



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

Detecção de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição Primários de Energia Elétrica

Maurício de Campos

*Tese de doutorado apresentada à Coordenadoria do Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários
à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica*

Área de Conhecimento: Processamento de Energia

Orientadores:

Antonio Marcus Nogueira Lima

Alexandre Cunha Oliveira

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Maurício de Campos, Dezembro de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- C198d Campos, Maurício de.
Detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição primários de energia elétrica / Maurício de Campos. – Campina Grande, 2018.
132 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Marcus Nogueira Lima, Prof. Dr. Alexandre Cunha Oliveira".
Referências.
1. Sistemas de Distribuição. 2. Energia Elétrica. 3. Processamento de Energia. 4. Faltas de Alta Impedância - Detecção. I. Lima, Antonio Marcus Nogueira. II. Oliveira, Alexandre Cunha. III. Título.
- CDU 621.3(043)

**"DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
PRIMÁRIOS DE ENERGIA ELÉTRICA"**

MAURÍCIO DE CAMPOS

TESE APROVADA EM 07/12/2017



ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG
Orientador(a)



LUCIANE NEVES CANHA, Dr., UFSM
Examinador(a)



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



CURSINO BRANDÃO JACOBINA, Dr.Ing., UFCG
Examinador(a)



FLÁVIO BEZERRA COSTA, D.Sc., UFRN
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*“We can only see a short distance ahead,
but we can see plenty there that needs to be done”
Alan Turing (1950)*

Agradecimentos

Agradeço a todos que contribuíram de uma forma ou de outra a este trabalho, em especial:

Aos meus pais, Rubens Augusto de Campos (*in memoriam*) e Imgardt Lili de Campos, por terem acima de tudo nos incentivado (Eu e minha irmã) a estudar e a seguir nossas vocações, com certeza são os maiores exemplos de amor, ética, perseverança e muito trabalho.

À minha esposa Marcela Luz Saraiva de Campos, por ter apoiado minha trajetória, abdicando muitas vezes dos seus desejos, e, por ter construído comigo os projetos mais importantes da minha vida.

Aos meus filhos, Julia e Henrique, que são os projetos mais importantes e mais felizes da minha vida, que tornam meus dias mais iluminados mas, acima de tudo, dão suporte para enfrentar as constantes dificuldades que acompanham a vida de um professor e pesquisador.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Marcus Nogueira Lima pelo exemplo de profissional, pelos conhecimentos, pelas conversas e orientações, e principalmente pelas sempre muito oportunas contribuições e ensinamentos.

Ao meu segundo orientador, e não menos importante Prof. Dr. Alexandre Cunha Oliveira, por ser sempre um exemplo de profissional, sua dedicação e conhecimento são inspiradores. Além disso, a incansável parceria em inúmeros projetos paralelos, os quais foram fundamentais para a minha carreira na UNIJUI.

Aos meus colegas de profissão, em especial à prof. Dra. Aíram Tereza Roncy Zago Sausen e o Prof. Dr. Paulo Sérgio Sausen, pelo incentivo, parceria e principalmente os longos anos de amizade e de trabalho conjunto. Neste mesmo sentido ao Prof. Dr. Fabiano Salvadori, que além de tudo, estabeleceu toda a Parceria da UNIJUI com a UFCG.

Aos professores da UFCG em especial ao Prof. Dr. Edson Roberto Cabral da Silva,

Prof. Dr. Maurício Beltrão de Rossiter Correa e ao Prof. Dr. Cursino Brandão Jacobina pela convivência, ensinamentos e principalmente a calorosa recepção a todos alunos que vieram, para concluírem suas trajetórias acadêmicas aqui em Campina Grande.

À Deus pelas nossas maravilhosas vidas.

Índice

Agradecimentos	iii
Índice	v
Índice de Tabelas	viii
Índice de Figuras	ix
Lista de Símbolos	xvi
Resumo	1
Abstract	2
1 Introdução	3
1.1 Motivação	6
1.2 Objetivos	7
1.3 Contribuições do Trabalho	8
1.4 Organização do Trabalho	9
2 Revisão Bibliográfica	11
2.1 Considerações sobre a Revisão Bibliográfica	34
3 Modelagem do Sistema de Distribuição de Energia e Métodos de De- tecção de FAI	36
3.1 Modelo de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	36
3.2 Modelo do Sistema de Distribuição de Ijuí	42
3.2.1 Modelos Matemáticos do Sistema de Distribuição Analisado	44
3.2.2 Cargas	45

3.2.3	Instrumentação do Sistema	46
3.2.4	Modelos Importantes e Parâmetros de Simulação	47
3.3	Estudo de Métodos de Detecção de Falhas de Alta Impedância por Análise de Assinatura de Falta	50
3.3.1	Transformada Wavelet	52
3.3.2	Redes Neurais Artificiais	55
3.3.3	Harmônicos de Baixa Ordem de Sequência Negativa	59
3.3.4	Harmônicos Não Característicos de Sequência Zero	61
3.3.5	Transformada de Fourier Janelada	61
3.4	Considerações Sobre o Capítulo	62
4	Análise Comparativa de Métodos de Detecção de Falhas de Alta Impedância por Assinatura	63
4.1	Primeiro Caso	64
4.2	Segundo Caso	72
4.3	Terceiro Caso	77
4.4	Quarto Caso	83
4.5	Considerações sobre os Resultados	86
5	Método Ativo de Detecção de Falta de Alta Impedância	89
5.1	Método Ativo de Detecção de Falta de Alta Impedância proposto por Zamora	89
5.1.1	Resultados	93
5.2	Proposta de Alteração com Vistas ao Aumento do Desempenho do Método de Detecção de Falta de Alta Impedância Ativo proposto por Zamora	102
5.2.1	Resultados	105
5.3	Considerações sobre os Resultados	110
6	Nova Metodologia para Detecção de Falhas de Alta Impedância Baseado na Combinação de Métodos Passivos	111
6.1	Combinação da Técnica de Harmônicos de Baixa Ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelets	112

6.2	Utilização de RNA para Determinação da Condição de Falta em Conjunto com a Combinação da Técnica de Harmônicos de Baixa Ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelets	119
6.3	Considerações sobre os Resultados	122
7	Conclusões	124
	Referências Bibliográficas	127

Índice de Tabelas

1.1	Corrente de faltas típicas em diversas superfícies (12,5kV)	6
2.1	Resultados dos testes experimentais do circuito apresentado na Figura 2.8) .	24
2.2	Resultados dos testes experimentais do circuito apresentado na Figura 2.8 quando utilizada a Técnica Convencional (abc - dq))	24
3.1	Dados comparativos do Sistema Real versus Simulado.	41
3.2	Níveis de tensão das etapas do SEP.	42
3.3	Valores de carga do alimentador 204.	45
3.4	Requisitos de oscilografia	46
5.1	Frequências recomendadas para superposição do sinal segundo Zamora . . .	93
5.2	Eventos pré-definidos para simular as faltas.	108

Índice de Figuras

2.1	Arquitetura do sistema proposto por Russel e Chinchali em 1989. Fonte: Adaptado de (RUSSELL e CHINCHALI, 1989)	14
2.2	Dados do Pré Processamento. Fonte: Adaptado de (EBRON et al., 1990) . .	15
2.3	Diagrama on-line do Alimentador Testado. Fonte: Adaptado de (ATWELL et al., 1990)	17
2.4	Diagrama do Estágio de Falta Testado. Fonte: Adaptado de (ATWELL et al., 1990)	17
2.5	Circuito de distribuição estudado por Chaari. Fonte: Adaptado de (CHAARI et al., 1996)	19
2.6	Diagrama unifilar do projeto testado na subestação utilizando relés de sequência negativa. Fonte:(HANNAH, 1998)	20
2.7	Diagrama esquemático do circuito simulado por Karimi. Fonte: Adaptado de (KARIMI et al., 2000)	22
2.8	Diagrama unifilar do esquema implementado em Mokhtari et al. Fonte: Adaptado de (MOKHTARI et al., 2002)	23
2.9	Configuração do sistema localizador de falta proposto em Lin et al. Fonte: Adaptado de (LIN et al., 2002)	26
2.10	Diagrama unifilar do esquema implementado em Mokhtari et al. Fonte: Adaptado de (SHENG e ROVNYAK, 2002)	27
2.11	Sistema baseado no conceito de potência diferencial. Fonte: Adaptado de (DARWISH et al., 2005)	27
2.12	Modelo adotado por Santos et. al. para desenvolvimento do banco de dados de faltas. Fonte: Adaptado de (SANTOS et al., 2010)	29

3.1	Componentes principais do sistema elétrico de potência característico. Fonte: Do Autor	37
3.2	Modelo Simplificado de um Sistema de Distribuição. Fonte: Adaptado de (ZAMORA et al., 2007)	38
3.3	Modelo de um sistema de distribuição apresentado por Zamora. Fonte: (ZAMORA et al., 2007)	39
3.4	Sistema apresentado por (ZAMORA et al., 2007) simulado no MATLAB. Fonte: Do Autor	40
3.5	Tensões em Regime do sistema simulado apresentado na Figura 3.4 Fonte: Do Autor	41
3.6	Sistema de Distribuição do Município de Ijuí.	43
3.7	Sistema equivalente ao diagrama apresentado pelo DEMA do alimentador 204.	44
3.8	Diagrama de etapas para a simulação de um SEP	47
3.9	Modelos de falta de alta impedância.	49
3.10	Diagrama genérico das técnicas de Detecção de faltas de alta impedância	51
3.11	Diagrama de Blocos da Transformada de Wavelet.	53
3.12	Transformada wavelet Daubechies.	54
3.13	Níveis Transformada de Wavelet (Daubechies).	54
3.14	Exemplo de uma rede neural de três camadas, cada círculo representa um neurônio.	56
3.15	Diagrama de Blocos da Rede Neural utilizada	56
3.16	Convergência do erro (Backpropagation)	57
3.17	Diagrama de blocos do treinamento da Rede Neural utilizando Backpropagation	58
3.18	Diagrama de Blocos da técnica baseada na análise da terceira harmônica da sequência negativa	60
3.19	Diagrama de Blocos da técnica baseada na análise dos Harmônicos de Segunda ordem de Sequência Zero	62
4.1	Circuito simulado no SIMULINK/MATLAB representando o caso 1.	65
4.2	Tensões RMS trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 1.	66
4.3	Valores instantâneos de tensão com detalhes da primeira Falta de alta impedância aplicada no caso 1.	66

4.4	Detalhe da primeira Falta de alta impedância aplicada no caso 1.	67
4.5	Detalhe das correntes trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 1.	67
4.6	Valores instantâneos de corrente com detalhes da primeira Falta de alta impedância aplicada no caso 1.	68
4.7	Detalhe do efeito da primeira FAI nas correntes do sistema para o circuito simulado no caso 1.	68
4.8	Resultado da transformada wavelet para o circuito simulado no caso 1.	69
4.9	Resultado da aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) no circuito simulado no caso 1.	69
4.10	Harmônicos não característicos de Sequência Zero – Neste caso segunda harmônica de sequência zero para o caso 1.	70
4.11	Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa - Neste caso Terceira harmônica de sequência negativa para o caso 1.	71
4.12	Transformada de Fourier Janelada utilizando uma janela de Hamming para o caso 1.	71
4.13	Circuito simulado no SIMULINK/MATLAB representando o caso 2.	73
4.14	Detalhe das tensões trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 2.	74
4.15	Correntes trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 2.	74
4.16	Resultado da transformada wavelet para o circuito simulado no caso 2.	75
4.17	Resultado da aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) no circuito simulado no caso 2.	75
4.18	Harmônicos não característicos de Sequência Zero – Neste caso segunda harmônica de sequência zero para o caso 2.	76
4.19	Harmônicos de baixa ordem de sequência negativa - Neste caso Terceira harmônica de sequência negativa para o caso 2.	76
4.20	Transformada de Fourier Janelada utilizando uma janela de Hamming para o caso 2.	77
4.21	Circuito simulado no SIMULINK/MATLAB representando o caso 3.	78
4.22	Detalhes das tensões trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 3.	79
4.23	Detalhes das correntes trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 3.	80
4.24	Resultado da transformada wavelet para o circuito simulado no caso 3.	80

4.25	Resultado da aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) no circuito simulado no caso 3.	81
4.26	Harmônicos não característicos de Sequência Zero – Neste caso segunda harmônica de sequência zero para o caso 3.	81
4.27	Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa - Neste caso Terceira harmônica de sequência negativa para o caso 3.	82
4.28	Transformada de Fourier Janelada utilizando uma janela de Hamming para o caso 3.	82
4.29	Circuito simulado no SIMULINK/MATLAB representando o caso 4.	84
4.30	Detalhes das tensões trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 4.	85
4.31	Detalhes das correntes trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 4.	85
4.32	Resultado da transformada wavelet para o circuito simulado no caso 4.	86
4.33	Resultado da aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) no circuito simulado no caso 4.	86
4.34	Harmônicos não característicos de Sequência Zero – Neste caso segunda harmônica de sequência zero para o caso 4.	87
4.35	Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa - Neste caso Terceira harmônica de sequência negativa para o caso 4.	87
5.1	Tensão sobreposta ao sistema. Fonte:(ZAMORA et al., 2007)	90
5.2	Sistema genérico com falta de alta impedância. Fonte:(ZAMORA et al., 2007)	90
5.3	Sinal de excitação sobreposto aos níveis de tensão da linha para processo de identificação da falta.	94
5.4	Forma de onda medida na subestação com o sinal sobreposto no momento do cálculo de resistência de falta.	94
5.5	Sinais de corrente para os quatro cenários simulados no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu.	95
5.6	Sinal de saída do cálculo de resistência de falta para o primeiro cenário simulado no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu.	96
5.7	Sinal de saída do cálculo de resistência de falta para os quatro cenários simulados no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu.	96

5.8	Sinal de saída do cálculo de resistência de falta, filtrado, para os quatro cenários criados no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu. . . .	97
5.9	Sinal de saída do cálculo de resistência de falta, filtrado e aproximado, para os quatro cenários criados no modelo elétrico do sistema distribuição europeu.	97
5.10	Sinal de saída do cálculo de resistência de falta para os quatro cenários criados no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu.	98
5.11	Sinais de corrente para os quatro cenários criados no modelo do sistema elétrico de distribuição brasileiro.	99
5.12	Sinal de saída do cálculo de resistência de falta para os quatro cenários simulados no modelo do sistema elétrico de distribuição brasileiro.	100
5.13	Sinal de saída do cálculo de resistência de falta, filtrado, para os quatro cenários simulados no modelo do sistema elétrico de distribuição brasileiro. .	101
5.14	Injeção de sinal de tensão no sistema.	103
5.15	Diagrama de blocos do modelo ARMAX.	105
5.16	Sistema equivalente ao diagrama apresentado pelo DEME1 do alimentador 204.	106
5.17	Sistema Equivalente do Alimentador 204 do DEME1.	107
5.18	Sinais de corrente para o sistema de distribuição simplificado simulado. . . .	107
5.19	Sinais dos parâmetros de impedância para o sistema de distribuição simplificado simulado.	108
5.20	Sinais dos parâmetros de impedância para o sistema de distribuição simplificado simulado.	109
5.21	Quadro comparativos dos resultados da aplicação dos métodos ativos	110
6.1	Diagrama de Blocos da técnica baseada na combinação da técnica de análise de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a transformada de Wavelets utilizando uma Rede neural para compor e determinar o resultado final.	113
6.2	Combinação da técnica de observação de Harmônicos de baixa ordem de Sequência negativa com a Transformada de Wavelet para o caso 1	113
6.3	Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 1, considerando o Nível 1 (db3).	114

6.4	Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 1, considerando o Nível 8 (db3).	114
6.5	Combinação da técnica de observação de Harmônicos de baixa ordem de Sequência negativa com a Transformada Wavelet para o caso 2.	115
6.6	Combinação da técnica de observação de Harmônicos de baixa ordem de Sequência negativa com a Transformada Wavelet para o caso 2.	115
6.7	Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 2, considerando o Nível 8 (db3).	116
6.8	Combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 3.	116
6.9	Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 3, considerando o Nível 1 (db3).	117
6.10	Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 3, considerando o Nível 8 (db3).	117
6.11	Combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 4.	118
6.12	Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 4, considerando o Nível 1 (db3).	119
6.13	Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 4, considerando o Nível 8 (db3).	119
6.14	Resultado baseado na combinação da técnica de análise de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a transformada de Wavelets utilizando uma Rede neural para compor e determinar o resultado final treinada em níveis 0 e 1, para o caso 1.	121

6.15	Resultado baseado na combinação da técnica de análise de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a transformada de Wavelets utilizando uma Rede Neural para compor e determinar o resultado final treinada em níveis 1 e 10; para o caso 1.	121
6.16	Resultado técnica baseada na combinação da técnica de análise de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a transformada de Wavelets utilizando uma Rede Neural para compor e determinar o resultado final treinada no caso 1 e aplicada caso 4.	122
6.17	Quadro comparativo dos resultados das técnicas passivas isoladas e da nova metodologia proposta, para todos os casos.	123

Lista de Símbolos

<i>A</i>	Ampere
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>DEC</i>	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
<i>DFT</i>	Discrete Fourier Transform
<i>DIC</i>	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
<i>DSP</i>	Digital Signal Processor
<i>DT</i>	Decision Trees
<i>EMTP</i>	Electromagnetic Transients Program
<i>EMTDC</i>	Electro Magnetic Transient Design and Control
<i>FAI</i>	Falta de Alta Impedância
<i>FEC</i>	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
<i>FIC</i>	Frequência Individual de Interrupção por Unidade Consumidora
	IR) [<i>FIR</i>] Finite Impulse Response
<i>GPS</i>	Sistema de Posicionamento Global
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>PSRC</i>	Power Systems Relaying Committee Working Group
<i>PMU</i>	Phasor Measurement Unit

RDE Rede de Distribuição de Energia

RNA Redes Neurais Artificiais

Rn Resistência de Neutro

SEP Sistema Elétrico de Potência

TM Transient monitoring

Xn Reatância de Neutro

Resumo

De uma forma geral todos sistemas elétricos estão susceptíveis a faltas. Todavia, existem faltas que não são detectadas pelo sistema de proteção, como por exemplo, a causada por galhos de árvores que tocam a rede elétrica ou ainda um rompimento de cabo sob uma superfície isolante tal como asfalto. Estas faltas são conhecidas como faltas de alta impedância (FAI). As FAI se apresentam como um desafio e normalmente não são detectadas pela proteção do sistema. Neste trabalho, foi realizado um estudo detalhado de técnicas de detecção de FAI apresentadas na literatura, identificando-se as condições em que cada uma apresenta melhor comportamento em termos de detecção, bem como as eventuais deficiências de cada uma das técnicas estudadas. As técnicas existentes podem ser classificadas em Passivas e Ativas. Das técnicas passivas foram escolhidas cinco para que fosse realizado um estudo comparativo de forma equilibrada partindo-se de um mesmo cenário e avaliando todas as técnicas sob as mesmas condições de análise. Uma técnica ativa também foi estudada, sob a ótica principalmente de desempenho. Baseado em todos estes estudos, foi proposta uma alteração da técnica ativa, esta modificação resultou em um melhor desempenho comparado a original. Para completar este estudo, este trabalho apresenta uma metodologia para a combinação das técnicas passivas de detecção de FAI. A técnica baseada na observação dos Harmônicos de baixa ordem de sequência negativa, foi combinada transformada wavelets. Por fim, foi utilizada uma rede neural artificial para que produzisse um diagnóstico, uma vez que é necessária a combinação de dois resultados para permitir a detecção precisa da condição de falta. Esta metodologia permitiu a distinção dos eventos do sistema e a correta detecção das faltas em todos os casos.

Abstract

In general, all electrical systems are susceptible to failure. However, there are faults that are not detected by the protection system, such as those caused by tree branches that hit the power grid or a cable break under an insulating surface such as asphalt. These faults are known as high impedance faults (HIF). HIF present themselves as a challenge and cannot be detected by traditional methods. In this work, a detailed study of detection techniques for high impedance faults presented in technical literature was carried out, identifying the conditions in which each improves detection behavior as well as possible deficiencies in each technique studied. The techniques existing in the literature can be classified as either passive or active. From the passive techniques present in the literature, five were chosen so that a comparative study could be carried out in a balanced way, starting with the same scenario and evaluating all the techniques under the same conditions. An active technique has also been studied from the standpoint of performance in terms of detectability and type of fault. Based on all these studies a change was proposed in the active technique. These modifications resulted in improved performance compared to the original. In order to complete this study, this work presents the possibility of combining the passive techniques for detecting HIF. The technique based on the observation of low order harmonics of negative sequence was combined with the technique based on wavelets. An artificial neural network was used to produce a final result, since it is necessary to combine two results to allow precise diagnosis of the fault condition. This combination allowed the detectors to distinguish the events in the system and correct detection of the faults in all cases.

1

Introdução

Sistemas elétricos de potência podem ser divididos em quatro importantes áreas: sistemas de geração, de transmissão, de distribuição e de utilização (consumidores). As linhas de transmissão são classificadas de acordo com o nível de tensão. Para cada faixa de tensão, existe um código representativo: A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV; A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV; A3 – tensão de fornecimento de 69 kV. As redes de distribuição são compostas por alimentadores de média (entre 2,3 kV e 44 kV) e baixa tensão (entre 110 e 440 V).

De uma forma geral, todos os sistemas elétricos estão susceptíveis a falhas. Conforme Tleis (TLEIS, 2008), uma falha em um sistema de potência é uma condição anormal na operação de algum tipo de equipamento, operando em uma das tensões primárias do sistema. De forma geral, as falhas mais comuns em sistemas de distribuição são a ocorrência de curto-circuito na média e baixa tensão; a queima de transformadores, pela constante ocorrência de curtos; o afrouxamento de conexões que ligam condutores aos demais componentes da rede. Estas falhas, são normalmente, ocasionadas pelo rompimento de cabos aéreos, pela quebra de isoladores, pela deterioração dos transformadores de distribuição e seus componentes, pelo acúmulo de sujeira sobre os isoladores, por atos de vandalismo, por fenômenos da natureza (como raios, ventos e queda de árvores ou galhos) e ainda por acidentes com viaturas.

Ainda segundo Tleis (TLEIS, 2008), dois tipos básicos de falhas podem ocorrer. A

primeira é uma falha no isolamento que resulta em um curto-circuito (do inglês *Arch fault*) e pode ocorrer como resultado da degradação pelo tempo, por um súbito aumento de tensão ou ainda por estresse e são comumente chamadas de faltas (do inglês *fault*). A segunda é uma falha que resulta em uma interrupção de corrente, também conhecida como circuito aberto (do inglês *open-circuit fault*).

Os curto-circuitos, podem ocorrer entre uma fase para o terra, fase-fase, duas fases com o terra, trifásico e ainda trifásico com o terra. Apenas o curto circuito que afeta as três fases de um sistema produz uma falta simétrica. Todas as demais produzem efeitos assimétricos em cada uma das fases do sistema. Tipicamente de 80% á 90% das faltas de curto-circuito ocorrem em ramais de distribuição aéreos e o restante em subestações e barramentos (TLEIS, 2008).

No Brasil, a distribuição da energia elétrica se faz, quase na sua totalidade, com ramais aéreos alimentados em tensões na ordem de 15 kV ou 25 kV. Este modelo, da década de 40 do século XX, possui, principalmente, condutores nus compondo as redes elétricas de distribuição dos centros urbanos. Esse sistema, além da fragilidade construtiva, disputa espaço, principalmente, com as árvores. A principal vantagem de utilizar este modelo, é a redução do custo de investimento, se comparada a outras formas de distribuição de energia, como por exemplo, por meio de condutores isolados ou protegidos. Com relação às desvantagens, a mais evidente, é a necessidade de adequação à topologia dos demais equipamentos e estruturas urbanas, que acaba interferindo na paisagem urbana das regiões por onde passa. Além disso, a exposição à condições adversas o tornam mais propenso à faltas que o sistema subterrâneo.

A confiabilidade e a qualidade do serviço de fornecimento de energia constituem-se em dois aspectos que o projeto, manutenção e operação dos sistemas de distribuição de energia devem se preocupar. Entretanto nem sempre é possível, proteger o sistema de todos os tipos de falhas pois, ainda, não estão disponíveis equipamentos capazes de realizar essa tarefa. Durante os últimos anos muitos pesquisadores têm trabalhado para apresentar às concessionárias de energia técnicas que possam identificar, classificar e localizar faltas em (Rede de Distribuição de Energia (*RDE*)).

Existem faltas que não são vistas pelo sistema de proteção, como por exemplo, a causada

por galhos de árvores que tocam a rede elétrica ou ainda um rompimento de cabo sobre uma superfície isolante tal como asfalto. As faltas que não interferem na continuidade de operação geram singularidades transitórias na RDE. Estas faltas comprometem a qualidade de energia entregue aos consumidores, acarretam o desligamento parcial ou total da RDE e podem causar óbito.

Conforme Zamora (ZAMORA et al., 2007) para as faltas que apresentam um incremento no fluxo de corrente de um sistema, já existem diversos dispositivos de proteção disponíveis. Quanto maior o nível do aumento de corrente do sistema, mais fácil é a detecção da falta. Entretanto, as faltas de baixa corrente (do inglês *Low Current Faults* (LCF)) também conhecidas como faltas de alta impedância (do inglês *High Impedance Fault* (HIF),¹) se apresentam ainda como um desafio e não podem ser detectadas pelos métodos tradicionais. Estas são faltas cujos valores de corrente, nos alimentadores da distribuição, ficam abaixo dos valores de partida dos relés de sobrecorrente tradicionais.

Sheng e Rovnyak (SHENG e ROVNYAK, 2004) afirmam que existem alguns poucos equipamentos que procuram detectar apropriadamente FAI. Dois deles disponíveis comercialmente são o *Digital Feeder Monitor* (DFM) da GENERAL ELECTRIC e o *High Impedance Fault Analysis System* (HIFAS) da NORDON TECHNOLOGIES. Ambos dispositivos combinam técnicas simples de detecção de faltas de alta impedância, com um algoritmo de variação de energia combinado com outro de detecção de variação de carga. Com isso, eles conseguem detectar alguns casos bem específicos de faltas em sistemas de distribuição e transmissão, devido às características simplificadas destes sistemas.

Como já foi dito, as FAI se caracterizam na maioria das vezes pelo contato de um condutor energizado em solos de baixa condutividade, galhos de árvores balançando e encostando na rede de distribuição, isoladores poluídos entre outros. Conforme Hou (HOU, 2006), em diversos estudos realizados a partir de testes preparados para simulação e análise das FAI dos sistemas de distribuição aterrados, os pesquisadores registraram magnitudes das correntes de falta variando de zero a menos de 100 amperes.

Ainda, além das causas descritas, as faltas no sistema, podem ser ocasionadas por mau funcionamento não esperado ou a idade avançada de alguns componentes, resultando com

¹Artigos em português utilizam o termo Falta de Alta Impedância (FAI)

isto em alterações da estrutura dinâmica. Desta forma, o objetivo primário de um sistema de diagnose de faltas consiste em detectar, isolar e realizar as ações necessárias para prevenir o sistema da instabilidade mantendo o controle sobre o mesmo.

As faltas de alta impedância possuem duas características principais (ELKALASHY et al., 2007): as baixas correntes de falta e o arco (curto circuito). Em 1996, Aucoin e Jones (AUCOIN e JONES, 1996) apresentam resultados experimentais da emulação de algumas faltas para alimentadores de distribuição com tensões de 12,5 kV, em que observa-se a intensidade das mesmas, conforme apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Corrente de faltas típicas em diversas superfícies (12,5kV)

No.	Superfície	Corrente (A)
1	Asfalto Seco	0
2	Areia Úmida	15
3	Solo e Vegetação Secos	20
4	Gramma Seca	25
5	Solo e Vegetação Úmidos	40
6	Gramma Úmida	50
7	Concreto Reforçado	75

Fonte: (AUCOIN e JONES, 1996)

Entre as características das FAI, elas não tendem a apresentar somente componentes em correntes de baixa amplitude, mas também um comportamento aleatório, instável com flutuações no seu nível. Os sinais de FAI, também são ricos em harmônicos e têm componentes de alta frequência. A maior parte das pesquisas em FAI tem-se concentrado no desenvolvimento de detectores de faltas mais sensíveis a estes distúrbios transitórios.

1.1 Motivação

Nos sistemas elétricos, caso ocorra uma falha mecânica no sistema de fixação do condutor ao poste, a população próxima a esta região estará exposta a uma condição de risco de acidentes com potencial de fatalidade elevado. É importante salientar que este modelo foi desenvolvido há aproximadamente 70 anos e apresenta, saturações tecnológicas. Isto acaba propiciando um baixo nível de confiabilidade no sistema elétrico de distribuição de energia se comparado com sistemas que apresentam melhor nível de isolamento elétrico.

Estas falhas no sistema podem causar prejuízos a todos os setores da sociedade, dentre os quais se destacam desligamentos constantes da rede, a queima de aparelhos domésticos e equipamentos, os prejuízos ao comércio e indústrias, os transtornos em hospitais e estabelecimentos de utilidade social, as perdas de faturamento, os gastos com manutenções, além do prejuízo à imagem da empresa concessionária de energia junto à comunidade.

Segundo Landini(LANDINI, 2001), existe argumentação suficiente, do ponto de vista jurídico, para indicar a concessionária como responsável, parcialmente ou totalmente, nos casos de faltas, mesmo quando estas estão relacionadas a descargas atmosféricas, tempestades, tormentas, etc. O consumidor lesado não precisa provar a culpa da concessionária, basta que ele prove a existência do fato, do dano e do nexo de causalidade entre ambos para que tenha direito a indenização.

O risco de óbito em faltas deste tipo é elevado, uma vez que em muitos casos o cabo energizado está próximo ao solo ou até sobre ele, e qualquer pessoa ou animal pode sofrer um choque elétrico. Como os arcos frequentemente acompanham uma falta, o risco de incêndio é alto. Assim, a detecção de tais falhas se apresenta como um objeto de estudo importante.

Algumas pesquisas, assim como técnicas atualmente implantadas são focadas, basicamente, na questão de localização da falta, uma vez que este conhecimento propicia a redução do tempo no restabelecimento do sistema elétrico. Entretanto tão importante quanto o conhecimento pontual da falta é a informação prévia de que o sistema está operando sob condição de falta. O diagnóstico, neste caso, deve ser realizado com auxílio de ferramentas desenvolvidas especificamente para este fim.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver uma metodologia para detecção on-line de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição primários de energia elétrica.

Neste sentido os objetivos específicos podem ser divididos em:

- Realizar uma revisão bibliográfica do assunto proposto analisando as técnicas a fim de

selecionar um conjunto de técnicas para serem testadas.

- A partir de um conjunto de técnicas selecionadas, realizar o estudo de um conjunto de técnicas de detecção de faltas de alta impedância encontradas na literatura de forma a comparar seu desempenho.
- Com base no estudo e na comparação de técnicas presentes na literatura, este trabalho, objetiva, propor uma nova metodologia para executar esta detecção de forma a aumentar o desempenho e a precisão da detecção da falta. Principalmente no que concerne a sensibilidade da técnica em relação a eventos transitórios, que são característicos dos sistemas elétricos.

1.3 Contribuições do Trabalho

Este trabalho apresenta três importantes contribuições, quais sejam:

Foi realizado uma comparação de cinco técnicas passivas presentes na literatura, baseadas em um cenário igual para todos os casos, incluindo além das faltas eventos transitórios do sistema. Estes eventos são citados ao longo do tempo como limitadores das técnicas, uma vez que acabam por produzir indicações de falso positivo para eventos de falta.

Baseado nas técnicas estudadas, foi proposta uma metodologia para que a partir de uma combinação das mesmas seja possível distinguir claramente uma falta de um evento normal do sistema. Esta combinação, implementada a partir do uso da técnica de monitoramento de harmônicos de baixa ordem de sequência negativa e a transformada wavelets (debauchies 3). Esta combinação produz, em função da intensidade da wavelet aplicada, dois resultados que combinados permitem a diferenciação de eventos de falta de eventos normais do sistema. Por fim uma Rede Neural Artificial treinada para este fim, realiza a distinção dos dois sinais apresentando a informação correta dos eventos de faltas.

