente (EMANUEL *et al.*, 1990). Nesta curva, é possível observar a existência de uma tensão de ruptura dielétrica, um valor a partir do qual começa a fluir corrente. Outro fato importante a ressaltar é que tanto a tensão quanto a corrente realizam a passagem por zero ao mesmo tempo, corroborando o comportamento resistivo da FAI. Para os propósitos práticos, os valores de tensão positiva, V_P , e negativa, V_N , são independentes da geometria do eletrodo de alta tensão e do seu material (cobre, alumínio ou ferro). Contudo, a compactação, porosidade e umidade do solo possuem um efeito notável sobre os valores de V_P e V_N . Solos secos ou menos densos dão lugar a valores maiores destas grandezas. Também foi observado que a nulidade de V_P e V_N implica a inexistência do segundo harmônico na corrente da falta.

A não linearidade da FAI implica uma corrente com harmônicos no ponto da falta, os quais se propagam no sistema de distribuição em maior ou menor medida, dependendo das características elétricas inerentes. O trabalho de KIM *et al.* (1988) apresenta uma análise dos harmônicos na corrente devido à presença de FAI, tendo em conta que, durante o funcionamento normal da rede de distribuição, também existem harmônicos, cuja proporção é aumentada com a presença de bancos de capacitores. O estudo conclui que a amplitude dos harmônicos ímpares é predominante na condição faltosa, mas o incremento relativo dos harmônicos pares é maior durante essa condição.

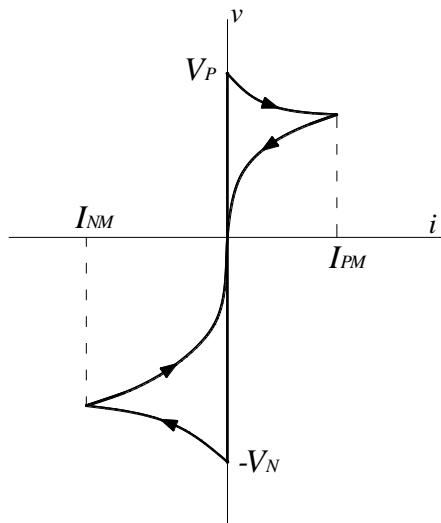


Figura 9 - Característica tensão-corrente de uma FAI (EMANUEL *et al.*, 1990).

O trabalho de EMANUEL *et al.* (1990) analisa os harmônicos da corrente de falta em conjunto com os valores eficazes da mesma. Os testes de campo indicaram valores eficazes da corrente da falta menores do que 1 A e que podem chegar até a 15 A. Foi verificado que, para valores da corrente da falta maiores do que 1 A, o arco se comporta de forma estável com valores eficazes aproximadamente constantes durante longos períodos de tempo. Correntes de falta menores do que 1 A são caracterizadas por curtos períodos de arco estável e por uma extinção e reignição aleatórias. Para correntes de falta maiores do que 10 A, se registraram terceiros harmônicos com amplitude entre 5 % e 15 % do valor de amplitude da fundamental e segundos harmônicos entre 3,7 % e 6,7 % com respeito à mesma referência. Para correntes entre 12 A e 15 A, a fase do terceiro harmônico permaneceu com $115^\circ \pm 15^\circ$ e a fase do segundo harmônico entre $\pm 25^\circ$. Harmônicos de ordem superior a estes foram desconsiderados por não apresentarem características confiáveis à FAI. Cabe ressaltar que os valores de harmônicos anteriores, registrados no ponto da falta, são atenuados pelo SEP e não são os mesmos que os registrados na subestação.

O trabalho de NAM *et al.* (2001) está baseado em testes realizados em uma rede de distribuição real cujo nível de tensão é de 22,9

kV. Estes ensaios contaram com as medições de tensão e corrente de um ramal, cujos condutores energizados foram intencionalmente colocados em contato com o solo. É ilustrada na Figura 10 a corrente em função do tempo que foi obtida em um dos ensaios realizados sobre pedras sólidas, verificando-se os fenômenos de *buildup*, *shoulder* e não linearidade durante cada ciclo. A duração e quantidade da repetição dos fenômenos de *buildup* e *shoulder* dependem do tipo de solo ensaiado, além disso, a corrente sempre atinge um estado estável depois de alguns ciclos (de quinze a quarenta ciclos), segundo o tipo de solo. De um modo geral, as correntes de falta registradas neste artigo foram entre três a quatro vezes maiores do que as apresentadas por EMANUEL *et al.* (1990). Para correntes de 76 A, foi registrado um valor da amplitude da corrente do terceiro harmônico de 11,8 % com respeito à amplitude da fundamental, o que concorda com EMANUEL *et al.* (1990). O segundo harmônico neste caso atingiu uma amplitude de 0,42 % com respeito ao valor de amplitude da fundamental, um valor próximo de zero, pois não se observam valores apreciáveis de V_P e V_N nas curvas tensão-corrente apresentadas. Este estudo também está em concordância com o apresentado por EMANUEL *et al.* (1990).

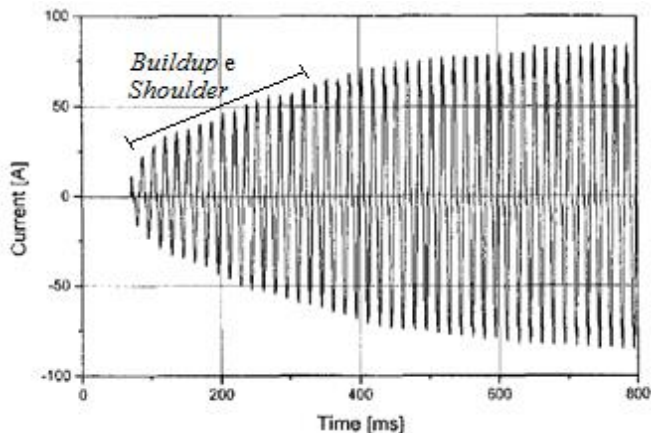


Figura 10 - Corrente em função do tempo de uma FAI típica (NAM *et al.*, 2001).

O trabalho de ELKALASHY (2007) trata as FAIs produzidas quando as árvores se inclinam sobre a linha e entram em contato com um condutor energizado. O sistema de distribuição estudado é do tipo não

aterrado e apresenta um nível de tensão de 20 kV com uma frequência nominal de 50 Hz. Visando obter um modelo adequado de FAI, foram realizados certos ensaios de laboratório, os quais consistiram basicamente em encostar uma árvore sobre um condutor energizado de diferentes maneiras. Em primeira instância foi verificado que o contato do condutor com a árvore (ramos e tronco) resulta em uma curva tensão-corrente tipicamente linear, cuja resistência depende muito da temperatura. Esta aumenta de 201 k Ω à temperatura ambiente até 800 k Ω a -15 °C, aproximadamente. A seguir se mediu a curva tensão-corrente devido ao arco elétrico. A árvore foi aproximada de forma gradual ao condutor energizado, observando que o arco elétrico é iniciado quando uma parte da árvore atinge uma distância pouco menor do que 2 ou 3 cm deste condutor. Após o início do arco, o afastamento da árvore provoca uma extensão do arco de 4 a 7 cm, até chegar à sua extinção. Se a distância entre a árvore e o condutor for constante, a FAI continua de forma permanente. Vários ensaios foram realizados mediante o contato do condutor energizado com as folhas, ramos e tronco da árvore, observando-se em todos os casos que o arco se extingue quando a tensão alternada passa por zero. O tempo em que o arco permanece extinto é mais prolongado no caso de contato com as folhas e de menor duração no caso de contato com tronco. Os resultados obtidos mostraram as características clássicas de uma FAI, que são a não linearidade e a assimetria. Os valores de pico das correntes de falta medidas nos ensaios podem ser considerados relativamente baixas, na ordem dos 100 mA. Observa-se neste trabalho que os valores de pico das correntes residuais na subestação durante a falta, estão compreendidas entre 0,6 a 60 mA. Os picos das tensões residuais na subestação durante a falta são de aproximadamente 400 V. Os valores aparentemente baixos de correntes residuais são devidos ao fato de que o sistema é do tipo não aterrado. Contudo, é provável que essas baixas correntes sejam difíceis de serem detectadas em função da presença do ruído natural em um sistema real, situação que não foi destacada no trabalho de ELKALASHY (2007).

2.2.2 Modelos de faltas de alta impedância

Para o correto estudo de FAI, deve-se aplicar o modelo dependente do grau de detalhamento desejado e do tipo de FAI a ser modelada. A seguir, apresentam-se modelos considerados os mais representativos na literatura atual, pois outras abordagens são basicamente pequenas variações destes mesmos estudos.

2.2.2.1 Diodos Antiparalelos

O modelo de diodos antiparalelos, mostrado na Figura 11 foi apresentado inicialmente por EMANUEL *et al.* (1990) para reproduzir de forma simplificada as características do arco elétrico gerado por uma FAI. O arco é modelado com duas fontes DC de valores V_P e V_N conectadas em forma antiparalela por meio de dois diodos ideais. Durante o semiciclo positivo, a corrente flui pelo ramo **P** enquanto que no semiciclo negativo atravessa o ramo **N**. Segundo a análise apresentada por EMANUEL *et al.* (1990), esta configuração permite controlar a assimetria mediante os valores escolhidos para V_P e V_N . Também indica que a existência do segundo harmônico na corrente de falta se deve à existência de uma diferença entre os potenciais positivo e negativo ($\Delta V = V_N - V_P$) e a influência deste harmônico aumenta com o acréscimo dessa diferença. Por sua vez, o valor de ΔV não afeta o terceiro harmônico de forma significativa. Se a relação X/R do modelo diminui, a influência relativa do terceiro harmônico aumenta enquanto a influência do segundo harmônico não varia significativamente.

Posteriormente, outros trabalhos propuseram certas variações ao modelo de EMANUEL *et al.* (1990). Assim, ZAMANAN *et al.* (2006) utilizam o modelo da Figura 12 (a), que permite controlar melhor a assimetria. Também é possível utilizar dois resistores não lineares sem colocar fontes DC, como mostra a Figura 12 (b), este arquétipo foi utilizado por SHARAF *et al.* (1993). A Figura 12 (c) mostra o modelo usado por SHENG *et al.* (2004), o qual consiste em um resistor não linear, dois diodos e duas fontes DC cujas amplitudes mudam aleatoriamente a cada meio ciclo. Com esta configuração, é possível representar simplificada a dinâmica e a aleatoriedade da FAI sobre diferentes superfícies, como asfalto, areia, grama ou terra.

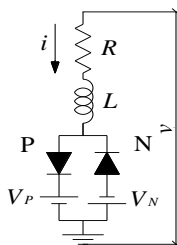


Figura 11 - Modelo de FAI por diodos antiparalelos (EMANUEL *et al.*, 1990).

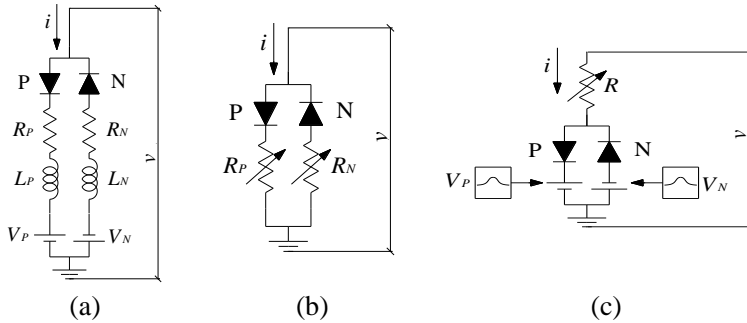


Figura 12 - Modificações de diodos antiparalelos de EMANUEL *et al.* (1990):
 a) Modelo proposto por ZAMANAN *et al.* (2006); b) Modelo utilizado por SHARAF *et al.* (1993); c) Modelo proposto por SHENG *et al.* (2004).

2.2.2.2 Modelo baseado nas Curvas Tensão-Corrente

O modelo descrito por NAM *et al.* (2001) pode ser entendido como uma “caixa preta”, pois baseia-se somente na curva tensão-corrente medida (ou suposta) da FAI. Visando representar as quatro características das FAI (*buildup*, *shoulders*, assimetria e não linearidade), foi proposto o modelo apresentado na Figura 13, que também permite sua implementação no programa ATP®.

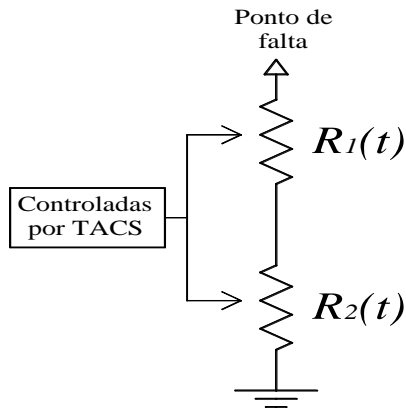


Figura 13 - Modelo de FAI proposto por NAM *et al.* (2001).

O método proposto emprega duas resistências em série controladas por dispositivos do tipo *Transient Analysis of Control Systems* (TACS). A resistência $R_1(t)$ segue a característica não linear e assimétrica da curva tensão-corrente, mantida idêntica em todos os ciclos. A resistência $R_2(t)$ tem por finalidade modelar os fenômenos de *buildup* e *shoulder*, variando seu valor durante o transcurso do tempo.

No trabalho de NAKAGOMI (2006), foi realizado um ensaio de FAI sobre um solo de baixa resistividade a fim de se obter o parâmetro $R_1(t)$. A curva tensão-corrente do ensaio apresenta-se na Figura 14 e está dada em pu. Deste modo, é possível definir a R_{falta} pela relação entre tensão e corrente de pico.

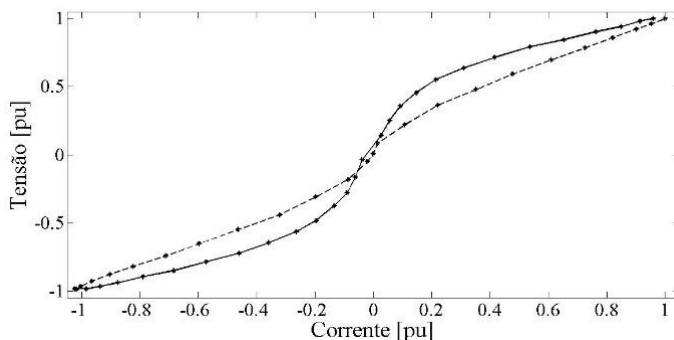


Figura 14 - Característica tensão em função da corrente de uma FAI modelada por NAKAGOMI (2006).

Uma equação para $R_1(t)$ é proposta por URIARTE *et al.* (2003), a qual se baseia simplesmente no ajuste da curva apresentada por NAM *et al.* (2001), conforme:

$$R_1(t) = \frac{1600}{1 + 65t} + 135t \quad (1)$$

A partir da expressão (1), a Figura 15 ilustra um exemplo do comportamento de $R_1(t)$. Para incluir o fenômeno de *shoulder* no comportamento de $R_1(t)$, esta é considerada constante em alguns intervalos de tempo.

Um trabalho que reúne vários parâmetros necessários para simular este tipo de modelo com diferentes tipos de solos compondo a FAI foi publicado por SANTOS *et al.* (2013). Nesse estudo, a resistência

$R_1(t)$ é modelada mediante um ajuste polinomial de curvas, obtendo-se uma única equação para modelar os fenômenos de *buildup* e *shoulder*.

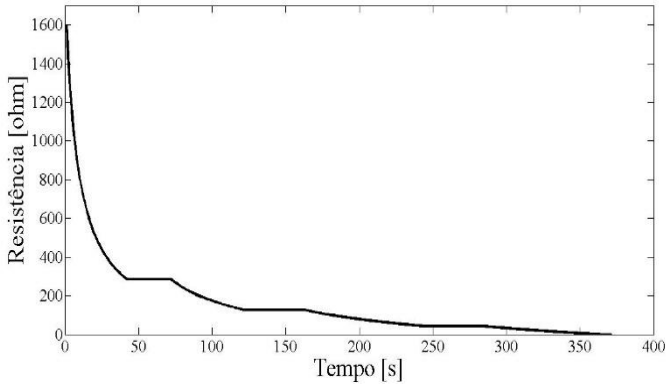


Figura 15 - Parte resistiva da FAI que diminui com o tempo (URIARTE *et al.*, 2003).