Além disso, também foi estudada uma técnica ativa proposta por (ZAMORA et al., 2007) que a partir da injeção de um sinal de alta frequência realiza o cálculo da impedância. Esta técnica possui algumas limitações que foram apresentadas ao logo do trabalho. Neste sentido, foi proposta uma nova metodologia que ao invés de realizar o cálculo da impedância, utiliza

um identificador de mínimos quadrados recursivo para realizar esta tarefa. esta modificação melhora a eficiência do método bem como permite a distinção de eventos normais do sistema.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho esta organizado da seguinte forma. No capítulo II deste documento é apresentada uma revisão bibliográfica do estado da arte das técnicas e estudos mais importantes encontradas na literatura. Além disso é proposta uma classificação destas técnicas.

O Capítulo III apresenta e detalha o modelo de um sistema de distribuição de energia elétrica. Este sistema foi apresentado por Zamora et al. ((ZAMORA et al., 2007) e no trabalho do autor são realizados vários experimentos e testes que permitem que se tenha ideia do funcionamento esperado do mesmo. Ainda neste capítulo é apresentado um conjunto de técnicas de detecção de faltas de alta impedância classificados como métodos baseados em assinatura de faltas (classificação apresentada no capítulo II), encontradas na literatura. Para escolha dos métodos estudados, foram utilizados os seguintes critérios, dois deles que apresentam o melhor resultado nos artigos científico numa vasta gama de aplicações, outros dois baseados na facilidade de implementação e finalmente, um quinto método considerado por muitos artigos o que apresenta resultados não satisfatórios.

A análise comparativa entre os métodos de detecção de faltas de alta impedância por análise de assinatura de falta apresentados no capítulo IV, utilizando o modelo apresentado no capítulo III. Estes métodos são: Transformada Wavelets; Redes Neurais Artificiais; Harmônicos não característicos de Sequência Zero; Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa; Transformada de Fourier Janelada.

O método de detecção de faltas de alta impedância, proposto por Zamora (ZAMORA et al., 2007) é analisado no capítulo V. O método foi testado nas condições abordadas no artigo original, onde são comparados os resultados. Além disso é apresentada uma proposta de readequação deste método visando melhor desempenho. O método aqui proposto, consegue aprimorar o desempenho do método de Zamora.

No Capítulo VI é proposto, uma nova técnica de detecção de faltas baseado na com-

binação de técnicas passivas de detecção de faltas de alta impedâncias. As quais utilizam uma rede neural para tomada final de decisão da condição de falta.

Por fim, são discutidos os resultados e as conclusões deste trabalho.

2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo foi realizada uma revisão dos trabalhos que estudam detecção de FAI de forma a obter subsídios para o estudo proposto. Foram analisadas técnicas e metodologias, de forma que fosse possível compreender a evolução das propostas de solução deste problema ao longo dos anos.

Faltas de alta impedância na maioria vezes não podem ser detectadas com proteções convencionais. Na literatura, a maioria dos esforços de pesquisa foram direcionados no sentido de identificar as faltas, ou seja, recursos e práticas para a sua detecção.

A preocupação sobre o tema não é recente, conforme Li e Redfem (LI e REDFEM, 2001) em 1949 o Power Systems Relaying Committee Working Group (*PSRC*), concluiu ser impossível, naquele momento, desenvolver técnicas para detecção de faltas de alta impedância.

Já no início da década de setenta, a empresa Pennsylvania Power and Light Company (PP&L), surpreendida pelas rupturas não detectadas de condutores de polietileno reticulado (do inglês *cross-linked polyethylene* – XLP), iniciou diversos testes derrubando os cabos XLP em diferentes tipos de solo, com o objetivo de simular FAI (Cf. (HOU, 2006)). Segundo Stoupis et. al. (STOUPIS et al., 2004), desde os anos setenta têm-se estudado mais detalhadamente a natureza das FAI com o objetivo de encontrar um método prático para detectar estes distúrbios.

Em meados dos anos oitenta Aucoin (AUCOIN, 1985) apresentou o status da detecção de faltas de alta impedância, o qual afirma que a muito se procura detectar este tipo de falta. Entretanto, até aquele momento não existia nenhuma solução definitiva para este problema. E ainda, que esta não era apenas uma questão técnica, mas envolvia vários problemas complexos como dificuldades jurídicas, econômicas e operacionais. Assim, uma das alternativas aceitável era de se produzir um equipamento mais sensível a sobrecorrentes. Como em Calhoun et. al. (CALHOUN et al., 1982), que desenvolveu um relê conectado ao terra, mais sensível quando utilizado em cargas leves. Este, inclusive, permitia a detecção de cabos rompidos, em alguns casos.

Muitas eram as técnicas, até aquele momento, que envolviam relés, instalados nas subestações, mais sensíveis a distúrbios elétricos. Muitas delas procuravam uma “assinatura” da falta, normalmente em componentes diferentes da frequência fundamental (60 Hz), sobre o argumento que componentes não fundamentais eram menos susceptíveis a distúrbios provocados pelas variações de carga. No entanto, eram alterados significativamente em condições de falta (AUCOIN, 1985). Ou ainda, métodos que utilizavam desbalanço de corrente em sistemas trifásicos. Ambos os métodos totalmente limitados às condições de carga do sistema e limitados à condições absolutamente restritas.

Aucoin e Russel em 1982 (AUCOIN e RUSSELL, 1982) propuseram uma técnica para detecção de faltas baseada no incremento de um sinal de alta frequência (2-10 kHz) causado por arcos provocados por falhas de alta impedância. Faltas que produzem sobrecorrentes relativamente baixas (≤ 10 Ampere (A)) não podem ser detectadas por este método.

Uma técnica para monitorar o desbalanço na forma de onda da componente fundamental, terceira e quinta harmônica de corrente através da aquisição de dados na subestação foi proposta por Balser et. al. (BALSER et al., 1986). A técnica proposta consistia em, por meio de uma avaliação estatística comparando o desbalanço atual com níveis anteriores de desbalanço e ainda definindo um limite tolerável de desbalanço detectar FAI. Este método foi embarcado, no que poderia ser considerado um dos primeiros relés digitais microcontrolados para ser instalado diretamente em uma subestação.

Em 1987 Aucoin e Russel (AUCOIN e RUSSELL, 1987) apresentam um trabalho em que se prioriza a análise de frequências próximas da fundamental, argumentando inclusive

que o seu trabalho apresentado em 1982, possui limitações em circuitos que possuem bancos de capacitores instalados. Os bancos de capacitores atenuam os sinais e “assinaturas” de faltas, impedindo a detecção das mesmas. Neste trabalho, foi utilizada uma técnica para detecção de faltas baseada na observação do comportamento de harmônicos próximos de 60 Hz ou também conhecidos como baixa ordem.

O comportamento da amplitude do espectro harmônico das componentes de frequências baixas sob o efeito de faltas foi apresentado por Aucoin e Russel (AUCOIN e RUSSELL, 1987) considerando a faixa de 30 Hz à 360 Hz (intervalos de 30 Hz). Foram investigadas “assinaturas” de faltas em baixa frequência para os seguintes casos: (i) faltas em diferentes tipos de solos; (ii) faltas em circuitos com bancos de capacitores desconectados; (iii) faltas em circuitos com bancos de capacitores conectados operando em condições de regime permanente; (iv) faltas com operação de *air switch*; (v) operação de bancos de capacitores (energização); (vi) alterações nos TAPs de transformadores. Os primeiros se referem a investigações em circuitos operando sob condições de faltas. Já os três últimos apresentam operações normais de um sistema de distribuição. Os autores afirmam ser possível, por meio da análise do espectro de baixa frequência, distinguir o comportamento normal do circuito em relação ao circuito operando em condições de falta (i.e. distinguir uma falta, de uma operação de chaveamento de banco de capacitores). Entretanto, segundo Russel (RUSSELL et al., 1988), existem vários eventos elétricos em um sistema de distribuição que podem ser atribuídos a faltas. Entretanto, estes mesmos eventos podem ocorrer em outras situações consideradas como funcionamento normal do mesmo (chaveamento e outros eventos normais).

Em 1989 Russell e Chinchali (RUSSELL e CHINCHALI, 1989) propuseram uma configuração baseada em um TMS32020 que utiliza alguns métodos de detecção de faltas e compara os resultados com um banco de dados definido por especialistas no assunto. Os parâmetros monitorados por este sistema são: (i) frequências sub harmônicas; (ii) frequências harmônicas pares; (iii) frequências harmônicas ímpares; (iv) faixa de altas frequências (2-6 kHz); (v) sequência zero da frequência fundamental; (vi) componentes de sequência negativa da frequência fundamental; e (vii) componente de sequência positiva da frequência fundamental. A base de dados provê certa “inteligência” ao processo (*rulebased*) e ainda permite que sejam adicionadas outras funcionalidades de um relé tradicional. A arquitetura do sistema proposto é apresentada na Figura 2.1.

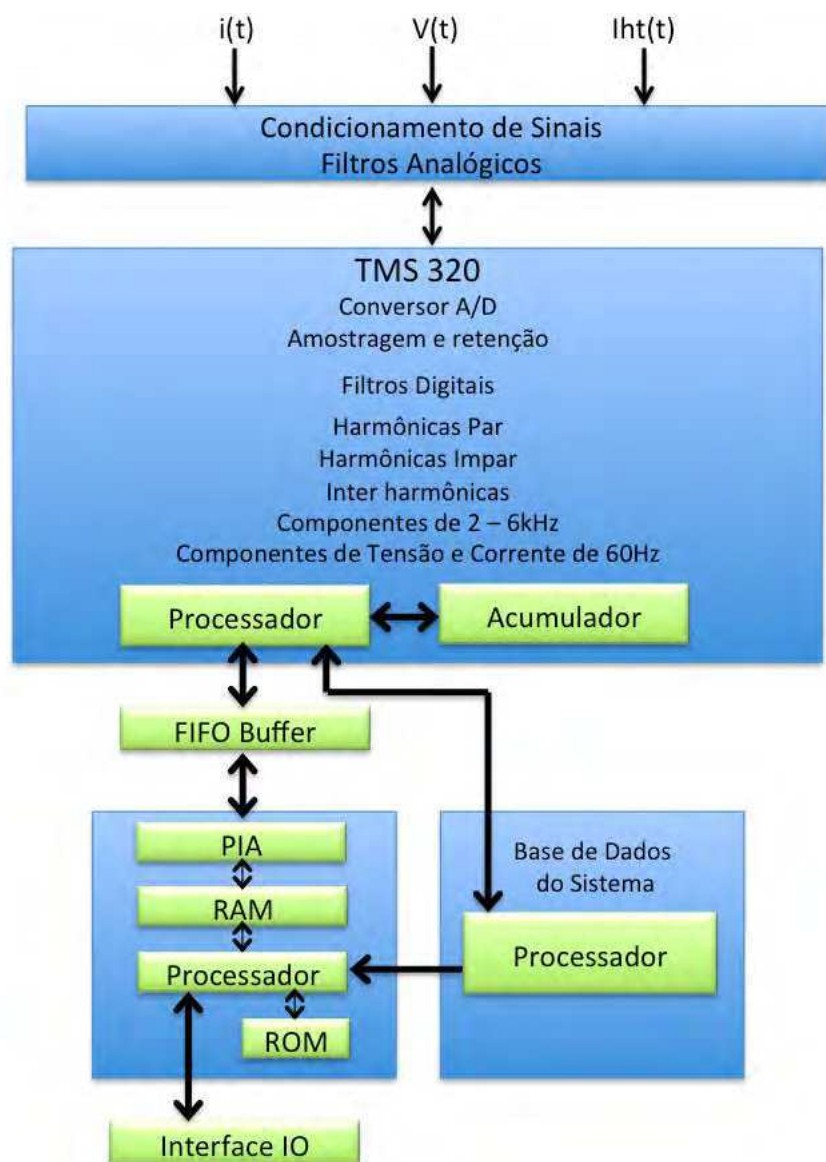


Figura 2.1: Arquitetura do sistema proposto por Russel e Chinchali em 1989. Fonte: Adaptado de (RUSSELL e CHINCHALI, 1989)

Logo no início da década de 90, tem-se o surgimento dos métodos de detecção de faltas empregando redes neurais a exemplo de Ebron et. al. (EBRON et al., 1990). Neste trabalho, a utilização de Redes Neurais Artificiais (*RNA*) (do inglês ANN – *Artificial Neural Network*) como estratégia para detecção de faltas se deve ao fato de que elas são particularmente sensíveis e se adaptam bem na resolução de problemas complexos bem como no reconhecimento de padrões específicos. Uma técnica de otimização, permite que a rede “aprenda” determinadas regras (um conjunto de casos) que facilitam a resolução de um determinado problema. Uma *RNA* apresenta um paralelismo inerente, provocando um incremento de velocidade em relação aos métodos seriais tradicionais. Como já apresentado, vários autores

realizaram investigações sobre o comportamento das formas de onda de corrente em circuitos de distribuição sob condições de falta. Estes dados são necessários para o treinamento da RNA. Por meio de simulações no Electromagnetic Transients Program (*EMTP*), definiu-se um caso-base, onde as frequências de falta estavam limitadas em 0 até 10 kHz, as cargas passivas (+/-20%), impedâncias de linha e carga sob falta (+/-20%), cargas do tipo motores de indução (+/-20%), tempos de comutação (0-169 ms.), tensão de condução dos diodos (+/-25%). A partir destes, foram gerados quatro casos particulares com as seguintes características: (i) Casos com comutação normal de cargas; (ii) Casos com comutação normal de cargas e capacitores; (iii) Casos com faltas de alta impedância e comutação normal de cargas; (iv) Casos com faltas de alta impedância e comutação normal de cargas e capacitores. O sistema ainda necessita de um pré-processador conforme Figura 2.2.

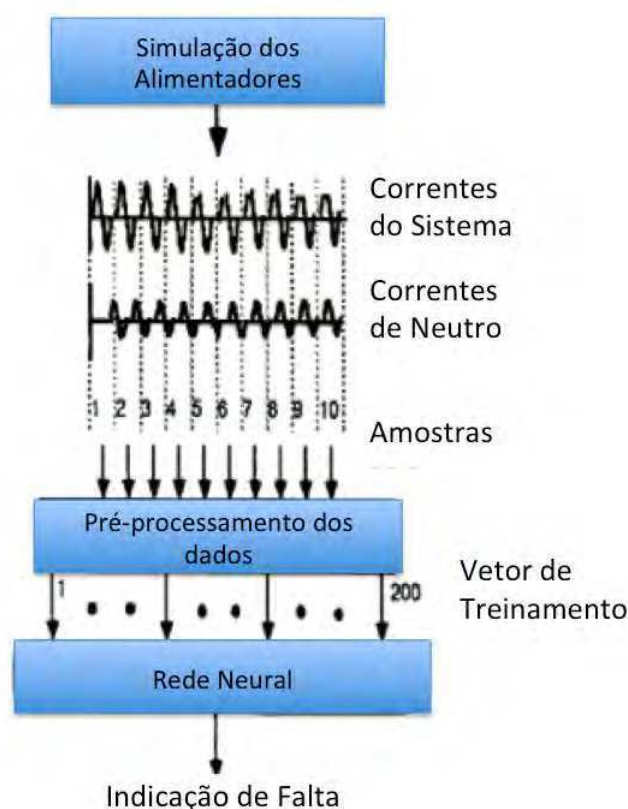


Figura 2.2: Dados do Pré Processamento. Fonte: Adaptado de (EBRON et al., 1990)

O pré-processador precisa de 10 ciclos pra poder extrair as informações do sistema. Nestes, ele define alguns parâmetros para treinar e monitorar posteriormente a rede:

- O valor da corrente de pico transitória sobre as três fases;
- A amplitude da corrente (da fase correspondente) antes e depois de um evento transitório;
- O número de transitórios classificados nos 75% da perturbação máxima,
- A magnitude da corrente de sequência positiva
- A quantidade de desbalanço entre fases (utilizando o método apresentado em (CALLHOUN et al., 1982));
- Componentes da primeira terceira e quinta harmônicas da corrente de neutro sugerido em (KILAR et al., 1979);
- Distúrbios no espectro de frequência da corrente de neutro em 10 seções (RUSSELL et al., 1982);

Ainda no início dos anos 90 vários trabalhos procuravam definir novos padrões de comportamento para sinais de corrente de circuitos sob condições de falta como apresentado por Emanuel et. al. (EMANUEL et al., 1990) e Jeffings e Linders (JEEFINGS e LINDERS, 1990) entre outros.

O relé conhecido como HIFAS - *High Impedance Fault Alarm System* foi apresentado por Atwell, et al. (ATWELL et al., 1990). Ele é sensível a alterações no 3º harmônico de corrente do circuito de distribuição. Neste dispositivo além do aumento da amplitude do sinal ele compara duas medidas, para perceber alterações no conteúdo harmônico do sinal (ângulo de fase e amplitude), uma de tempo curto (1 a 2 segundos) e outra com uma media de tempo longo (20 a 30 minutos). Os cenários testados são os apresentados na Figura 2.3 e Figura 2.4 abaixo.

Entre as conclusões sobre o desempenho deste dispositivo, Atwell et. al. (ATWELL et al., 1990) afirma poder “perceber” faltas de 1% acima da corrente nominal do alimentador. No entanto, apenas faltas com 3% do valor nominal foram totalmente detectadas.

Outra técnica que pretendia detectar o rompimento de condutores se baseia no desbalanço das tensões. Neste caso, para se ter uma real determinação do desbalanço, são

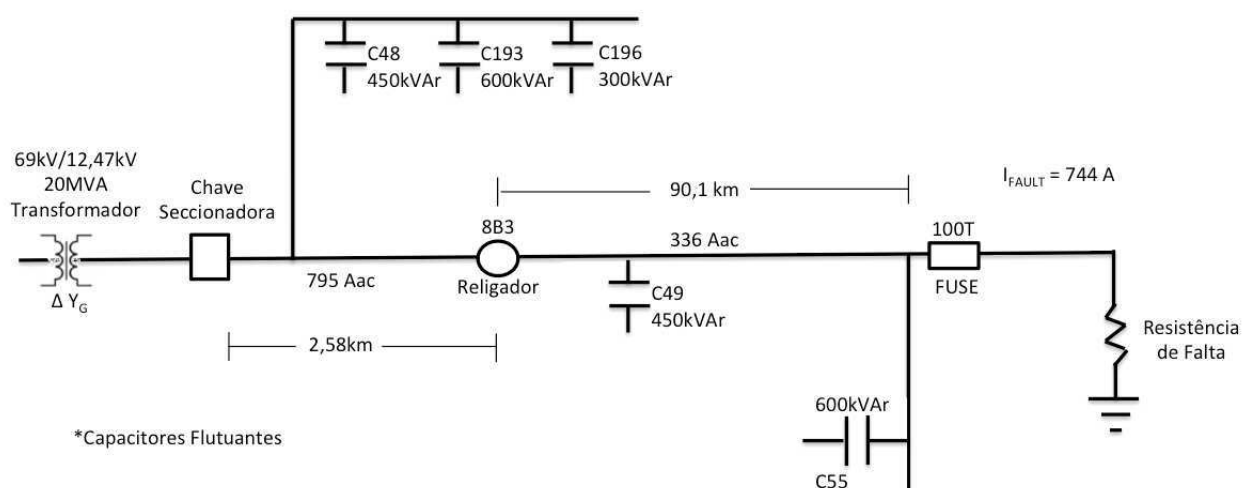


Figura 2.3: Diagrama on-line do Alimentador Testado. Fonte: Adaptado de (ATWELL et al., 1990)

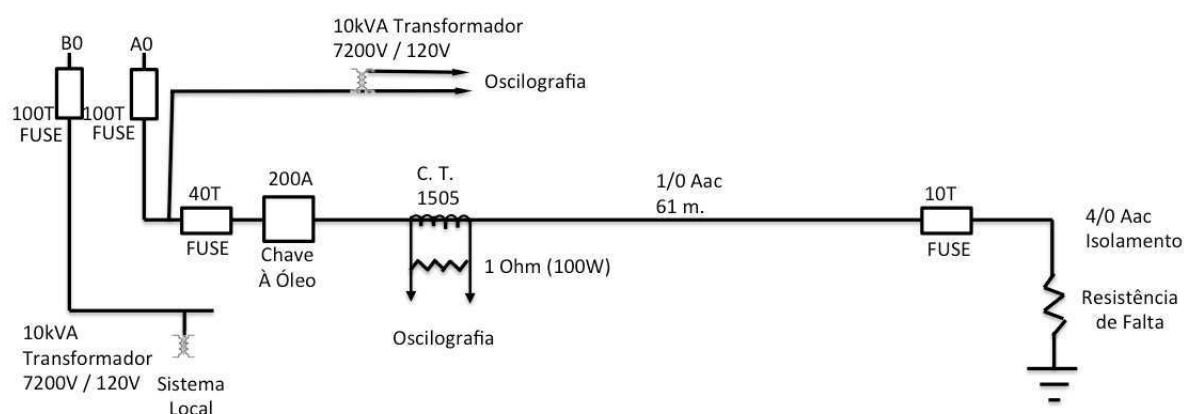


Figura 2.4: Diagrama do Estágio de Falta Testado. Fonte: Adaptado de (ATWELL et al., 1990)

analisados, por exemplo, nas três fases do sistema, a sequência negativa ¹ e a sequência de zero ² das tensões.

Em 1991, Kwon et al. (KWON et al., 1991) propôs um método para detecção de FAI denominado de medida da variância incremental das harmônicas de potência de ordem par. No qual afirma-se que existem arcos intermitentes na maioria das faltas de alta impedância

¹Uma das três grandezas utilizadas na análise de componentes simétricas dos sistemas de potência trifásicos e é utilizada para calcular as condições de desbalanço de um sistema trifásico usando somente o cálculo monofásico.

²Só é possível analisar elementos de sequência zero em sistemas de distribuição de 4 fios.

e que a forma de onda da corrente possui uma forma assimétrica em cada ciclo, gerando componentes de ordem par no espectro harmônico do sistema. Entretanto, o sistema de distribuição pode possuir também componentes de ordem par e, por isso, os limites entre o considerado funcionamento normal do sistema ou o comportamento sobre falta devem ser definidos pelo projetista. Assim, foi utilizada na implementação deste método a limitação de análise no espectro compreendido entre 360-1980 Hz, pois abaixo e acima desta faixa, foi difícil definir diferenças entre as componentes geradas pelo funcionamento normal do sistema e as componentes características de faltas.

Até aquele momento, para a obtenção da maioria dos resultados experimentais, foram utilizados sistemas simples onde se provoca a queda de um condutor energizado sobre superfícies específicas. Desconsiderando em grande parte dos casos outras características do sistema. Ou ainda, simulações no EMTP, favorecidas pela evolução dos microcomputadores no final dos anos 80 e início dos anos 90.

Yu e Khan (YU e KHAN, 1994), propõem um método adaptativo para detecção de faltas. Este método se baseia em algumas características conhecidas de FAI as quais são: amplitude da corrente, amplitude da 3ª harmônica de corrente, amplitude da 5ª harmônica de corrente, ângulo da 3ª harmônica de corrente, a diferença angular entre 3ª harmônica de corrente e a fundamental de tensão e por fim sequência negativa. A partir destas características identificadas para um determinado sistema (com base em dados coletados em um simulador *EMTP*), a média da corrente de sequência negativa é calculada e um, denominado, bloco médio de corrente de carga é recalculado em intervalos de 18000 ciclos (5 min.). Esta recalibração dos valores torna o sistema adaptativo.

Em 1996, Robertson et. al. (ROBERTSON et al., 1996) utilizaram a transformada wavelet para detectar assinaturas não periódicas características de faltas em circuitos de distribuição. A teoria wavelets foi introduzida nos anos oitenta por Morlet e Grossmann em (MORLET e GROSSMANN, 1984). A transformada wavelet permite que, em alguns casos, seja determinada a ocorrência de faltas, e, ainda permitem que sejam desenvolvidas técnicas de localização destas faltas. Este novo método é apresentado como uma nova forma poderosa de verificar e analisar transitórios em sistemas de potência. Entre as características destacadas está a capacidade da wavelet de detectar em curtos intervalos componentes de alta frequência e em longos intervalos componentes de baixa frequência, aumentando a capa-

cidade de se analisar sinais com impulsos e oscilações. Demonstra ainda que a transformada wavelet pode ser aplicada em sistemas de potência em projetos de sistemas para detecção de transitórios característicos.

Outro trabalho que apresenta a transformada wavelet como ferramenta para auxiliar a detecção de faltas é o de Chaari (CHAARI et al., 1996). Na Figura 2.5 apresenta-se o circuito radial de distribuição estudado. Este é um circuito ressonante e aterrado de 20 kV e foi simulado no EMTP.

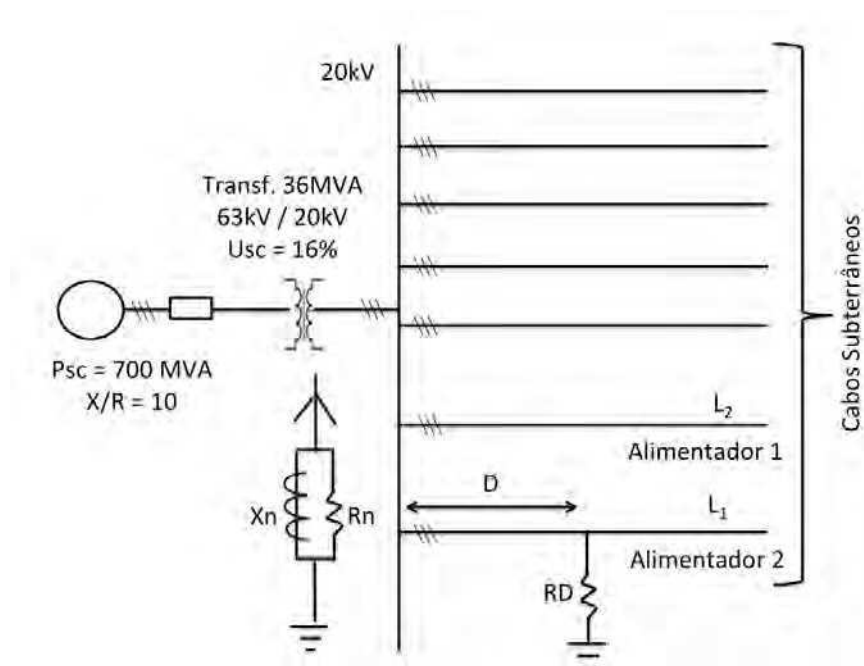


Figura 2.5: Circuito de distribuição estudado por Chaari. Fonte: Adaptado de (CHAARI et al., 1996)

O circuito utiliza uma bobina de Petersen³ (*Petersen Coil*) definida por uma Reatância de Neutro (X_n)=40 Ω em paralelo com uma Resistência de Neutro (R_n)=800 Ω . Sete alimentadores derivam do barramento. O comprimento total dos alimentadores é igual a 105 km. Quando ocorre uma falta monofásica definiu-se como R_d e neste caso D é a distância (km) entre o barramento e a falta. Tem-se ainda outros equipamentos como cargas e bancos de capacitores para compensação de potência reativa que não são mostrados na Figura 2.5. Neste trabalho foi apresentada uma wavelet mãe e o conceito de transformada rápida recursiva wavelet para se obter informação instantânea de tempo e frequência de um barramento

³Uma bobina de Peterson é um indutor ligado ao sistema neutro e terra. O objetivo é o de igualar (ou cancelar) a componente capacitiva de uma falta de terra. A resultante é apenas uma pequena componente resistiva.

de sequência zero em condições de falta.

Os autores, Benne, et al. (BENNE e RUSSELL, 1997) afirmaram que é irreal imaginar naquele momento (1997), que apenas um único algoritmo consiga detectar a maioria das faltas com segurança e precisão, isto devido a grande variedade de características apresentadas por FAI. Em mais de 15 anos de experimentos e pesquisas, foram analisadas centenas de faltas. Na maioria dos estudos, é provado que alguns eventos transitórios ocorrem no alimentador, o mais difícil é caracterizar que este evento é realmente uma falta (FAI).

Hannah (HANNAH, 1998) apresentou formas de se calibrar um relé de sequência negativa para aplicações em sistemas de distribuição de energia. Afirmando que o mesmo apresenta bons resultados em FAI em apenas uma fase em relés conectados no secundário de um transformador em uma subestação de distribuição. Esta técnica é considerada de baixo custo, com aplicações principalmente em sistemas de distribuição de energia rural. O diagrama unifilar do sistema testado neste caso é apresentado na Figura 2.6.

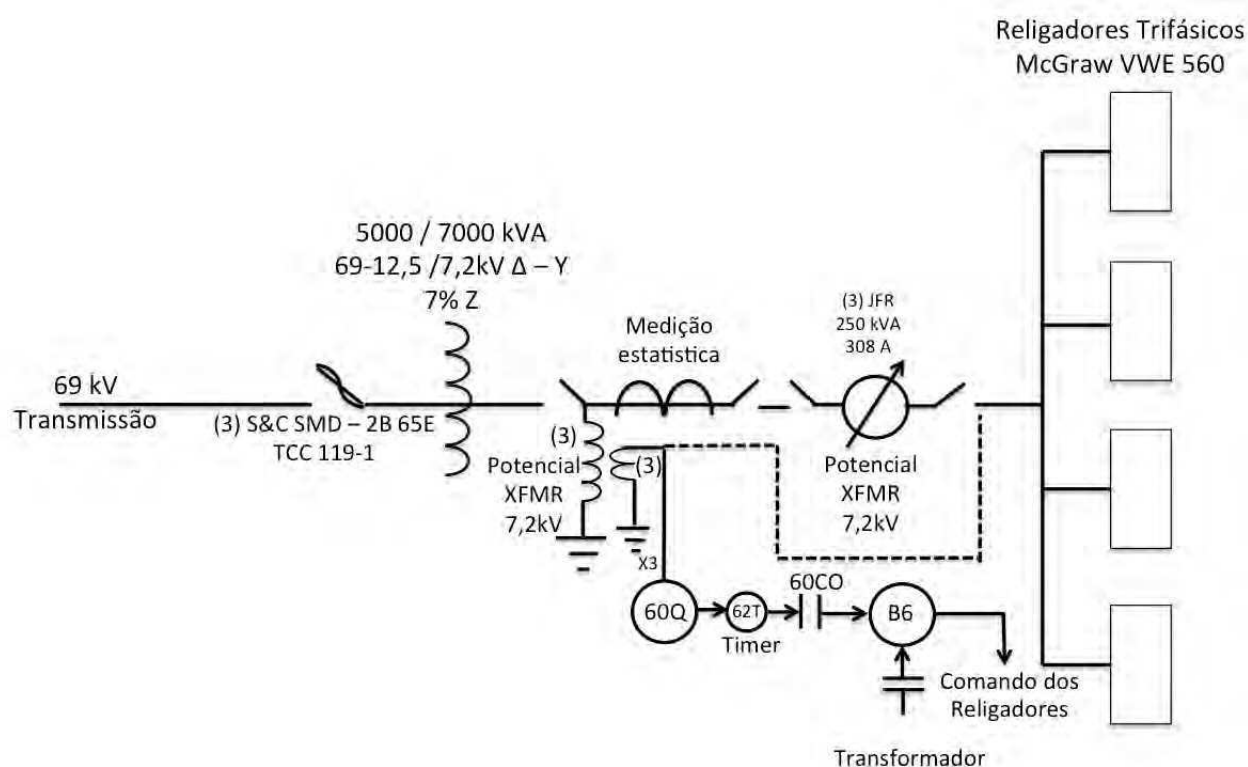


Figura 2.6: Diagrama unifilar do projeto testado na subestação utilizando relés de sequência negativa. Fonte:(HANNAH, 1998)

Cargas desbalanceadas podem causar algum tipo de sequência negativa de corrente mesmo em sistemas funcionando adequadamente. Em função disso, Xiangjun, et al. (XI-

ANGJUN et al., 2001) apresentaram uma nova metodologia de cálculo aplicando uma componente de falta (ΔI^2). No entanto, a sequência negativa ainda pode ser ocasionada por outras faltas “ungrounded” (tais como falta entre duas fases). Mas nestes casos, tensões de sequência zero não aparecem, assim, para reduzir o efeito das faltas “ungrounded”, no instante da detecção da falta a tensão de sequência zero é verificada. Quando essa tensão de sequência zero ultrapassa um determinado limite os esquemas de proteção podem atuar no sistema. A partir destas conclusões, alguns métodos foram desenvolvidos: (i) corrente de sequência negativa baseada em proteção de sobrecorrente; (ii) diferença entre sequência negativa e sequência zero baseado na proteção, (iii) corrente de sequência negativa baseado na proteção diferencial; (iv) diferença de fase entre corrente de sequência negativa e falha em tensão de fase baseada na proteção; e (v) energia dissipada no ponto de falta baseada na proteção.

No final dos anos 90, Benne e Russel (BENNE e RUSSELL, 1997) concluíram, de forma mais objetiva, o que muitos já deixavam de certa forma subentendido nos seus trabalhos, que durante muitos anos, a detecção de falhas de alta impedância foi de certa forma possível, porque na verdade, é relativamente fácil se detectar ruídos de faltas provocados por arcos, pois estes produzem altos níveis de distorção harmônica. Também, concluiu-se que é fácil se modelar determinadas características de um tipo de falta, mas nem sempre esta falta apresenta características exclusivas, ou seja, sempre existirão eventos no sistema com comportamento semelhante a alguma característica de uma falta. Desta forma, não é tão simples tomar uma decisão correta, segura e definitiva, determinando se um evento é ou não uma falta em comparação a outros eventos considerados “normais” do sistema de distribuição. A FAI possui características muito semelhantes a pequenos ruídos gerados por cargas monofásicas, por exemplo. Ou ainda, um alimentador com uma carga instalada de centenas de Ampères pode em um determinado momento sofrer pequenas variações assim como um motor de grande porte.

Uma técnica de detecção de distúrbios em sistemas de distribuição utilizando wavelets é apresentada por Karimi et. al. (KARIMI et al., 2000). O objetivo do trabalho era identificar distúrbios de tensão e ainda determinar qual o tipo de evento que resultou neste distúrbio. A técnica é mais rápida e mais precisa que os esquemas apresentados até então. Esta técnica foi simulada no seguinte circuito apresentado na Figura 2.7. A wavelet é utilizada

para detectar componentes transitórios em alta frequência combinados com componentes de baixa frequência.

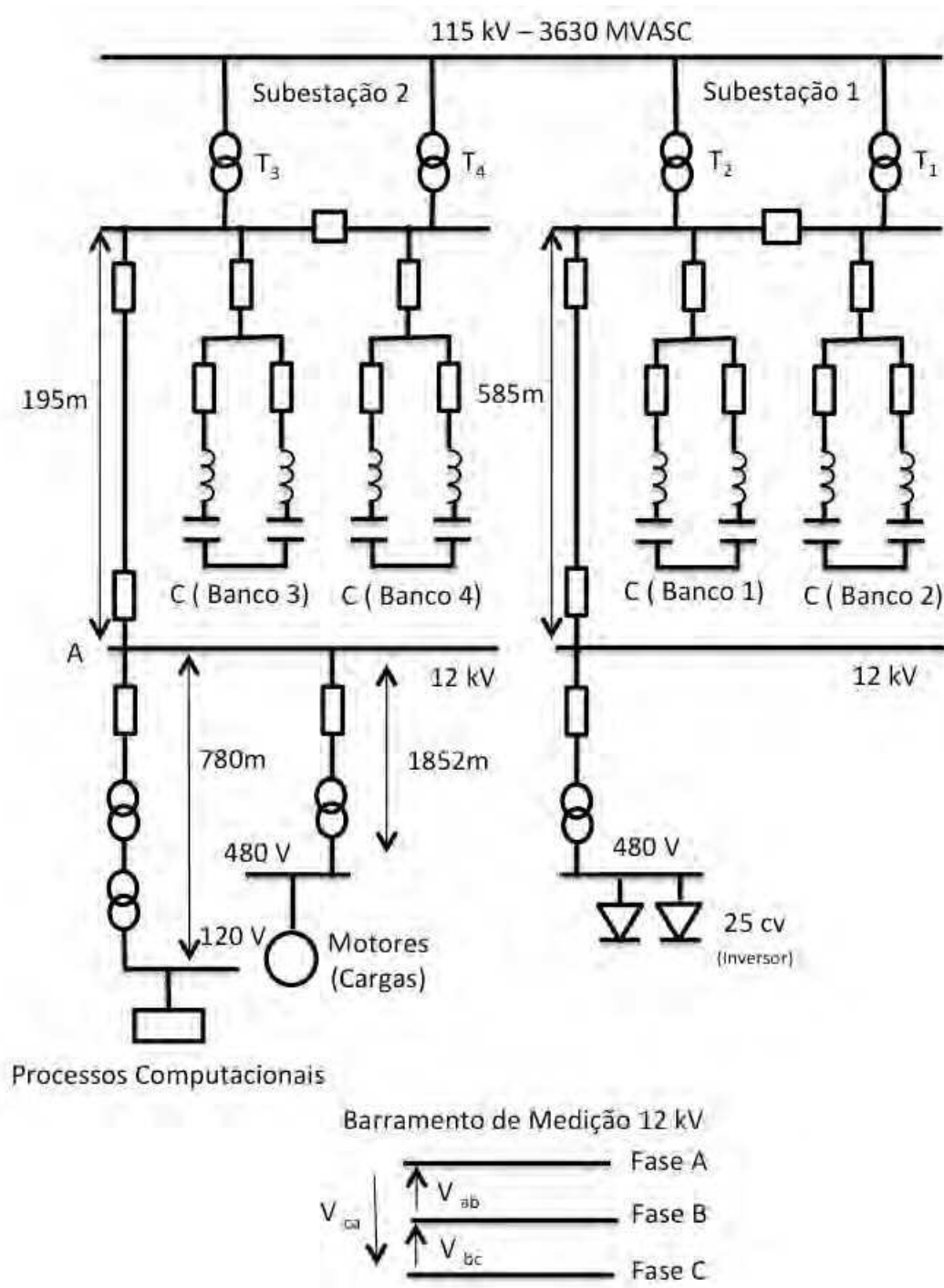


Figura 2.7: Diagrama esquemático do circuito simulado por Karimi. Fonte: Adaptado de (KARIMI et al., 2000)

Os parâmetros da Figura 2.7 são: Fonte - 115 kV, 3630 MVA_{SC} , 60 Hz; Transformador T1 e T2 - 27 MVA, 115 kV/12 kV, 60 Hz; Indutância de dispersão(T1 e T2) 11,6 %; Transformador T3 e T4 – 37,5 MVA, 115 kV/12 kV, 60 Hz; Indutância de dispersão (T3

e T4) – 12,8 %; Bancos de capacitores – 4,8 MVA; Cabos - 0,2 $\mu\text{H}/\text{ft.}$; Frequência de amostragem: 8333 Hz.

Como resultados da simulação usando Electro Magnetic Transient Design and Control (*EMTDC*) tem-se que 44% são detectados até a amostra 3 (0,24 ms), 20% são detectados entre amostra 3 e amostra 7, 34% detectados entre amostra 7 e amostra 15 e os demais 2% são detectados após 27. Além disso a probabilidade de erro nas simulações indica que uma a cada 217.000 faltas no sistema pode não ser detectada pela lógica. Ainda, um em cada 333 chaveamentos, em média, de bancos capacitores pode ser confundido com uma falta.

Em 2002 Mokhtari et.al. (MOKHTARI et al., 2002) realizaram teste experimentais, em modelo de escala de potência reduzida e compararam o mesmo com uma técnica convencional conhecida como transformação de Clark de tensão em um sistema síncrono rotativo (abc - dq0). O diagrama unifilar do circuito implementado é apresentado na Figura 2.8.

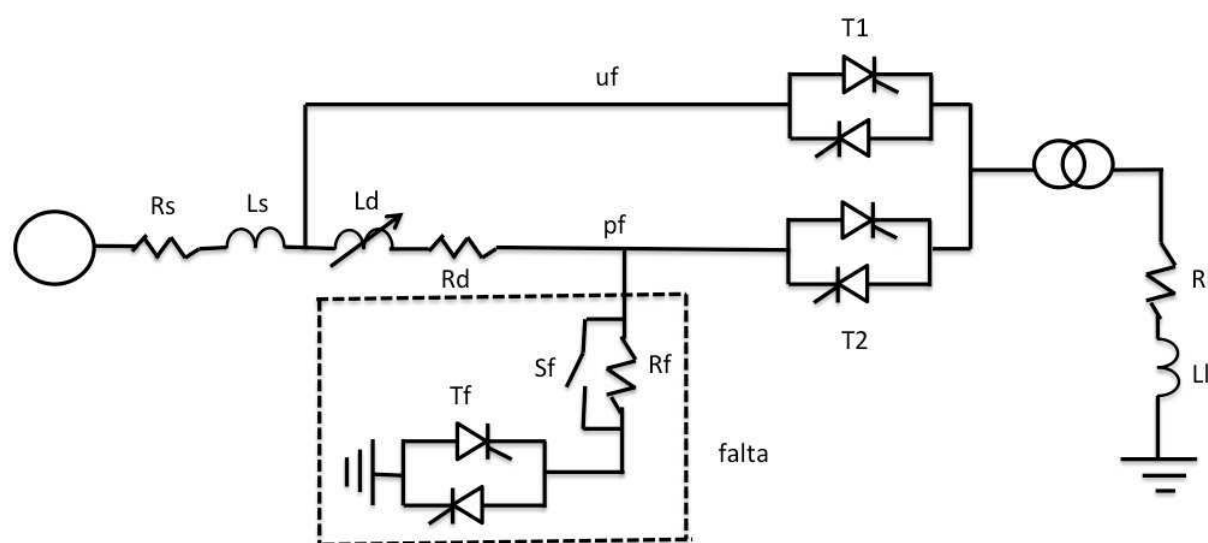


Figura 2.8: Diagrama unifilar do esquema implementado em Mokhtari et al. Fonte: Adaptado de (MOKHTARI et al., 2002)

Além da detecção da falta é realizada a transferência de carga para uma fonte alternativa. O controle é realizado através de uma placa de desenvolvimento baseada em Digital Signal Processor (*DSP*) modelo UHP40 (o DSP deste kit é um TMS320C40 de ponto flutuante da Texas Instruments). Tensões e correntes de linha são amostradas em 5882 Hz e 6660 Hz para a técnica baseada em wavelet e a técnica convencional, respectivamente.

Para este circuito experimental foram realizados estudos de três casos específicos: 1)Três

fases sobre distúrbio de tensão, 2) Falta entre uma fase e o terra e 3) Falta entre fases. Os resultados destes testes são apresentados nas Tabela 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1: Resultados dos testes experimentais do circuito apresentado na Figura 2.8)

Caso #	Tempo de Detecção(ms)	Tempo de Transferência(ms)	Tempo Total de Transferência de Carga(ms)
1	0,68	1,53	2,21
2	3,06	Não disponível	3,06
3	0,68	Não disponível	0,68

Fonte: (MOKHTARI et al., 2002)

Tabela 2.2: Resultados dos testes experimentais do circuito apresentado na Figura 2.8 quando utilizada a Técnica Convencional (abc - dq)

Caso #	Tempo de Detecção(ms)	Tempo de Transferência(ms)	Tempo Total de Transferência de Carga(ms)
1	1,65	3,3	4,95
2	4,65	Não disponível	4,65
3	4,40	3,60	8,00

Fonte: (MOKHTARI et al., 2002)

Tem-se que no caso 1 o método baseado em wavelet reduziu o tempo de detecção em 59% e o tempo de transferência de carga em 54% determinando um total de transferência de carga 55% menor. Para o caso 2 tanto o tempo de detecção quanto o de transferência de carga foram reduzidos em 34% no método baseado em wavelet. E ainda como resultados do caso 3 o método wavelet reduziu o tempo de detecção e o de transferência de carga em 85% e 91%, respectivamente.

Já em Bingyin, et al. (BINGYIN et al., 2001), um método pra detecção de faltas baseados na análise da sequência zero é apresentado, inclusive com modelagem para sistemas que não possuem aterramento adequado. Esta técnica, devido à grande quantidade de informação a ser armazenada, consegue detectar faltas apenas com intervalos maiores que 5 minutos entre si. Foi necessário mais de um ciclo de dados amostrados para detecção de faltas, aplicando-se a metodologia apresentada, bem como outros presentes na literatura. A análise se baseou em conjunto de dados coletados entre os anos de 1999 e 2000.

Em 2002, Lin et. al. (LIN et al., 2002) propuseram um novo tipo de localizador de faltas para sistemas de transmissão de energia em três fios através de Unidade de Medição

Fasorial - Phasor Measurement Unit (*PMU*). A técnica baseada em PMU foi concebida inicialmente no *Virginia Polytechnic Institute*, em 1991. Esta técnica permite medir grandezas fasoriais a partir de amostras sincronizadas por sinal de Sistema de Posicionamento Global (*GPS*). Os cálculos de fasores são executados por meio da Discrete Fourier Transform (*DFT*). As grandezas fasoriais medidas atendendo a norma Institute of Electrical and Electronics Engineers (*IEEE*) 1344⁴, são enviadas continuamente para um concentrador de dados a uma taxa de 60 Hz. A inovação desta proposta se deve ao fato de que os autores realizam a medição em apenas dois terminais ao contrário dos demais autores. Na figura 2.9 apresenta-se a configuração do sistema localizador de falta proposto.

Segundo Wiot (WIOT, 2004), a técnica denominada monitoramento de transitórios (do inglês Transient monitoring (*TM*)) é muito importante no projeto e desenvolvimento de dispositivos de proteção digitais. Além disso, um filtro preditivo ideal para monitoramento de transitórios deve decompor o sinal perfeitamente, deixando apenas o ruído branco ⁵ (do inglês *signal whitening*). Baseado nesta afirmação uma nova técnica adaptativa para TM em tempo real foi proposta. Além disso, são apresentadas as técnicas tradicionais baseadas em Filtros Clássicos de Fourier e comparadas com o método proposto denominado de Filtro de Fourier Corrigido. Segundo os resultados apresentados o método elimina de forma eficiente sinais na faixa de 20 à 200 Hz e ainda é estável na presença de ruídos brancos.

Em 2002 Sheng e Rovnyak (SHENG e ROVNYAK, 2002) propuseram um método de detecção de FAI baseado em Árvore de Decisão (do inglês Decision Trees (*DT*)). As características das FAI, que foram utilizadas como entradas da DT são características conhecidas na literatura, as quais: Correntes RMS, magnitudes do segundo, terceiro e quinto harmônicos, e a fase da terceira harmônica. A vantagem deste método é a frequência de amostragem reduzida em comparação com outros métodos (1920 Hz) reduzindo o custo do *hardware* envolvido. O diagrama Unifilar do sistema de 60 Hz simulado é apresentado na Figura 2.10. Quatro alimentadores aéreos são conectados a uma subestação transformadora de 138 kV/12,5 kV que é alimentada por uma linha de transmissão de 50 km em um barramento considerado infinito. O autor assume ainda que as faltas ocorreram próximas do final, cerca de 5 km onde o alimentador fornece energia a um consumidor industrial. Este

⁴IEEE Std 1344-1995 IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.

⁵O adjetivo branco é utilizado para descrever este tipo de ruído em analogia ao funcionamento da luz branca, dado que esta é obtida por meio da combinação simultânea de todas as frequências cromáticas.

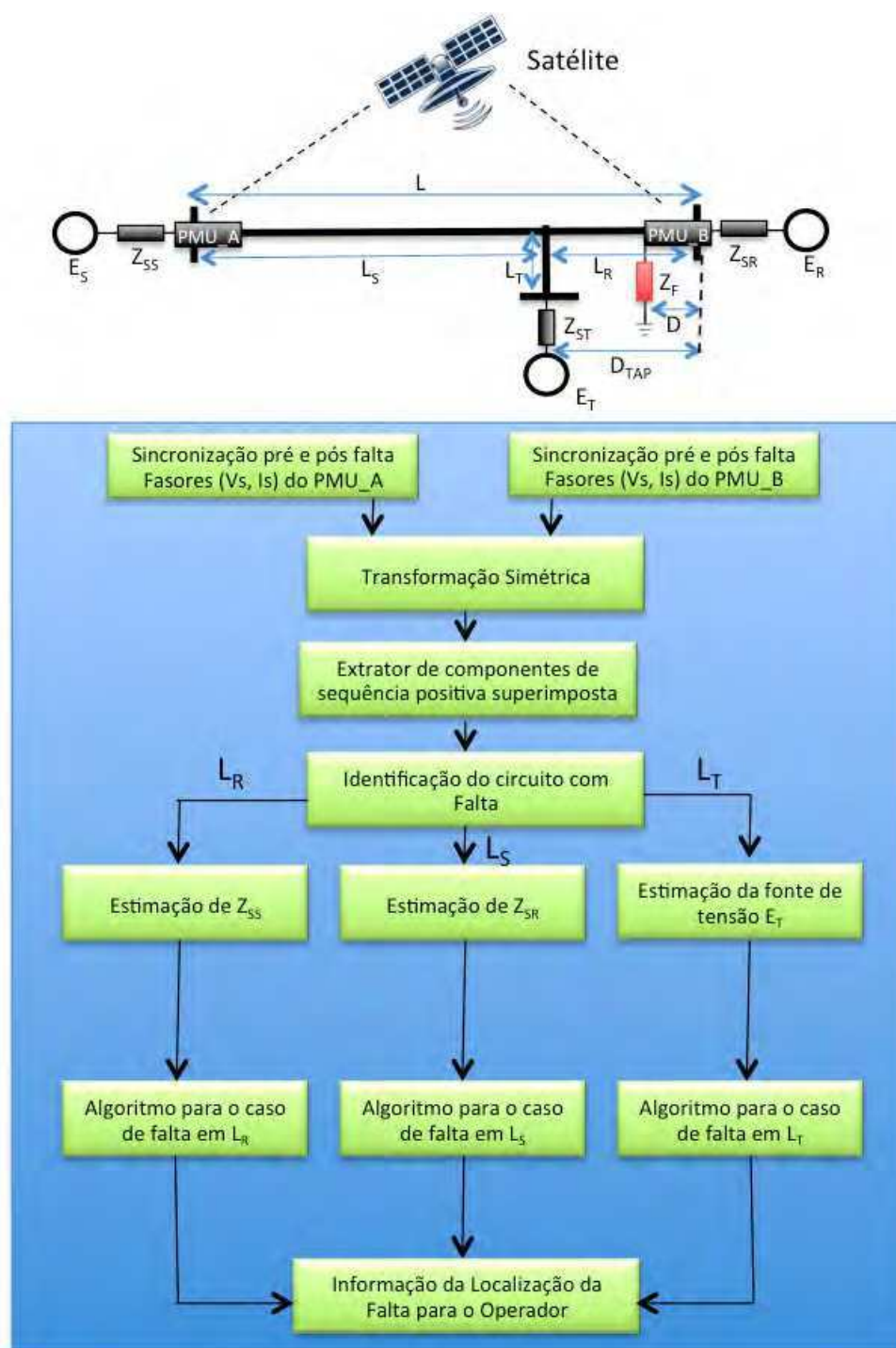


Figura 2.9: Configuração do sistema localizador de falta proposto em Lin et al.
Fonte: Adaptado de (LIN et al., 2002)

possui um transformador de carga e 1800 kVAR de capacitores *shunt*. A carga possui ainda um fator de potência de 0,8 (vide Figura 2.10).

O resultado do método apresentado através de simulações no EMTP é excelente e ainda pode ser incrementado com a utilização combinada de wavelets de forma similar ao que foi

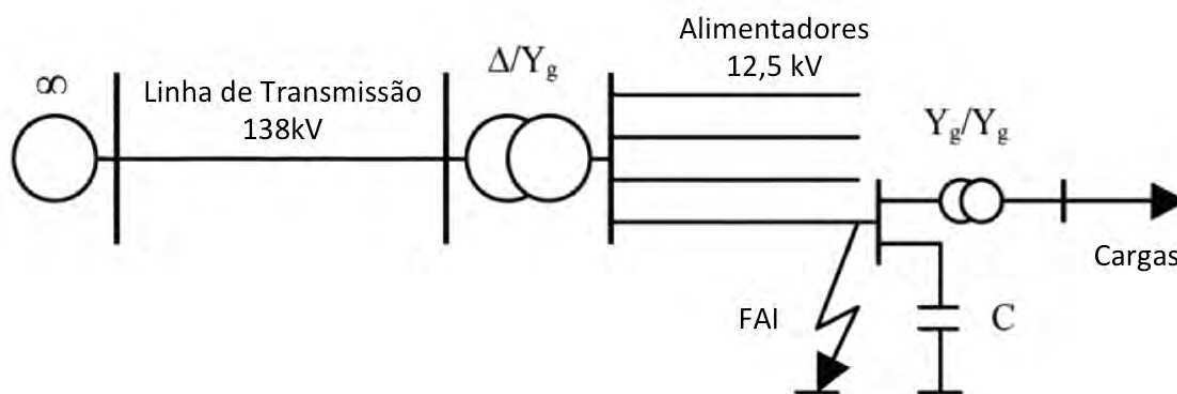


Figura 2.10: Diagrama unifilar do esquema implementado em Mokhtari et al. Fonte: Adaptado de (SHENG e ROVNYAK, 2002)

proposto para proteção de transformadores em (SHENG e ROVNYAK, 2002).

Em 2005 Darwish et. al. (DARWISH et al., 2005) propuseram um novo conceito para detecção de faltas de alta impedância em linhas de transmissão. Neste conceito as quantidades médias das potência ativa e reativa por fase, que entram e deixam a linha, são comparadas conforme Figura 2.11.



Figura 2.11: Sistema baseado no conceito de potência diferencial. Fonte: Adaptado de (DARWISH et al., 2005)

O sistema proposto foi simulado e se aplica, por enquanto, apenas a linhas de transmissão. Segundo os autores ele permite observar faltas, de 0Ω até 400Ω .

Outro problema, quando se monitora um sistema a partir de uma subestação, é o de se diferenciar correntes *inrush*⁶ de correntes de falta. Este tema é abordado em Baran e Kim (BARAN e KIM, 2006) que demonstram através de dados que não é trivial fazer esta distinção. Assim, foi proposto um classificador baseado em redes neurais que permite através de dados obtidos por FFT ou transformada wavelets detectar uma falta. Os testes de ambos

⁶Corrente transitória que surge principalmente em função da magnetização de transformadores.

os classificadores, baseado em transformada rápida de Fourier e baseado em transformada wavelet apresentaram bons resultados. No entanto o desempenho do classificador baseado na wavelet é superior.

Em 2007 Zamora et. al. (ZAMORA et al., 2007) afirmaram que a maioria das técnicas desenvolvidas até o momento só conseguem ser aplicadas sob certas condições e em sistemas de distribuição predefinidos. Assim, é proposta uma nova técnica para detecção de faltas de baixa corrente em sistemas de distribuição radial, baseada na superposição dos sinais de tensão de frequência superior a nominal. Segundo os autores, uma falta monofásica altera os parâmetros e as amplitudes dos sinais em regime permanente de uma rede. A admitância fase-terra de uma fase sob o efeito de uma falta se altera e incrementa a assimetria de um alimentador.

A metodologia proposta é que, em vez de se injetar uma corrente através do neutro aterrado, uma tensão de certa frequência é sobreposta no barramento. Assim, é possível monitorar os sinais de falta que diferem do sinal principal, normalmente 50/60Hz. Desta forma, este método trabalha independente do funcionamento do sistema principal e não afeta o funcionamento das cargas. É possível através deste método monitorar faltas com resistências até um limite de 15 k Ω .

Em Dwivedi et al. em 2008 (DWIVELDI et al., 2008), é proposto um método de localização de falta de alta impedância utilizando o terceiro nível, obtidos através da Wavelet mãe Daubechies 4 dos sinais de corrente das três fases. Esse nível é proposto em função da banda de frequência estar definido entre 60 e 200 Hz. Dessa forma, há uma redução dos ruídos de alta frequência e, nessa banda, estão os harmônicos de segunda e terceira ordem que são predominantes em situações de faltas. Nesse trabalho, os autores propõe a somatória dos coeficientes de terceira ordem da corrente de cada fase conforme mostrado a seguir, onde é indicada a quantidade de amostras.

$$T_{a,b,c} = \sum_{k=1}^N d_3(k) \quad (2.1)$$

Comparado com uma tabela existente para o tipo de falta e para cada linha do sistema elétrico. Dessa forma, a linha onde a menor diferença foi verificada é considerada como local da falta. O nível de acerto foi alto, apenas para faltas com impedância de 200 Ω na última

secção do sistema proposto é que o método não foi efetivo.

O correto modelamento da falta de alta impedância é complexo uma vez que possui inúmeras interferências, desde características específicas de solo ou ainda composições de asfalto, bem como características específicas do ambiente. Neste sentido, em 2010, Santos et. al. (SANTOS et al., 2010) apresentam a composição de um banco de dados de características de faltas, com objetivo de propor um modelo mais adequado a simulação deste tipo de falta. Para além do tipo de solo (pedra triturada, grama, solo local, pavimento e areia), foram consideradas as características de carregamento do sistema nas proporções de 25, 50, 75 e 100%. Além disso também foi considerado o ângulo de incidência do cabo no solo. O modelo proposto foi baseado no modelo apresentado na Figura 2.12. Desta forma, foram realizados testes, para todas as condições descritas acima, em um sistema de 13,8kV da Energisa. Ainda como contribuição deste trabalho e principalmente em Souza et. al. (SOUZA et al., 2010), são discutidas as limitações da oscilografia. Neste último trabalho, é realizada a análise da oscilografia instalada onde o caso da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) é apresentado. Fica evidente que além da diversidade de dispositivos instalados em um sistema deste tipo, a análise fica comprometida seja por limitações das bandas de comunicação, seja por limitação nos dispositivos de aquisição.

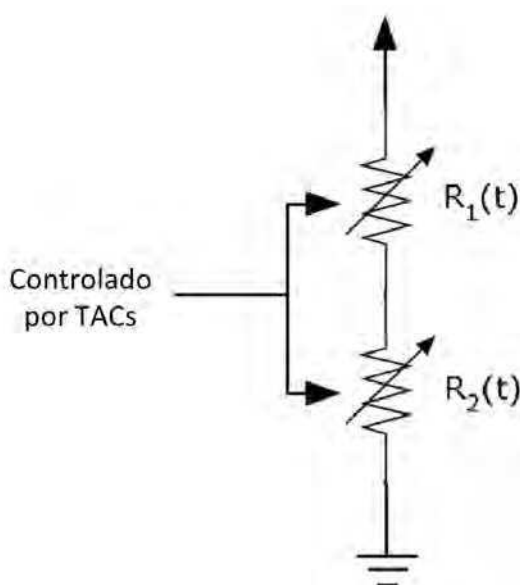


Figura 2.12: Modelo adotado por Santos et. al. para desenvolvimento do banco de dados de faltas. Fonte: Adaptado de (SANTOS et al., 2010)

A correta distinção dos sinais de falta em relação aos sinais provenientes de eventos normais do sistema é foco do estudo de Öhrström e Söder (ÖHRSTRÖM e SÖDER, 2011).

Para fazer esta classificação eles utilizam limites pré programados de corrente, e ainda um PLL (phase-locked loop). Este PLL é utilizado para realizar a discriminação dos sinais de falta dos casos de chaveamento de cargas, e permite, nos casos estudados, a classificação dos sinais reais de falta.

Em 2012 Ali et al. (ALI et al., 2012), propuseram um método de localização de faltas de alta impedância em um sistema de distribuição radial utilizando a transformada wavelet. O método proposto toma como base os sinais, obtidos através da Wavelet mãe Daubechies 4 de primeira, segunda e terceira escala do sinal de tensão medido no barramento da subestação. Esses dados são calculados para as três fases utilizando dois ciclos pós-evento. Dessa forma, são obtidos 18 valores para cada nó. Para análise da proposta, um sistema de distribuição de 38 nós é modelado e são simuladas as faltas com impedâncias de 60, 70, 80, 90 e 100 ohms por dois ciclos. Com esses dados, um coeficiente médio entre dois nós é proposto conforme abaixo:

$$Av = \frac{(\sum d_i + \sum d_j)}{2} \quad (2.2)$$

Dessa forma, são gerados cinco bancos de dados, um para cada impedância de falta simulada, onde para cada item, há dezoito dados referentes a média calculada dos sinais de primeira, segunda e terceira ordem de cada fase de cada um dos dois ciclos considerados. Baseado nesse banco de dados, quando houver a detecção de uma falta de alta impedância, o algoritmo proposto, através da Transformada Wavelet do sinal, calcula os sinais de primeira, segunda e terceira ordem da onda de tensão de cada fase em dois ciclos. Dessa forma, é calculada a média da diferença absoluta destes para cada um dos elementos de cada banco de dados. A partir desses dados, é criado um ranking, indicando desde a secção com menor diferença encontrada, até a de maior diferença. Nos resultados apresentados, os autores mostram que a secção em falta estava sempre entre as duas melhores colocadas no ranking.

Em 2013, Pasdar et al. (PASDAR e HUSAIN, 2013) propuseram um método on-line para detecção e localização de um nó defeituoso em redes elétricas de distribuição inteligentes. O método baseia-se na injeção de alta frequência (na faixa de 9 kHz até 95 kHz referente a Banda A da CENELEC) impondo uma tensão (inferior a 1 V de acordo com a norma EN50065-1). Neste sentido, a ideia é determinar as alterações das características de

impedância em cada um destes nós. Esta técnica foi testada com diferentes cenários de faltas e nestes a técnica proposta é capaz de detectar as faltas com alta precisão. No entanto, o sistema utiliza cada um dos transformadores como nós de medição, se caracterizando como um processo bastante oneroso e de difícil implementação nos sistemas atuais.

Ainda neste ano, Silva et al. (SILVA et al., 2013), utiliza a transformada wavelets combinada a redes neurais artificiais para estimar a localização de faltas de alta impedância. Neste caso foram simulados diversos tipos de solos, em um sistema típico de distribuição de energia brasileiro. Para estes casos, foram utilizados os resultados e a modelagem obtida por este mesmo grupo de pesquisadores em 2010, no trabalho (SANTOS et al., 2010). Neste novo trabalho, utilizando uma wavelet mãe do tipo Daubechies 48 (db48), foi obtido 93% de sucesso na localização das faltas para os casos estudados.

Um método para detectar faltas de alta impedância baseado na identificação de transitórios utilizando redes neurais artificiais, foi proposto por Farias et al. (FARIAS e L., 2014). Foi utilizada uma rede neural para tentar identificar faltas de alta impedância no sistema de distribuição e diferenciá-las de transitórios tradicionais do sistema. Apesar de parecerem promissoras algumas considerações do artigo, os resultados ainda são superficiais.

Com a implementação e desenvolvimento das redes inteligentes em 2014, Masa et. al. (MASA et al., 2014) apresentaram um estudo das limitações dos atuais sistemas de proteção em face as faltas que possam ocorrer. Para realização deste estudo é necessário um amplo conhecimento das principais características de faltas e também dos sistemas de proteção atuais além do conhecimento dos sistemas de proteção mais obsoletos ainda em funcionamento. Ou seja, as características de falta são randômicas, o que explica parcialmente porque algumas técnicas têm bom desempenho em determinados cenários e não funcionam em outros. Eles demostram ainda, assim como muitos trabalhos que estão sendo realizados, que a composição e a seleção de um conjunto de técnicas é necessário para permitir com mais clareza a distinção de um estado de falta.

Milioudis et. al. (MILIOUDIS et al., 2015) , já haviam pesquisado sobre a detecção de faltas de alta impedância em sistemas primários de distribuição utilizando os sinais de power line communications (PLC) como um sinal ativo para a verificação de impedâncias da rede. Neste novo trabalho eles estendem o estudo para a aplicação em sistemas de

distribuição secundária. Basicamente, em conjunto com o emissor dos sinais PLC, é acoplado um circuito de monitoramento que permanece continuamente monitorando a impedância específica nestas frequências. O ponto de acoplamento do sinal PLC entre a média e a baixa tensão é o escolhido para este estudo, desta forma apenas os sinais que são transferidos pelo acoplamento do mesmo podem ser monitorados. Neste caso, os cálculos são efetivamente parecidos com os já apresentados por Zamora et. al. (ZAMORA et al., 2007), uma vez que necessita do conhecimento e cálculo das impedâncias do sistema em seu funcionamento normal, calculadas anteriormente a falta. A vantagem neste caso, em função do sinal ser monitorado no lado primário do circuito de distribuição, é que apenas uma das fases precisa ser monitorada para que se detecte uma falta em qualquer outra fase.