2.2.2.3 Arco Elétrico

Os modelos de representação por arco elétrico são baseados em equações diferenciais que representam a relação existente entre a tensão e a corrente do arco elétrico, sem entrar em um detalhamento físico rigoroso dos fenômenos envolvidos. O objeto é formar um acoplamento eficiente e viável para estudos da interação dinâmica do arco com a rede elétrica. A maioria destes modelos deriva dos trabalhos pioneiros apresentados por Cassie em 1932 e Mayr em 1943, conforme ZANETTA *et al.* (2003), inicialmente utilizados no desenvolvimento de disjuntores.

O trabalho de ELAKALASHY (2007) trata as FAIs produzidas quando árvores entram em contato com as linhas aéreas de média tensão. O artigo apresenta uma versão melhorada e modificada da equação dinâmica de arco para se aproximar ainda mais ao comportamento da FAI:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} (G - g) \quad (2)$$

Onde:

- g é a condutância do arco variável com o tempo;

- G é a condutância estacionária do arco, igual a $|i|/V_{arc}$;
- $|i|$ é o valor absoluto da corrente que atravessa o arco;
- V_{arc} é uma constante, chamada tensão de arco;
- τ é a constante de tempo do arco elétrico.

Na equação (2) existem dois parâmetros desconhecidos: V_{arc} e τ . O parâmetro V_{arc} descreve o nível de corte da tensão de arco, que pode ser determinado quando $dg/dt = 0$ sincronizado com o instante em que a corrente é máxima. Este parâmetro é estimado a partir da curva tensão–corrente descoberta no experimento de laboratório descrito no artigo. Uma vez conhecido V_{arc} , é possível obter-se τ mediante a equação (3):

$$\frac{g(k+1) - g(k)}{\Delta t} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{|i|}{V_{arc}} - g(k) \right), k = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Como $g(k)$ é conhecida devido aos dados experimentais, a constante de tempo τ pode ser isolada da equação anterior. Este procedimento resulta em uma série de pontos de τ em função de g , os quais podem ser ajustados com uma equação exponencial da seguinte forma:

$$\tau = Ae^{Bg} \quad (4)$$

Onde A e B são constantes obtidas no ajuste. Como a curva tensão–corrente é assimétrica, haverá valores diferentes de A , B e V_{arc} para os semiciclos positivo e negativo. Como exemplo, no artigo são mostrados os valores $V_{arc} = 2.050$ V, $A = 5,6 \cdot 10^{-7}$ e $B = 395.917$ para uma tensão de linha nominal de 20 kV.

Na Figura 16 é ilustrado um algoritmo para se resolver a equação de arco no ATP® e, deste modo, simular a FAI. A entrada denominada CTR é um sinal binário que vale 0 (zero), quando o arco se extingue, e 1 (um) quando este se reinicia. Este sinal pode ser predefinido pelo usuário ou pode provir de algum bloco lógico que, por exemplo, detecte a passagem da tensão por zero. A entrada denominada RES é um valor de resistência variável que domina quando o CTR é 0 (zero), ao invés da equação de arco. No trabalho de ELKALASHY (2007), esta resistência foi considerada como 0,5 M Ω /ms depois da extinção do arco e durante 1 ms, sendo que depois é mantida em 0,4 M Ω /ms até a religação do arco elétrico.

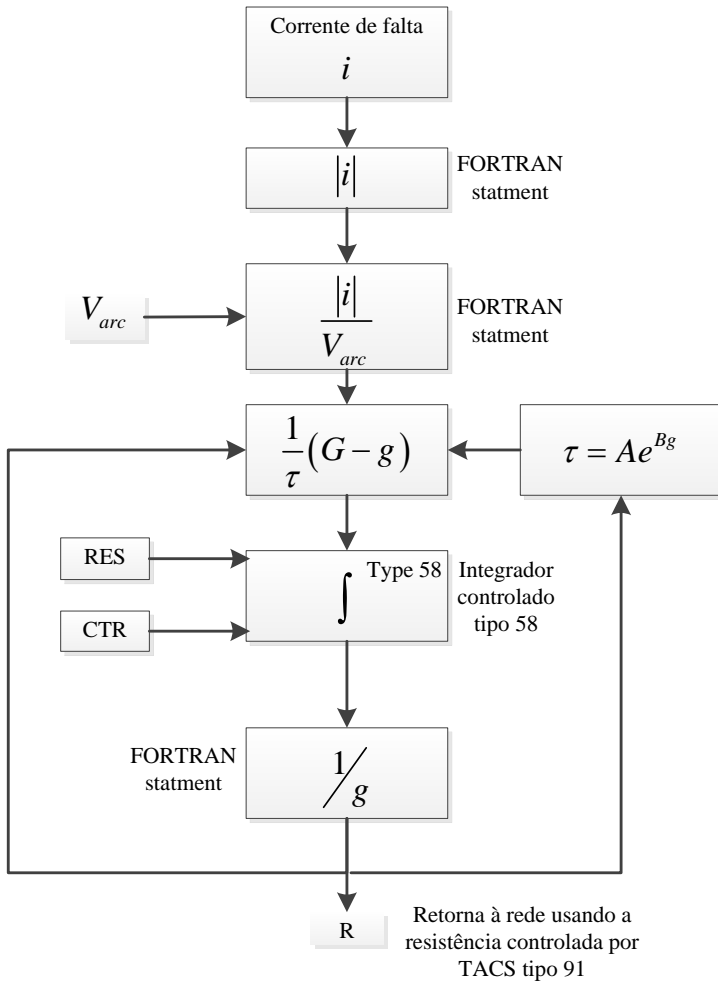


Figura 16 - Fluxograma para a resolução da equação de arco no programa ATP® (ELKALASHY, 2007).

3 DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

3.1 Métodos disponíveis na literatura

Considerando-se as características não lineares das FAI, sua identificação não é uma tarefa trivial e geralmente não pode ser realizada utilizando-se métodos convencionais de detecção de curtos-circuitos. Desta forma, apresenta-se a seguir uma breve revisão dos métodos considerados mais relevantes para a detecção de faltas resistivas (lineares) e de FAI em sistemas elétricos de potência.

3.1.1 Aplicações de Filtros

O método mais simples para a detecção da presença de distúrbios superpostos ao estado normal de um sistema é utilizando arranjos de filtros. Aplicados aos sinais de tensão e/ou corrente, os filtros permitem analisar somente as frequências de interesse do conteúdo espectral dos sinais transitórios, conforme necessidade do estudo.

Sendo assim, o trabalho de PAOLONE *et al.* (2011) propõe uma abordagem baseada em microcontrolador para detecção e localização automática de faltas. A metodologia consiste em criar uma *wavelet* mãe com parte do próprio sinal de tensão que será analisado. Este processo começa com a detecção do transitório produzido pela falta para iniciar a gravação digital dos sinais, a qual consiste em analisar continuamente as tensões das três fases mediante o arranjo apresentado na Figura 17. O sinal de entrada passa por um filtro digital de resposta infinita a impulso de Butterworth resultando no sinal $S_{lpf}(t)$. O sinal $S_{lpf}(t)$ é subtraído do sinal de entrada $S(t)$ e comparado com um limiar preestabelecido, o qual toma o valor de 10% da amplitude nominal de $S(t)$ (0,1 p.u. da tensão nominal de fase do sistema) para este caso. Se o sinal de entrada possui transitórios com componentes de frequência além da frequência de corte do filtro, o valor absoluto de $S(t) - S_{lpf}(t)$ terá valores superiores ao limiar S_l , disparando assim a gravação digital dos sinais de tensão. Ainda, para o caso de estudo particular apresentado em PAOLONE *et al.* (2011), a frequência de corte do filtro foi de 1 kHz. Todo este sistema foi inserido dentro de um microcontrolador e foram usadas frequências de amostragem entre 0,1 MHz e 1 MHz.

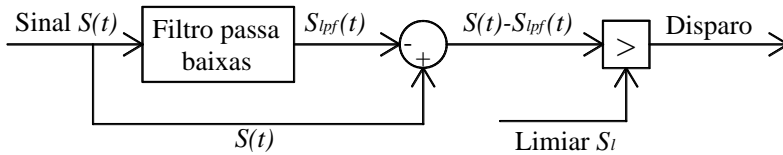


Figura 17 - Arranjo de filtragem (PAOLONE *et al.*, 2011).

Uma vez gravados os sinais das três fases, propõe-se seleccionar a fase faltosa como sendo a que possui a máxima energia definida por:

$$E_h = \sum_{n=0}^N [S_h(n \cdot \Delta t) - S_h(0)]^2, h = a, b, c \quad (5)$$

Onde N é o número de amostras na janela de tempo T_w gravada na ativação do disparo (o valor típico para T_w é de 1 ms), n é um número inteiro, S_h é o sinal gravado da fase h e Δt é o período de amostragem ($1/fs$, onde fs é a frequência de amostragem). Graças a um *buffer*, os sinais na janela T_w iniciam cerca de 10% de tempo antes do disparo relativo ao tamanho da janela (100 μ s neste caso). A equação (5) é válida porque, em pequenos intervalos de tempo, o estado pré-falta de tensão e corrente pode ser considerado como constante. Deste modo, a energia calculada com (5) representa unicamente a energia dos transitórios das ondas viajantes produzidas pela falta.

No trabalho de EMANUEL *et al.* (1990), o método de filtros é utilizado para a detecção de harmônicos nos sinais, o qual visa identificar a presença do segundo e terceiro harmônicos causada pela FAI mediante medições no ponto da falta.

Para determinar a possibilidade de um detector de FAI baseado em componentes harmônicos de baixa frequência, EMANUEL *et al.* (1990) mostram o grau da presença de harmônicos nas correntes medidas na subestação. A partir de medições das correntes de fase e neutro em um alimentador, monitoradas continuamente durante uma semana (168 h ininterruptas), ressaltaram as seguintes considerações:

- O terceiro harmônico se encontra principalmente nas correntes de fase e existe para altas correntes de falta;
- O segundo harmônico foi encontrado na corrente de neutro para arcos eléctricos de baixa corrente.

3.1.2 Aplicações da Transformada *Wavelet* Discreta

A transformada *wavelet* é ideal para detectar e classificar eventos, pois considera as informações tanto de tempo quanto de frequência, podendo ser aplicada a sinais não estacionários. A transformada *wavelet* consiste basicamente em se decompor o sinal em versões dilatadas e trasladadas de uma função padrão chamada de *wavelet* Mãe. A sua versão discreta é a mais utilizada na prática porque pode ser implementada mediante bancos de filtros digitais.

Um dos primeiros autores a utilizar a transformada *wavelet* discreta (TWD) para detectar e localizar faltas em sistemas de energia elétrica foi MAGNAGO *et al.* (1998). Este trabalho baseia-se no fato de que uma falta produz ondas que viajam ao longo da linha, as quais são refletidas no terminal de monitoração e na falta. Conhecendo-se o momento em que estas ondas chegam a um ou dois terminais e conhecendo-se a velocidade de propagação (da topologia da linha), é possível identificar o local da falta mediante simples equações de cinemática. Este trabalho utiliza a TWD para decompor o sinal em alguns detalhes de altas frequências. O instante de chegada das ondas ao(s) ponto(s) de monitoração está relacionado com o aumento repentino no valor dos coeficientes de detalhe da TWD. Além de utilizar a metodologia *wavelet*, o trabalho também mostrou os princípios da metodologia de detecção de faltas por ondas viajantes.

Em KIM *et al.* (2002) é apresentado um método para detectar a presença de FAI em linhas de transmissão com TWD das correntes de fase. O método realiza o somatório dos valores absolutos do primeiro detalhe com a família Daubechies 4 (db 4) e compara este com um limiar. Ainda, para o distúrbio ser classificado como FAI, o limiar deve ser superado durante certo tempo, aumentando deste modo a confiabilidade do método. O algoritmo detalhado é mostrado na Figura 18, onde SUM_d1 é o somatório do valor absoluto do detalhe d1, FC é o limiar que indica a presença de um distúrbio (limite inferior de SUM_d1), FI é um contador que indica o número de amostras em que foi superado o limiar FC e D é outro limiar que indica o número mínimo de amostras em que a condição de distúrbio deve ser sustentada para ser considerada uma FAI.

No trabalho de KIM *et al.* (2002) foi usada uma frequência de amostragem de 3.840 Hz (64 amostras por ciclo em frequência de 60 Hz). Depois de várias simulações numéricas, os autores definiram os seguintes limiares empíricos: $FC = 0,085 A$ e $D = 128$ amostras. Esta metodologia é interessante porque não precisa de altas frequências de amostragem, sendo ainda capaz de discriminar FAI de outros tipos de eventos, tais

como chaveamentos de capacitores e linhas, fornos de arco, etc. O principal problema desta abordagem reside na definição certa dos limiares FC e D , os quais devem ser determinados mediante simulações numéricas e dados empíricos.

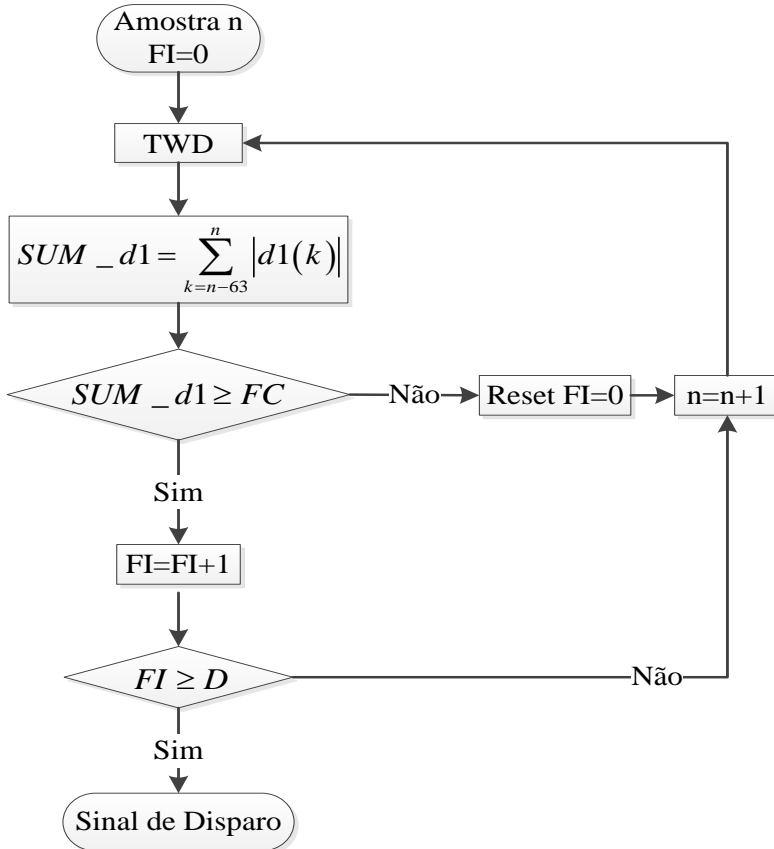


Figura 18 - Fluxograma para detecção de FAI (KIM *et al.*, 2002).

Em ELKALASHY (2007) é apresentado um método para detecção de FAI utilizando a TWD com uma *wavelet* mãe da família Daubechies 14 (db 14). Os sinais são amostrados a uma frequência de 100 kHz e são usados os detalhes d3 e d4 que incluem as faixas de 12,5 – 6.125 e 6,25 – 3.125 kHz respectivamente. Nos detalhes mencionados da TWD apareceram transitórios correspondentes à reignição do arco

elétrico quando a corrente passa por zero, como foi explicado na modelagem de FAI. Segundo os autores, se a aparição destes transitórios nos detalhes d3 e d4 resulta ser de forma periódica, é muito provável que exista uma FAI no sistema. Para melhorar a confiabilidade do método são utilizadas a tensão residual u_r e corrente residual i_r .

Em ELKALASHY (2008) se concretiza o método de ELKALASHY (2007) em conjunto com a localização da FAI.

3.1.3 Aplicações da Transformada de Park

A transformada de Park originou-se com o trabalho realizado por R. H. Park, em que foi desenvolvida uma teoria generalizada para a análise de máquinas elétricas rotativas (PARK, 1929), e que, recentemente vem sendo utilizada em estudos para demais áreas do setor elétrico.