Em 2015 Costa et. al. (COSTA et al., 2015), propuseram uma nova técnica para detecção de FAI baseadas nos limites da transformada wavelets. Nesta técnica é avaliado o coeficiente de energia wavelet, a partir dos valores destes coeficientes em regime permanente. No trabalho, existe uma clara preocupação com os eventos do sistema, bem como da distinção de diversos tipos de de FAI. Foram obtidos bons resultados em FAI de longa duração que produziram arcos elétricos. Foram testadas falhas em superfícies secas e úmidas. Neste caso é necessária uma taxa de amostragem superior, apesar do baixo peso computacional. Este método apresentou um desempenho superior aos demais que utilizam a transformada wavelet tradicional em função do aumento significativo de energia no instante de falta. A metodologia ainda foi desenvolvida para operar em conjunto com a proteção de faltas tradicionais. Em faltas que não houve a geração de arco a técnica não percebe esta condição.

A preocupação da influência e do comportamento de FAI em sistemas de distribuição com geração distribuída (GD) surge em 2016 em alguns trabalhos como por exemplo em Nayak et. al. (NAYAK et al., 2016). Este, apresentou uma metodologia simples e com diversas limitações, pois utiliza uma técnica bastante convencional e a muito já condenada, a simplicidade do circuito de testes utilizado garante um desempenho razoável. Mesmo assim, a preocupação sobre este novo cenário com sistemas de redes inteligentes deve balisar os futuros estudos nesta área.

Nos últimos anos também tem surgido um maior número de métodos propondo a Lógica Fuzzy como uma alternativa para auxiliar na detecção de FAI. No trabalho apresentado por Toneli Neto et. al. (TONELLI-NETO et al., 2017) é realizado, a comparação de duas

técnicas baseadas em lógica fuzzy com vistas a analisar seu desempenho. No entanto a lógica fuzzy é apenas mais uma ferramenta para auxiliar na correta classificação e novamente, neste trabalho, esta implementação ocorre no sentido de se tentar diagnosticar claramente situações de faltas de eventos normais do sistema.

Santos et. al. (SANTOS et al., 2017) em 2017, apresentou um estudo e proposta de um algoritmo, baseado em análise transitória, para detecção de FAI. Neste artigo afirma-se que apesar de ter tido uma redução no número de acidentes em sistema de distribuição no Brasil nos anos de 2001 a 2014, de 1046 para 777 respectivamente, resultando numa redução do número de mortes de 381 para 299, este tipo de acidente ainda é preocupante. As FAI são a terceira maior causa de mortes tendo ocorrido em 2013, 30 e em 2014, 53 óbitos desta natureza. A técnica proposta neste trabalho analisa componentes de alta e baixa frequência inseridos no sistema em função da situação de faltas. Novamente existe uma clara preocupação com eventos do sistema e sua correta distinção dos eventos de faltas. O desempenho do método atendeu a 70% dos casos estudados de forma confiável.

Baseado na avaliação dos métodos de detecção de FAI identificados na literatura é possível propor uma classificação dos mesmos em dois grandes grupos: Técnicas de detecção de faltas por assinatura de faltas (passivas) e Técnicas de detecção de faltas por sobreposição de sinais (ativas). A seguir resumem-se as técnicas de detecção avaliadas e as ferramentas utilizadas.

Técnicas de Detecção de Faltas:

- variações de energia em uma determinada frequência de banda ((CALHOUN et al., 1982), (AUCCOIN e RUSSELL, 1982));
- espectro de baixa frequência da corrente ((AUCCOIN, 1985), (RUSSELL et al., 1988) e (KIM e RUSSELL, 1989));
- variância incremental das harmônicas de potência de ordem par (KWON et al., 1991);
- corrente RMS e determinadas harmônicas (ATWELL et al., 1990);
- sequência não características nas harmônicas de corrente ((HANNAH, 1998), (XIANG-JUN et al., 2001) e (BINGYIN et al., 2001));
- unidade de medição fasorial - PMU (*Phasor Measurement Unit*) (LI e REDFEM, 2001);

- monitoramento de transitórios (WIOT, 2004);
- superposição dos sinais de tensão de uma certa frequência (ZAMORA et al., 2007);
- distúrbios no espectro de frequência da corrente de neutro ⁷ ;

Não classificadas

- Árvores de decisão ((SHENG e ROVNYAK, 2004) e (SHENG e ROVNYAK, 2002));
- Ondas viajantes;

Ferramentas de detecção de Faltas:

- FFT;
- Transformada de Fourier de Janela
- Fractal;
- Redes Neurais Artificiais;
- Filtro de Kalman;
- Transformada de Wavelet;
- Lógica Fuzzy

2.1 Considerações sobre a Revisão Bibliográfica

Como pode-se perceber, a preocupação com as FAI remete ao início da história dos sistemas de distribuição de energia. Os primeiros relatos da preocupação com o tema surgem ainda na década de 40 do século passado, mas, é apenas nos anos 80 que são realmente propostas alternativas para detecção deste tipo de faltas. As técnicas do final dos anos 80 e início dos anos 90 buscavam na sua maioria, perceber variações no espectro harmônico

⁷Detection of Arcing Faults on Distribution Feeders”, EPRI Report EL-2757, Prepared by Texas A & M University, December 1982.

de baixa ordem dos sistemas de distribuição. Algumas destas técnicas, inclusive, acabaram sendo implementadas em relés comerciais no início dos anos 2000, no entanto, todas demonstraram um conjunto de fragilidades e normalmente confundiam eventos operacionais do sistema com condições de FAI. Ainda na década de 90 surgem as técnicas baseadas em redes neurais artificiais seguida da transformada wavelets. Métodos de detecção utilizando essas técnicas continuam sendo propostos até a atualidade. Ao longo de todos estes anos uma preocupação é recorrente, a maioria das técnicas e metodologias propostas em muitos casos, acabam detectando corretamente situações de FAI. No entanto, eles acabam confundido-se com os eventos normais do sistema e geram falsos positivos em situações por exemplo da energização de um banco de capacitores e ainda, a energização de transformadores.

Como pode-se perceber ainda nesta revisão bibliográfica, muitas vezes o cenário estudado para uma determinada técnica é simples, o que acaba produzindo bons resultados. Contudo, os sistemas de distribuição de energia elétrica são sistemas complexos assim surgem dúvidas do correto funcionamento destas técnicas nestas situações.

Por fim, todas as técnicas submetidas aos cenários originais, funcionam adequadamente. No entanto os cenários são muito distintos entre si o que não permite uma comparação de desempenho entre as técnicas propostas na literatura. Este trabalho inicia com a definição de um cenário e, a partir dele, o estudo de um conjunto de técnicas submetidas a alguns casos, para que seja possível uma comparação justa das mesmas.

3

Modelagem do Sistema de Distribuição de Energia e Métodos de Detecção de FAI

Neste capítulo é discutida a estrutura de um sistema de detecção de faltas de alta impedância. É apresentada a modelagem do sistema de distribuição de energia elétrica utilizado para as simulações das técnicas estudadas e propostas neste trabalho e apresentados os parâmetros de simulação. Conforme observado no Capítulo II, existem diversas técnicas propostas para a detecção de faltas de alta impedância na literatura. Também neste capítulo, um conjunto de técnicas foi detalhado. Isto permite, que no capítulo seguinte seja realizado um conjunto de comparações em condições semelhantes permitindo uma análise das potencialidades e fragilidades de cada uma das técnicas estudadas.

3.1 Modelo de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Historicamente, os sistemas de distribuição primários, projetados e instalados no Brasil, são radiais. O sistema radial é aquele no qual a alimentação é feita apenas por uma

extremidade, ou seja, o fluxo de potência segue da fonte para as cargas diretamente. Conceitualmente existem dois tipos. Os sistemas radiais simples são utilizados em áreas de baixa densidade de carga, nas quais os circuitos tomam direções distintas. A principal desvantagem é que demanda maior tempo para que o fornecimento seja restabelecido quando há um defeito pois neste caso, o circuito todo fica desligado ou pelo menos o trecho além do ponto de falta.

Esta configuração, facilita a operação de sistemas principalmente referente à seletividade e coordenação dos equipamentos de proteção, isolando o local onde ocorreu o problema. A desvantagem de tal sistema é que, todas as cargas que estiverem à jusante de tal problema, que não possuem caminho alternativo de alimentação, ficarão, durante o período de manutenção e restabelecimento, sem energia. Isto impacta diretamente nos índices de qualidade como, por exemplo, Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (*DIC*) e Frequência Individual de Interrupção por Unidade Consumidora (*FIC*) ou Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (*DEC*) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (*FEC*) os quais são fiscalizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (*ANEEL*) e podem gerar multas quando ultrapassados os limites estabelecidos pelas normas vigentes.



Figura 3.1: Componentes principais do sistema elétrico de potência característico.
Fonte: Do Autor

A Figura 3.1 mostra os componentes principais do Sistema Elétrico de Potência (SEP) característico brasileiro. Os sistemas radiais são utilizados em áreas que demandam maior densidade de carga ou requeiram maior grau de confiabilidade. Este sistema caracteriza-se pela existência de interligações normalmente abertas, entre alimentadores adjacentes da

mesma ou de subestações diferentes. Este sistema ainda, pode ser projetado de forma que exista certa reserva de capacidade em cada circuito, para a absorção de carga de outro circuito na eventualidade de defeito. E ainda, desta forma ele limita o número de clientes interrompidos por defeitos e diminui o tempo de interrupção em relação ao sistema radial simples.

Em Zamora et al. (ZAMORA et al., 2007) é apresentada a modelagem de um sistema de distribuição de energia elétrica, localizado em Basque na Espanha. Este sistema é composto por uma rede de média tensão, constituída por uma subestação e cinco alimentadores de distribuição com topologia radial.

O sistema apresentado naquele trabalho possui:

- Um transformador delta-estrela com neutro com relação de transformação de 30 kV /13,8 kV e 12 MVA.
- Cinco alimentadores que somados apresentam 35,7 km de cabos aéreos e 8,9 km de cabos subterrâneos.
- O sistema alimenta um conjunto de 98 cargas.

O modelo simplificado de um sistema de distribuição de energia elétrica é apresentado na Figura 3.2. Para este modelo, apresentou-se os resultados observados na Tabela 3.1.

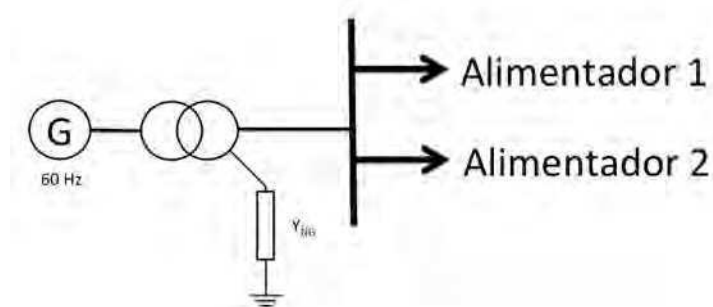


Figura 3.2: Modelo Simplificado de um Sistema de Distribuição. Fonte: Adaptado de (ZAMORA et al., 2007)

Na Figura 3.3 é apresentado o modelo completo do sistema de distribuição simulado. Em seguida na Figura 3.4 é apresentado este circuito no MATLAB/SIMULINK, simulado para este trabalho.

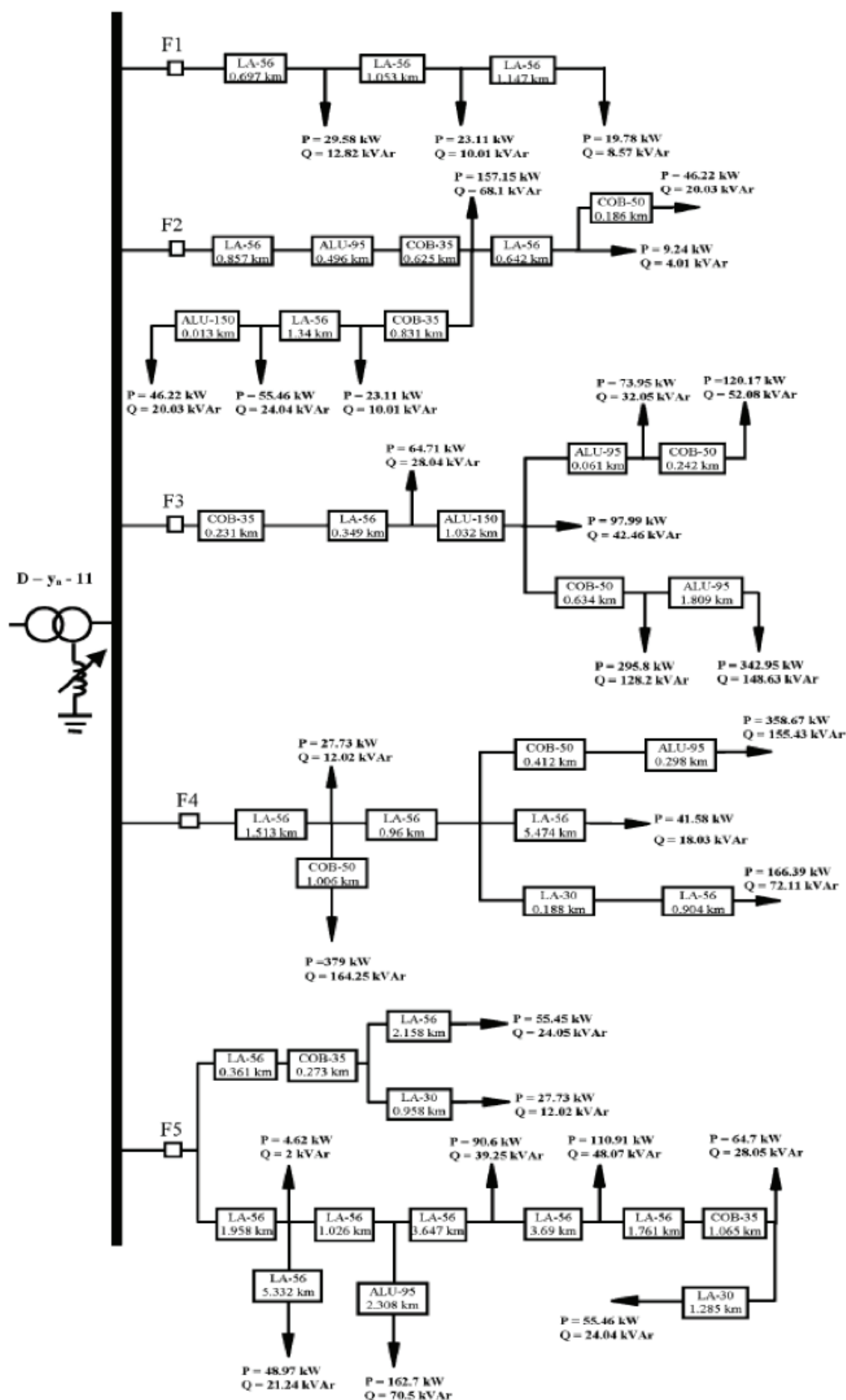


Figura 3.3: Modelo de um sistema de distribuição apresentado por Zamora.
Fonte: (ZAMORA et al., 2007)

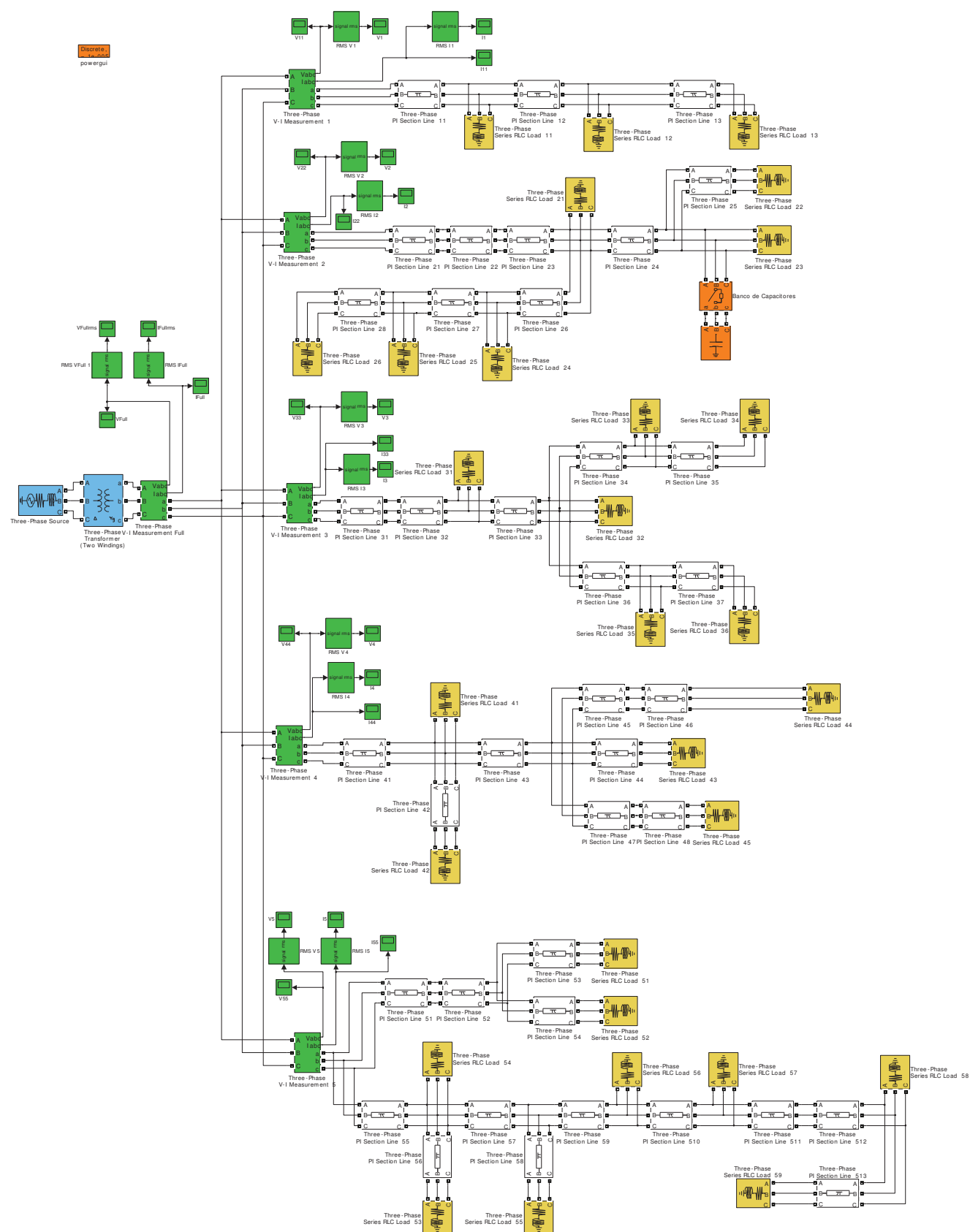


Figura 3.4: Sistema apresentado por (ZAMORA et al., 2007) simulado no MATLAB. Fonte: Do Autor

Este modelo foi validado no ATP e também no Matlab/Simulink. A tabela 3.1 apresenta os resultados obtidos, tanto nas medições realizadas, como nas simulações utilizando o MATLAB.

Tabela 3.1: Dados comparativos do Sistema Real versus Simulado.

Alimentador	Tensão de Linha (kV)	Corrente (A)		Potência Ativa (kW)	
		Real	Simulada	Real	Simulada
1	13,73	3,30	3,29	72	72,52
2	13,73	15,42	15,29	338	337,69
3	13,73	45,47	45,02	998	997,21
4	13,73	44,66	44,33	978	975,71
5	13,73	28,49	27,89	626	623,96

Fonte: Adaptado de (ZAMORA et al., 2007)

Na Figura 3.5 são apresentadas as tensões em regime permanente do sistema da Figura 3.4 simulado no MATLAB/SIMULINK. As tensões em regime permanente convergem para os valores tradicionais de um sistema real. A utilização de um sistema deste porte para análise de faltas de alta impedância visa permitir que as técnicas estudadas possam ser comparadas em condições similares.

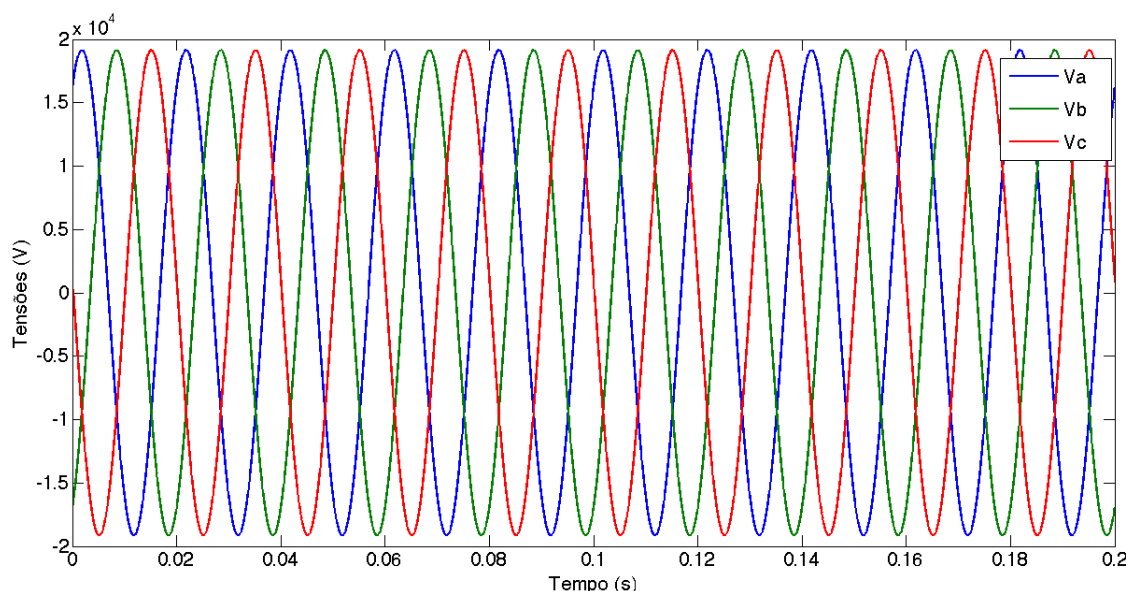


Figura 3.5: Tensões em Regime do sistema simulado apresentado na Figura 3.4

Fonte: Do Autor

As especificações de simulação foram mantidas exatamente como as originais. No caso das informações que não constavam no artigo original como por exemplo resistência de

saturação do transformador, foram utilizados parâmetros de fornecedores de equipamentos padrão para este tipo de operação. Todos os parâmetros de simulação estão detalhados no apêndice A.

3.2 Modelo do Sistema de Distribuição de Ijuí

Nesta seção é apresentado um sistema de distribuição de energia elétrica urbano e brasileiro, disponibilizado pelo Departamento de Energia Municipal de Ijuí (DEMEI). Este modelo permite um segundo cenário de testes para o método proposto por Zamora (ZAMORA et al., 2007), e das adaptações propostas neste trabalho para aquele método. Ijuí é um município do interior do Rio Grande do Sul, mais precisamente no noroeste do estado. O município possui cerca de 80 mil habitantes e cerca de 30 mil consumidores urbanos, se caracterizando como uma cidade de pequeno porte. O sistema apresenta a rede primária com tensão nominal de 23,1 kV. A rede de distribuição secundária opera com níveis de tensão de 220 V / 380 V.

A tabela 3.2 mostra os níveis de tensão usuais das 3 componentes principais do SEP.

Tabela 3.2: Níveis de tensão das etapas do SEP.

COMPONENTE		TENSÃO (kV)
GERAÇÃO		2,2 a 22 (13,8)
TRANSMISSÃO	TRANSMISSÃO	138 a 1000 (138 – 230 -500)
	SUBTRANSMISSÃO	22 a 138 (34,5 - 69 – 138)
DISTRIBUIÇÃO	DIST. PRIMÁRIA	3,8 a 25 (8,9 - 13,8 - 23,1)
	DIST. SECUNDÁRIA	0,110 a 0,440 (0,127 a 0,220)

Na Figura 3.6 é apresentado o diagrama georreferenciado da distribuição primária do alimentador 204 do DEMEI com pontos de medição concentrados. É necessário ressaltar que se trata de fluxo de potência. Para realizar a equivalência do diagrama como o apresentado por Zamora(ZAMORA et al., 2007) é necessário analisar o fluxo de potência, determinar o sentido e realizar os cálculos da carga em derivação.

Para este momento, as perdas das linhas são desconsideradas, sendo considerado que todo o sistema esteja a tensão nominal. Ambas as afirmações são falsas, porém válidas

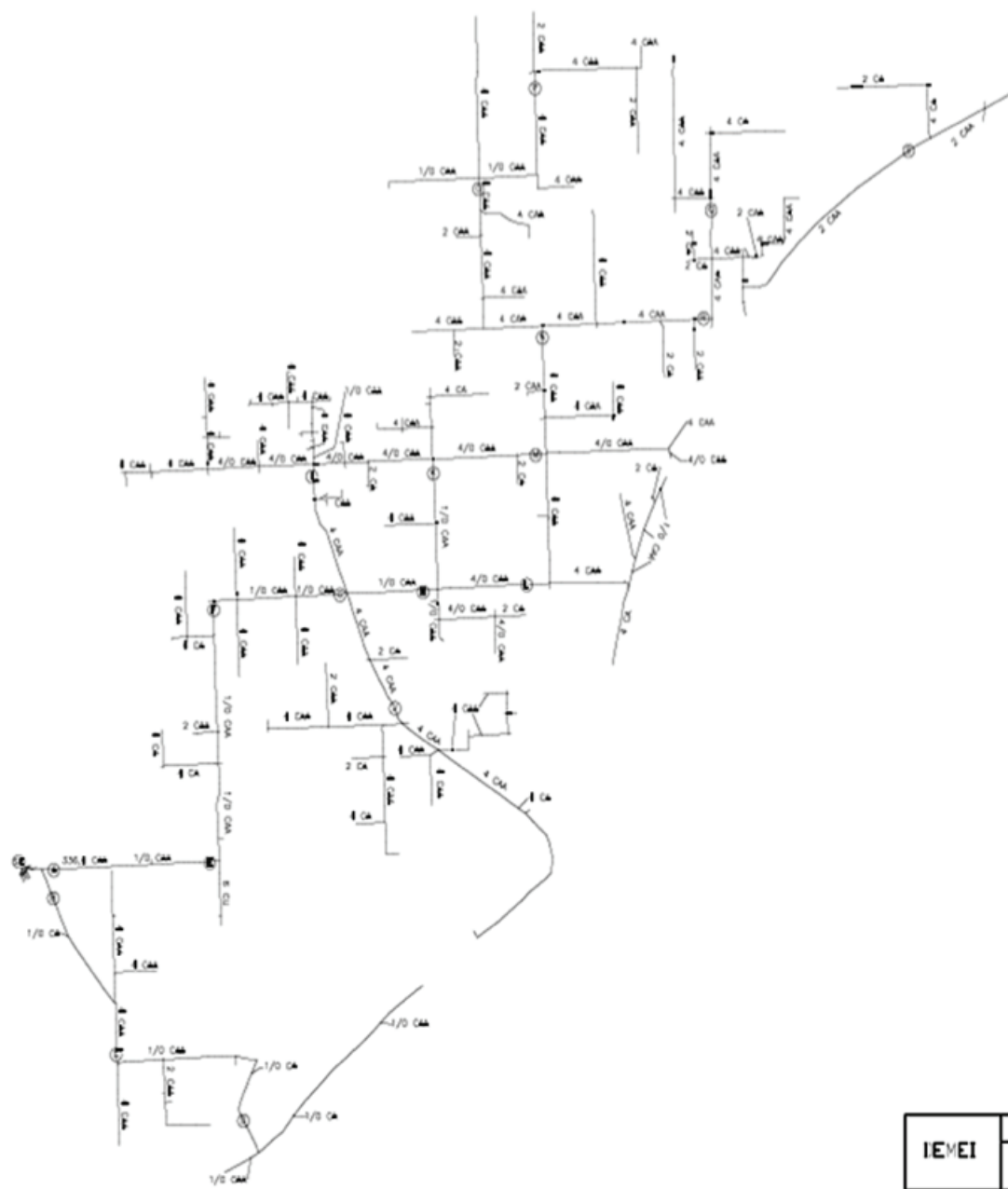


Figura 3.6: Sistema de Distribuição do Município de Ijuí.

como uma aproximação, uma vez que estes parâmetros mudam constantemente durante o dia, sendo diferente em estações do ano distintas. É necessário considerar que se trata de um sistema dinâmico onde a carga varia de maneira não uniforme. Estas características logicamente agregam maior dificuldade a validação do modelo utilizado para representar o sistema.

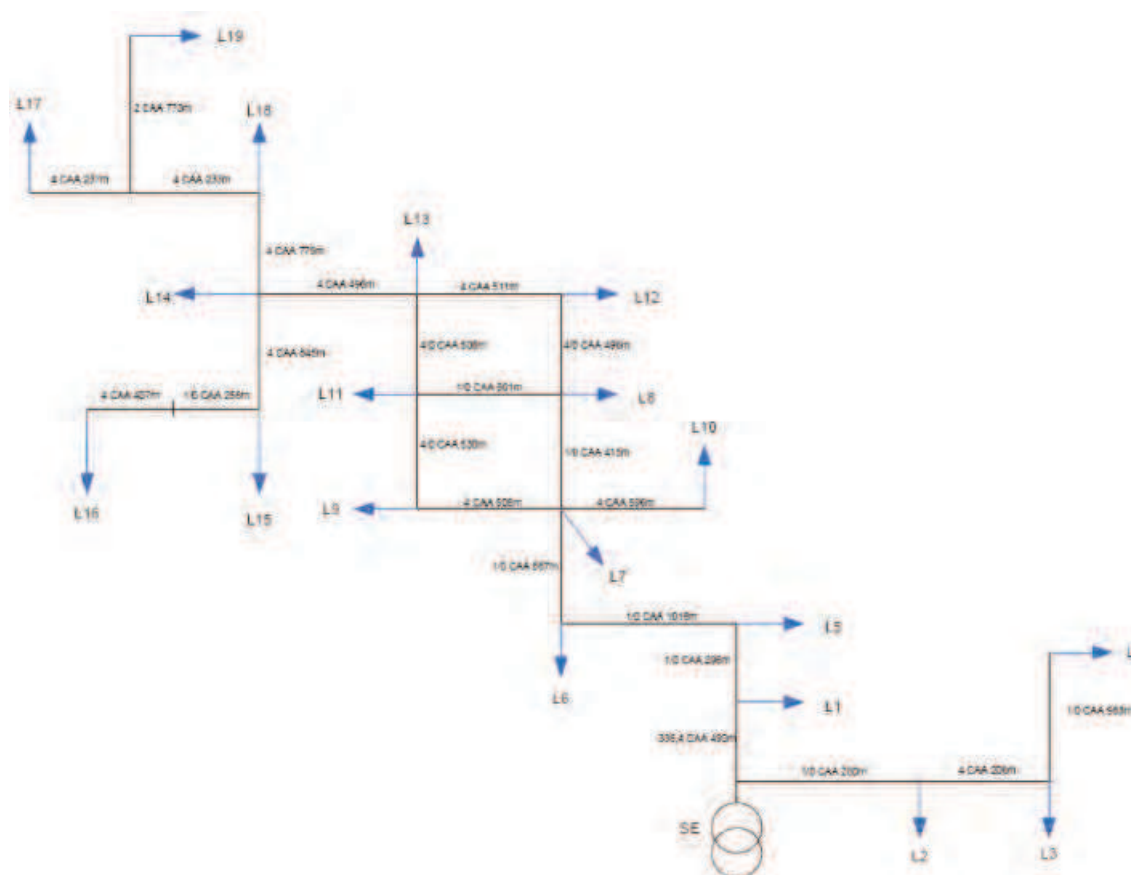


Figura 3.7: Sistema equivalente ao diagrama apresentado pelo DEMEI do alimentador 204.

3.2.1 Modelos Matemáticos do Sistema de Distribuição Analisado

O modelo da rede secundária, neste caso, pode ser representado como o equivalente a potência ativa e reativa (resistores e indutores ou capacitores). Já o circuito que alimenta esta, como basicamente os componentes do sistema anterior a rede de distribuição primária, se comporta como uma fonte e uma indutância (equivalente Thévenin do diagrama unifilar) e pode ser modelado desta forma.

Outros equipamentos do Sistema Elétrico de Potência (*SEP*) são: medidores (TCs - Transformadores de Corrente e TP's - Transformadores de Potencial), relés, chaves fusíveis, religadores, chaves seccionadoras entre outros. De forma geral, estes se comportam como chaves para os equipamentos de proteção que são usualmente modelados como um circuito aberto, algumas vezes inserindo uma resistência alta para contato aberto e capacitores ou resistores e indutores em paralelo para simular outros fatores associados às chaves. Usual-

mente o modelo destes não tem grande influência porque sua magnitude é bastante pequena frente aos parâmetros da carga envolvida.

3.2.2 Cargas

Ligados a rede primária de distribuição estão os transformadores que reduzem os níveis de tensão ao secundário. A carga de um transformador é a potência absorvida pela totalidade dos consumidores a ele conectados. Sendo assim, as potências drenadas da rede podem ser modeladas como dispositivos resistivos e indutivos ou capacitivos com potência equivalente as cargas. Para a modelagem do sistema, foram considerados os valores das cargas e habilitado o recurso de *load flow* do MATLAB/Simulink. Devido ao extenso número de transformadores de um sistema de distribuição, as cargas são concentradas nestes pontos ignorando ramais terminais até os consumidores.

Tabela 3.3: Valores de carga do alimentador 204.

Carga	Potência Ativa (W)	Potência Reativa (VAr)
L1	$1,63 \cdot 10^5$	$7,50 \cdot 10^4$
L2	$1,44 \cdot 10^5$	$6,15 \cdot 10^4$
L3	$2,06 \cdot 10^5$	$2,79 \cdot 10^4$
L4	$4,96 \cdot 10^4$	$2,13 \cdot 10^4$
L5	$5,57 \cdot 10^5$	$2,28 \cdot 10^5$
L6	$3,54 \cdot 10^5$	$1,54 \cdot 10^5$
L7	$1,21 \cdot 10^6$	$5,66 \cdot 10^5$
L8	$5,12 \cdot 10^5$	$5,57 \cdot 10^4$
L9	$1,33 \cdot 10^5$	$8,04 \cdot 10^4$
L10	$4,01 \cdot 10^5$	$1,28 \cdot 10^5$
L11	$1,34 \cdot 10^6$	$5,85 \cdot 10^5$
L12	$7,47 \cdot 10^3$	998,48
L13	$6,25 \cdot 10^5$	$2,35 \cdot 10^5$
L14	$7,58 \cdot 10^5$	$2,96 \cdot 10^5$
L15	$3,52 \cdot 10^5$	$1,50 \cdot 10^5$
L16	$2,52 \cdot 10^5$	$1,07 \cdot 10^5$
L17	$3,26 \cdot 10^5$	$1,39 \cdot 10^5$
L18	$2,61 \cdot 10^5$	$1,12 \cdot 10^5$
L19	$1,25 \cdot 10^5$	$5,34 \cdot 10^4$

Os parâmetros de carga são definidos pela potência máxima, isto se deve ao fato de que sistemas de distribuição possuem cargas dinâmicas, com variações consideráveis de acordo

com a hora do dia e estação do ano. Sendo assim, este modelamento foi desconsiderado para este caso.

3.2.3 Instrumentação do Sistema

No Brasil a oscilografia de um sistema precisa atender os critérios definidos pelo PRODIST da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Esta norma determina como requisitos mínimos de um sistema de oscilografia da rede elétrica, uma baixa taxa de amostras por ciclo. No entanto, as normas internacionais são mais adequadas, conforme pode ser visto na Tabela 3.4. Nesta podemos observar que a melhor padronização é estabelecida pela norma IEC 61850, que estabelece para análise de qualidade de energia 256 amostras por ciclo. No entanto, esta norma estabelece apenas 80 amostras por ciclo para sistemas de proteção o que é insuficiente para técnicas mais modernas de detecção de FAI.

Tabela 3.4: Requisitos de oscilografia

	PRODIST	IEC 61850	IEEE 519	Este Trabalho
Taxa de Amostragem	16 Amostras por ciclo	80 amostras por ciclo (Proteção) e 256 (Qualidade de Energia)	64 amostras por ciclo	333 amostras por ciclo
Conversão AD	12 bits	12 bits	12 bits	12 bits
Precisão	1%	<1%	<1%	<1%

Fonte: O Autor

Conforme pode-se observar este trabalho utilizou uma amostragem superior a estas normas. Esta amostragem permite uma melhor precisão na detecção dos eventos de faltas no sistema estudado.

Ainda, conforme apresentado em (ALEKSEEV e KALIAKIN, 2016), a precisão da detecção através da transformada wavelets está diretamente ligada a correta frequência de amostragem do sinal analisado. Este trabalho também detalha a decomposição do sinal da wavelet em diversos níveis, metodologia aplicada na composição de técnicas de detecção de FAI com capacidade de distinguir este tipo de falta de eventos normais do sistema. Conforme apresentado é possível destacar sinais distintos dependendo do nível de decomposição utilizado.

3.2.4 Modelos Importantes e Parâmetros de Simulação

Em tese, modelos matemáticos não precisam corresponder à realidade em termos microscópicos, mas sua utilização está condicionada a uma eficiente aproximação da realidade macroscópica, sendo uma ferramenta muito importante para o entendimento dos fenômenos que ocorrem na natureza. Para o caso dos SEP, a maioria dos equipamentos podem ser aproximados por resistores indutores e capacitores, cujos modelos matemáticos são apresentados nos trabalhos de Faraday, Lord Kelvin, Maxwell e J.J. Thompson. Para a caracterização de parâmetros concentrados, os quais normalmente são utilizados e facilitam a análise (exceção linhas de transmissão), cabe dizer que o comportamento básico da associação dos componentes RLC é uma equação diferencial linear de segunda ordem.

Esta associação de elementos lineares é válida para a representação dos sistemas de potência, para pequenas perturbações. É necessário sempre determinar qual o comportamento do sistema para uma melhor aproximação dos modelos. Diferentes modelos melhor aproximam características do sistema para diferentes respostas e distúrbios do modelo. Como neste caso é desejado um modelo para aplicação em métodos de detecção de faltas de alta impedância, que serão discutidas posteriormente, estas têm por características pequenas perturbações, o que, torna o modelo adotado indicado para o estudo do problema.

O diagrama da Figura 3.8 mostra quais são as etapas para a simulação de um circuito elétrico de potência. Uma vez obtido um modelo real, a primeira etapa é entender quais são os modelos matemáticos mais indicados para a representação de cada componente.

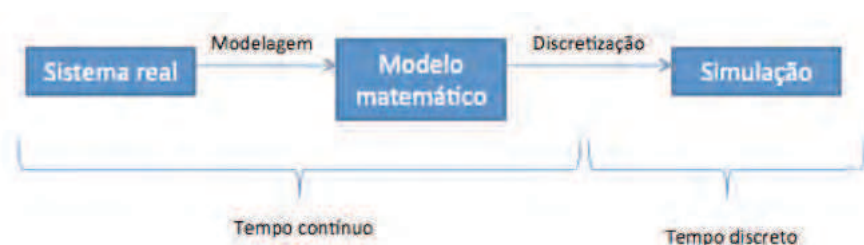


Figura 3.8: Diagrama de etapas para a simulação de um SEP

Porém, este depende da disponibilidade do modelo no software que será utilizado. Sendo assim, uma vez determinado os modelos individuais dos componentes, é obtido um modelo

geral do sistema. O máximo desempenho que um simulador pode atingir é a perfeita semelhança com a resposta do modelo solucionado em tempo contínuo analiticamente, isto é, sem métodos numéricos.

Todas as simulações deste trabalho foram realizadas no Matlab/Simulink. Como já mencionadas elas foram realizadas no cenário explanado no início deste capítulo. Conforme já apresentado a taxa de amostragem foi definida em 50 μ S (333 amostras por ciclo).

Para o modelo de linha foi utilizado, do *toolbox* denominado *Simscape Power Systems Blocks*, o bloco *Three-Phase PI Section Line* onde é possível especificar as resistências, indutâncias e capacitâncias de sequência, além dos demais parâmetros como comprimento do cabo e a frequência da rede, por exemplo. Para definição das cargas foi utilizado o bloco *Three-Phase Parallel RLC Load*, onde pode ser definido o tipo de conexão, tensões, potências frequência do sistema e da carga. Na aba *Load Flow* que pode ser definida a partir da impedância constante, ou da potência constante. No caso deste trabalho foi definido como impedância constante que determina a impedância de carga baseado no valor de tensão do sistema.

Ainda do mesmo *toolbox*, o bloco *Three-Phase Transformer (Three Windings)*, foi utilizado para simulação dos transformadores. Ele permite todas as conexões. No caso foi utilizada a configuração Delta-Estrela, conforme o trabalho original. Ele permite ainda, a simulação da saturação do mesmo.

Como é desejado um sistema que apresente o comportamento do sistema de distribuição na ocorrência de faltas de alta impedância, além dos modelos do sistema elétrico, é necessário modelar a própria falta. A literatura técnica mostra diversos estudos sobre modelos de falta. De forma resumida, os modelos mais aceitos nos estudos são mostrados na Figura 3.9.

Enquanto o primeiro modelo linear de um resistor torna o comportamento da corrente em relação à tensão bastante simples, relacionada pela lei de Ohm, os modelos não lineares apresentam comportamentos que são característicos de arcos elétricos. O modelo programado é o mais genérico podendo compreender diversas funções que são extraídas de alguma falta específica.

A diversidade dos modelos de falta torna complexo o processo de detecção da mesma, isto porque, por exemplo, enquanto os métodos de análise em frequência consideram que haverá

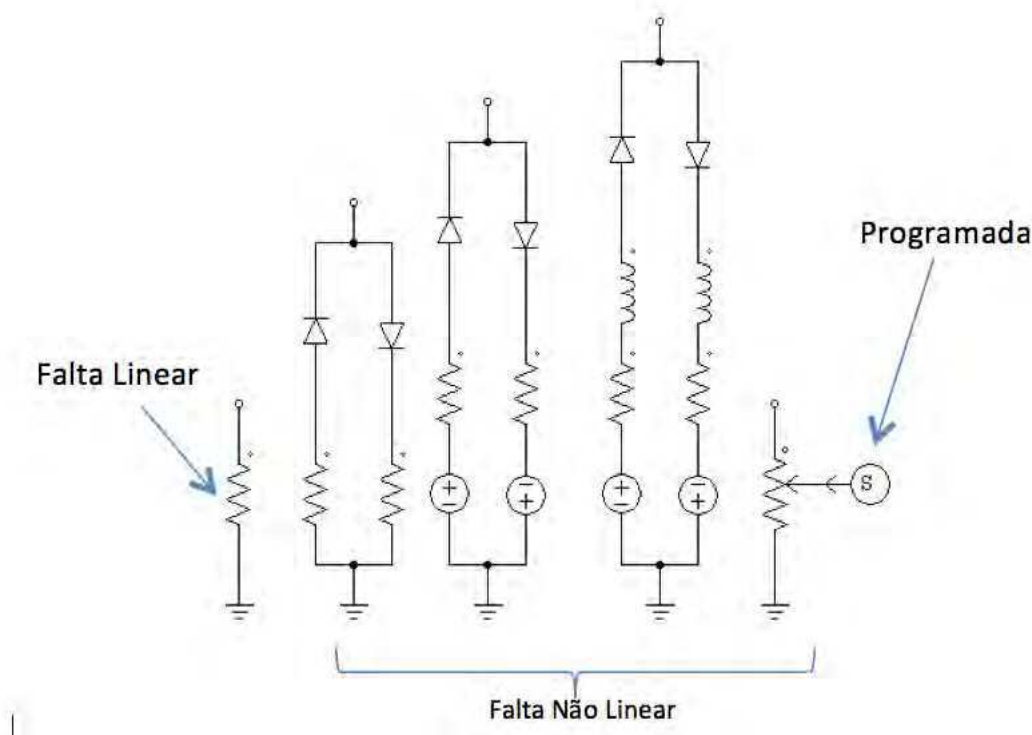


Figura 3.9: Modelos de falta de alta impedância.

harmônicas no sinal, sendo característica de modelos não-lineares, estes se tornam ineficientes na detecção do caso de um resistor com comportamento linear. Desta forma, as inúmeras técnicas de detecção se tornam válidas para modelos específicos, e ainda, considerando que exista uma boa relação entre corrente de falta e corrente de carga. Em outras palavras, se a corrente de falta for muito menor que a corrente de carga, a sua identificação a partir da corrente total, quando possível, apresenta um elevado grau de dificuldade.

Neste trabalho são adotados o modelo resistivo, especificamente para reproduzir os casos originais da técnica ativa e no restante o modelo não linear com diodos antiparalelos para a análise das faltas.

No sistema elétrico de potência devido, às cargas não lineares instaladas, ou equipamentos em geral, ou ainda, pela imprecisão das medições, sempre existirá ruídos. Existem diversas fontes de ruídos em um sistema de distribuição de energia elétrica que são sujeitas a variáveis que dependem de acontecimentos anteriores e presentes ao seu surgimento, entre elas, efeitos de temperatura, efeitos de saturação do material, efeitos do ambiente e principalmente, correlação de ruído causado pela circulação do mesmo entre pontos do sistema.

De forma genérica ruídos podem ser classificados em duas categorias: ruídos de fontes

externas e ruídos de fontes internas. Algumas das fontes externas de sinais incluem: interferência eletromagnética, interferência de radiofrequência, arcos elétricos, perturbação de equipamentos (comportamento não linear e características aleatórias), raios, entre outros.

Dependendo da origem do ruído ele surgirá pela transmissão interna ou diretamente externa. Quando o sinal do ruído circula na rede, ele é afetado (modificado) pela mesma, então surge o ruído colorido, ou correlacionado, que incorpora características dependentes do modelo. Quando o ruído é totalmente aleatório este é chamado ruído branco. Considerando que o ruído é parte inerente de um sistema de distribuição real é necessário que os métodos, principalmente aqueles que dependem das assinaturas de transiente do sistema (como é o caso da maioria dos processos de identificação de faltas de alta impedância), considerem a influência do mesmo no estágio de projeto e validação do método de detecção de falta. Sendo assim, foi escolhido adicionar ruído branco as fontes ideais a partir do bloco *Band-Limited White Noise*

3.3 Estudo de Métodos de Detecção de Faltas de Alta Impedância por Análise de Assinatura de Falta

As atuais técnicas de detecção de FAI podem ser classificadas em: técnicas passivas baseadas em uma assinatura de falta a ser identificada por um sistema de instrumentação e por algoritmos de detecção; e técnicas ativas que procuram identificar condições de falta através de sinais de alta frequência injetados no sistema elétrico.

De forma geral a detecção de falta de alta impedância se dá conforme apresentado na figura 3.10 onde se tem os valores instantâneos de tensão e corrente das três fases do circuito que alimentam o sistema de detecção de FAI (Módulo de aquisição de dados). No módulo principal de detecção de FAI, o bloco de pré-processamento analógico contém os filtros analógicos necessários a implementação de algumas técnicas. Ainda neste caso, sistemas de sincronização são necessários somente em técnicas baseadas em ondas viajantes ou detecção por medições simultâneas em mais de uma região (normalmente utilizada para localização da falta). No segundo bloco tem-se a representação do sistema de condicionamento dos sinais onde é realizada a amostragem analógico/digital. O pré-processamento digital apresentado

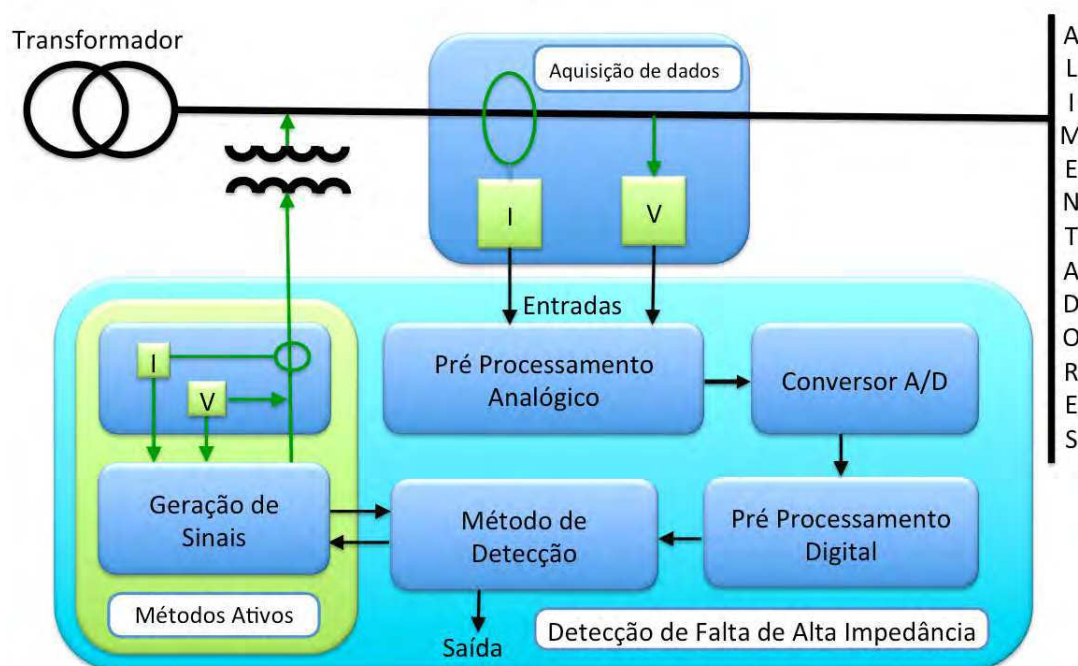


Figura 3.10: Diagrama genérico das técnicas de Detecção de faltas de alta impedância

Fonte: O Autor

no terceiro bloco é necessário em algumas técnicas na forma de filtros digitais que permitem a “seleção” de faixas de interesse específico, dependendo da técnica proposta. Por fim, o bloco do método se refere a aplicação do método escolhido e provê o resultado final do sistema descrito.

O Módulo de métodos ativos também apresentado na figura 3.10 é opcional e, se refere somente a técnicas que de alguma forma necessitam que seja injetado algum tipo de sinal no sistema elétrico, com o objetivo de mitigar faltas. utilizando esses como referência.

Para este trabalho foram escolhidas algumas técnicas para que fosse realizada uma comparação entre o seu desempenho, utilizando como base um modelo de sistema de distribuição de energia elétrica. Para escolha destes métodos, foram utilizados os seguintes critérios, dois deles que apresentam o melhor resultado nos artigos científico numa vasta gama de aplicações (Transformada Wavelet e Redes Neurais Artificiais), outros dois baseados na facilidade de implementação (Método de componentes de baixa frequência em sequência zero e Método de componentes de baixa frequência em sequência negativa) e um quinto método que é bastante criticado, em função dos resultados que ele apresenta, nos artigos que é o método de detecção de faltas através da Transformada de Fourier Janelada. Estes métodos serão

descritos a seguir.

3.3.1 Transformada Wavelet

Embora, os conceitos da transformada wavelet tenham sua origem em 1909, somente a partir da década de 80 recebeu um grande impulso para aplicações em análise de sinais, passando a ser uma alternativa à análise de Fourier. Conforme Morlet e Grossmann em 1984 (MORLET e GROSSMANN, 1984), a transformada Wavelets é apresentada na Equação (3.1).

$$U_{\psi}(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) u(t) dt \quad (3.1)$$

onde, $b \in \Re$ é o parâmetro de translação $a > 0$ é a escala e $\psi(t)$ é a wavelet mãe. Esta equação se refere a transformada wavelet contínua. Onde ainda:

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-\tau}{s} \right) \quad (3.2)$$

A versão discreta da equação 3.2 é dada por:

$$\psi_x^{\psi}[n, a^j] = \sum_{m=0}^{N-1} x[m] \psi_j^*[m-n] \quad (3.3)$$

onde,

$$\psi_j[n] = \frac{1}{\sqrt{a^j}} \psi \left(\frac{n}{a^j} \right) \quad (3.4)$$

A escolha da wavelet mãe não é de toda uma tarefa fácil, visto que ela deve possibilitar a decomposição do sinal e a sua interpretação futura, além de possuir características de reversibilidade como, por exemplo, no processamento de imagens e de voz. Nesse sentido, deve-se escolher uma função wavelet, dentre as famílias distintas de funções wavelets mães existentes, e que são classificadas a partir das características das funções básicas: ortonor-

mal (Daubechis, Coiflets e Symlets e Mayer); bi-ortonormal (B-Spline); e não ortonormal (Gaussiana, Morlet e Chapéu Mexicano).

Com relação a detecção de faltas de alta impedância, o objetivo da análise é a determinação das componentes harmônicas transitórias que temporariamente aparecem nas componentes de fase zero das correntes e tensões, em instantes de tempo quando a falta ocorre ou se extingue. No diagrama de blocos apresentado na Figura 3.11, a wavelet decompõe o sinal basicamente em duas ou mais informações, conforme o nível utilizado.

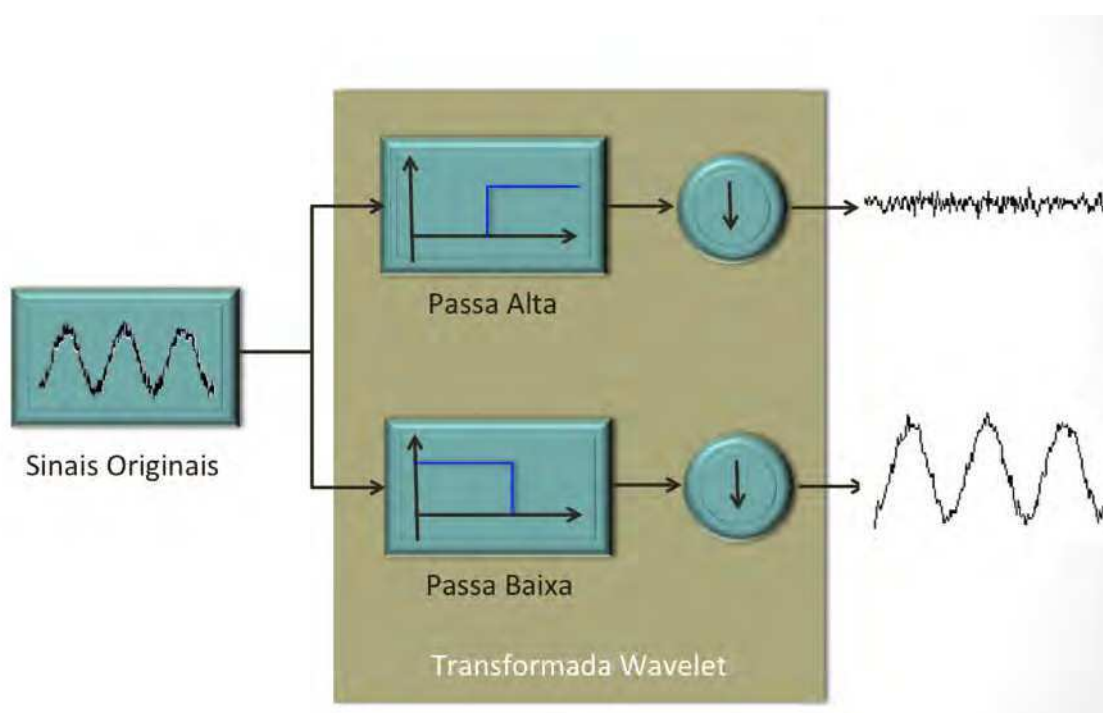


Figura 3.11: Diagrama de Blocos da Transformada de Wavelet.

Fonte: O Autor

Em muitos deles, os coeficientes da transformada wavelet dos sinais analisados (e magnitudes relacionadas as componentes de alta frequência) são obtidos pelo uso da transformação de Mallat que utiliza bancos de filtros produzindo aproximações dos sinais e detalhes em especificado nível de decomposição do sinal relacionados a frequência de amostragem do sinal utilizada.

As wavelets Daubechies surgem com base no trabalho de Ingrid Daubechies, e se caracterizam como uma família de wavelets ortogonais que definem uma transformada wavelet discreta e é caracterizada por um número máximo de níveis de precisão. Ingrid Daubechies (usando os trabalhos de Mallat) construiu um conjunto de bases ortonormais de wavelets

suaves, com suportes compactos.

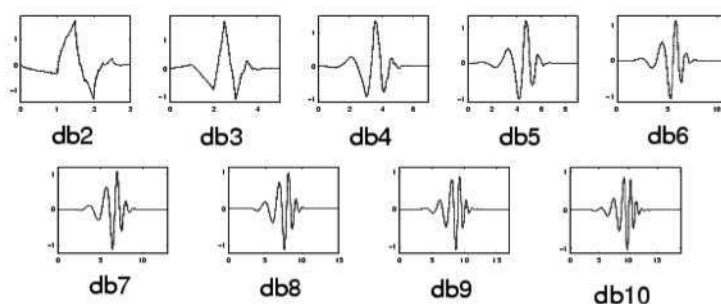


Figura 3.12: Transformada wavelet Daubechies.

Fonte:Mathworks

Os trabalhos de Daubechies são as bases das aplicações atuais da transformada wavelets. A transformada wavelet do tipo Daubechies, considerando cada um dos níveis iniciais é apresentada na figura 3.12. Como podemos observar quanto maior o nível da transformada utilizada mais seletivo se torna o filtro e consequentemente um maior número de filtros é utilizado.

Em 1989, Coifman sugeriu a Daubechies uma base ortormal de wavelets que foram denominadas de coifets (SULAIMAN et al., 2013). Por fim, ele realizou ainda, um estudo da utilização deste diversas wavelets mães objetivando a detecção de faltas de alta impedância, que compara o seu desempenho nesta tarefa(vide figura 3.13).

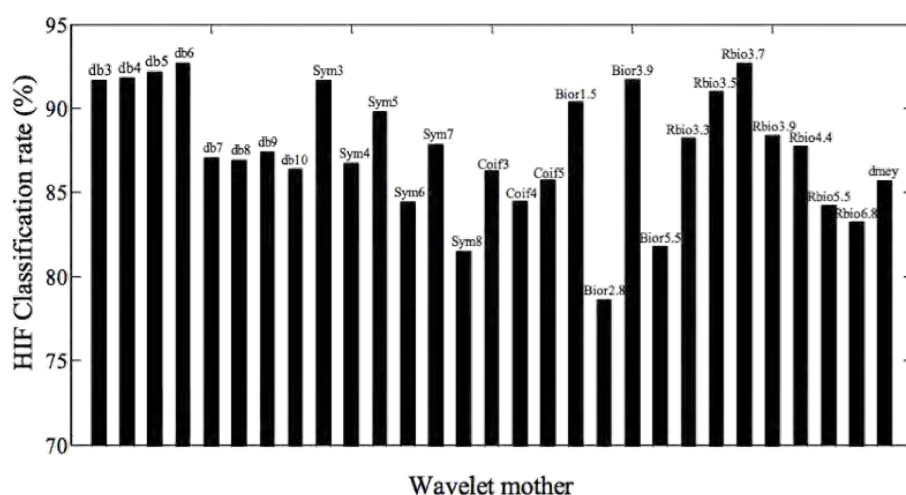


Figura 3.13: Níveis Transformada de Wavelet (Daubechies).

Fonte:(SULAIMAN et al., 2013)

Neste temos as seguintes representações Daubechie (db), Symlets (Sym), Coiflets (Coif),

Biorthogonal (Bior), Reverse Biorthogonal (Rbior), Discrete Meyer (dmey)

3.3.2 Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais são algoritmos computacionais que tentam reproduzir o funcionamento do cérebro humano. A primeira pesquisa científica mencionando a neuro-computação data de 1943, dos autores McCulloch e Pitts (MCCULLOCH e PITTS, 1943). Assim como o cérebro humano, as redes neurais são capazes de aprender e tomar decisões baseadas na aprendizagem. Uma rede neural pode ser interpretada como um esquema de processamento capaz de armazenar conhecimento baseado em aprendizagem (experiência) e disponibilizar este conhecimento para a aplicação em questão.

Em uma rede neural, além do conhecimento ser obtido através de etapas de aprendizagem, pesos sinápticos são utilizados para armazenar o conhecimento. Na prática, uma sinapse é o nome dado à conexão existente entre neurônios. Nestas, são atribuídos valores, os chamados pesos sinápticos. Portanto, a constituição de uma série de neurônios artificiais (ou virtuais) conectados entre si formam a rede neural.

Tendo uma rede neural montada, uma série de valores podem ser aplicados sobre um neurônio, sendo que este está conectado a outros pela rede. Estes valores (ou entradas) são multiplicados no neurônio pelo valor do peso de sua sinapse. Então, esses valores são somados. Se esta soma ultrapassar um valor limite estabelecido, um sinal é propagado pela saída (axônio) deste neurônio. Em seguida, essa mesma etapa se realiza com os demais neurônios da rede. Isso quer dizer que os neurônios vão enfrentar algum tipo de ativação, dependendo das entradas e dos pesos sinápticos.

Existem várias formas de se desenvolver uma rede neural. Ela deve ser montada de acordo com o(s) problema(s) a ser(em) resolvido(s). Em sua arquitetura são determinados o número de camadas usadas (as camadas são formadas por neurônios), a quantidade de neurônios em cada camada, o tipo de sinapse utilizado, etc.

A rede neural utilizada neste trabalho esta descrita no diagrama de blocos da Figura 3.15.

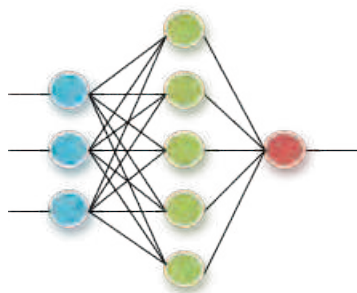


Figura 3.14: Exemplo de uma rede neural de três camadas, cada círculo representa um neurônio.

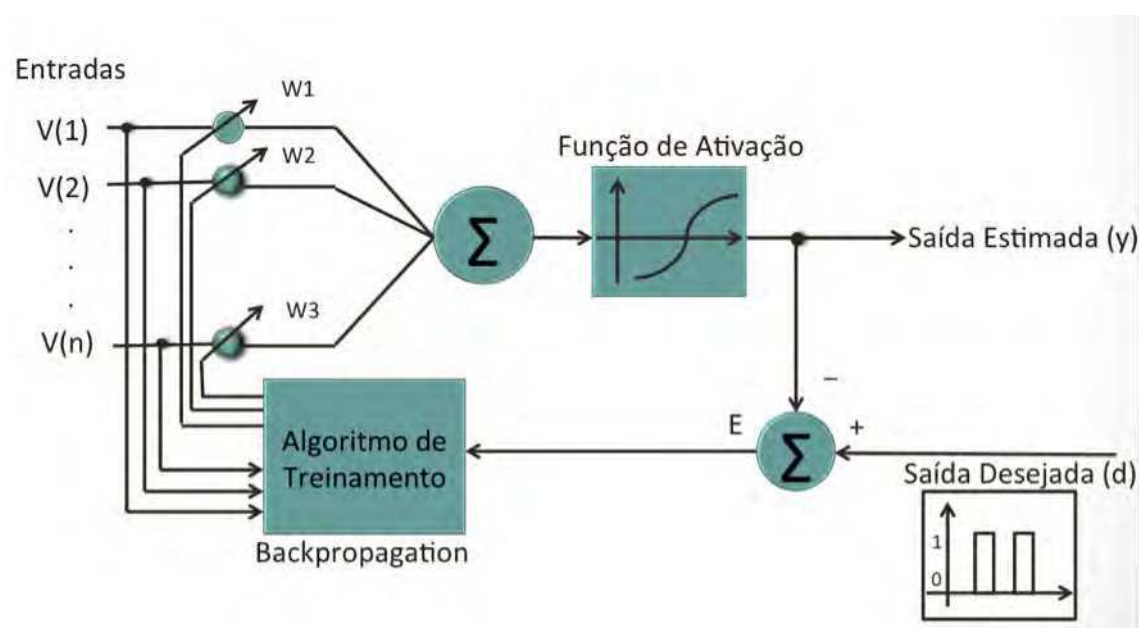


Figura 3.15: Diagrama de Blocos da Rede Neural utilizada
Fonte: O Autor

Conforme Barreto (BARRETO, 2002), o processo de aprendizagem das redes neurais é realizado quando ocorrem várias modificações significativas nas sinapses dos neurônios (ativação dos neurônios). Se determinadas conexões são mais utilizadas, estas são reforçadas enquanto que as demais têm seu peso proporcional reduzido. É por isso que quando uma rede neural artificial é implantada para uma determinada aplicação, é necessário um tempo para que esta seja treinada.