O trabalho de LOPES *et al.* (2011) apresenta um algoritmo para localização de faltas baseado na metodologia de ondas viajantes em linhas de transmissão, considerando-se a ocorrência de uma FAI. Basicamente, o algoritmo envolve a detecção dos transitórios contidos nos sinais de tensão registrados em ambos os terminais de uma linha de transmissão, com sincronização de tempo pelo sistema GPS. A detecção, em cada terminal da linha de transmissão, dos instantes das chegadas das frentes de ondas produzidas pela falta é realizada usando a transformada de Park.

A aplicação da transformada de Park em um sistema de tensões trifásicas (v_a , v_b e v_c) resulta em componentes de tensão zero (v_0), de eixo direto (v_d) e de eixo em quadratura (v_q) segundo:

$$\begin{bmatrix} v_0(t) \\ v_d(t) \\ v_q(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos(\omega_r t) & \cos\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\omega_r t) & \sin\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Conforme mostrado em (6), sendo as tensões de fase senoidais com frequência ω_r e desfasadas em 120° , as tensões v_d e v_q estarão compostas apenas por uma componente DC. Ao existir uma componente de frequência diferente de ω_r em uma das tensões de fase, os espectros

das tensões v_d e v_q terão componentes de frequência além da componente DC. A partir da tensão v_d , esta característica é usada para detectar transitórios que caracterizam as faltas. Desta forma, a detecção do transitório é feita por meio de coeficientes de diferenças (C_{dif}) entre a amostra v_d atual e a amostra v_d do instante imediatamente anterior conforme a equação (7).

$$C_{dif}(n) = \frac{v_d(n) - v_d(n-1)}{\Delta t} \quad (7)$$

O n é o número da amostra e Δt é o período de amostragem. Tais coeficientes terão amplitudes nulas para condições de regime permanente e comportamento oscilatório com amplitudes diferentes de zero durante a ocorrência do distúrbio. O emprego da tensão de eixo direto v_d para detectar o instante do transitório permite monitorar todas as fases do sistema utilizando-se uma única grandeza, sendo uma significativa vantagem em relação a outros métodos de detecção e por isso, a transformada de Park é selecionada para a detecção de FAIs neste trabalho.

Segundo LOPES *et al.* (2011), a flexibilidade e praticidade deste método de detecção é melhorada em grande medida mediante a definição de um limiar adaptativo que considera os desbalanceamentos das tensões de fase. Na presença de desequilíbrios nas tensões de fase, aparece uma componente de segundo harmônico superposta à componente DC tanto nas componentes direta quanto de quadratura e uma componente de primeira harmônica no componente zero (FERRAZ *et al.*, 2012).

3.1.4 Aplicações de Redes Neurais

O método de redes neurais é bastante difundido para solucionar problemas complexos envolvendo não linearidades, o qual se faz muito apropriado para a detecção de falta de alta impedância.

MORETO (2005) propôs um trabalho para detecção e localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica baseado em redes neurais artificiais. Basicamente, após a obtenção dos sinais elétricos de corrente e tensão das oscilografias registradas, o resultado do método proposto é definido por três redes neurais artificiais, sendo que a primeira é responsável para identificar o tipo de falta, a segunda para localização de faltas envolvendo terra e a última para localizar faltas fase – fase. As redes neurais implementadas

são do tipo perceptron de múltiplas camadas totalmente conectadas e alimentadas no sentido camada de entrada – camada de saída (*feedforward multilayer perceptron*).

Seguindo este estudo, em BRETAS *et al.* (2006) são utilizadas duas redes neurais, uma para detectar a presença de uma FAI e outra para localizar esta falta. Para realizar a detecção, foi usada uma rede retroalimentada com uma camada escondida, composta por 12 neurônios de entrada, 15 escondidos e 10 neurônios de saída (arquitetura 12-15-10). Uma saída é ativada para cada tipo de falta e as 10 ficam inativas no caso da não ocorrência de falta. As funções de ativação das camadas escondidas foram logarítmicas sigmóides, enquanto para os neurônios de saída foram usadas uma função linear. O treinamento da rede foi realizado com o método de Levenberg-Marquardt utilizando o toolbox do MatLab®. Como função de efetividade, foi adotado o erro quadrático com valores objetivo de 5×10^{-5} . O método usa como entradas para detecção as componentes fundamentais, segundo, terceiro e quinto harmônico das correntes de sequência, sendo que todas são calculadas a partir de um filtro de Fourier de um ciclo com correção do decaimento exponencial. Para detectar efetivamente a falta, as condições positivas devem ser mantidas durante 10 janelas de tempo de um ciclo.

Em MICHALIK *et al.* (2008) são apresentadas duas redes neurais para realizar a detecção de FAI em diferentes alimentadores de uma rede de distribuição de 22,9 kV. O princípio de decisão das redes é baseado na direção (sinal) da potência aparente e ativa de sequência zero de diferentes harmônicos. As vantagens das redes neurais apresentadas é que são lineares, significando uma carga computacional e tempo ínfimos comparados com redes neurais não lineares. Este procedimento mostrou ser muito eficiente, discriminando corretamente as FAI de outros eventos como comutação de linhas e capacitores. O harmônico que gerou principalmente as decisões de existência de FAI foi o terceiro, o que está de acordo com os dados experimentais de todos os trabalhos relacionados com FAI.

O principal problema do método das redes neurais é que estas devem ser previamente treinadas para serem aplicadas a um sistema particular (problema de escalabilidade), desta forma, qualquer alteração e ou manobra da rede elétrica, recorrente dos sistemas de distribuição, o método se torna ineficaz.

3.2 Métodos disponíveis em equipamentos comerciais

Atualmente, os principais fabricantes de sistemas de proteção concentram o desenvolvimento de algoritmos para detecção e identificação de FAI não mais na análise da intensidade de corrente de falta, mas sim nas características intrínsecas às formas de onda das correntes de falta. A seguir, são citados os algoritmos utilizados por grandes fabricantes de relés digitais de proteção para a detecção e identificação de FAI em sistemas elétricos de potência:

3.2.1 General Electric (GE)

A GE adota os algoritmos desenvolvidos pela Texas A&M University, nos quais a identificação de FAI se concentra na detecção e identificação de arcos elétricos, os quais podemos citar:

- Algoritmo de Energia: a existência de arcos elétricos causa “rajadas” de energia que se espalham por todo o espectro de frequências, sendo estas detectadas em frequências diferentes da fundamental e também nas inter-harmônicas. Quando o algoritmo detecta uma brusca mudança nos valores de energia e esta variação se sustenta por um período de tempo determinado, o Algoritmo de Energia reporta este evento ao Algoritmo Especialista Detector de Arcos e reinicia a monitoração de uma nova variação.
- Algoritmo de Aleatoriedade: compara um meio-ciclo com o ciclo anterior, buscando variações erráticas que indiquem a formação de arco. Quando um evento é identificado, ele é reportado ao Algoritmo Especialista Detector de Arcos.
- Algoritmo Especialista Detector de Arcos: sistema especialista que analisa os eventos gerados pelos algoritmos anteriores e, conferindo um determinado grau de confiança a cada um deles (o que é dependente do número de eventos), decide se há ou não a ocorrência de arcos elétricos.
- Algoritmo de Detecção de Eventos de Carga: este algoritmo examina, fase a fase, uma leitura RMS a cada dois ciclos, de cada corrente de fase e também da corrente de neutro, sinalizando os seguintes eventos: sobrecorrente, brusca queda de carga, taxa de variação na carga, evento trifásico importante e disjuntor aberto. A seguir, o Algoritmo de Análise de Carga examina estes sinais. O algoritmo determina então se o arco gerado é de condutores caídos ou entre condutores intactos, inibindo o Algoritmo Especialista Detector de Arcos no caso de o evento ser de sobrecorrente ou disjuntor aberto.

- Algoritmo de Análise de Carga: sua função é identificar a diferença entre arcos gerados por condutores caídos ou intactos. Esta identificação é efetuada analisando-se a brusca perda de carga ou uma sobrecorrente que inicia o arco. Quando uma queda de condutor é identificada, o algoritmo procura identificar a fase através da análise da variação da corrente de carga ou da existência de sobrecorrente.
- Algoritmo de Extração de Carga: a corrente de carga é subtraída, de tal forma que seja analisada somente a parcela da corrente de neutro referente à falta. Esta informação é transmitida, a seguir, ao Algoritmo de Análise de Padrões de Arcos.
- Algoritmo de Análise de Padrões de Arcos: a corrente de neutro sob falta é correlacionada às tensões de fase. Este dado é utilizado pelo Algoritmo de Análise de Carga se os métodos anteriores não identificarem nenhum tipo de falta.
- Algoritmo de Análise Espectral: o espectro das componentes inter-harmônicas da corrente de neutro é comparado com o espectro 1/f modelo. Uma alta correlação indica que o evento é de um arco elétrico.
- Algoritmo de Identificação de Arcos Suspeitos: a função deste algoritmo é a detecção de arcos esporádicos. Cada evento, individualmente, não gera um alarme, mas seu valor acumulado pode gerar um alarme.

3.2.2 Asea Brown Boveri (ABB)

A ABB adota os algoritmos desenvolvidos pela Lafayette College, nos quais são usadas as três técnicas listadas abaixo:

- Redes Neurais: composta por duas camadas, sendo que o treinamento segue a estratégia de *back-propagation* com uma curva de aprendizagem adaptativa, resultante de testes conduzidos na Lafayette College.
- *Wavelets*: é feita a análise de multirresolução dos registros de corrente e então realizada a tomada de decisão, sem maiores informações do fabricante.
- Métodos Estatísticos de Elevada Ordem: baseados na análise dos espectros de ordem mais elevada, “bispectrum” e “trispectrum”, servindo para reduzir a ocorrência de alarmes falsos.

3.2.3 Schweitzer Engineering Laboratories (SEL)

A SEL procurou soluções para a identificação de FAI que fossem simples o suficiente para ser embarcada em seus relés atuais, sem a necessidade de se desenvolver um hardware dedicado a esta função. Basicamente, o algoritmo separa as componentes inter-harmônicas das harmônicas através de um filtro que compara continuamente o ciclo atual da corrente com o anterior. O sinal restante é devido à FAI ou a ruídos, então o respectivo valor é aplicado a um filtro IIR, que gera um valor médio. Este valor é aplicado a alguns decisores, que definem se houve ou não um evento de geração de arco. O nível de referência dos decisores é obtido de uma função de sintonia adaptativa, que escolhe o patamar de decisão em função do valor médio das inter-harmônicas presentes nos sinais. Esta aprendizagem dá-se de forma contínua, não sendo necessário estabelecer-se um período de aprendizagem. Cada evento registrado incrementa dois contadores, um de alarme e um de falta, com pesos que dependem do desvio em relação à referência e também do intervalo de tempo entre dois eventos.

A grande diferença do algoritmo da SEL em relação ao da GE é que todas as técnicas de inteligência artificial foram substituídas por contadores e comparadores, simplificando significativamente a implementação das funções de proteção.

4 MODELAGEM DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA E DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO TESTE

Para validar a abordagem proposta neste trabalho e implementar modelo de falta de alta impedância e da rede de distribuição teste, foram utilizados modelos numéricos simulados no domínio do tempo mediante o *Alternative Transient Program* (ATP®).

O ATP® é um programa de simulação digital que permite analisar transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, através de um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados. Vale ressaltar que o programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo, por isso são calculados valores em intervalos de tempo discretos.

O ATP® foi desenvolvido no final dos anos 60 pelo Dr. Hermann Dommel e, até hoje, o desenvolvimento do programa continua através do grande número de contribuições de diversas empresas e universidades do mundo inteiro. Todos os programas são gratuitos, sendo apenas necessário ao usuário o cadastramento ao grupo e o comprometimento a não apoiar o comércio e venda dos aplicativos.

A escolha na utilização do ATP® para as implementações dos modelos de FAI e de redes de distribuição testes deste trabalho se faz adequada visto que o programa atende as principais funções necessárias para este projeto, priorizando a análise com grande precisão dos transitórios de sistemas desbalanceados como ocorre, na prática, nos circuitos alimentadores de distribuição e nas faltas associadas ao sistema elétrico.

4.1 Modelagem da falta de alta impedância

O modelo de FAI foi adotado segundo a proposta de EMANUEL *et al.* (1990), cujo trabalho baseou-se na realização de testes de campo e de laboratório. Em tais testes foram medidas, com um oscilógrafo, as tensões e correntes produzidas por FAI controladas, sendo que, a partir destes experimentos, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A corrente de falta não é simétrica, já que o semiciclo positivo é maior do que o semiciclo negativo;

- Uma assimetria é notada na tensão de arco, sendo menor no semiciclo positivo do que no semiciclo negativo; e
- Uma assimetria também sempre que a presença de arco elétrico no solo foi detectada, estas características são mantidas para quaisquer valores de corrente.

Visando reproduzir as características acima citadas, foi idealizado o modelo apresentado na Figura 19. Neste modelo, o arco é modelado com duas fontes DC de valores V_P e V_N conectadas em forma antiparalela por meio de dois diodos ideais. Durante o semiciclo positivo, a corrente flui por V_P enquanto que no semiciclo negativo passa por V_N . Para os propósitos práticos, os valores de V_P e V_N são independentes, tanto da geometria do eletrodo em contato com o solo quanto do seu material (cobre, alumínio ou ferro). Entretanto, a compactação, porosidade e umidade do solo possuem um efeito notável sobre os valores de V_P e V_N . Solos secos e/ou menos densos dão lugar a valores maiores destas grandezas.

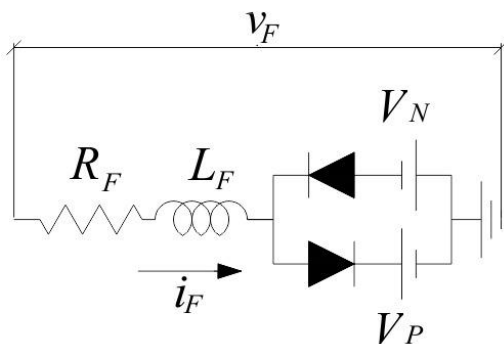


Figura 19 - Modelo de falta de alta impedância implementado.

Os parâmetros do modelo de FAI de EMANUEL *et al.* (1990), apresentados na Figura 19, implementado foram definidos de tal maneira que a corrente de falta produzida não influenciasse nos dispositivos de proteção convencionais por sobrecorrente. Logo, apresenta-se a Tabela 1 com os parâmetros utilizados:

Tabela 1 - Parâmetros do modelo de FAI implementado no ATP®.

R (Ω)	L (H)	V_P (V)	V_N (V)
246,20	0,1152	3800	4400

A Figura 20 ilustra a FAI implementada no programa ATP®, lembrando que o ANEXO B – MODELAGEM DE INDUTOR VIA MODELS apresenta o código do bloco MODELS Norton Type-94 para melhor simulação computacional do modelo de EMANUEL *et al.* (1990).

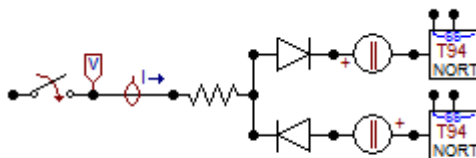


Figura 20 - FAI implementada no ATP.

4.2 Modelagem dos sistemas de distribuição teste

O modelo de FAI apresentado na subsecção anterior foi utilizado no modelo numérico de sistema de distribuição IEEE com 34 nós, implementado também no programa ATP®. A seguir, as características e demais dados deste sistema de distribuição é apresentado em detalhes.

4.2.1 Sistema IEEE 34 barras

A Figura 21 ilustra o circuito alimentador de distribuição, sem geração distribuída, a ser implementado no software ATP® e simulado em todas as condições e tipos de faltas, para posterior aplicação nos métodos de localização de faltas propostos.

O sistema do alimentador simulado é o IEEE 34 barras que corresponde a um modelo de alimentador no estado do Arizona (EUA) com carga total instalada de 2054 kVA, que garante a simulação da rede de distribuição de modo a possuir características desejáveis aos estudos desenvolvidos: características de não-homogeneidade, desbalanceamento significativo e derivações laterais diversas (mono-, bi- e trifásicas).

A tensão nesta rede de distribuição é 24,9 kV, entre fases com conexão estrela aterrado e o comprimento total do tronco principal do alimentador é de 57,771 km (entre a subestação e o nó 840). As características de toda estrutura do alimentador de distribuição de 34 nós

(como configurações e modelagem de condutores, transformadores e cargas) estão apresentadas em detalhes no Anexo A.

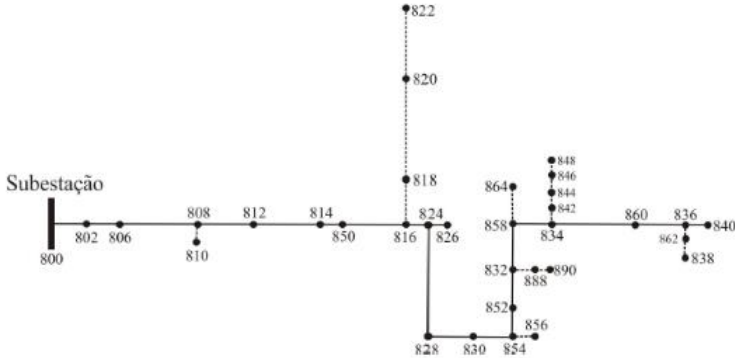


Figura 21 - Arquitetura do alimentador teste IEEE 34 barras simulado (KERSTING, 2001).

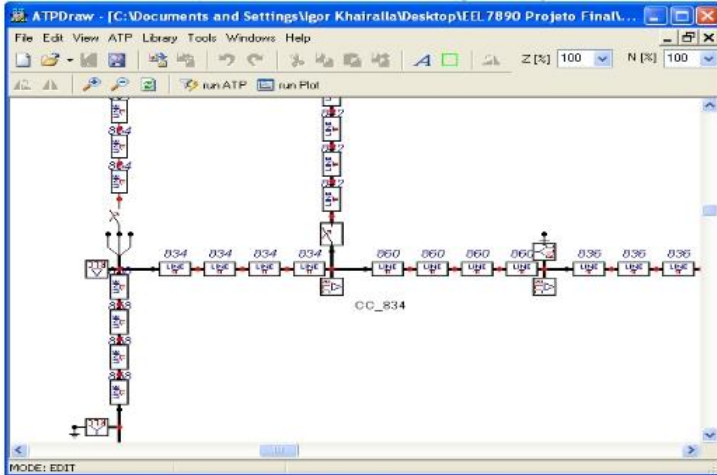


Figura 22 - Parte da arquitetura do alimentador teste IEEE 34 barras no ATP®.

Através do programa ATPDraw®, implementa-se a rede de distribuição de forma visual com os componentes pré-definidos do programa, conforme a Figura 22. Vale ressaltar que as diferentes seções

do alimentador são modeladas através de modelos π a parâmetros concentrados, sendo possível considerar acoplamentos mútuos distintos entre as 3 fases, para a modelagem adequada da não-transposição do alimentador. Os demais elementos de chaveamento servem para simular a atuação do sistema de proteção da rede de distribuição.

4.2.1.1 Simulações realizadas

Para validar o algoritmo desenvolvido neste trabalho, são feitas as seguintes simulações na rede de distribuição teste:

Tabela 2 - Pontos de simulação na rede teste IEEE 34 barras.

#	Situação	Barra
1	Energização de ramal	818
2	Desenergização de ramal	818
3	Falta de baixa impedância	824
4	Falta de baixa impedância	838
5	Falta de alta impedância	802
6	Falta de alta impedância	822
7	Falta de alta impedância	824
8	Falta de alta impedância	838
9	Falta de alta impedância	842
10	Abertura de banco capacitor	830
11	Fechamento de banco capacitor	830
12	Falta de baixa impedância em outro alimentador	-
13	Falta de alta impedância em outro alimentador	-

Para a representação de falta de baixa impedância e de alta impedância em outro alimentador, é realizada a duplicação da rede elétrica em teste e conexão em paralelo, realizado as respectivas faltas na barra de 824 deste outro alimentador. Na Figura 23 são destacadas as barras utilizadas para a realização de simulações.

Vale ressaltar que os dados de saída do ATP® são os sinais de tensão e corrente registrados no equipamento de proteção da subestação.

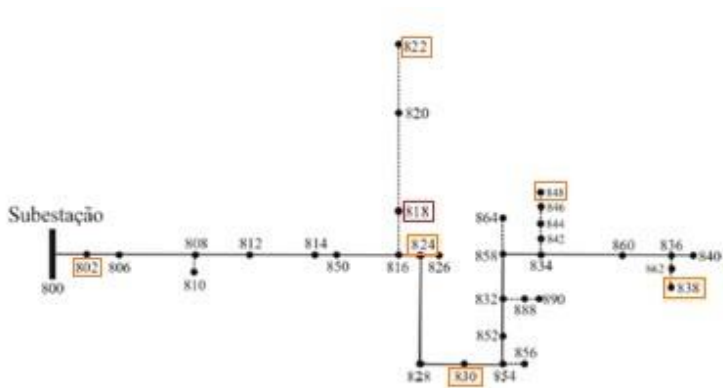


Figura 23 - Destaques para barras com eventos simulados na rede IEEE 34 barras.

5 ALGORITMO DESENVOLVIDO PARA DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Para validar a abordagem proposta neste trabalho e implementar o algoritmo desenvolvido para a detecção de falta de alta impedância foi utilizado o programa *Matrix Laboratory* (MatLab®).

A plataforma MatLab®, ferramenta muito útil para engenheiros e matemáticos, fornece uma linguagem de programação de alto nível, um ambiente interativo de computação técnica e demais funções para desenvolvimento de algoritmos, análise e visualização de dados e computação numérica.

Utilizando o MatLab®, o usuário consegue desenvolver protótipos e avaliar algoritmos de maneira mais rápida em comparação com as linguagens tradicionais de programação, tais como C, C++ e FORTRAN. O programa, através de seus *toolboxes*, abrange várias áreas, incluindo processamento de sinais e imagens, módulos de comunicações, design de controle, testes e medições, modelagem e análise financeira e biologia computacional. Várias bibliotecas e módulos estendem o ambiente do MatLab®, tornando o programa mais ágil e de maior flexibilidade para seu usuário na solução de casos mais específicos.

Após feitas as simulações em ATP® e geradas as formas de onda de tensão e corrente do equipamento de proteção na subestação, o MatLab® é utilizado neste trabalho para a realização das transformadas de Park e *wavelet* destes sinais, esta através da ferramenta *Wavelet ToolboxTM*, e também para implementação do método de detecção de falta de alta impedância desenvolvido.

5.1 Transformada de Park

Também conhecida como transformada DQ, é comumente relacionada às máquinas elétricas rotativas, transformando indutâncias variáveis do estator em indutâncias constantes em um referencial em rotação com velocidade síncrona. Embora a transformada de Park possa ser aplicada a diferentes tipos de sinais, este conceito é aplicado a três sinais de tensão, monitorado na subestação ou em algum outro equipamento de proteção de um sistema de distribuição.

Considerando um instante de tempo t , a transformada DQ pode ser expressa na forma de uma matriz como apresenta as equações (8) e (9).

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \end{bmatrix} = T_p \cdot \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde:

$$T_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi_p(t)) & \cos(\phi_p(t) - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\phi_p(t) + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\phi_p(t)) & -\sin(\phi_p(t) - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\phi_p(t) + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Em que $v_a(t)$, $v_b(t)$, e $v_c(t)$ são os sinais de tensão monitorados nas fases a , b e c , $v_d(t)$ e $v_q(t)$ são as componentes de eixo direto e de quadratura da transformada de Park.

A equação (9) define uma mudança no eixo de referência do sinal trifásico que está girando com uma fase arbitrária dependente do tempo definida como $\phi_p(t)$. Neste estudo, esta fase é considerada uma função linear conforme demonstra a equação abaixo:

$$\phi_p(t) = \omega_p t + \theta_p \quad (10)$$

Onde ω_p é uma velocidade angular constante, em rad/s, e θ_p é o ângulo inicial em relação ao eixo de referência quando $t = 0$ e possui valor aleatório.

Com o intuito de tornar claras as importantes propriedades da transformada DQ, $v_d(t)$ e $v_q(t)$ podem formar um sinal complexo definido conforme:

$$v_{dq}(t) = v_d(t) + jv_q(t) \quad (11)$$

Esta equação pode ser definida na forma polar, conforme abaixo:

$$v_{dq}(t) = m(t)e^{j\varphi(t)}e^{j\phi_p(t)} \quad (12)$$

Onde:

$$m(t) = \sqrt{m_1^2(t) + m_2^2(t)} \quad (13)$$

$$m_1(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(v_a(t) - \frac{1}{2} v_b(t) - \frac{1}{2} v_c(t) \right) \quad (14)$$

$$m_2(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{3}}{2} (v_b(t) - v_c(t)) \quad (15)$$

$$\varphi(t) = \arg(m_1(t) + j m_2(t)) \quad (16)$$

Definindo:

$$M(t) = m(t) e^{j\varphi(t)} \quad (17)$$

Substituindo (17) em (12), obtém-se:

$$v_{dq}(t) = M(t) e^{j\phi_p(t)} \quad (18)$$

Na equação (17), as partes real e imaginária do sinal $M(t)$ são as componentes α e β da transformação $\alpha\beta$, também utilizadas na análise de sinais em sistemas elétricos de potência. A equação (18) descreve que a transformada DQ realiza uma modulação do sinal complexo $M(t)$ com a função $\exp(j\phi_p(t))$, deslocando o seu espectro de frequências para a parte negativa do mesmo de uma quantidade ω_p .

Por conseguinte, quando a equação (18) é aplicada a um sinal trifásico de tensão (tensões de fase v_a , v_b , e v_c), é possível destacar as seguintes características (IURINIC *et al.*, 2015):

- v_d e v_q são constantes se o conjunto trifásico v_a , v_b , e v_c é balanceado, sem harmônicos nem componentes transitórias;
- em caso de presença de desequilíbrio dos sinais de tensão v_a , v_b , e v_c ; surge uma componente de segunda harmônica superposta nos sinais constantes v_d e v_q ;
- se existem harmônicos presentes nos sinais de tensão v_a , v_b , e v_c , os sinais v_d e v_q apresentam o mesmo harmônico deslocado conforme valor ω_p adotado, sendo que o mesmo acontece com o espectro de frequências das componentes transitórias;
- os harmônicos balanceados múltiplos de três são cancelados pela transformada de Park e não têm influência sobre v_d e v_q .

Logo, como a transformada de Park realiza a filtragem eficiente da componente de frequência fundamental no sinal, restando apenas os

valores de harmônicos (com exceção dos múltiplos de 3) e componentes transitórias, este servirá adequadamente para a identificação de FAIs, conforme características elétricas previamente demonstradas.

5.2 Transformada *Wavelet*

Para a análise e discriminação de sinais estacionários, têm sido aplicadas técnicas bem conhecidas, como a transformada de Fourier, a transformada rápida de Fourier e a transformada de Fourier de tempo curto. Basicamente, as transformadas de Fourier representam um sinal através de funções senoidais de diferentes frequências, ou seja, um sinal no domínio do tempo é transformado para o domínio da frequência. Porém, estas técnicas de Fourier não são recomendadas para análise de sinais não estacionários, visto que não são capazes de detalhar as características intrínsecas destes tipos de sinais.

A partir daí, surge a transformada *wavelet*, que é uma ferramenta que permite decompor um sinal em diferentes componentes de frequências, permitindo assim, estudar cada componente separadamente em sua escala correspondente. A palavra *wavelet* significa pequena onda, referindo-se à característica de que esta função é de tamanho finito.

A transformada *wavelet* vem sendo constantemente utilizada em processamento de sinais, principalmente não estacionários. O conceito das *wavelets* originou-se na transformada Haar (1910), sendo formuladas matematicamente apenas na década de 80, surgindo a transformada *wavelet* contínua desenvolvida de Grossman & Morlet (1984) e o modelo matemático para a análise multiresolucional proposto por Mallat (1989). Em 1992, Daubechies contribuiu fortemente na consagração da transformada *wavelet* discreta e na definição da família Daubechies de *wavelets* mães, muito utilizada principalmente em análises de sinais elétricos.

A transformada *wavelet* de um sinal contínuo no domínio do tempo $f(t)$ é definida através da equação (19).

$$WT(f, a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (19)$$

onde a é o parâmetro de escala e b é o parâmetro de deslocamento de tempo, respectivamente, características de dilatação e de translação do sinal. Quando $a > 1$, ocorre a dilatação, da mesma forma que quando $a < 1$, resulta na contração da função *wavelet* mãe. Assim, na medida em que b

varia a , o sinal é analisado em torno de b . Desta forma, um sinal unidimensional $f(t)$ é transformado em um sinal bidimensional $F(a,b)$ permitindo uma análise tempo versus frequência com a resolução aumentada quanto maior forem as frequências.

A função $\Psi(t)$ é a chamada *wavelet* mãe, para a qual há diversas opções a serem escolhidas, porém devem obedecer às características de curta duração, de comportamento oscilatório e de tamanho finito, conforme exigem as seguintes equações (20) e (21):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (20)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (21)$$

5.2.1 Transformada *Wavelet* Discreta

A transformada *wavelet* é útil essencialmente para estudos teóricos, deduções e verificações de suas propriedades, porém, para aplicações práticas a discretização da transformada é mais eficiente e permite a sua implementação computacional.

Na transformada *wavelet* discreta, os parâmetros de dilatação e translação (parâmetros a e b) não variam continuamente, como no caso da transformada contínua, mas sim discretamente. Em análise de sinais, pode-se restringir os valores dos parâmetros a e b a uma grade discreta, fixando-se um passo de dilatação a_0 e um passo de translação b_0 . A equação (22) mostra a forma discreta da transformada em comparação com a forma contínua, primeiramente discretizando apenas os parâmetros de escala e translação (a e b) e depois discretizando também a variável independente (tempo) (DAUBECHIES, 1992).

$$DWT(f, m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \Psi^* \left(\frac{n - kb_0 a_0^m}{a_0^m} \right), \quad (22)$$

onde os parâmetros a e b são funções do parâmetro inteiro m , conforme $a = a_0^m$ e $b = nb_0 a_0^m$, e k é uma variável inteira que se refere a uma dada amostra no sinal de entrada.

Um sinal amostrado na frequência f_s pode ser decomposto em N estágios utilizando a transformada *wavelet* discreta. Os componentes de decomposição são relacionados ao sinal original através da equação (23).

$$\text{Composição do Sinal (DWT)} = S_N + \sum_{i=1}^N D_i \quad (23)$$

Como exemplo, caso $N=3$, a transformada *wavelet* discreta resulta nos seguintes componentes:

- d_1 (coeficiente de detalhe 1) representa frequências de $fs/2$ a $fs/4$;
- d_2 (coeficiente de detalhe 2) representa frequências de $fs/4$ a $fs/8$;
- d_3 (coeficiente de detalhe 3) representa frequências de $fs/8$ a $fs/16$;
- S_3 (coeficiente de aproximação) representa frequências de $fs/16$ a componente contínua.

O coeficiente de aproximação é uma representação de baixa frequência do sinal original e o coeficiente de detalhe é a diferença entre dois coeficientes de aproximação sucessivos. Desta forma, a aproximação tem a mesma tendência geral do sinal original e o detalhe mostra as componentes de alta frequência. As Figura 24 e Figura 25 e Figura 48 ilustram esta característica em questão.

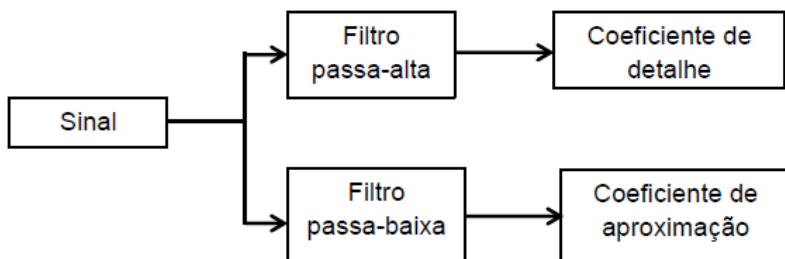


Figura 24 - Decomposição da transformada *wavelet*.

Maiores detalhamentos sobre a decomposição do sinal em diversos níveis e a respectiva reconstrução são tratadas pela metodologia de análise multiresolução, também conhecida como algoritmo de Mallat (MALLAT, 1989), o qual não será descrito neste trabalho.