O algoritmo de treinamento da rede neural, pode ser simplificado da seguinte forma:

“ Iniciar todas as conexões com $w_i = 0$ (ou aleatórios)

Repita

Para cada padrão de treinamento (x, d)

faça

Calcular a saída y

Se ($d \neq y$)

então atualizar pesos n até o erro ser aceitável”

No caso estudado foi utilizada a regra delta generalizada através do Algoritmo de retropropagação (do inglês *backpropagation*). Neste caso o processo de redução gradativa de erro que acompanha a minimização se denomina convergência. A medida que a rede aprende, o valor do erro converge para um valor estável, normalmente irreduzível. O processo de aprendizagem prossegue até que algum critério seja estabelecido, como por exemplo, um valor mínimo de erro global, ou uma diferença sucessiva mínima entre erros calculados para cada iteração. Considerando a superfície do erro e definindo que o mesmo seja o menor possível dentro das limitações do sistema ele irá convergir conforme apresentado na Figura 3.16.

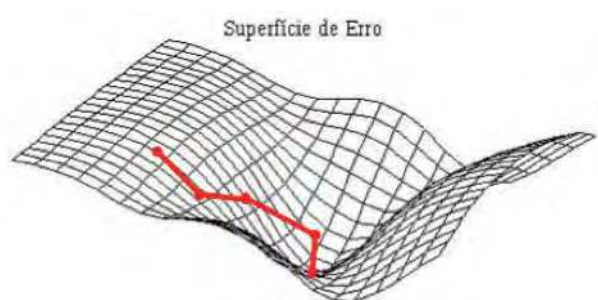


Figura 3.16: Convergência do erro (Backpropagation)

As duas formas mais usuais para o cálculo do erro são, o mínimo erro médio quadrático (Leans Means Square) apresentado na Equação 3.5 ou o Erro Quadrático Médio (Root Means Square) apresentado na equação 3.6.

$$E = \frac{1}{2} \sum_i (d_i - y_i)^2 \quad (3.5)$$

$$E = \sqrt{\sum_i (d_i - y_i)^2} \quad (3.6)$$

O diagrama de blocos do treinamento do tipo blackpropagation é apresentado na Figura 3.17.

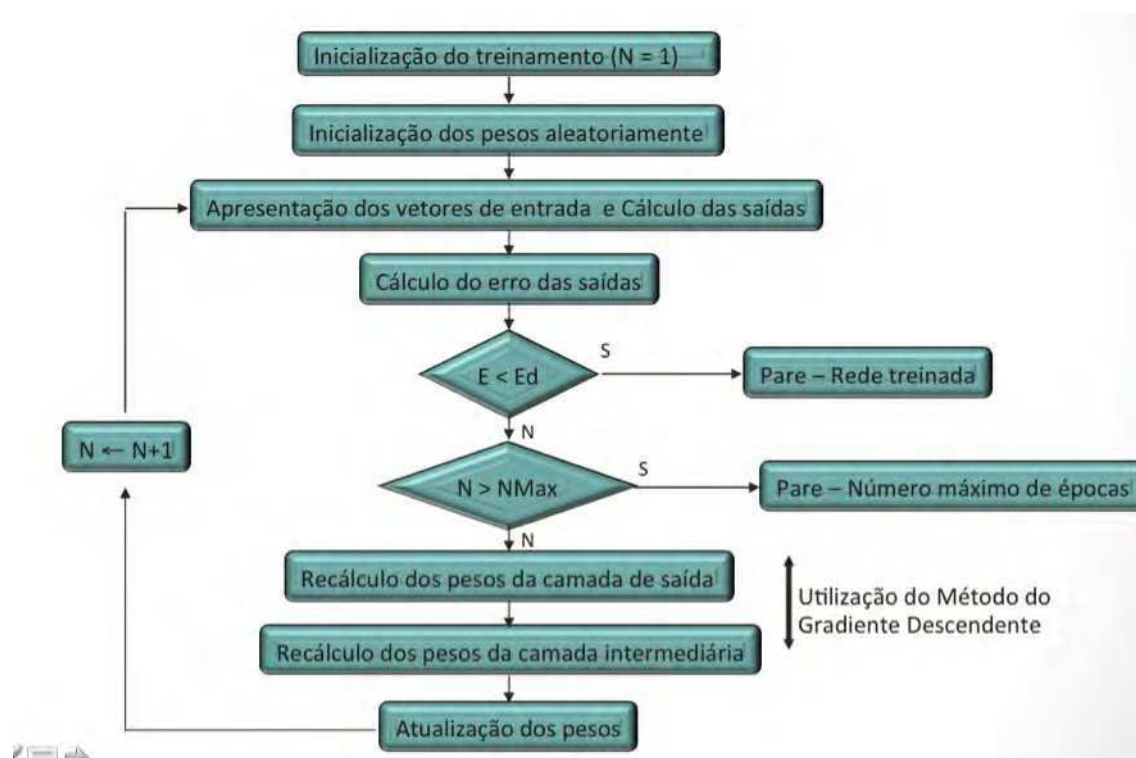


Figura 3.17: Diagrama de blocos do treinamento da Rede Neural utilizando Back-propagation

Existem três tipos de treinamento para redes neurais artificiais:

- Supervisionado: neste tipo, a rede neural recebe um conjunto de entradas padronizadas e seus correspondentes padrões de saída, onde ocorrem ajustes nos pesos sinápticos até que o erro entre os padrões de saída gerados pela rede tenha um valor desejado;
- Não-supervisionado: neste tipo, a rede neural trabalha os dados de forma a determinar algumas propriedades do conjunto de dados. A partir destas propriedades é que o aprendizado é constituído;
- Híbrido: neste tipo ocorre uma "mistura" dos dois modos anteriores (supervisionado e não-supervisionado). Assim, uma camada pode trabalhar com um tipo enquanto outra camada trabalha com o outro.

A capacidade de "aprender" associada a uma rede neural é uma das mais importantes qualidades destas estruturas. Na prática, ela tem a capacidade de adaptar-se, de acordo com regras pré-existent, alterando seu desempenho ao longo do tempo. Para tal, é necessário o cálculo da variação dos pesos sinápticos a partir da equação:

$$\Delta w_{ij} = \mu(d_i - u_i)x_j \quad (3.7)$$

onde:

- Correção de erro: $\Delta w_{ij} = m.e.x_i$
- m = taxa de aprendizagem
- x_i = valor de entrada
- $e = (d_j - y_i)$ = erro (valor calculado – valor desejado)

Entre as muitas aplicações possíveis a uma rede neural, destaca-se reconhecimento de padrões e classificação e o processamento de sinais, que são de interesse neste trabalho.

3.3.3 Harmônicos de Baixa Ordem de Sequência Negativa

As condições de desbalanço de um sistema trifásico são calculadas através das componentes simétricas. As componentes simétricas consistem de grandezas positivas, negativas e de sequência-zero. Basicamente os valores de sequência-positiva são aqueles presentes durante condições trifásicas equilibradas. As grandezas de sequência-negativa medem a quantidade de desbalanço existente no sistema de potência e as grandezas de sequência-zero estão mais comumente associadas ao fato de se envolver a terra em condições de desbalanço.

Conforme Elnewehi (ELNEWEIHI e SCHWEITZER, 1997), uma falta desequilibrada no alimentador gera tensão de sequência-negativa na barra da distribuição, a qual, por sua vez, gera corrente de carga de sequência-negativa nos alimentadores conectados à barra que não está sob defeito. O efeito da corrente de carga de sequência-negativa dos alimentadores sem defeito é o de reduzir a corrente de sequência-negativa para o relé da barra. Isso dessensibiliza os elementos de sobrecorrente de sequência negativa do relé da barra e ajuda na coordenação desses elementos com os elementos de sobrecorrente do relé do alimentador localizado à frente.

As equações para calcular as sequências positiva e negativa são dadas a seguir:

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3.8)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (3.9)$$

onde,

- V_1 é a tensão de sequência-positiva,
- V_2 é a tensão de sequência-negativa
- a é um operador igual a 1 até 120° . Multiplicando um fasor por a faz girar esse fasor 120 graus no sentido horário. Quando elevado ao quadrado, o operador a^2 torna-se igual a 1 até 240° e faz girar um fasor em 240 graus no sentido horário.

O diagrama de blocos que resume a sequência utilizada para determinar a condição de falta nesta técnica é apresentada na figura 3.18.

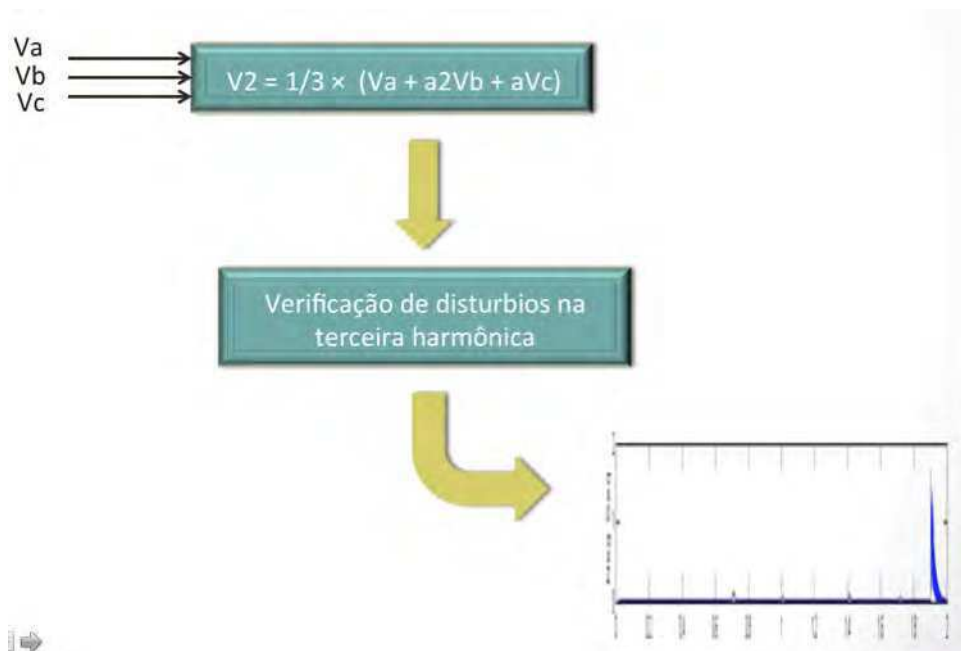


Figura 3.18: Diagrama de Blocos da técnica baseada na análise da terceira harmônica da sequência negativa

3.3.4 Harmônicos Não Característicos de Sequência Zero

Conforme já foi descrito, as componentes de sequência zero aparecem em função do desequilíbrio do sistema trifásico, fazendo surgir componentes no terra do sistema. Ainda alguns autores relatam um incremento significativo nas componentes harmônicas de baixa ordem pares de sequência Zero.

A equação para calcular a sequência zero é dada a seguir:

$$V_z = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (3.10)$$

onde,

- V_z é a tensão de sequência-zero.

O diagrama de blocos que resume a sequência utilizada para determinar a condição de falta da técnica baseada na análise dos Harmônicos de Segunda ordem de Sequência Zero é apresentada na Figura 3.19.

3.3.5 Transformada de Fourier Janelada

Existe uma quantidade expressiva de ferramentas matemáticas para processamento e para análise de sinais. Se o sinal é classificado e tem características de um sinal periódico e estacionário, utiliza-se a série de Fourier (*Fourier Transform* - FT).

Devido às limitações da FT, a partir da década de 40 passou-se a trabalhar com a Transformada de Fourier de Tempo Curto (*Short-time Fourier Transform* - STFT). A STFT permite a análise espectral como função do tempo, dividindo-se o sinal original em janelas menores de tempo, de modo que se pode realizar uma melhor localização da singularidade. Uma primeira desvantagem desta técnica de análise é a necessidade do conhecimento a priori, do instante de ocorrência da singularidade, e uma segunda é que ela acarreta a perda de informação de frequência, devido a redução da largura da janela de tempo. Ou seja, se por

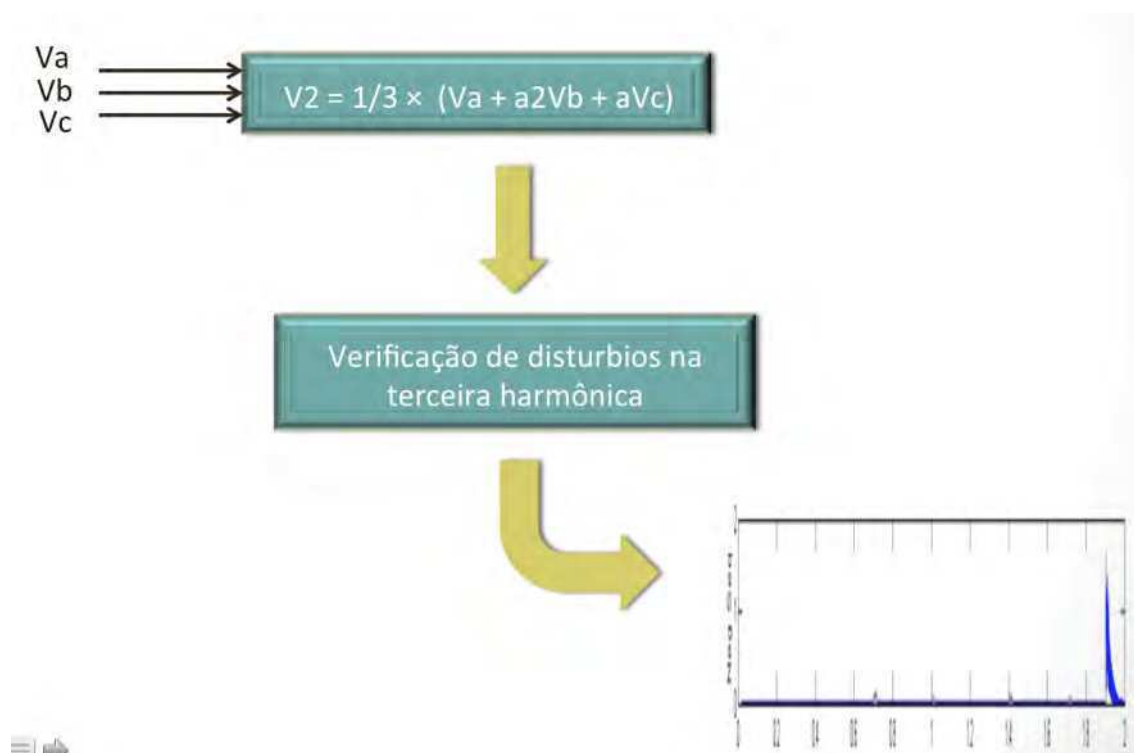


Figura 3.19: Diagrama de Blocos da técnica baseada na análise dos Harmônicos de Segunda ordem de Sequência Zero

um lado a FT de janela ampla permite uma boa resolução de frequência e má resolução no tempo, a STFT permite uma boa resolução no tempo, mas uma má resolução de frequência.

3.4 Considerações Sobre o Capítulo

Conforme já foi observado na revisão bibliográfica, existem inúmeros trabalhos, ao longo dos anos, que estudam técnicas e metodologias para detecção de faltas de alta impedância. No entanto, cada uma delas é aplicada em um cenário específico o que dificulta a comparação do desempenho das mesmas. Com o objetivo de permitir na sequência deste trabalho uma comparação justa, neste capítulo foi apresentada a modelagem do sistema de distribuição que é utilizado nas simulações realizadas. Além disso, foi discutida a detecção de FAI e proposto um diagrama generalizado para este fim. A partir da revisão bibliográfica realizada no Capítulo II, foram escolhidas 5 técnicas para serem testadas neste trabalho.

4

Análise Comparativa de Métodos de Detecção de Faltas de Alta Impedância por Assinatura

O modelo do sistema elétrico reduzido, apresentado no Capítulo III foi utilizado para a realização de um estudo comparativo entre algumas técnicas de detecção de faltas de alta impedância estudadas e apresentadas naquele mesmo capítulo. São elas:

- Método 1 – Transformada wavelets;
- Método 2 - Rede neural artificial;
- Método 3 - Harmônicos não característicos de Sequência Zero;
- Método 4 - Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa;
- Método 5 - Transformada de Fourier Janelada.

Para realizar este estudo, neste capítulo, a partir do sistema descrito no capítulo III, foram definidos quatro casos. Cada um deles apresenta duas ou três faltas de alta impedância intermitentes. Alguns deles, apresentam também a inserção de outros eventos considerados normais no sistema, tais como energização de banco de capacitores, alimentadores e transformadores (corrente *in rush*), para verificar o efeito destes em cada uma das técnicas e

qual a possibilidade deste evento gerar um falso positivo, na distinção de uma falta de alta impedância.

4.1 Primeiro Caso

No primeiro caso apresentado na Figura 4.1, foram aplicadas duas faltas de alta impedância distantes da subestação. A primeira no final do ramal 1, próximo a última carga iniciando em 0,6 segundos com duração de 0,1 segundos. A segunda falta no final do ramal 3, iniciando em 1,2 segundos com duração de 0,2 segundos. Também, foi adicionado um evento considerado normal ao sistema caracterizando o chaveamento de um banco de capacitores no final do ramal 2 em 1,9 segundos.

Simulando o circuito, conforme a Figura 4.2, durante o funcionamento normal do sistema tem-se tensões estabilizadas em torno de 13,5 kV. Também na figura pode-se observar claramente o desequilíbrio característico gerado nas condições de falta monofásica, apesar do mesmo não apresentar variações ou incremento de tensão muito significativo por se tratar de uma falta de alta impedância. Em contrapartida, o chaveamento do banco de capacitores apresenta um distúrbio maior no sinal de tensão ao contrário da corrente, e também com conteúdo em alta frequência.

A partir dos valores instantâneos da tensão apresentado na figura (?), podemos perceber nos detalhes o comportamento da primeira falta.

Na figura 4.4 observa-se detalhadamente o comportamento, a partir do sinal de tensão RMS, da falta 1 provocada neste caso.

Na Figura 4.5 são apresentados os detalhes das correntes do sistema durante todo o período de simulação. Em regime permanente, as correntes normais do sistema têm aproximadamente 133 A. A variação de corrente é típica de uma falta de alta impedância com variações na ordem de 0,5 A (menos de 0,4% da corrente nominal). Já o chaveamento do banco de capacitores apresenta variação de corrente ainda menor, entretanto tem-se um significativo incremento no conteúdo em alta frequência.

A partir dos valores instantâneos da corrente apresentado na figura (?), podemos perceber

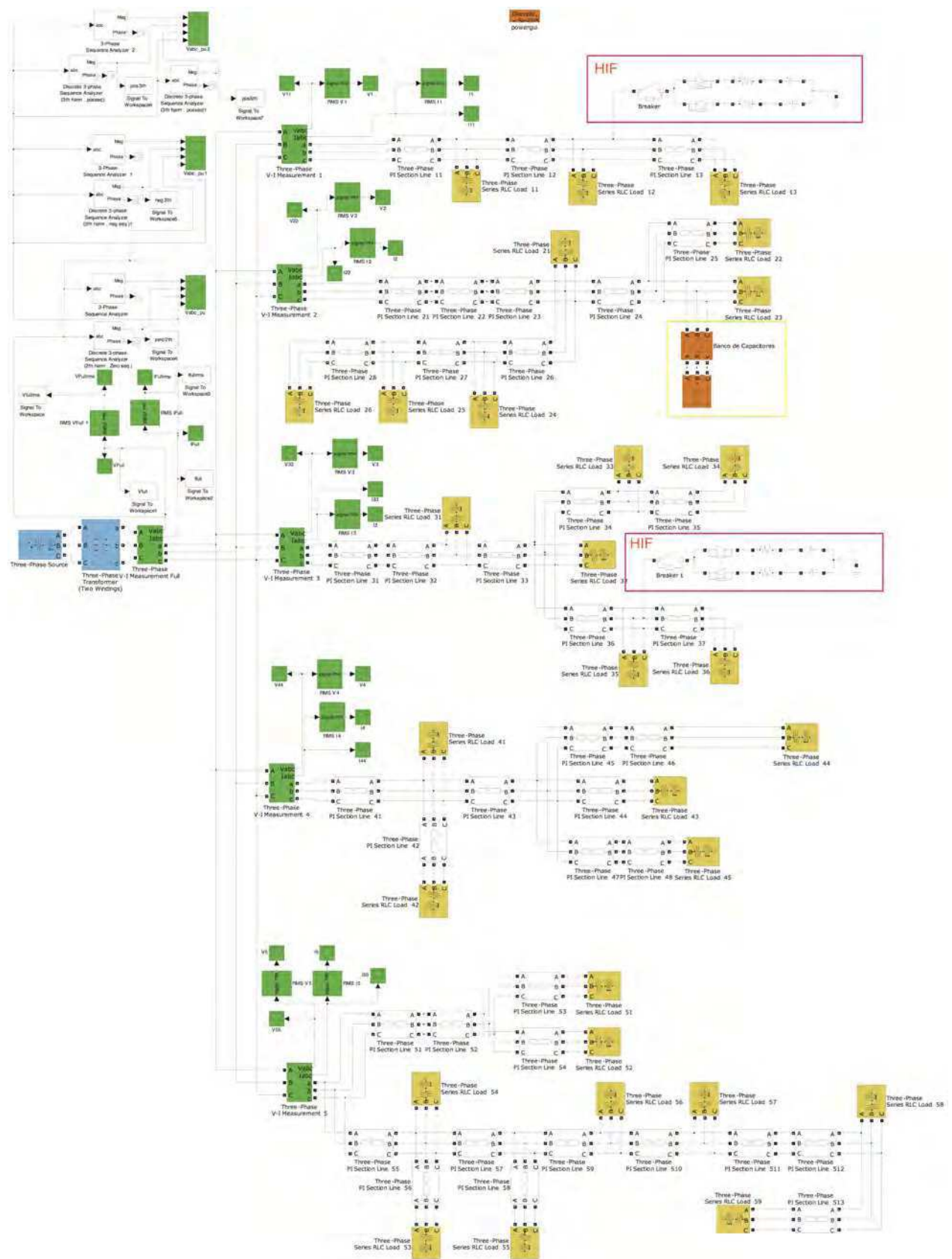


Figura 4.1: Circuito simulado no SIMULINK/MATLAB representando o caso 1.

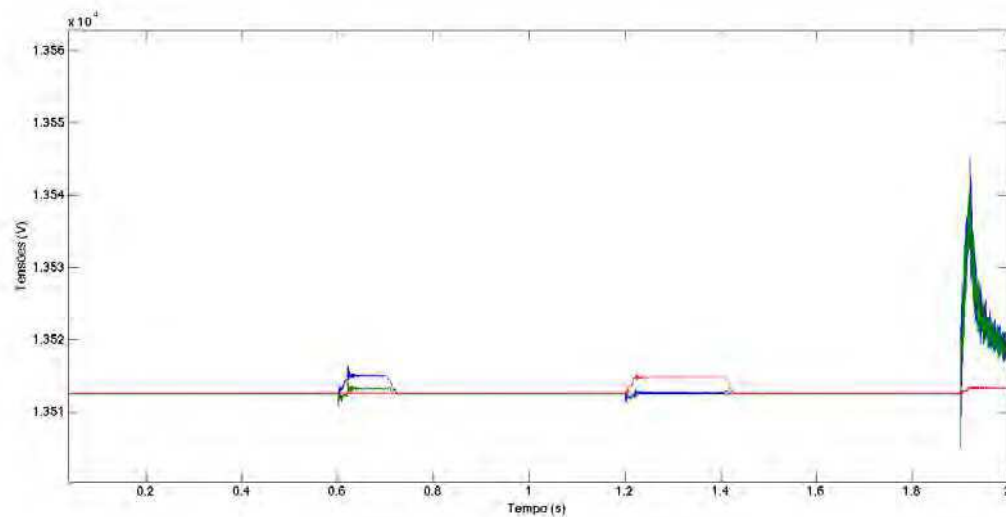


Figura 4.2: Tensões RMS trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 1.

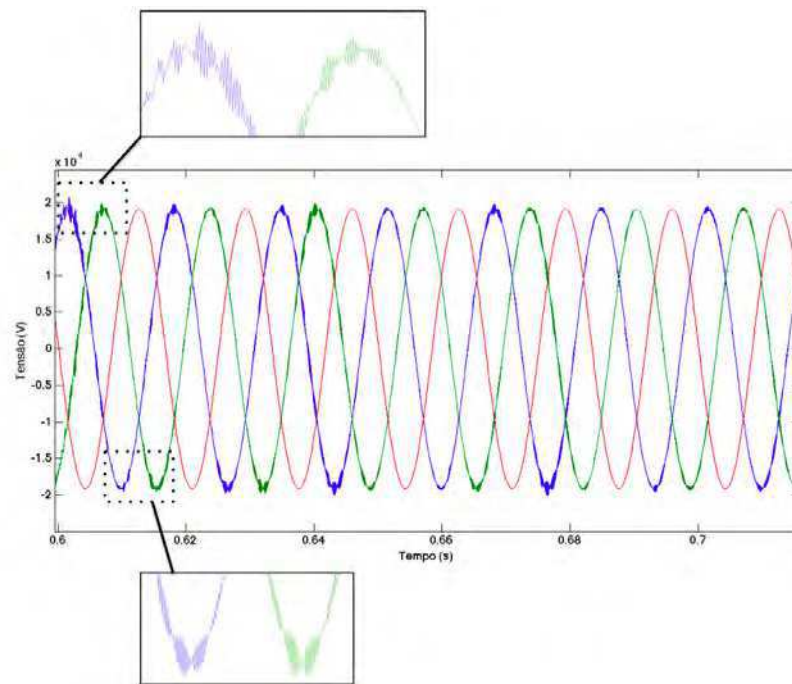


Figura 4.3: Valores instantâneos de tensão com detalhes da primeira Falta de alta impedância aplicada no caso 1.

nos detalhes o comportamento da primeira falta. Avaliando-se as Figuras (?) e (?), percebe-se que os ruídos das faltas são mais intensos e se propagam de forma mais intensa nos sinais de tensão. Essas características se repetem em todos os casos estudados neste trabalho.

Os detalhes a partir dos sinais de corrente RMS podem ser observados na Figura 4.7.

Para este caso então aplicou-se, utilizando o MATLAB®, a Transformada de Wavelet

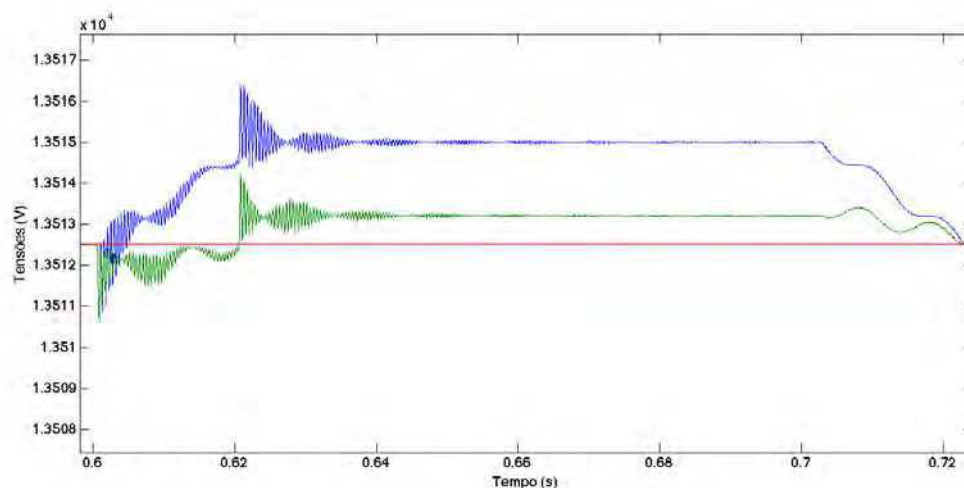


Figura 4.4: Detalhe da primeira Falta de alta impedância aplicada no caso 1.

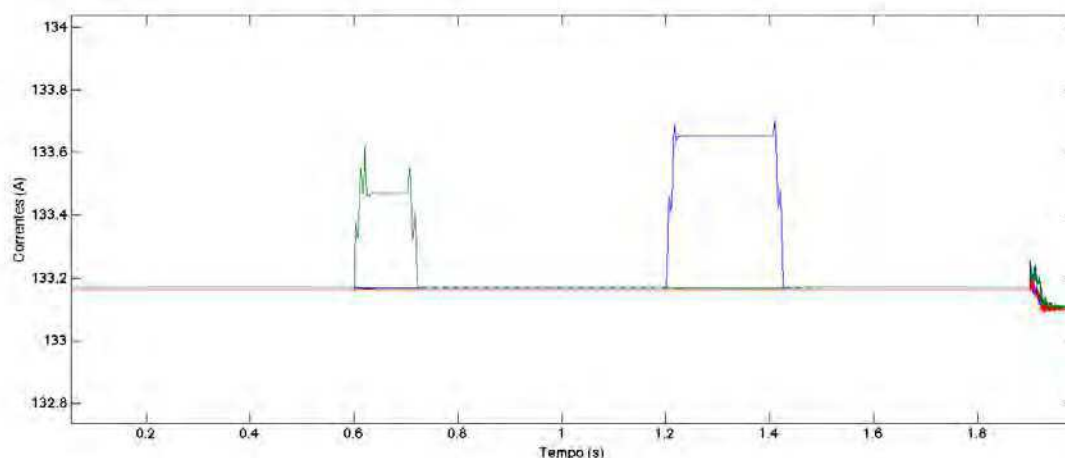


Figura 4.5: Detalhe das correntes trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 1.

do tipo Ortogonal com filtro digital FIR¹ (*Finite Impulse Response*) do tipo Daubechies de Terceira Ordem (db3) produzindo o resultado apresentado na Figura 4.8.

A Transformada de Wavelet consegue identificar o instante inicial de cada uma das falhas. Entretanto, o chaveamento de um banco de capacitores também é identificado como uma falta de alta impedância (Falso Positivo), ainda com mais intensidade e com uma resposta muito semelhante à resposta da WT ao distúrbio da falta.

Como segundo método proposto, foi utilizada a técnica de detecção utilizando uma Rede Neural Artificial, que foi treinada para reconhecimento de padrões. Neste caso, foi

¹Um filtro FIR ou de resposta ao impulso finita é um tipo de filtro digital caracterizado por uma resposta ao impulso que se torna nula após um tempo finito, em contraste com os filtros IIR.

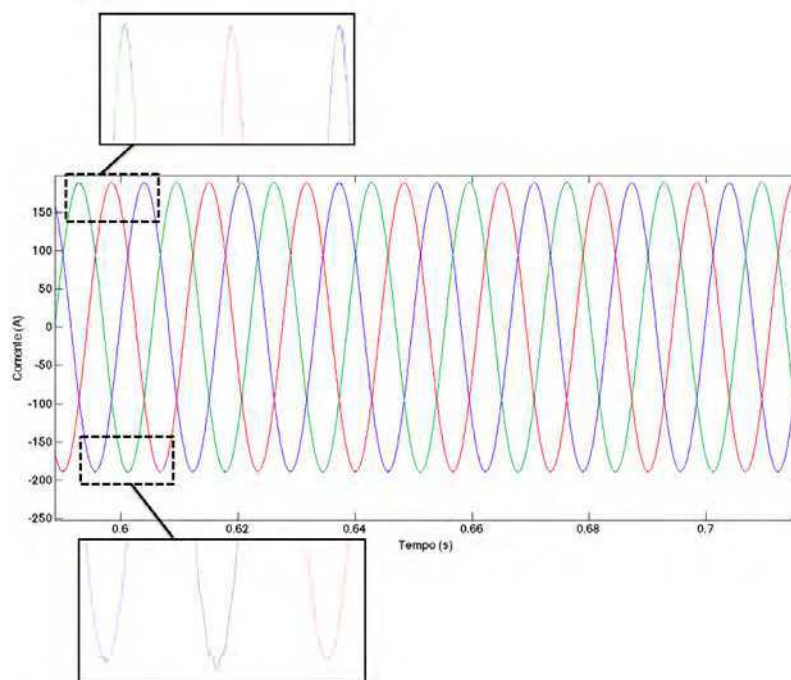


Figura 4.6: Valores instantâneos de corrente com detalhes da primeira Falta de alta impedância aplicada no caso 1.

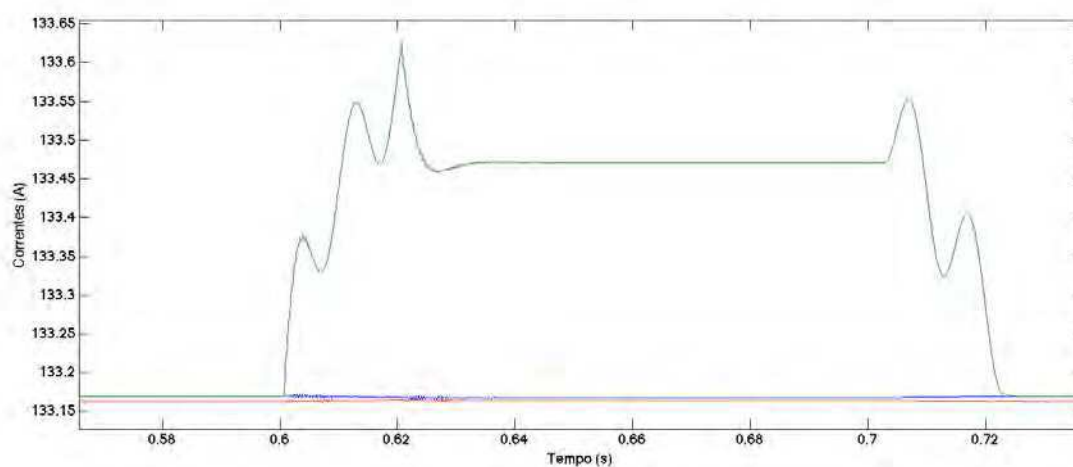


Figura 4.7: Detalhe do efeito da primeira FAI nas correntes do sistema para o circuito simulado no caso 1.

utilizada uma rede com duas camadas ocultas do tipo rede direta (*Feedforward*²), utilizando o MATLAB®. Esta RNA foi treinada utilizando como base os dados deste primeiro caso Ou seja, foram utilizados os mesmos níveis de corrente e tensão bem como os mesmos eventos ocasionais do sistema. Desta forma, os resultados aqui obtidos (vide Figura 4.9) são con-

²Estas redes são representadas em camadas e seu grafo não tem ciclos. A primeira camada, chamada camada de entrada, recebe os sinais de excitação e a última camada é composta por neurônios que têm sua saída como a saída da rede. Restam ainda, os neurônios internos à rede, que podem organizar-se em uma ou mais camadas intermediárias, chamadas camadas ocultas

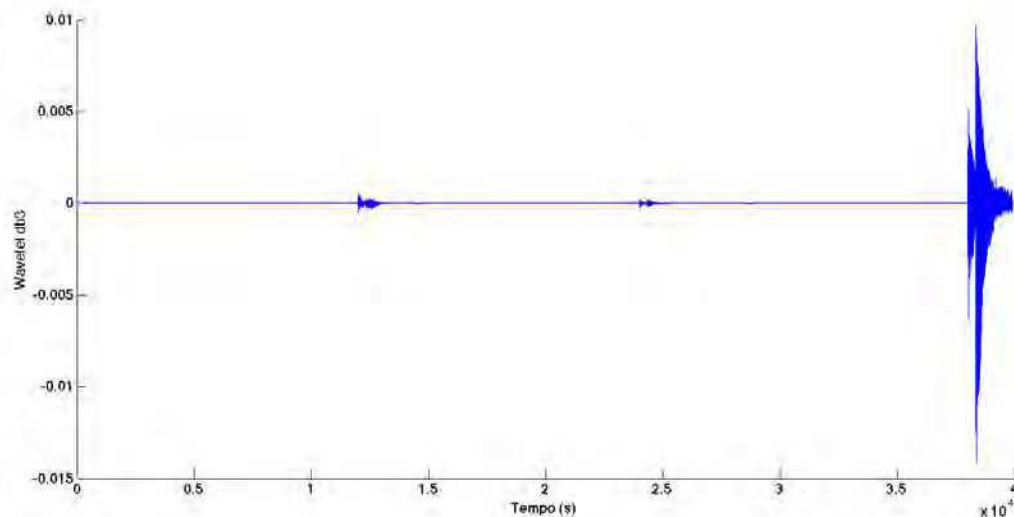


Figura 4.8: Resultado da transformada wavelet para o circuito simulado no caso 1.

dizentes com o cenário simulado, tendo sido detectadas as as faltas, no entanto, devem ser comparados com os resultados obtidos nos casos seguintes.

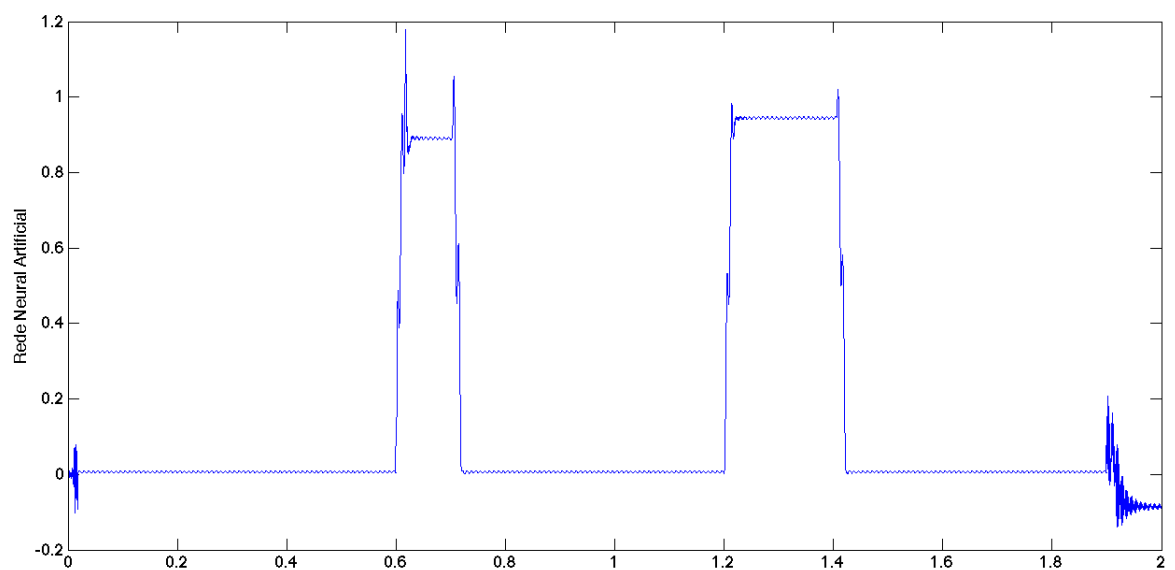


Figura 4.9: Resultado da aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) no circuito simulado no caso 1.

O terceiro método utilizando Harmônicos não característicos de sequência zero foi implementado, neste caso específico foram analisados os sinais resultantes da segunda harmônica do sistema. Esta é citada na literatura por ser mais imune aos eventos normais do sistema. O resultado desta técnica é apresentado na Figura 4.10.

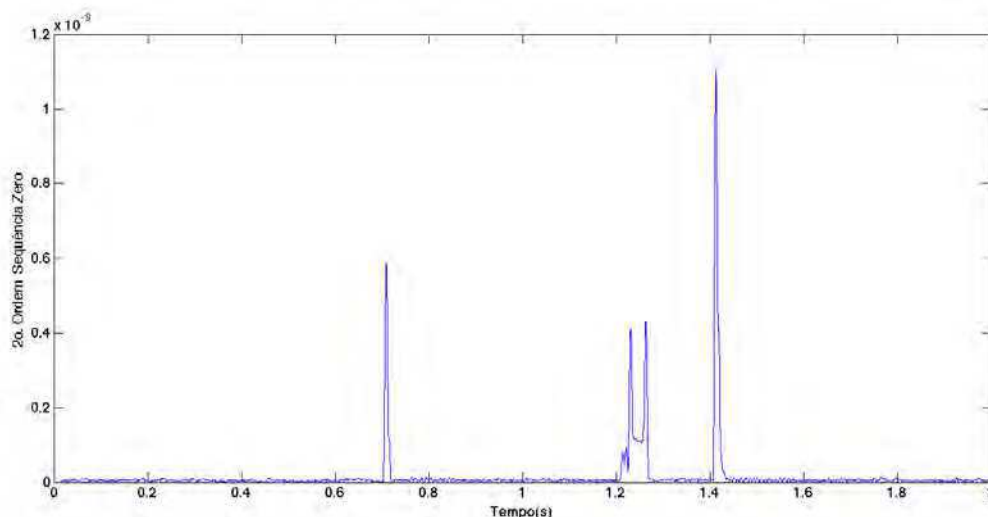


Figura 4.10: Harmônicos não característicos de Sequência Zero – Neste caso segunda harmônica de sequência zero para o caso 1.

Para este caso específico, pode-se observar que no caso da primeira falta a técnica é sensível apenas ao instante final da falta, não percebendo seu início. Já a segunda falta é percebida com boa precisão. Ainda, o chaveamento do banco de capacitores não é percebido neste caso.

A técnica que utiliza harmônicos de baixa ordem de sequência negativa para a detecção de faltas de alta impedância foi implementada como o quarto método deste estudo. Na literatura esta técnica é defendida por conseguir perceber variações instantâneas e desbalanços de corrente em um sistema trifásico. Na Figura ?? os resultados desta técnica são apresentados.

Neste caso, a técnica percebeu ambas as faltas, mas foi bastante sensível também para o chaveamento do banco de capacitores.

A última técnica testada foi a Transformada de Fourier Janelada, para a implementação desta técnica foram realizadas as seguintes considerações:

1. Foi encontrada uma componente única que continha o sinal de todas as fases do sistema utilizando a equação: $y(t) = \frac{ia(t)+ib(t)+ic(t)}{ia(max)+ib(max)+ic(max)}$
2. Este sinal $y(t)$ foi amostrado a uma frequência de 20 kHz.
3. Utilizando uma janela de Hamming truncada em 256 pontos foi calculado a FFT deste sinal.

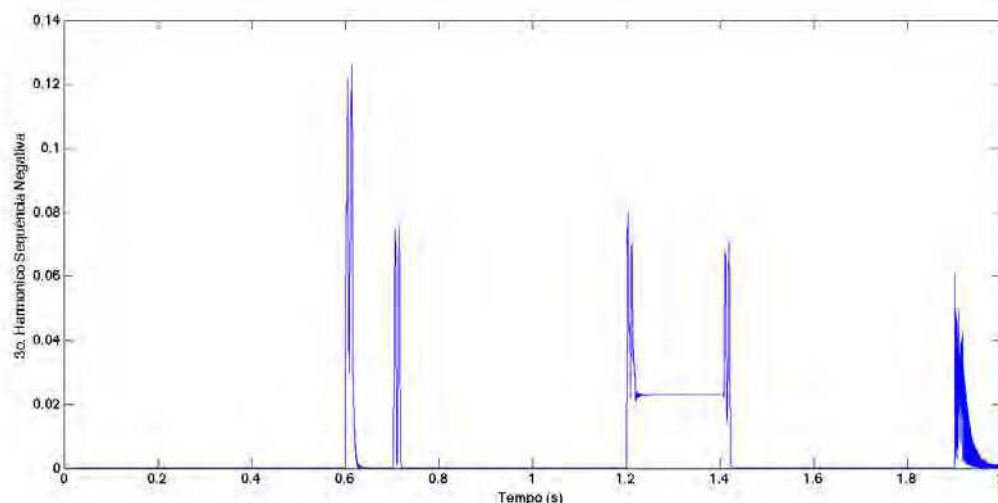


Figura 4.11: Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa - Neste caso Terceira harmônica de sequência negativa para o caso 1.

O resultado desta técnica é apresentado na Figura 4.12.

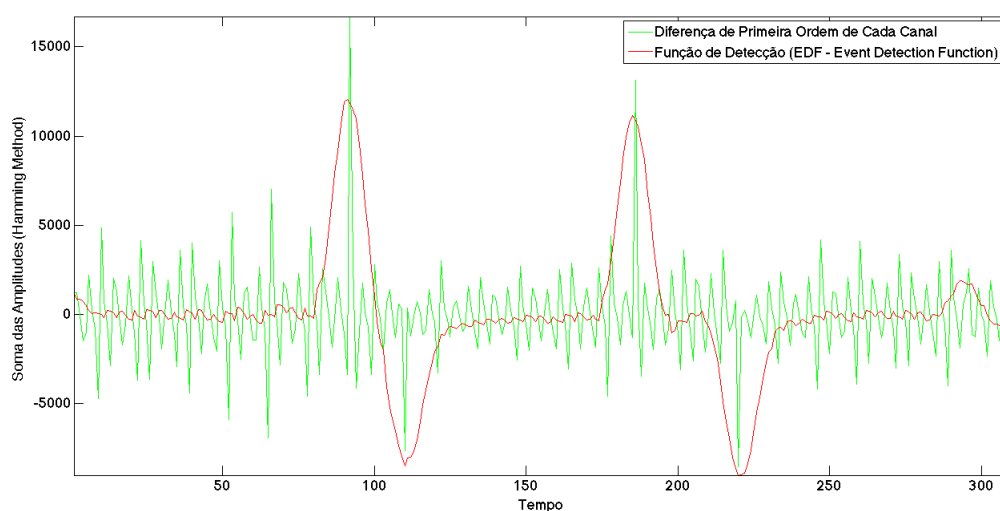


Figura 4.12: Transformada de Fourier Janelada utilizando uma janela de Hamming para o caso 1.

Esta técnica apresenta uma boa percepção as falhas aplicadas ao sistema, entretanto algumas considerações precisam ser feitas. Em primeiro lugar o sistema aqui apresentado possui baixa quantidade de ruídos. Em segundo lugar esta técnica necessita do truncamento apresentado no item (3) anterior, este truncamento pode provocar erros quando de falhas que estão fora das frequências vistas por esta janela. Além disso, a informação da janela precisa estar totalmente amostrada para a realização da mesma proporcionando um atraso

nesta detecção.

4.2 Segundo Caso

No segundo caso apresentado na Figura 4.13, foram aplicadas também duas faltas de alta impedância uma próxima e outra distante da subestação. A primeira no final do ramal 4 próximo a última carga iniciando em 0,7 segundos com duração de 0,3 segundos. A segunda falta no início do ramal 5 iniciando em 1,4 segundos com duração de 0,3 segundos. Foi adicionado também um banco de capacitores em uma posição intermediária do ramal 4, acionado em 1,9 segundos.

Análogo ao primeiro caso neste segundo caso na Figura 4.14 pode se observar que durante o funcionamento normal do sistema tem-se tensões estabilizadas em torno de 13,5 kV aproximadamente. Observa-se também o desequilíbrio característico gerado nas condições de falta monofásica, apesar do mesmo não apresentar variações ou incremento de tensão significativo. O chaveamento do banco de capacitores no entanto, apresenta um distúrbio bastante significativo com conteúdo em alta frequência.

Simulando o circuito apresentado tem-se na Figura 4.15 detalhes das correntes do sistema onde pode-se observar que em regime elas são idênticas as apresentadas na Figura 4.5. A variação de corrente é típica de uma falta de alta impedância com variações na ordem de 0,8 A (que representa menos de 0,7 % da corrente nominal). Para este caso o chaveamento do banco de capacitores apresenta variação de corrente bastante significativa também com incremento no conteúdo em alta frequência.

Para este caso também foi aplicada a técnica da transformada wavelet do tipo Daubechies de Terceira Ordem (db3) produzindo o resultado apresentado na Figura 4.16.

A transformada wavelet neste caso também consegue identificar o instante inicial de cada uma das faltas provocadas. Entretanto o chaveamento de um banco de capacitores, conforme já foi observado nas variações de tensões e correntes, provoca um distúrbio significativo e

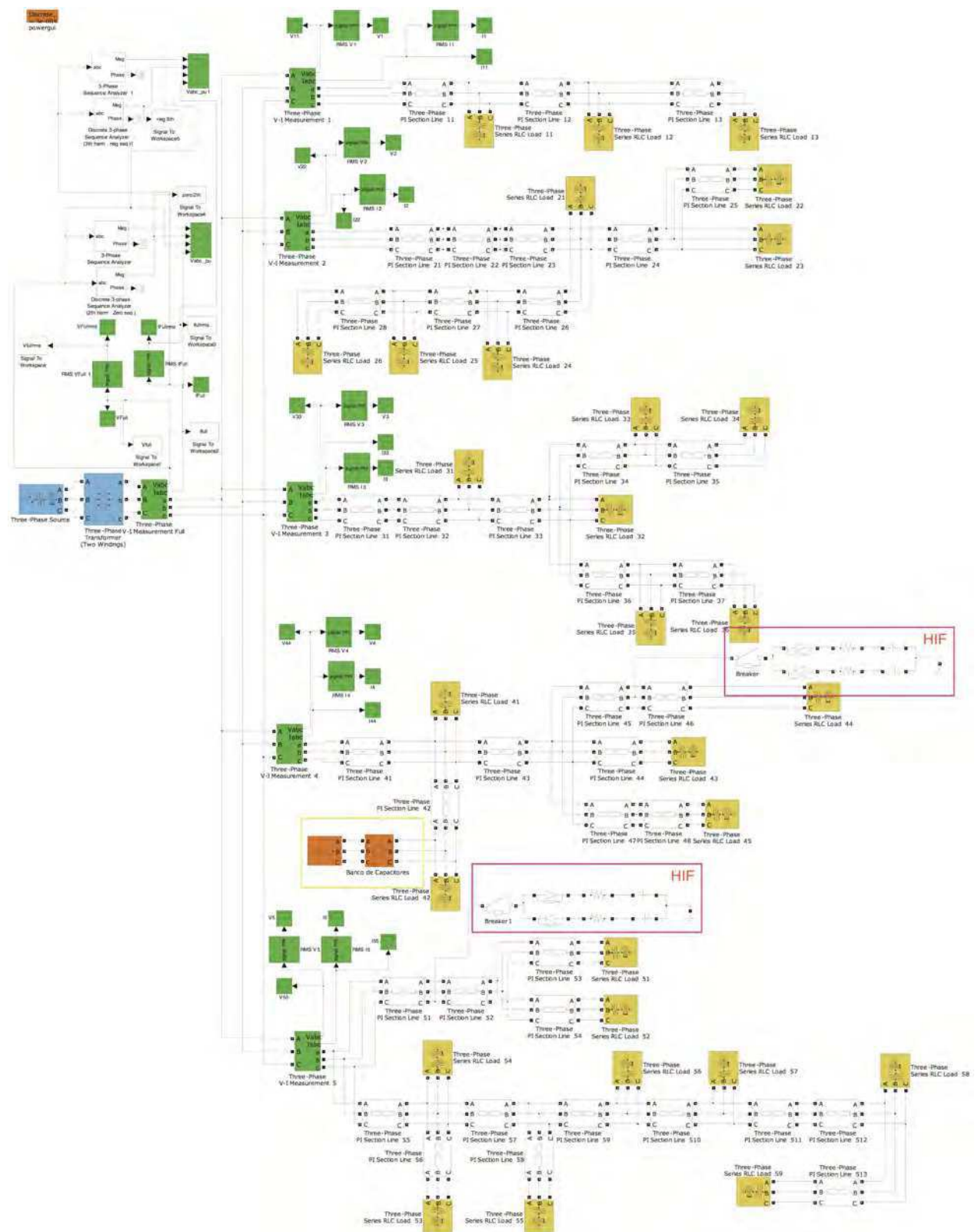


Figura 4.13: Circuito simulado no SIMULINK/MATLAB representando o caso 2.

é identificado, neste caso, ainda com mais intensidade e com uma resposta também muito semelhante à resposta da WT ao distúrbio característico de uma falta.

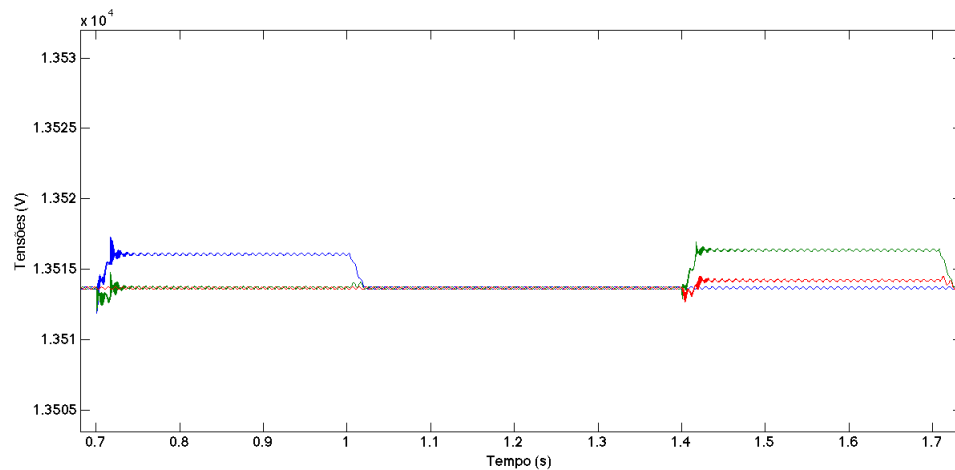


Figura 4.14: Detalhe das tensões trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 2.

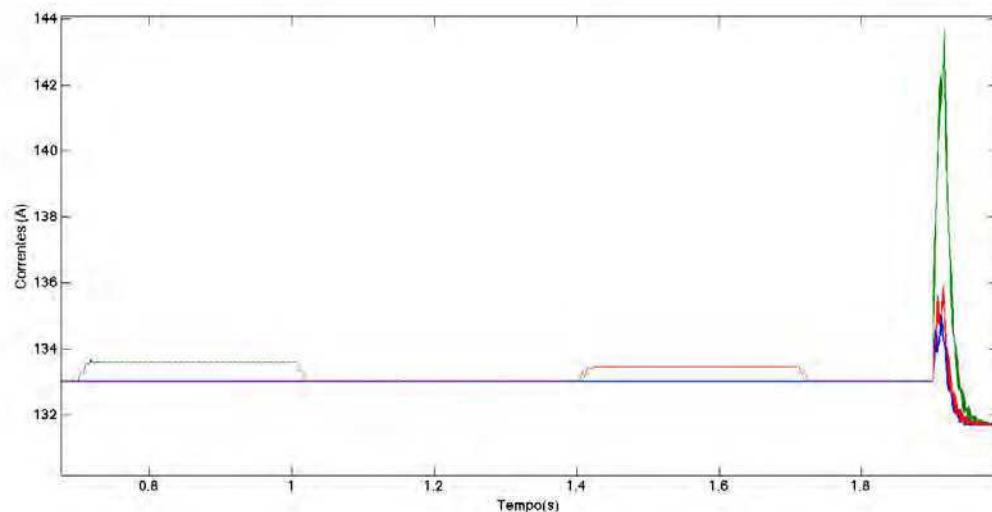


Figura 4.15: Correntes trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 2.

Utilizando a técnica de detecção através de uma Rede Neural Artificial neste segundo caso (treinada a partir das informações geradas pelo primeiro caso), pode-se observar o seu resultado na Figura 4.17. Neste resultado a técnica apresenta uma correta detecção das faltas mesmo elas estando localizadas em circuitos e posições muito diferentes da original (treinamento). No entanto, o transitório provocado pelo chaveamento do banco de capacitores foi bastante significativo fazendo com que a RNA apresentasse um resultado equivocado e fora de qualquer padrão do treinamento original.

O terceiro método foi implementado e o resultado desta técnica é apresentado na Figura 4.18.

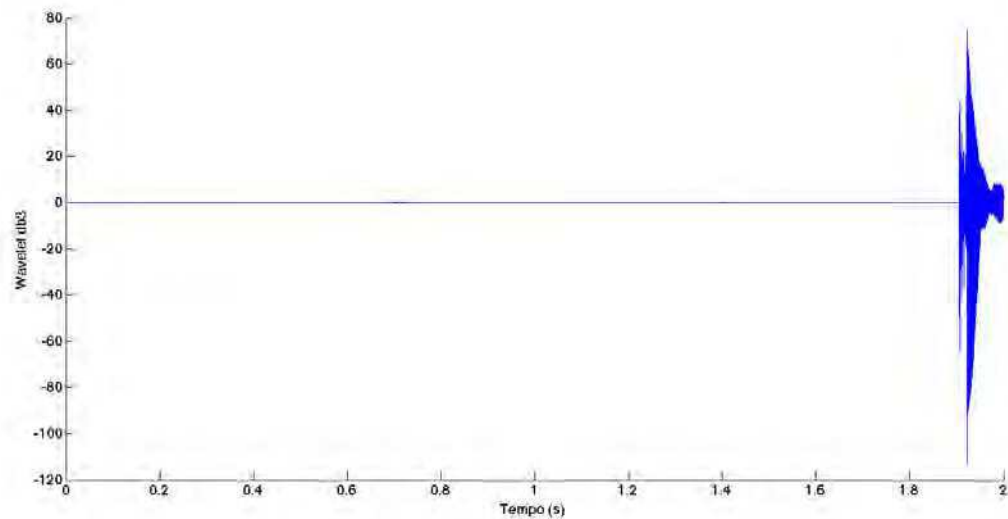


Figura 4.16: Resultado da transformada wavelet para o circuito simulado no caso 2.

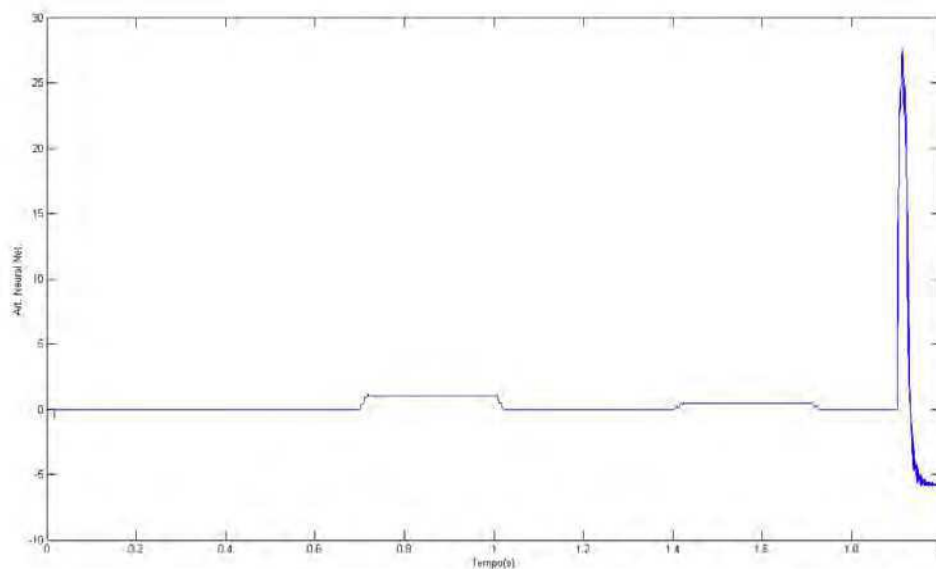


Figura 4.17: Resultado da aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) no circuito simulado no caso 2.

Como aconteceu no primeiro caso (primeira falta), pode-se observar que no caso da segunda falta a técnica é sensível apenas ao instante final da falta, não percebendo seu início. Já a primeira falta não pôde ser percebida por este método de forma conclusiva. Por fim, o chaveamento do banco de capacitores não é percebido de forma significativa também neste caso.

A técnica de análise de terceiro harmônico de sequência negativa para a detecção de

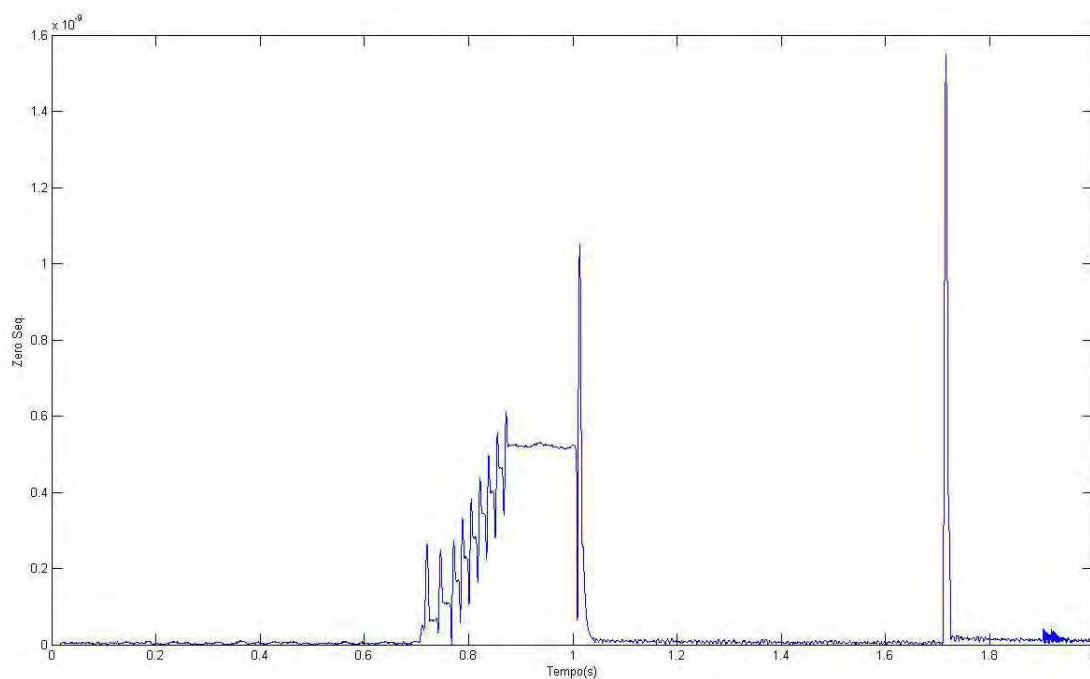


Figura 4.18: Harmônicos não característicos de Seqüência Zero – Neste caso segunda harmônica de seqüência zero para o caso 2.

faltas de alta impedância foi implementada também neste caso e os seus resultados são apresentados na Figura 4.19

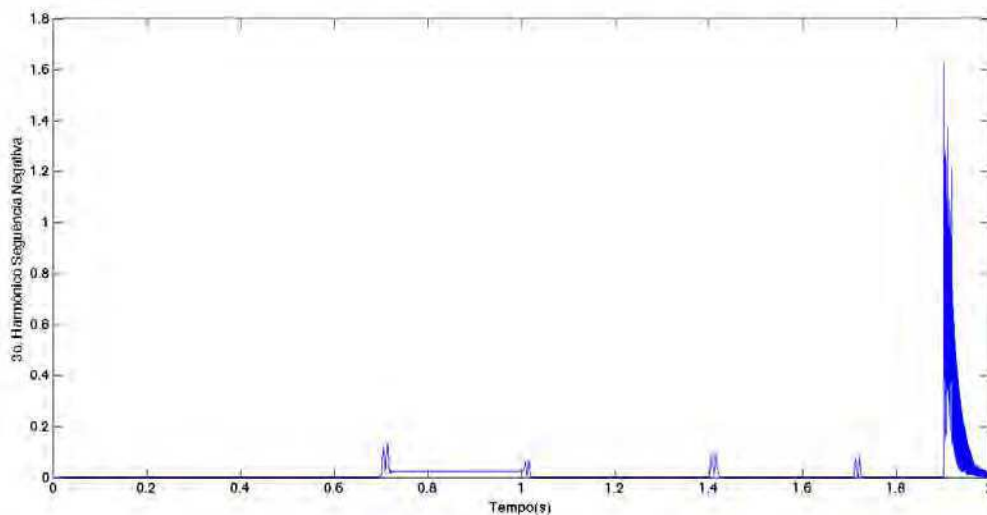


Figura 4.19: Harmônicos de baixa ordem de seqüência negativa - Neste caso Terceira harmônica de seqüência negativa para o caso 2.

Assim como no primeiro caso, neste caso a técnica também percebeu ambas as faltas, apesar de apresentar respostas diferenciadas para cada uma delas. Também foi bastante

sensível para o chaveamento do banco de capacitores.

O resultado para a técnica utilizando a Transformada de Fourier Janelada é apresentado na Figura 4.20 .