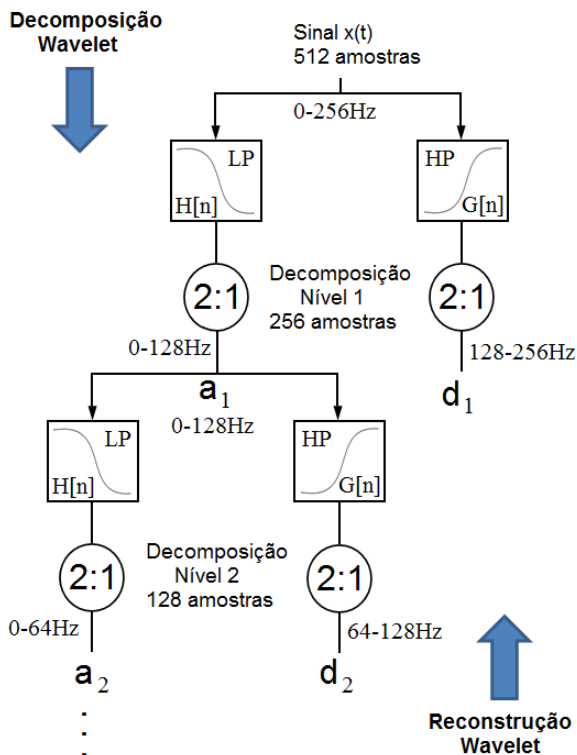


Figura 25 – Exemplo de arquitetura da transformada *wavelet* via análise multiresolução.

5.2.2 Famílias de *Wavelet* Mãe

Há diversas funções bases disponíveis na literatura técnica, identificadas por famílias de *wavelets*. Para cada estudo específico de sinal, deve-se levar em conta alguns critérios (TORRENE e COMPO., 1997), conforme listado abaixo:

- Ortogonal ou não ortogonal: na análise de *wavelet* ortogonal, basicamente o número de convoluções em cada escala é proporcional à largura da função *wavelet* mãe nesta escala, sendo utilizado em processamento de sinais visto que fornece a representação mais compacta do sinal em análise. A função *wavelet* não ortogonal é altamente redundante em escalas maiores, onde o espectro *wavelet*

em tempos adjacentes está altamente correlacionado, sendo utilizada para a análise de sinais temporais onde variações contínuas e suaves são esperadas;

- Real ou complexa: a função *wavelet* real fornece apenas uma componente simples e pode ser utilizada apenas para indicar picos e descontinuidades do sinal em análise. A função *wavelet* complexa fornece informação sobre a amplitude e a fase, sendo mais adequada para capturar comportamentos oscilatórios do sinal em análise;
- Largura: a função *wavelet* estreita terá boa resolução em tempo, porém ruim resolução em frequência, enquanto a larga terá resolução ruim em tempo, mas boa resolução em frequência;
- Formato: a função *wavelet* deve refletir o tipo de características presentes na série temporal em estudo. Para sinais temporais com picos ou descontinuidades, a *wavelet* de Haar é recomendada, enquanto que para séries temporais mais suaves recomenda-se funções *wavelet* suaves, assim como as de Daubechies.

As funções *wavelet* mãe possuem características que habilitam e restringem a utilização conforme o tipo de transformada, desta forma, segue análise feita para algumas famílias *wavelet* (TANNUS, 2015):

Tabela 3 - Possibilidade de uso das famílias *wavelets* (TANNUS, 2015).

Família <i>Wavelet</i>	Transformada <i>Wavelet</i> Contínua	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta
Haar	Possível	Possível
Daubechies	Possível	Possível
Biortogonal	Possível	Possível
Coiflets	Possível	Possível
Symlets	Possível	Possível
Chapéu Mexicano	Possível	-
Morlet	Possível	-
Gaussiana	Possível	-
Shannon	Possível na CWT complexa	-
Morlet Complexa	Possível na CWT complexa	-

A seguir são apresentadas as características de algumas poucas funções base, mas de relevância para a transformada *wavelet* e do objetivo deste trabalho.

5.2.2.1 Haar

A *wavelet* de Haar é a precursora das transformadas *wavelet*, sendo também a mais simples e se assemelha a uma função degrau. Esta é ortogonal e possui suporte compacto, ou seja, a energia da *wavelet* está restrita a um intervalo finito. A função base de Haar é dada pela equação (24)(22) e a onda ilustrada pela Figura 26.

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \leq t < 1/2 \\ -1, & \text{se } 1/2 \leq t < 1 \\ 0, & \text{demais casos} \end{cases} \quad (24)$$

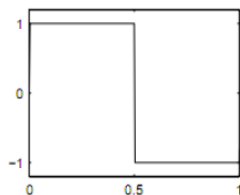


Figura 26 - *Wavelet* de Haar.

5.2.2.2 Chapéu Mexicano

Esta família é a derivada segunda da função gaussiana, com característica não ortogonal e simétrica, que permite examinar os sinais de um modo simétrico e linear na fase. A função base Chapéu Mexicano é dada pela equação (25) e a onda ilustrada pela Figura 27.

$$\text{mexh}(t) = (1 - t^2)e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (25)$$

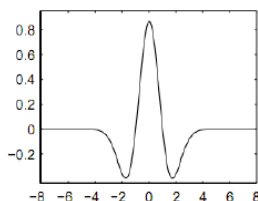


Figura 27 - *Wavelet* chapéu mexicano.

5.2.2.3 Daubechies

De característica ortogonal, a família Daubechies, desenvolvida por Ingrid Daubechies, é amplamente utilizada para análise de sinais provenientes de sistemas elétricos de potência.

Foram criados vários tipos de ondas, cujos respectivos nomes das funções são escritos dbn, em que db refere-se à abreviação do nome da família e n é a ordem. A *wavelet* db1 é a mesma da função de Haar, as demais são ilustradas na Figura 28.

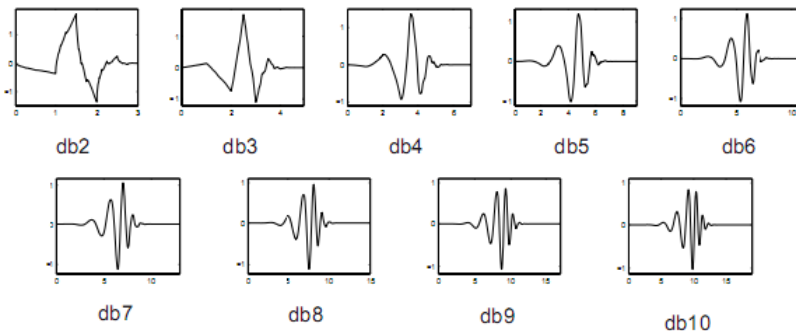


Figura 28 - *Wavelets* da família Daubechies.

5.2.3 Escolha da *wavelet* mãe

Conforme exposto, a transformada *wavelet* consiste em uma transformação linear através de uma função base chamada *wavelet* mãe, a qual possui diversos tipos e modelos, sendo algumas demonstradas também anteriormente.

Conforme PEREIRA (2016), que realizou a comparação de algumas *wavelets* mães da família Daubechies, a *wavelet* mãe db4 apresentou os melhores resultados para análise de transitórios de unidades geradoras registrados em oscilografias. Segundo o estudo de SANTOSO *et al.* (1996), as ondas db4 e db6 são melhores para análises de pequenos e rápidos distúrbios transitórios, enquanto para transitórios lentos, as funções bases db8 e db10 são recomendadas. Em sua aplicação para detecção, localização e possível classificação de distúrbios de qualidade de energia elétrica, foi adotada a db4.

A db4 foi também utilizada no estudo de ZANAMAN *et al.* (2010) de STACHEL *et al.* (2008) para detecção e classificação de

transientes em redes de distribuição, apenas com alterações nos algoritmos e níveis de decomposição propostos.

Na análise de SEDIGHI (2014) para classificação de fenômenos transientes em sistemas de distribuição, obteve-se sucesso na utilização da onda *symmlet_1* como função base para a transformada *wavelet* discreta dos sinais de corrente das três fases.

A escolha da *wavelet* mãe apropriada ao estudo desejado é de extrema importância para obter-se bons resultados, conforme já ressaltado neste capítulo. Com base nas referências utilizadas e no tipo de sinal a ser analisado, é utilizada a função base *db4*, apresentada detalhadamente pela Figura 29.

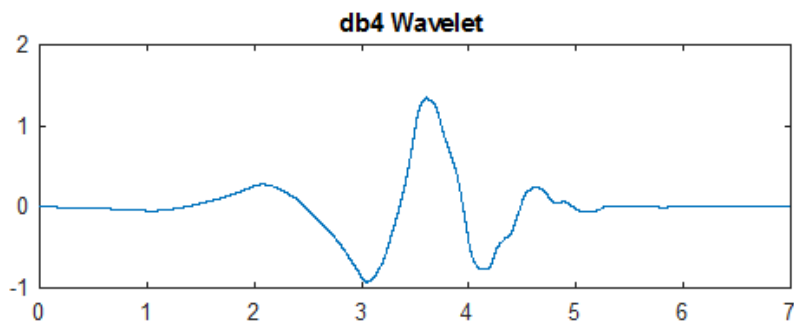


Figura 29 - *Wavelet* mãe *db4*.

Para o caso da *db4*, a transformação tem quatro *wavelets* e coeficientes da função de escala. Os coeficientes da função de escala são:

$$\begin{aligned}
 h_0 &= \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\
 h_1 &= \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\
 h_2 &= \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \\
 h_3 &= \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}
 \end{aligned} \tag{26}$$

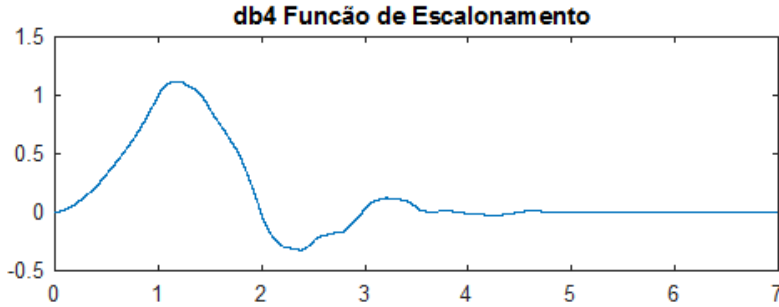


Figura 30 - Função de escalonamento da *wavelet* mãe db4.

A cada passo da transformada de *wavelet* aplica-se a função de escalonamento para a entrada de dados, função esta ilustrada pela Figura 30. Se o conjunto de dados original tiver N valores, a função de escalonamento será aplicada na transformada para calcular $N/2$ valores suavizados.

Os valores dos coeficientes *wavelet* da função são:

$$\begin{aligned} g_0 &= h_3 \\ g_1 &= -h_2 \\ g_2 &= h_1 \\ g_3 &= -h_0 \end{aligned} \quad (27)$$

O escalonamento e funções *wavelet* são calculados tomando o produto interno dos coeficientes e quatro valores de dados. As funções de escada e de tempo da *wavelet* db4 são as seguintes:

$$a_i = h_0 s_{2i} + h_1 s_{2i+1} + h_2 s_{2i+2} + h_3 s_{2i+3} \quad (28)$$

$$b_i = g_0 s_{2i} + g_1 s_{2i+1} + g_2 s_{2i+2} + g_3 s_{2i+3} \quad (29)$$

5.3 Detecção da falta de alta impedância

O algoritmo proposto neste trabalho para detecção de falta de alta impedância está ilustrado na Figura 31. É composto por três blocos:

- Bloco 1 – Filtragem do Sinal: representa a utilização das técnicas de filtragem dos sinais em estudo, através das transformadas de Park e *wavelet*;

- Bloco 2 – Algoritmo adaptativo: representa o coração deste trabalho proposto, o qual é responsável por determinar se há a ocorrência de falta de alta impedância a partir do sinal dt , que é o sinal de saída do Bloco 1 e está composto principalmente por transitórios em destaque;
- Bloco 3 – Definição da seletividade: através da detecção da falta de alta impedância do Bloco 2, parte-se então para identificação se a falta de alta impedância detectada está na zona de proteção do equipamento de proteção em análise.

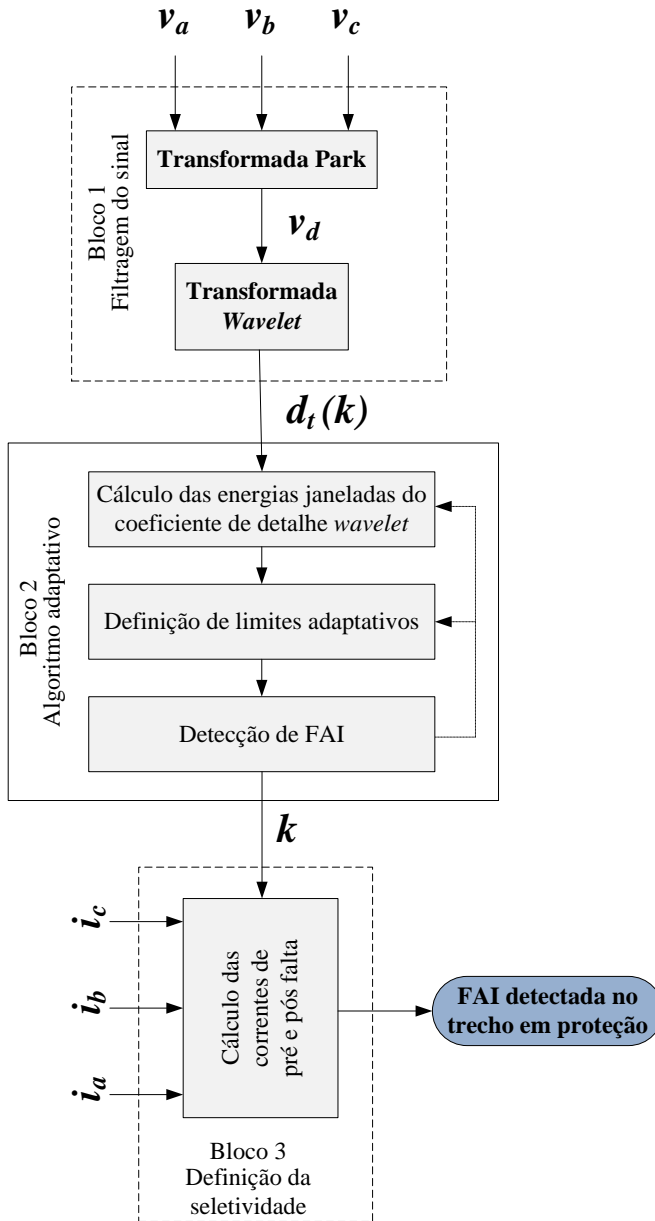


Figura 31 - Algoritmo adaptativo proposto.

5.3.1 Bloco 1 – Filtragem do Sinal

As variáveis de entrada são os sinais de tensão das três fases (v_a , v_b , v_c) obtidos através de simulações de equipamento de proteção do sistema de distribuição, cujos respectivos valores são calculados em sistema por unidade (pu), utilizando como base o valor RMS (*root mean square*) dos dois primeiros ciclos do sinal da fase B. A primeira etapa destaca-se pela utilização da transformada de Park dos sinais de tensão das fases, resultando em novos sinais (v_d - tensão de eixo direto, v_q - tensão de eixo em quadratura), dos quais apenas o sinal v_d será aproveitado, conforme detalhado anteriormente. Logo, como o sinal v_d possui harmônicos indesejados devido ao desbalanceamento do sistema e/ou interferências eletromagnéticas de sinais, é necessário incluir uma etapa de filtragem para deixar apenas os transitórios e o ruído inerente aos sinais monitorados. Utiliza-se então a transformada *wavelet* discreta, que com a utilização da função base db 4, realizará a filtragem do sinal v_d , resultando em dois sinais, o de aproximação a_l e o de detalhe d_l . Apenas o segundo sinal será utilizado prosseguindo com o processo, visto que é o sinal que destacará a presença de transitórios comuns ao SEP.

5.3.2 Bloco 2 – Algoritmo adaptativo

O Bloco 2 representa o coração deste trabalho proposto, o qual é responsável por determinar se há a ocorrência de falta de alta impedância a partir do sinal d_l , que está composto unicamente por ruído e transitórios. Vale ressaltar que se inexistisse ruído no sinal, a detecção seria simples visto que qualquer valor diferente de zero seria um transitório. Entretanto, como nos casos práticos reais o ruído é inevitável, o algoritmo de detecção deve considerar obrigatoriamente esta característica, a qual é geralmente feita pela fixação de algum limiar. O problema que decorre ao se considerar um limiar fixo é que previamente deve ser realizado um estudo visando conhecer os níveis normais de ruído presentes no sistema, porém ainda assim, se este nível de ruído varia por alguma razão, o limiar fixado pode não funcionar como deveria. Portanto, a definição de um limiar confiável é de primordial importância no desenvolvimento de um método de detecção, sendo neste algoritmo definido um limiar que automaticamente se adapta aos níveis de ruído presentes no sinal de detecção. Desta forma, o método proposto pelo algoritmo adaptativo conta com as seguintes situações:

- i. Calcular a energia da janela da amostra do sinal d_l , seguindo COSTA *et al.* (2009) conforme equação (30):

$$\varepsilon(k) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\frac{\Delta k}{2}} d_t^2(n), & \text{se } 1 \leq k \leq \frac{\Delta k}{2} \\ \sum_{n=k-\frac{\Delta k}{2}+1}^k d_t^2(n), & \text{se } \frac{\Delta k}{2} \leq k \leq \frac{k_T}{2} \end{cases}, \quad (30)$$

onde $k = \{1, 2, \dots, k_T/2\}$, k_T é o número total de amostras do sinal original, e Δk é o tamanho da janela, que é definido pela divisão da frequência de amostragem do sinal ($f_s = 15360 \text{ Hz}$) pela frequência fundamental do sinal original ($f = 60 \text{ Hz}$). Isso corresponde a uma janela de um ciclo da frequência fundamental.

- ii. Com base nos valores das energias das janelas das amostras dos dois primeiros ciclos, o algoritmo adaptativo irá calcular os limiares adaptativos para o valor limite da máxima energia em regime normal de operação (SANTOS *et al.*, 2013) e o valor considerado para variação brusca de energia:

$$\varepsilon_{M\acute{a}xima} = (1 + \delta) \cdot \max\{\varepsilon_{anteriores}\}, \quad (31)$$

$$\Delta\varepsilon(k) = \max\{\varepsilon_{anteriores}\} - \min\{\varepsilon_{anteriores}\}, \quad (32)$$

onde $\max(\varepsilon_{anteriores})$ é o máximo valor e $\min(\varepsilon_{anteriores})$ é o mínimo valor do conjunto de energias das janelas das amostras calculadas previamente nos dois primeiros ciclos e δ é a margem de tolerância, a qual é fixada neste trabalho em 10%.

- iii. A cada novo valor de energia da janela da amostra calculada, verifica-se a diferença de energia entre valores consecutivos e o valor limite de variação, conforme a equação (33):

$$\Delta\varepsilon(k) = \varepsilon(k) - \varepsilon(k - 1) \quad (33)$$

- iv. Então, varrem-se as amostras do sinal em estudo e continuamente verifica-se se os valores de energia da janela e da diferença de energias da amostra k ultrapassam os limiares definidos pelo regime normal de operação. Caso

seja verificada esta situação, é definida a amostra k em análise:

- Logo, realiza-se novo cálculo da energia da janela da amostra de um ciclo após a detecção do transitório;
- Tal valor é comparado com energias das janelas das amostras de um ciclo, não deslizantes, após 200 milissegundos da amostra de detecção do transitório;
- Devido às características intrínsecas da falta de alta impedância, se os valores de energia da janela da amostra calculada são superiores de um coeficiente de confiança, definido em 50%, **considera-se que é uma FAI**. Esta metodologia proposta também condiz com as características obtidas por SANTOS *et al.* (2013).

As Figura 32 e Figura 33 podem ilustrar o desenvolvimento e a análise do algoritmo proposto.

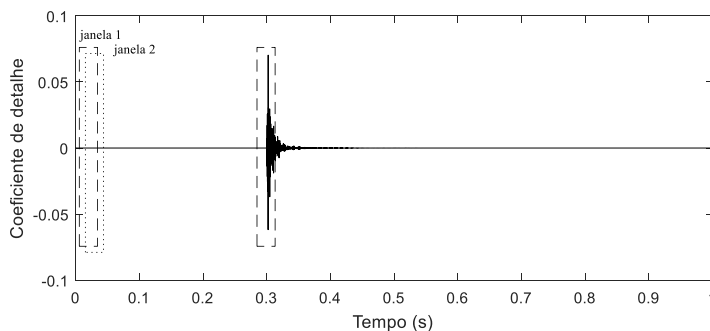


Figura 32 - Obtenção da energia da janela da amostra.

Como a proteção proposta baseia-se em sinais de tensão, resta agora apenas saber se a ocorrência da FAI está na área determinada pela proteção do equipamento (neste caso, a jusante do alimentador).

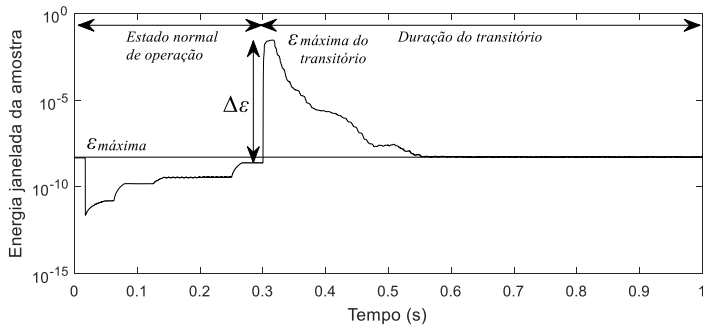


Figura 33 – Análise do algoritmo através da energia da janela da amostra.

5.3.3 Bloco 3: Definição da seletividade

Para atender a característica de seletividade, muito importante na filosofia de proteção, a qual traduz se o equipamento de proteção atuará em sua respectiva área e objetivo de proteção, o algoritmo desenvolvido neste trabalho utilizou-se de cálculos RMS (*root mean square*) das correntes das fases A, B e C, pré falta e pós falta, em janelas de um ciclo.

No caso da detecção de um transitório, através do algoritmo proposto, surge a amostra k , a qual é tomada como o ponto de início do transitório. A partir daí, calculam-se as correntes das fases A, B e C pré-falta de um ciclo anterior e as mesmas correntes pós falta de um ciclo posterior a amostra k .

A comparação entre os valores calculados determina se a falta ocorreu no alimentador em referência. Caso seja verificado aumento das correntes, traduzindo em contribuição para corrente de curto circuito, considera-se que o alimentador está em falta. A Figura 34 ilustra o fluxograma do método adotado e que representa o Bloco 3 – Definição da seletividade:

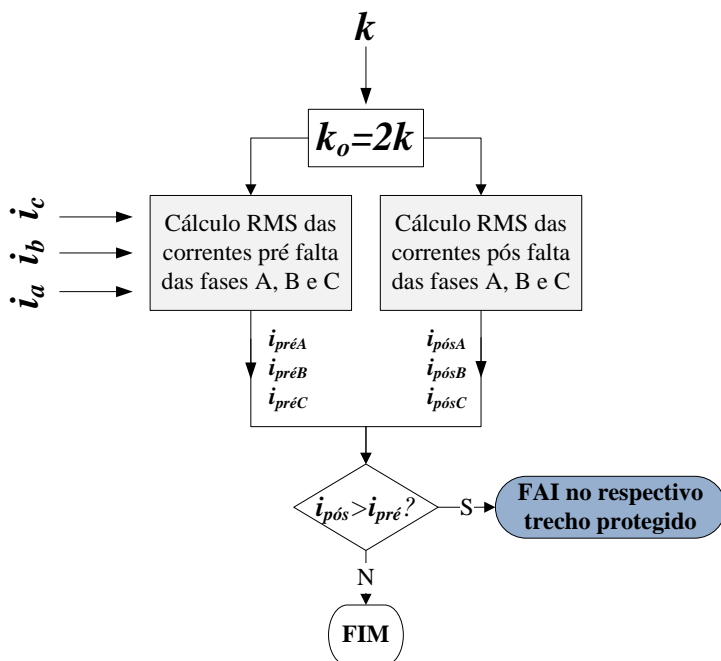


Figura 34 - Método para determinar se há falta no alimentador.

6 RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 35 apresenta o resultado da corrente de falta de alta impedância simulada conforme modelagem de EMANUEL *et al.* (1990) e implementação de MODELS no ATP® vide IURINIC (2016), apresentado no Anexo B.

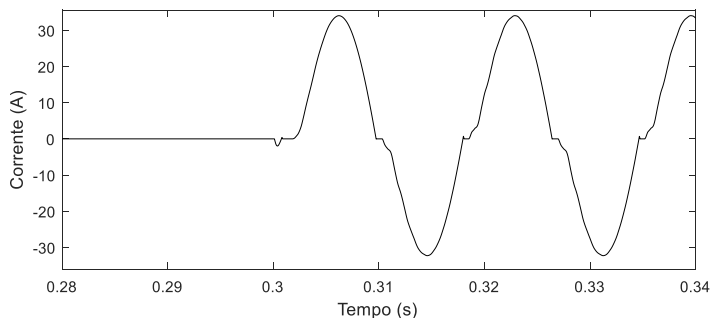


Figura 35 - Corrente de falta da simulação.

Pode-se então verificar que a corrente de falta de alta impedância atende a maioria dos requisitos descritos anteriormente das características de falta de alta impedância.

Para a validação do algoritmo adaptativo proposto, foram simuladas várias situações comuns ao sistema de distribuição, os quais podemos citar:

- Falta de baixa impedância – implementado através de uma resistência de $0,001 \Omega$ à terra;
- Falta de alta impedância – implementado conforme modelo descrito anteriormente;
- Abertura e fechamento de banco de capacitores – implementado através de banco de capacitores de 1,2 Mvar no ATP®;
- Energização e desenergização de ramal – basicamente realizadas através de operação das chaves disponíveis dos ramais, o que gera muitos distúrbios e transitórios devido à energização de grande número e de grandes cargas, contendo correntes de *inrush* de transformadores de distribuição.

Logo, apresentam-se a seguir os resultados da aplicação do algoritmo adaptativo nestas situações destacadas.

6.1 Análise da falta de baixa impedância

Para representar as características e resultados comuns em relação às ocorrências de faltas de baixa impedância, utilizam-se os dados obtidos através da simulação da situação nº 4 – falta de baixa impedância na barra 838. Logo, verificam-se os gráficos da tensão na Figura 36, lembrando que a falta ocorre em 0,3 ms.

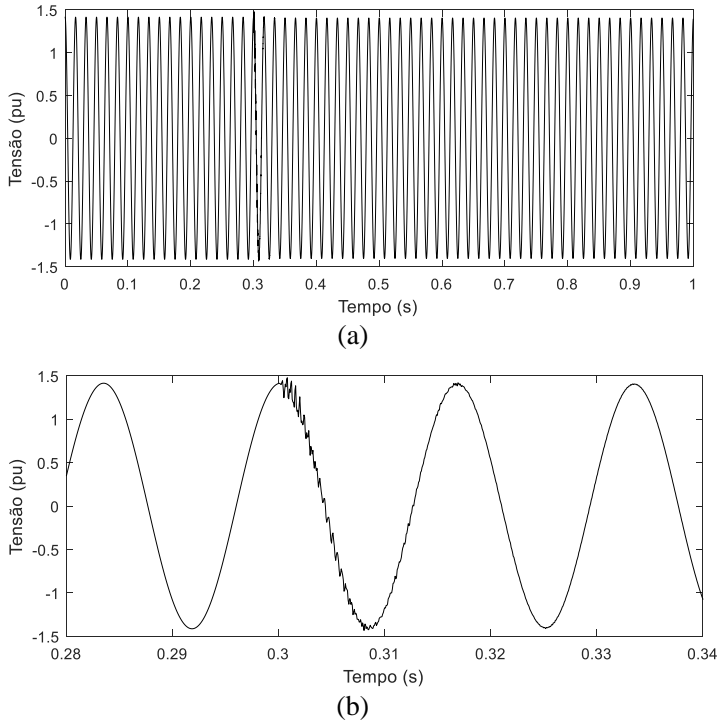


Figura 36 – (a) Tensão registrada na ocorrência de falta de baixa impedância;
(b) Detalhamento do transitório no sinal de tensão.

Aplica-se então a transformada de Park, a qual replica as características de transitórios dos sinais das três fases em apenas um, a tensão de eixo direto, a qual é ilustrada pela Figura 37.

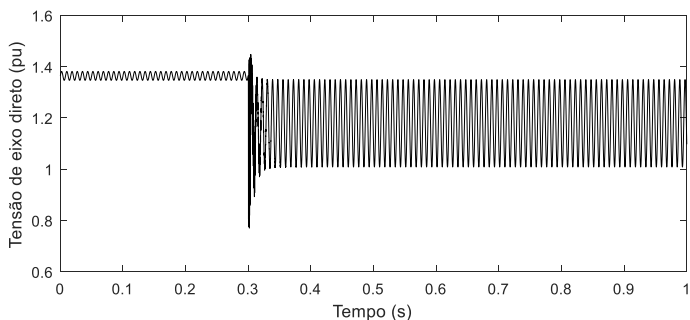


Figura 37 – Tensão de eixo direto em falta de baixa impedância.

Conforme descrito anteriormente, o sinal v_d contém ruídos e transitórios indesejados, necessitando a aplicação de filtragem. Desta forma, foi escolhida a transformada *wavelet* para esta função, através da *wavelet* mãe db4, resultando no seguinte sinal, contendo basicamente transitórios desejados, vide Figura 38.

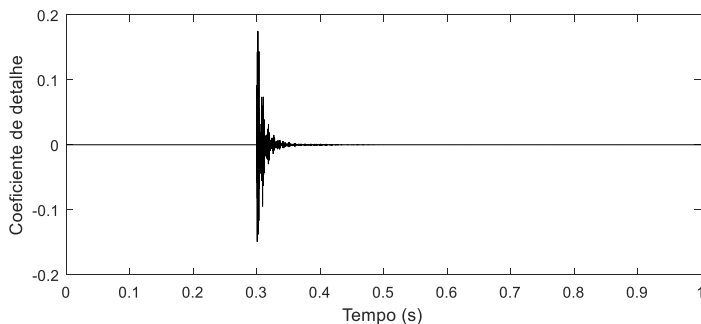


Figura 38 - Coeficiente de detalhe *wavelet* do sinal de tensão em falta de baixa impedância.

A partir deste ponto, o sinal é analisado pelo algoritmo adaptativo, o qual gera apenas um resultado final, se há ou não falta de alta impedância. O algoritmo proposto pode ser verificado e validado pelo gráfico das energias das janelas das amostras demonstrado na Figura 39.

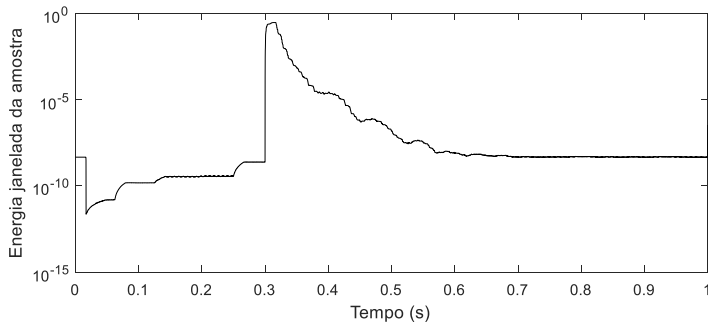
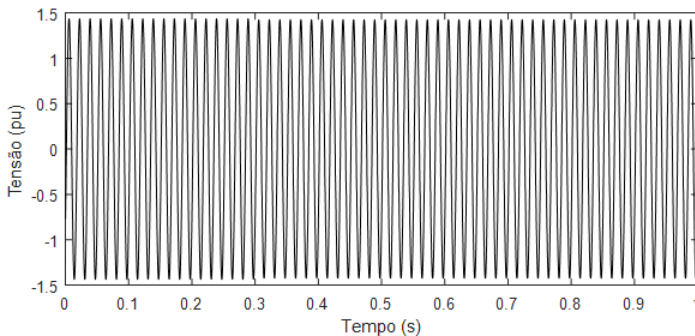


Figura 39 - Energias das janelas das amostras do sinal em falta de baixa impedância.

O resultado do algoritmo de detecção de falta de alta impedância foi negativo, o que pode ser validado pela energia das amostras decaírem após alguns ciclos da ocorrência do transitório, o que não acontece com a falta de alta impedância que é demonstrada a seguir.

6.2 Análise da falta de alta impedância

Para representar as características e resultados comuns em relação às ocorrências de faltas de alta impedância, utilizam-se os dados obtidos através da simulação da situação nº 6 – falta de alta impedância na barra 838. Logo, os gráficos da tensão podem ser vistos na Figura 40, lembrando que a falta ocorre em 0,3 ms.



(a)

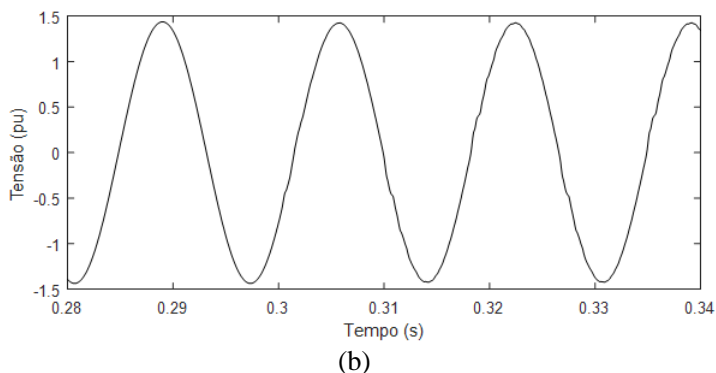


Figura 40 – (a) Tensão registrada na ocorrência de falta de alta impedância; (b) Detalhamento do transitório no sinal de tensão.

Verifica-se que a tensão sofre variações discretas, muito menos perceptíveis em relação à falta de baixa impedância. Novamente, aplica-se a transformada de Park, a qual replica as características de transitórios dos sinais das três fases em apenas um, a tensão de eixo direto, a qual é ilustrada na Figura 41.

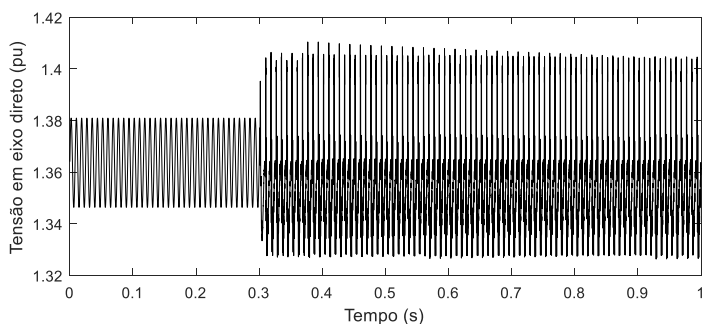


Figura 41 – Tensão de eixo direto em FAI.

Apesar do sinal de tensão aparentemente não apresentar grandes variações, o sinal v_d carrega valores elevados e oscilatórios, provenientes principalmente das características intrínsecas da falta de alta impedância. Ainda assim contém ruídos e transitórios indesejados, os quais são ignorados pela filtragem *wavelet*, vide Figura 42.

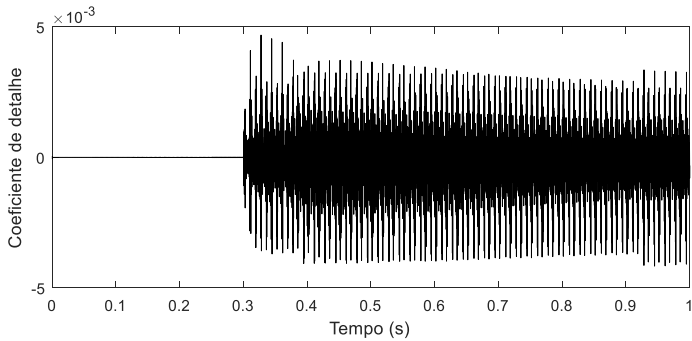


Figura 42 - Coeficiente de detalhe *wavelet* do sinal de tensão em FAI.

Logo, o sinal é analisado pelo algoritmo adaptativo, o qual gera apenas um resultado final, se há ou não falta de alta impedância. O algoritmo proposto pode ser verificado e validado pelo gráfico das energias das janelas das amostras demonstrado na Figura 43.

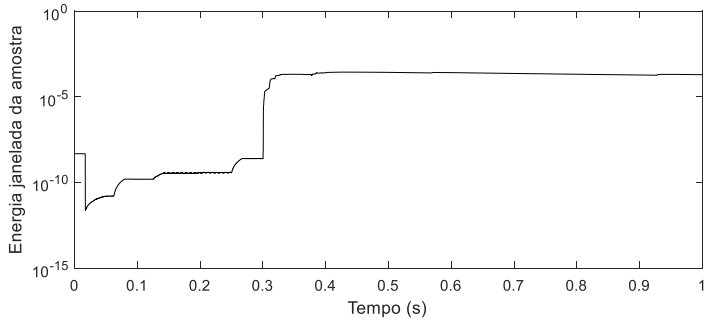


Figura 43 - Energias das janelas das amostras do sinal em FAI.

O resultado do algoritmo de detecção de falta de alta impedância foi **positivo**, ou seja, uma FAI foi detectada na rede elétrica em estudo, o que pode ser validado pela energia das amostras manterem-se constantes após alguns ciclos da ocorrência do transitório, estando de acordo também com estudos de SANTOS *et al.* (2013).

6.3 Análise de chaveamento de banco de capacitores

Para representar as características e resultados comuns em relação ao chaveamento de banco de capacitores, utilizam-se os dados obtidos através da simulação da situação nº 11 – fechamento de banco de capacitores na barra 830.

No fechamento de banco de capacitores, o qual é mais expressivo que a respectiva abertura, não serão detalhados os gráficos de tensão e do sinal v_d , partindo direto para análise do sinal d_t e das energias das janelas das amostras. Ressalta-se que o chaveamento ocorre em 0,3 ms.

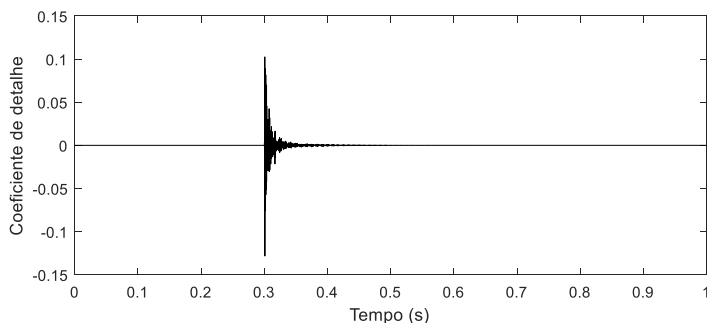


Figura 44 - Coeficiente de detalhe *wavelet* do sinal de tensão em fechamento de banco de capacitores.

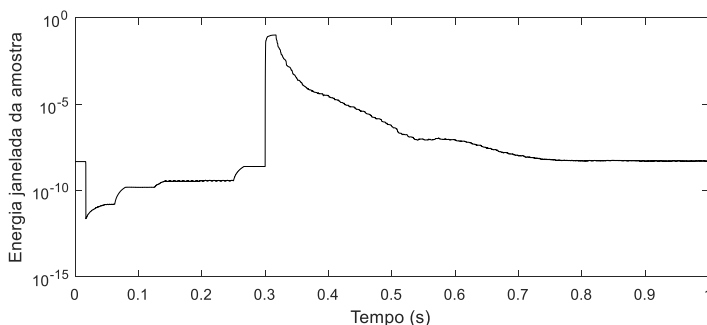


Figura 45 - Energias das janelas das amostras do sinal em fechamento de banco de capacitores.

O resultado do algoritmo de detecção de falta de alta impedância foi negativo, ou seja, uma FAI não foi detectada, o que é correto para esta situação em estudo. Tal resultado é validado pela energia das amostras decaírem após alguns ciclos da ocorrência do transitório.

6.4 Análise em energização de ramal

Para representar as características e resultados comuns em relação às energizações de ramal, utilizam-se os dados obtidos através da simulação da situação nº 1, energização de ramal na barra 818.

Na energização de ramal do alimentador, a qual é mais expressivo que a respectiva desenergização, novamente não serão detalhados os gráficos de tensão e do sinal v_d , partindo direto para análise do sinal d_t e das energias das janelas das amostras das amostras. A energização ocorre em 0,3 ms.

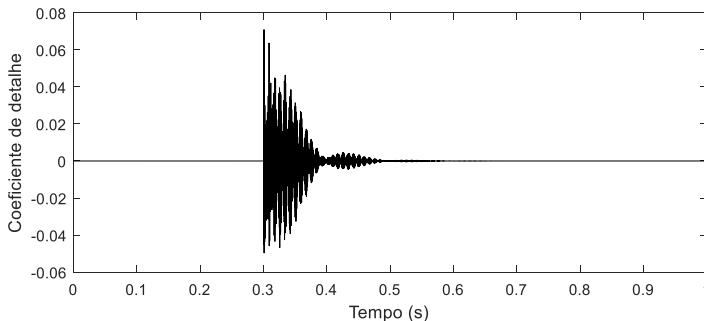


Figura 46 - Coeficiente de detalhe *wavelet* do sinal de tensão em energização de ramal.

O resultado do algoritmo de detecção de falta de alta impedância foi negativo, ou seja, uma FAI não foi detectada, o que é correto para esta situação em estudo. Tal resultado é validado pela energia das amostras decaírem após alguns ciclos da ocorrência do transitório.

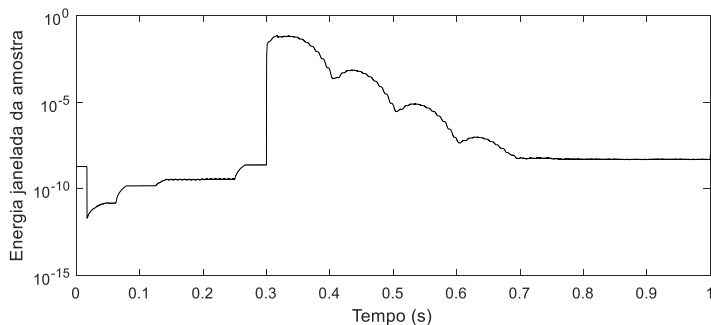


Figura 47 - Energias das janelas das amostras do sinal em energização de ramal de alimentador.

6.5 Resumo dos resultados obtidos

A seguir, apresenta-se a Tabela 4 contendo os resultados do algoritmo adaptativo proposto para a detecção de falta de alta impedância.

Tabela 4 - Resultados das simulações realizados do algoritmo proposto.

#	Situação	Barra	Transitório	FAI
1	Energização de ramal	818	Sim	Não
2	Desenergização de ramal	818	Sim	Não
3	Falta de baixa impedância	824	Sim	Não
4	Falta de baixa impedância	838	Sim	Não
5	Falta de alta impedância	824	Sim	Sim
6	Falta de alta impedância	838	Sim	Sim
7	Falta de alta impedância	822	Sim	Sim
8	Falta de alta impedância	848	Sim	Sim
9	Falta de alta impedância	802	Sim	Sim
10	Abertura de banco capacitor	830	Não	Não
11	Fechamento de banco capacitor	830	Sim	Não
12	Falta de baixa impedância em outro alimentador	-	Sim	Não
13	Falta de alta impedância em outro alimentador	-	Sim	Não

Foram criadas duas colunas para maior detalhamento do resultado do algoritmo:

- a primeira chamada transitório, demonstra se o sinal em análise foi capaz de ultrapassar a energia da janela da amostra máxima e o limite de diferença abrupta de energia, previamente calculados;
- a segunda chamada FAI, demonstra se as energias das janelas das amostras do sinal em análise continuam constantes e dentro de um valor confiável em relação à energia da janela da amostra de primeiro ciclo pós falta, para determinar se se trata de uma falta de alta impedância. Caso positivo, também é realizada a análise de seletividade do alimentador, se a FAI ocorre ou não neste trecho em proteção.

Exceto pela abertura do banco de capacitores, o algoritmo detectou os transitórios dos demais eventos, o qual traz outras oportunidades futuras para a base do algoritmo, as quais serão citadas nas conclusões.

Em relação ao objetivo do trabalho proposto, que é a detecção de falta de alta impedância, o algoritmo detectou corretamente as ocorrências de FAI, e principalmente não teve respostas de falsos positivos. Logo, o algoritmo adaptativo para detecção de falta de alta impedância através da transformada de Park e *wavelet* correspondeu ao objetivo proposto.

7 CONCLUSÃO

O trabalho realizado mostrou uma revisão sobre faltas de alta impedância em sistemas de distribuição, as quais devem ser estudadas continuamente visto a extrema importância em sua identificação e detecção, para manter a segurança dos seres vivos próximos às redes elétricas. A detecção de uma FAI não pode ser realizada com métodos convencionais de sobrecorrente, desta forma, muitos estudos são feitos no aprimoramento da modelagem das FAIs e também na respectiva detecção, visando cada vez mais aprimoramento do assunto.

Em relação a modelagem da FAI, foi utilizada a metodologia de EMANUEL *et al.* (1990), a qual é eficiente e de simples implementação no software ATP® adotado para as simulações dos sinais em estudo. As características apresentadas na corrente de falta em simulação estão de acordo com a maioria das características das referências bibliográficas citadas neste trabalho.

Referente aos métodos apresentados na literatura para detecção de falta de alta impedância, no trabalho proposto utilizou-se de dois: a transformada de Park e a transformada *wavelet*. A transformada de Park, pouco comum em análises de transitórios, pode ser aplicada em um ponto de medição do sistema elétrico para extrair características importantes das três fases (principalmente de harmônicos em transitórios/faltas no SEP) representando em apenas um sinal, neste caso o sinal v_d (tensão no eixo direto). Esta característica simplifica a implementação e processamento de algoritmos computacionais envolvendo sinais elétricos, porém, o sinal resultante ainda necessita de um método de filtragem para destacar apenas as características transitórias do sinal original em análise.

Logo, através das características apresentadas e da grande quantidade de aplicações no setor elétrico, a transformada *wavelet* foi escolhida para realizar a devida filtragem do sinal formado e ainda assim, destacar apenas os transitórios de faltas e oscilações dos sistemas de distribuição em conjunto com a *wavelet* mãe db4. A transformada *wavelet* discreta além de implementada neste algoritmo, pode ser implementada em processamento em tempo real, o qual demonstra ainda mais aplicabilidade ao método escolhido.

Com base no sinal filtrado, o qual em regime normal de operação é zero ou muito próximo, haverá apenas valores relevantes na presença de transitórios, ruídos e/ou variações nos sinais de tensão das fases. Assim, quando da ocorrência de alguma anormalidade, de forma a diferenciar a ocorrência de ruídos, chaveamentos comuns de cargas e/ou aspectos de qualidade de energia elétrica, foi implementado um algoritmo

adaptativo com limiares também adaptativos através de valores na situação normal de operação do sinal em estudo.

Logo, este algoritmo se diferencia pela aplicabilidade em qualquer situação e qualquer característica da rede elétrica, podendo ser aplicado em vários níveis de tensão ou em outros locais de proteção, como em um religador ao longo do próprio alimentador. E através dos resultados obtidos, poderá ser testado na proteção em tempo real de sistemas de distribuição, visto que detectou as FAIs simuladas e não apresentou situações de falso positivo (atuações indevidas).

7.1 Trabalhos futuros

O trabalho desenvolvido nesta dissertação mostra contribuições para a detecção de falta de alta impedância em sistemas de distribuição, cujos estudos trouxeram o uso de limiares adaptativos. De modo a consolidar o estudo e aperfeiçoar a técnica, a seguir são apresentadas as perspectivas e sugestões para a realização de próximos trabalhos:

- Aprimoramento do algoritmo desenvolvido, com base no aperfeiçoamento da metodologia, dos limiares adaptativos e realização de testes com oscilografias/dados reais;
- Ampliar os estudos de caso com simulações de outras modelagens de FAI, para prever o máximo as ocorrências do SEP;
- Realização de testes com outras *wavelet* mães ou com a criação de uma função base para TWD específica;
- Aprimorar o algoritmo adaptativo proposto para a classificação dos eventos transitórios registrados, conforme mostrado na Tabela 4, que não são FAIs, através de valores também adaptativos ou de outras técnicas, como redes neurais;
- Implementação do algoritmo em linguagem capaz de acompanhamento *online* em relé de proteção instalado em campo.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Qualidade da Energia Elétrica: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8, Revisão 8. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016.
- BETTIOL, A. L. *et al.* Aplicação da Transformada de Park na Detecção Adaptativa de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica considerando a Presença de Ruídos. En: XVI ERIAC - ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ. Puerto Iguazú, 17 a 21 de mayo de 2015.
- BRETAS, A. S. *et al.* A Novel High Impedance Fault Location for Distribution Systems Considering Distributed Generation. In: Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. Caracas: IEEE, 2006.
- COSTA, F. B. *et al.* A Wavelet-Based Method for Detection and Classification of Single and Crosscountry Faults in Transmission Lines. In Internacional Conference on Power Systems Transients (IPST'09). Kyoto, Japan. June 3-6, 2009.
- DAUBECHIES, Ingrid. Ten Lectures on Wavelets. Vermont: Capital City Press, 1992.
- DUBÉ, L. Users Guide to Models in ATP. [s.l.]: Laurent Dubé, 1996.
- ELKALASHY, N. I. *et al.* Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, [Piscataway], v.14, n.2, p.375-383, Apr. 2007.
- ELKALASHY, N. I. *et al.* DWT-based detection and transient power direction-based location of high-impedance faults due to leaning trees in unearthed MV networks. IEEE Transactions on Power Delivery, [Piscataway], v.23, n.1, p.94-101, Jan, 2008.
- EMANUEL, A. E. *et al.* 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, [Piscataway], v.5, n.2, p.676-686, Apr, 1990.

FERRAZ, R. *et al.* High Impedance Fault Detection in Distribution Systems: Adaptive Approach Considering Noising Environment. In 23rd International Conference on Electricity Distribution - CIRED. Lyon, 15-18 June 2015.

IURINIC, L. U. Diagnóstico de Falhas em Sistemas de Subtransmissão: Uma Formulação Baseada na Transformada Wavelet Contínua. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Porto Alegre, 2012.

IURINIC, L. U. Localização de falhas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Porto Alegre, 2016.

IURINIC, L. U. *et al.* DQ0 - Transformation Algorithm for Detection of High Impedance Faults in Distribution Systems: A Numerical Study of Voltage Unbalance Effect. En: Congreso Internacional de Distribución Eléctrica, CIDEL 2014. Buenos Aires, Argentina, 2014.

IURINIC, L. U. *et al.* Fault Induced Transients Detection in Power Systems: Adaptive Approach Considering Noising Environment. Paper submitted to the International Conference on Power Systems Transients (IPST2015) in Cavtat, Croatia. June 15-18, 2015.

JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. Ground resistance-revisited. IEEE Transactions on Power Delivery, [Piscataway], v.4, n.2, p.949-956, Apr, 1989.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeder. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus. Proceedings... . Piscataway: IEEE, 2001. p.908-912.

KIM, C. H. *et al.* A novel fault-detection technique of high-impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform. IEEE Transactions on Power Delivery, [Piscataway], v.17, n.4, p.921-929, Oct, 2002.

KIM, C.J. RUSSELL, B. D. Harmonic behavior during arcing faults on power distribution feeders. *Electric Power Systems Research*, [s.l.], v.14, n.3, p.219-225, Jan, 1988.

LOPES, F. V. *et al.* An Adaptive Fault Location Method for smart Distribution and Transmission Grids. *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*. Medellin: [s.n.]. 2011. p. 1-7.

LOPES, F. V.; FERNANDES, D.; NEVES, W. L. A. A traveling-wave detection method based on Park's transformation for fault locators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28, July 2013. p. 1626-1634.

MATHWORKS. Matlab: the language of technical computing. Disponível em: <<http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 30 de abril de 2017.

MAGNAGO F.H; ABUR A. A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals. In: *POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING*, Edmonton. Proceedings... Piscataway: IEEE, 1999. p.426-431.

MALLAT, S. G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Jul. 1989. p 674-693.

MICHALIK, M. *et al.* New ANN-Based Algorithms for Detecting HIFs ind Multigrounded MV Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, 23, Jan. 2008. p. 58-66.

MORETO, M. Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

NAKAGOMI, R. M. Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NAM, S. R. *et al.* A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTF. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2001, Vancouver. Proceedings... Piscataway: IEEE, 2001. p.1175-1180.

PAOLONE, M.; BORGHETTI, A.; NUCCI, C. A. An Automatic System to Locate Phase-to-Ground Faults in Medium Voltage Cabel Networks Based on Wavelets Analysis of High-Frequency Signals. Power Tech. Trondheim: IEEE, 2011.

PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Piscataway, 48, Jul. 1929. 716-727.

PEREIRA, S. Transformada wavelet aplicada a análise automática de oscilografias de curta duração em unidades geradoras. 2016. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

SANTOS, W. C. *et al.* High Impedance Fault Detection and Location Based on Electromagnetic Transient Analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, Vancouver. Proceedings... [s.l.]: IPST, 2013. p.1-6.

SANTOSO, S. POWERS, E.J. GRADY, W.M. HOFMANN, P. Power quality assessment via wavelet transform analysis. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 11, Issue: 2. Apr, 1996.

SEDIGHI, A. Classification of Transient Phenomena in Distribution System using Wavelet Transform. In: Journal of Electrical Engineering, Vol. 65, No. 3, 2014, p. 144-150.

SHARAT, A. M.; SNIDER, L. A.; DEBNATH, K. A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection. In: ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT, 2., 1993, Hong Kong. Proceedings... Piscataway: IEEE, 1993. p.613-620.

SHENG, Y.; ROVNYAK, S. M. Decision Tree-Based Methodology for High Impedance Fault Detection. IEEE Transactions on Power Delivery, [Piscataway], v.19, n.2, p.533-536. Apr, 2004.

SHORT, T. A. Electric Power Distribution Handbook. CRC Press, 2004.

STACHEL, P *et al.* Enhanced Segmentation of Disturbance Record by Adaptive Thresholding. In: Proceedings of the 16th Power Systems Comutation Conference, 14-18 July, 2008.

SULTAN, A. F.; FEDIRCHUK, D. J.; SWIFT, G. W. Detecting Arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry. IEEE Transactions on Power Delivery, [Piscataway], v.9, n.1, p.461-470, Jan, 1994.

TANNUS, D. D. Análise de wavelet na detecção e diagnóstico de oscilações em malhas de controle de processo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Sergipe, 2015. São Cristóvão, 2015. 108 f.

TORRENCE, C e COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1997.

URIARTE, F. M. Modeling, Detection, And Localization of High-Impedance Faults In Low-Voltage Distribution Feeders. 2003. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculty Of The Virginia Tech Polytechnic Institute And State University, Virginia, 2003.

ZAMANAN, N.; SYKULSKI, J. K. . Modelling arcing high impedances faults in relation to the physical processes in the electric arc. In: WORLD SCIENTIFIC AND ENGINEERING ACADEMY AND SOCIETY INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS, 6., 2006, Lisboa. Proceedings... [s.l.]: WEAS, 2006. p.28-33.

ZANETTA, L. C. J. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. São Paulo: USP, 2003.

ANEXO A – ALIMENTADOR TESTE IEEE 34 BARRAS

A Figura 48 ilustra a arquitetura utilizada do alimentador teste para as simulações de faltas através do software ATP®. Neste anexo são descritas as características da rede de distribuição utilizada, baseadas em dados da IEEE em seu sistema característico de 34 barras (KERSTING, 2001).

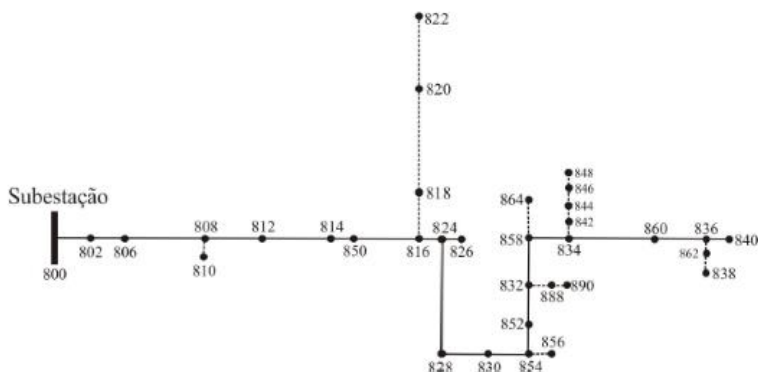


Figura 48 - Imagem da arquitetura do alimentador IEEE 34 barras.

A subestação do sistema de distribuição teste possui um transformador cuja tensão de linha é de 24,9 kV e de modelo Y aterrado. Os comprimentos e as características de impedância de cada secção de linha são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 - Comprimento e características das secções do alimentador IEEE 34 barras.

Nó A	Nó B	Comprimento (km)	Distância da subestação (km)	Configuração (modelo)
800	802	0,786	0,786	300
802	806	0,527	1,314	300
806	808	9,824	11,137	300
808	810	1,769	12,906	303

808	812	11,430	22,567	300
812	814	9,062	31,629	300
814	850	0,003	31,632	301
850	816	0,094	31,727	301
850	816	0,094	31,821	301
816	818	0,521	32,342	302
818	820	14,676	47,018	302
820	822	4,188	51,206	302
816	824	3,112	34,933	301
824	826	0,924	35,857	303
824	828	0,256	35,189	301
828	830	6,230	41,419	301
830	854	0,158	41,578	301
854	856	7,111	48,689	303
854	852	11,226	52,804	301
852	832	0,003	52,807	301
832	888	0,000	52,807	XFM-1
888	890	3,219	56,025	300
832	858	1,494	54,300	301
858	864	0,494	54,794	302
858	834	1,777	56,077	301
834	842	0,085	56,162	301
842	844	0,411	56,574	301
844	846	1,109	57,683	301
846	848	0,162	57,845	301
834	860	0,616	56,693	301
860	836	0,817	57,510	301
836	862	0,085	57,595	301
862	838	1,481	59,076	304
836	840	0,262	57,772	301

Abaixo, seguem as matrizes de impedância e admitância de fases por unidade de comprimento (km):

Configuração (modelo) 300:

$$z_{abc} = \begin{pmatrix} 0,8355 + 0,8339.j & 0,1304 + 0,3589.j & 0,1322 + 0,3114.j \\ 0,1304 + 0,3589.j & 0,8222 + 0,8427.j & 0,1283 + 0,2851.j \\ 0,1322 + 0,3114.j & 0,1283 + 0,2851.j & 0,8257 + 0,8367.j \end{pmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$y_{abc}^d = \begin{pmatrix} 3,3136.j & -0,9511 & -0,6176 \\ -0,9511 & 3,1663.j & -0,3858 \\ -0,6176 & -0,3858 & 3,0360.j \end{pmatrix} \frac{\mu\Omega^{-1}}{km}$$

Configuração (modelo) 301:

$$z_{abc} = \begin{pmatrix} 1,1987 + 0,8821.j & 0,1454 + 0,4026.j & 0,1474 + 0,3556.j \\ 0,1454 + 0,4026.j & 1,1973 + 0,8930.j & 0,1430 + 0,3273.j \\ 0,1474 + 0,3556.j & 0,1430 + 0,3273.j & 1,2011 + 0,9990.j \end{pmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$y_{abc}^d = \begin{pmatrix} 3,2004.j & -0,8977 & -0,5875 \\ -0,8977 & 3,0625.j & -0,3719 \\ -0,5875 & -0,3719 & 2,2970.j \end{pmatrix} \frac{\mu\Omega^{-1}}{km}$$

Configuração (modelo) 302:

$$z_{abc} = \begin{pmatrix} 1,7497 + 0,9284.j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$y_{abc}^{sh} = \begin{pmatrix} 2,6407.j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{\mu\Omega^{-1}}{km}$$

Configuração (modelo) 303:

$$z_{abc} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,7497 + 0,9284.j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$y_{abc}^{sh} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,6407.j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{\mu\Omega^{-1}}{km}$$

Configuração (modelo) 304:

$$z_{abc} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,2010 + 0,8882.j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

$$y_{abc}^{sh} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,7273.j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{\mu\Omega^{-1}}{km}$$

A seguir, são apresentados os dados referentes às cargas concentradas e distribuídas e suas respectivas conexões ao sistema alimentador teste. Exclusivamente para as cargas distribuídas no programa ATP®, estas foram alocadas ao nó final mencionado.

Tabela 6 - Cargas concentradas.

Nó	Carga	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tipo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
860	Y	20	16	20	16	20	16
840	Y	9	7	9	7	9	7
844	Y	135	105	135	105	135	105
848	Δ	20	16	20	16	20	16
890	Δ	150	75	150	75	150	75
830	Δ	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229

Tabela 7 - Cargas distribuídas.

Nó	Nó	Carga	Fase A		Fase B		Fase C	
		Tipo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
802	806	Y	0	0	30	15	25	14
808	810	Y	0	0	16	8	0	0
818	820	Y	34	17	0	0	0	0
820	822	Y	135	70	0	0	0	0
816	824	Δ	0	0	5	2	0	0
824	826	Y	0	0	40	20	0	0
824	828	Y	0	0	0	0	4	2
828	830	Y	7	3	0	0	0	0

854	856	Y	0	0	4	2	0	0
832	858	Δ	7	3	2	1	6	3
858	864	Y	2	1	0	0	0	0
858	834	Δ	4	2	15	8	13	7
834	860	Δ	16	8	20	10	110	55
860	836	Δ	30	15	10	6	42	22
836	840	Δ	18	9	22	11	0	0
862	838	Y	0	0	28	14	0	0
842	844	Y	9	5	0	0	0	0
844	846	Y	0	0	25	12	20	11
846	848	Y	0	0	23	11	0	0
Total			262	133	240	120	220	114

Para a realização dos estudos de impacto de chaveamento de banco de capacitores no sistema de distribuição teste, foi proposta a inclusão de capacitor de capacidade trifásica próxima a 1,2 Mvar (comum ao sistema de distribuição de energia elétrica) em paralelo a barra 830 com configuração de conexão em estrela.

ANEXO B – MODELAGEM DE INDUTOR VIA MODELS

No Quadro 1, segue o código utilizado para a implementação do indutor via bloco MODELS Norton Type-94 (DÚBE, 1996) no programa ATP®, conforme modelo de FAI proposto por EMANUEL *et al.* (1990). Este código se faz necessário para evitar as oscilações numéricas inerentes do método de integração trapezoidal padrão do ATP® (IURINIC, 2016).

Quadro 1 – Algoritmo para indutor conforme o método de segunda ordem de Gear em linguagem MODELS (IURINIC, 2016).

```

DATA n -- number of phases
ng {dflt: n*(n+1)/2} -- number of conductances on each side
INPUT v[1..n] -- voltage(t) at each left node
v0[1..n] -- voltage(t=0) at each left node
i0[1..n] -- current(t=0) into each left node
VAR i[1..n] -- current(t) into each left node (for plotting)
is[1..n] -- Norton source(t+timstep) at each left node
g[1..ng] -- conductance(t+timstep) at each left node
-- sequence is 1-gr, 1-2, 1-3..1-n,2-gr,2-3..2-n,...n-gr
flag -- set to 1 whenever conductance value is modified
OUTPUT i[1..n],is[1..n],g[1..ng],flag
comment-----
| Next, declarations of user-defined data for this particular model |
| - their value is defined at the time of using the type-94 component |
-----endcomment
-- End header.
DATA L1--[H] Indutância
comment-----
| Next, declarations provate to this model |
-----endcomment
VAR st --utilizado para converter de Laplace (s) para o dom. do tempo
L--[H] valor variável da indutância
INIT
st := 3/(2*timestep) --Para converter desde Laplace usando a regra Gear2
L := L1 --Valor inicial da indutância
g := 1/(st*L) --Valor inicial da condutância
ENDINIT
EXEC
IF t=0 THEN
flag := 1 --O valor da condutância mudou
i := i0 --Corrente a través de L quando t=0
is := -((4/3)*i0-(1/3)*0) --Termo histórico para o seguinte passo de tempo
ELSE
flag := 0 --Reset flag
i := g*v-is --Aplicando a regra Gear2, calculada desde v(t)
is := -((4/3)*i-(1/3)*prevval(i)) --Termo histórico para o seguinte passo de tempo
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