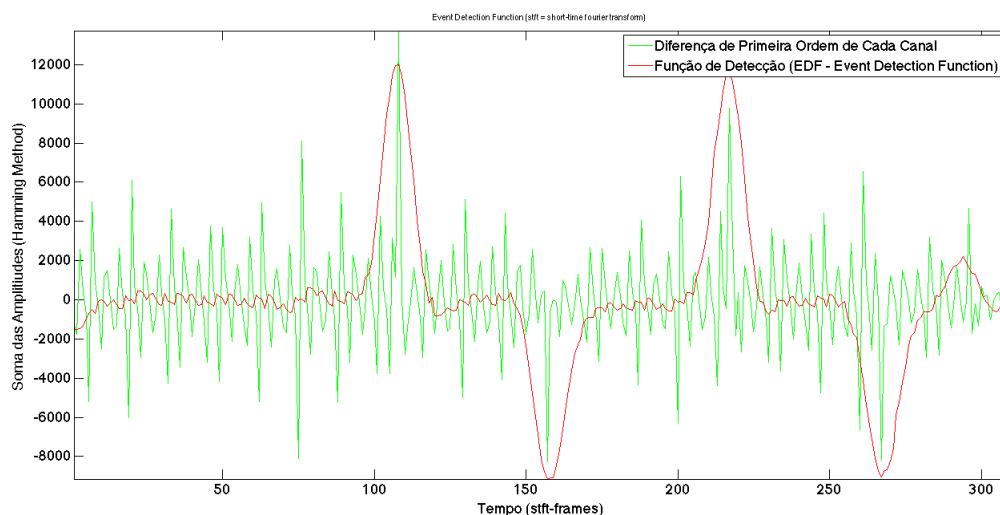


Figura 4.20: Transformada de Fourier Janelada utilizando uma janela de Hamming para o caso 2.

Novamente esta técnica apresenta uma boa percepção as faltas aplicadas ao sistema, entretanto as considerações anteriores também serão pertinentes a todos os casos. Neste caso, o banco de capacitores também apresentou um distúrbio de menor intensidade visto por esta técnica. Novamente neste, caso deve se reforçar que o prévio conhecimento do instante de ocorrência da falta contribui para um resultado mais preciso. Este método portanto, não apresenta confiabilidade e caso a "janela" não seja dimensionada de acordo com o evento, é provável que esta técnica falhe e a falta passe despercebida pela mesma.

4.3 Terceiro Caso

Neste terceiro caso, foram aplicadas três faltas de alta impedância todas distantes da subestação no ramal com corrente de valor significativo em comparação com os demais (ramal 5 têm corrente em torno de 28 A cerca de aproximadamente 22% do total) e fases distintas. A primeira iniciando em 0,7 segundos com duração de 0,2 segundos, a segunda iniciando em 1,0 segundo com duração de 0,4 segundos e a terceira iniciando em 1,6 segundos

com duração de 0,3 segundos. Foi adicionado também um banco de capacitores em uma posição intermediária do ramal 1, acionado em 0,2 segundos, permanecendo acionado por todo período da simulação. Cabe ressaltar que o ramal 1 é o que possui a menor corrente em regime (cerca de 3,2 A ou ainda 2,5% do total do sistema completo).

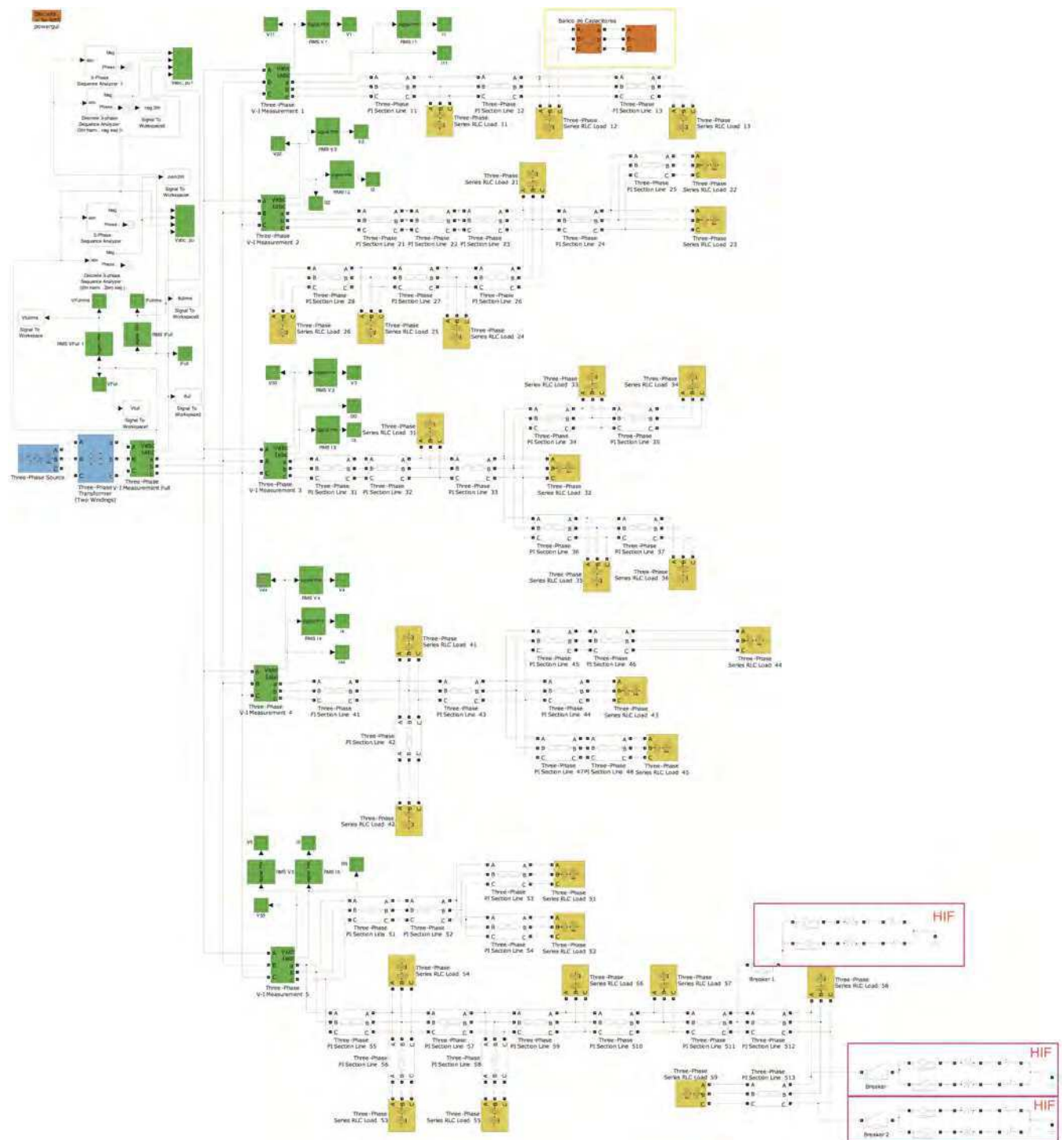


Figura 4.21: Circuito simulado no SIMULINK/MATLAB representando o caso 3.

Na Figura 4.22 percebe-se que durante o funcionamento normal do sistema tem-se tensões

estabilizadas em torno de 13,5 kV aproximadamente. Como nas demais situações pode-se observar também o desequilíbrio característico gerado nas condições de falta monofásica, apesar do mesmo não apresentar variações ou incremento de tensão significativo. O chaveamento do banco de capacitores, por sua vez, apresenta um distúrbio bastante significativo com conteúdo em alta frequência.

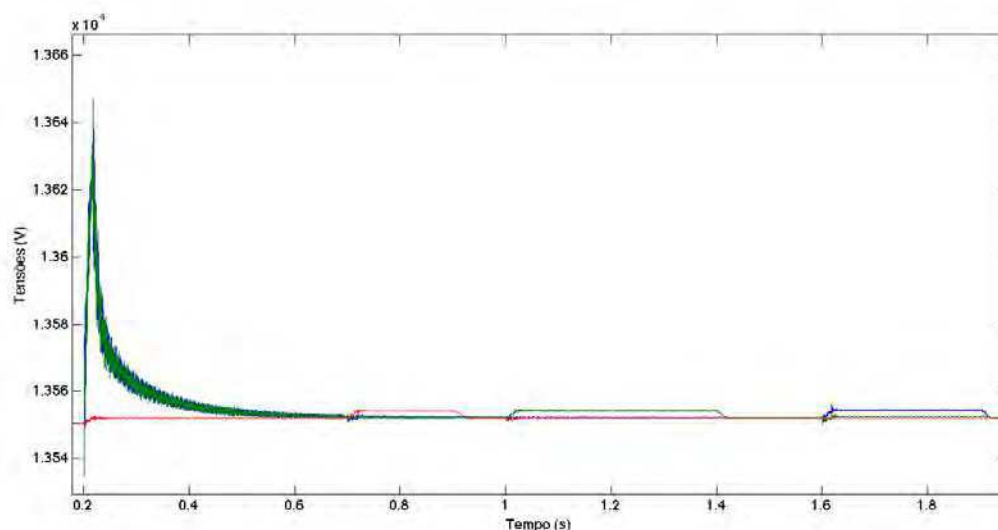


Figura 4.22: Detalhes das tensões trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 3.

Simulando o circuito apresentado tem-se na Figura 4.23 as correntes do sistema durante todo o período de simulação. Como ocorre nos demais casos a variação de corrente é típica de uma falta de alta impedância com variações chegando a um máximo de 0,5A (que representa menos de 0,4 % da corrente nominal). Para este caso o chaveamento do Banco de capacitores apresenta variação de corrente, pouco significativa, mas com incremento no conteúdo em alta frequência.

Na Figura 4.24 tem-se os resultados da aplicação da técnica da transformada wavelet do tipo Daubechies de Terceira Ordem (db3).

O instante inicial de cada uma das faltas é percebido como nos demais casos pela transformada de wavelet. Entretanto o distúrbio provocado pelo chaveamento de um banco de capacitores apresenta variações bastante significativas e é percebido também com uma resposta muito semelhante à resposta da WT ao distúrbio característico de uma falta.

Na Figura 4.25 é apresentado o resultado obtido da detecção utilizando a técnica de detecção através de uma Rede Neural Artificial (também treinada a partir das informações

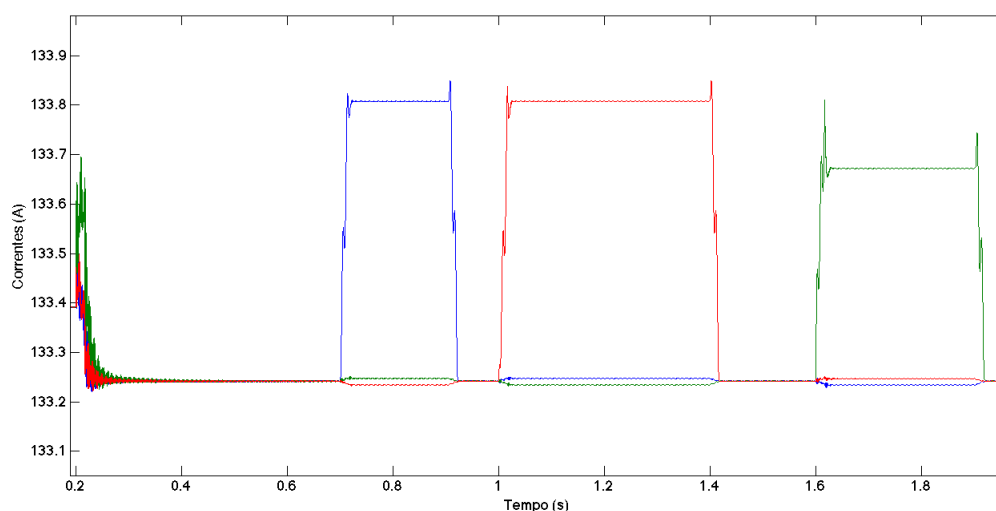


Figura 4.23: Detalhes das correntes trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 3.

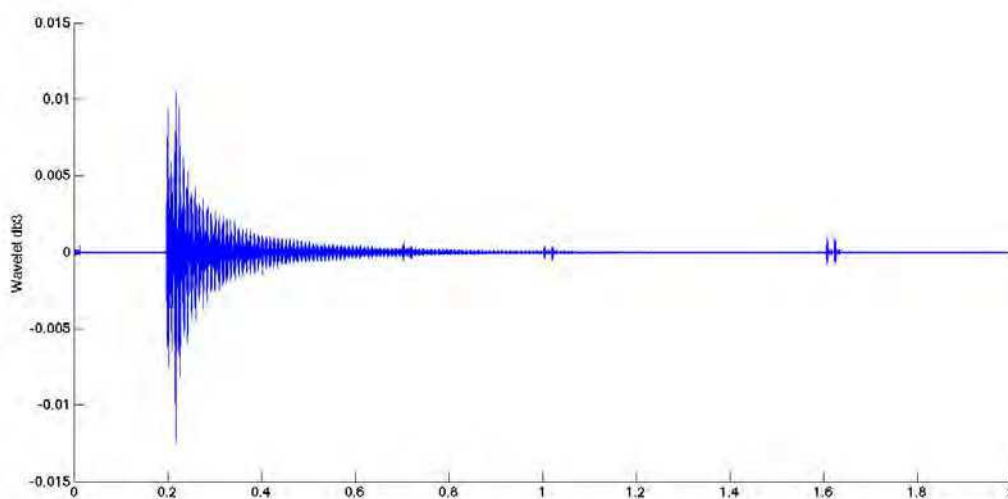


Figura 4.24: Resultado da transformada wavelet para o circuito simulado no caso 3.

geradas pelo primeiro caso). O que se percebe neste caso é que os valores detectados não convergem para os resultados do treinamento.

Na Figura 4.26 tem-se o resultado da implementação do terceiro método para este terceiro caso.

Visivelmente, esta técnica para várias condições de falta, consegue apenas perceber o instante final da falta não percebendo que o circuito esta sob condição de falta. Isso pode ser observado novamente na Figura 4.26, pois a primeira e a terceira falta apenas são percebidas

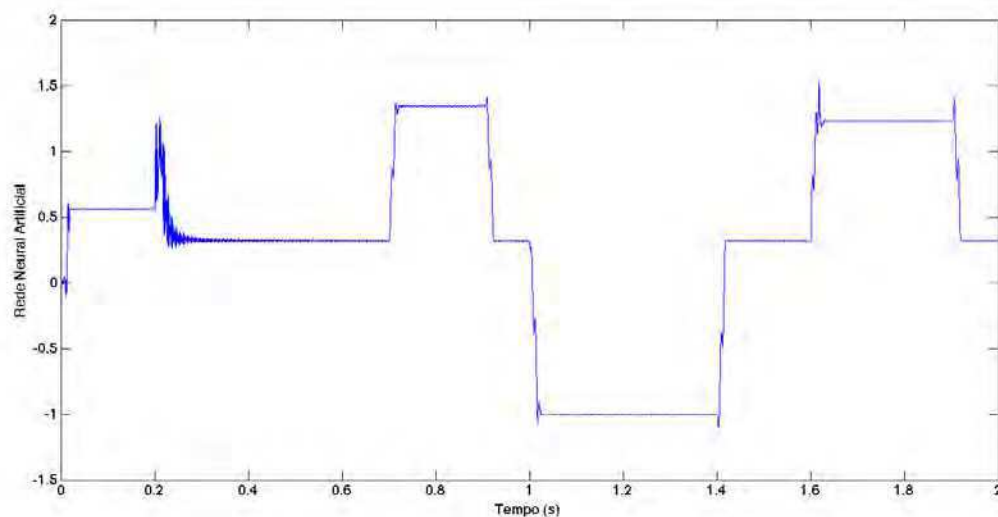


Figura 4.25: Resultado da aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) no circuito simulado no caso 3.

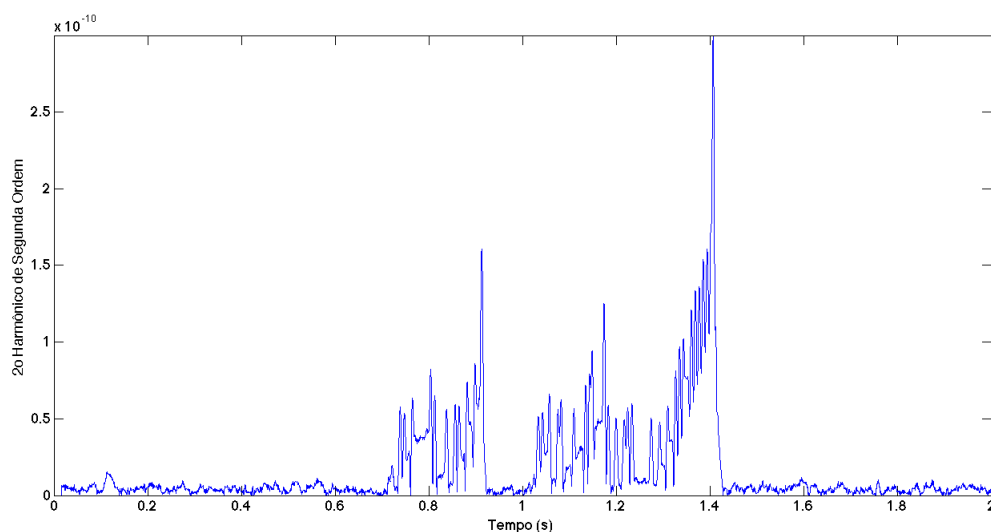


Figura 4.26: Harmônicos não característicos de Sequência Zero – Neste caso segunda harmônica de sequência zero para o caso 3.

no instante final da sua ocorrência.

Implementando-se a técnica de análise de terceiro harmônico de Sequência Negativa para este caso temos os resultados mostrados na Figura 4.27.

Esta técnica, neste caso, também identifica as faltas adequadamente, no entanto como nos demais casos ela foi bastante sensível também para o chaveamento do banco de capacitores.

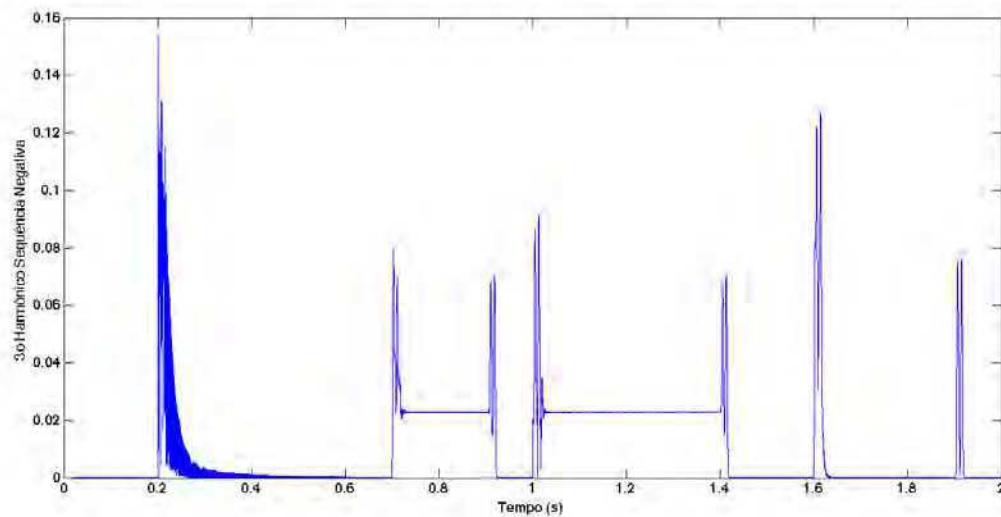


Figura 4.27: Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa - Neste caso Terceira harmônica de sequência negativa para o caso 3.

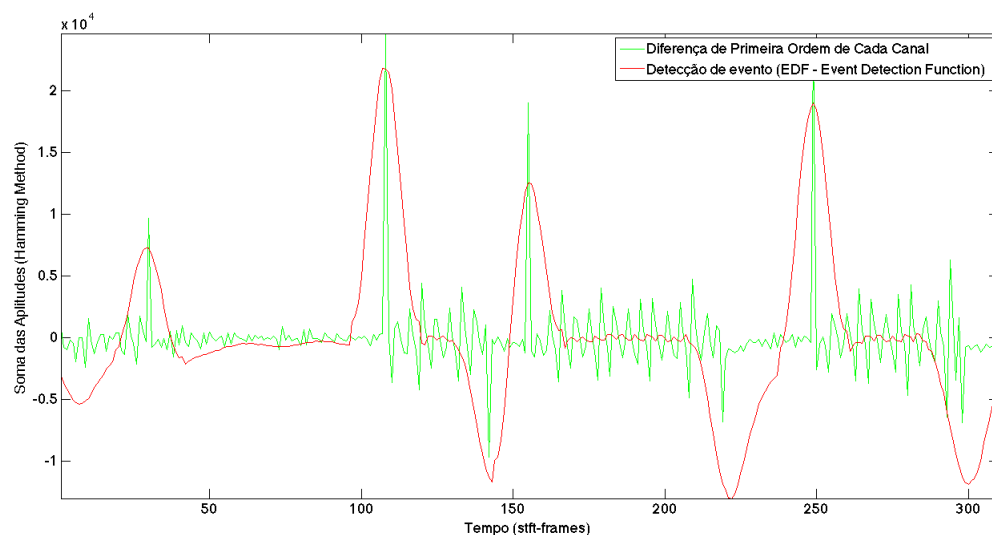


Figura 4.28: Transformada de Fourier Janelada utilizando uma janela de Hamming para o caso 3.

A técnica utilizando a Transformada de Fourier Janelada apresenta, conforme a Figura 4.28, uma boa percepção as falhas aplicadas ao sistema, entretanto as considerações anteriores também serão pertinentes a todos os casos. Ainda, também neste caso o banco de capacitores apresentou um distúrbio de menor intensidade mas que foi percebido pela técnica.

4.4 Quarto Caso

Finalmente, neste quarto caso, foram aplicadas duas faltas de alta impedância uma no ramal 1 e outra no ramal 3. A primeira iniciando em 0,6 segundos com duração de 0,1 segundos, a segunda iniciando em 1,2 segundos com duração de 0,2 segundos. Foi adicionado um banco de capacitores no ramal 2 acionado em 1,9 segundos. E ainda, uma variação de carga no ramal 4 do sistema em 1s. Esta variação é bastante significativa, pois tem um nível de corrente de aproximadamente 15 A representando 12% da corrente nominal do sistema completo.

Na Figura 4.30 pode-se observar que durante o funcionamento normal do sistema tem-se tensões estabilizadas em torno de 13,55 kV e após a inserção de carga ela cai pra 13,5 kV.

Através da Figura 4.31, percebe-se que a variação de carga é dezenas de vezes maior que as variações de corrente, para este caso específico, ocasionadas por faltas de alta impedância.

Os resultados da aplicação da técnica da transformada wavelet do tipo Daubechies de Terceira Ordem (db3) no caso 4 são apresentados na Figura 4.32. Assim como nos casos anteriores, o instante inicial de cada uma das faltas é percebido, entretanto a variação de carga e o acionamento do banco também apresentam uma assinatura neste sinal. Assim, em todas elas, fica difícil a identificação do evento, considerando apenas esta informação.

Utilizando a técnica de detecção através de uma Rede Neural Artificial (ainda treinada a partir das informações geradas pelo primeiro caso) tem-se os resultados mostrados na Figura 4.33. Neste caso os valores detectados também não convergem para os resultados do treinamento, mesmo assim, as faltas apresentam variações na resposta, da mesma forma que no caso 3.

Para este quarto caso pode-se observar o resultado do terceiro método na Figura 4.34. Novamente esta técnica em alguns casos, consegue apenas perceber o instante final da falta não percebendo o início da mesma. O que chama atenção é que nem o banco de capacitores nem a variação de carga foram detectadas por este método.

Na Figura 4.35 tem-se a implementação da técnica de análise de terceiro harmônico de sequência negativa para este caso. Neste caso, para esta técnica, a variação de carga

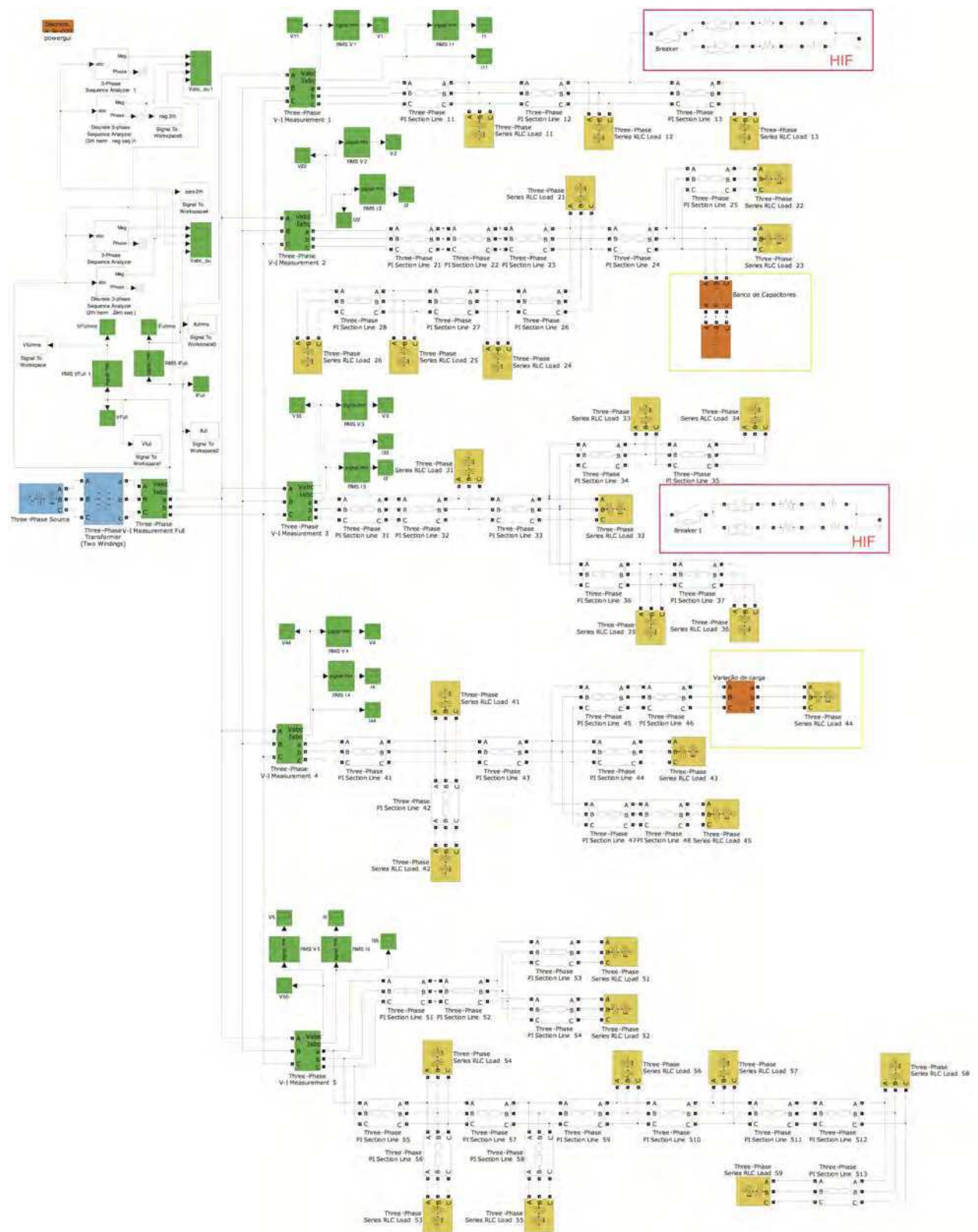


Figura 4.29: Circuito simulado no SIMULINK/MATLAB representando o caso 4.

apresenta um incremento significativo na informação, e ainda, as faltas foram detectadas corretamente. Como nos casos anteriores pode-se destacar que todos os eventos do sistema

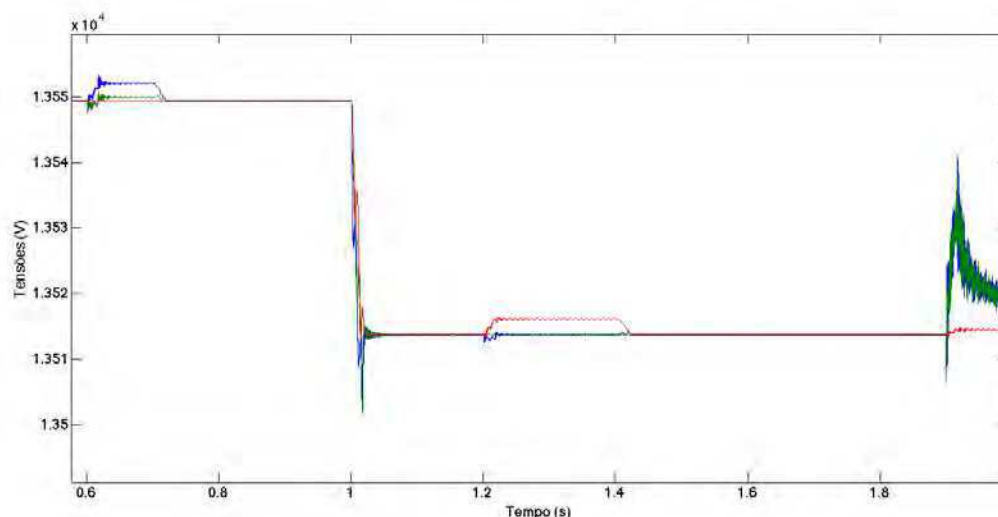


Figura 4.30: Detalhes das tensões trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 4.

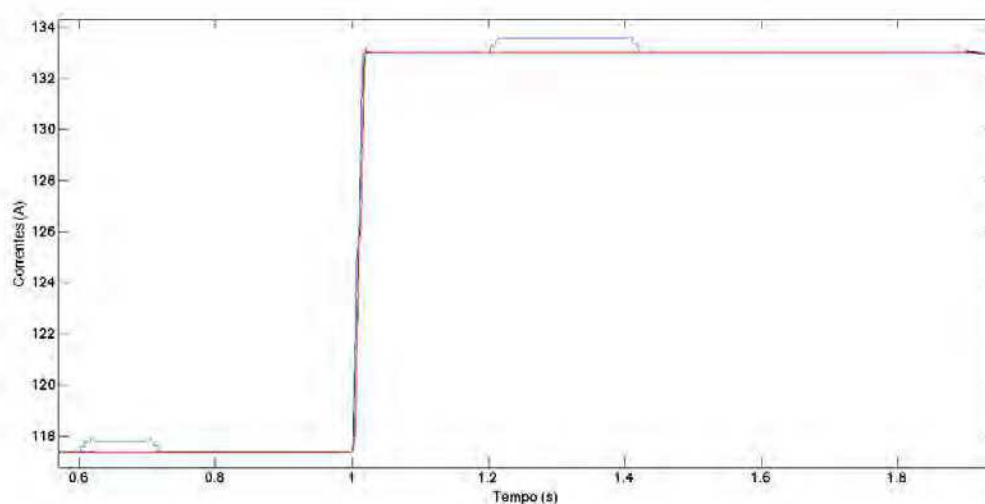


Figura 4.31: Detalhes das correntes trifásicas do sistema para o circuito simulado no caso 4.

aparecem nesta técnica, sejam eles provenientes de falta ou não.

Finalmente, a técnica utilizando a Transformada de Fourier Janelada novamente apresenta percepção as faltas aplicadas ao sistema, mas isto ocorre somente com o prévio conhecimento do instante da falta e o correto dimensionamento da janela, o que não é possível na prática.

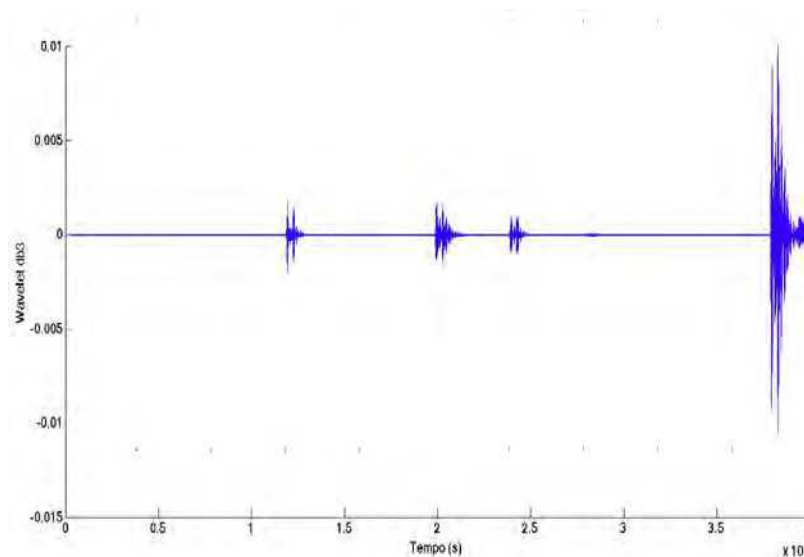


Figura 4.32: Resultado da transformada wavelet para o circuito simulado no caso 4.

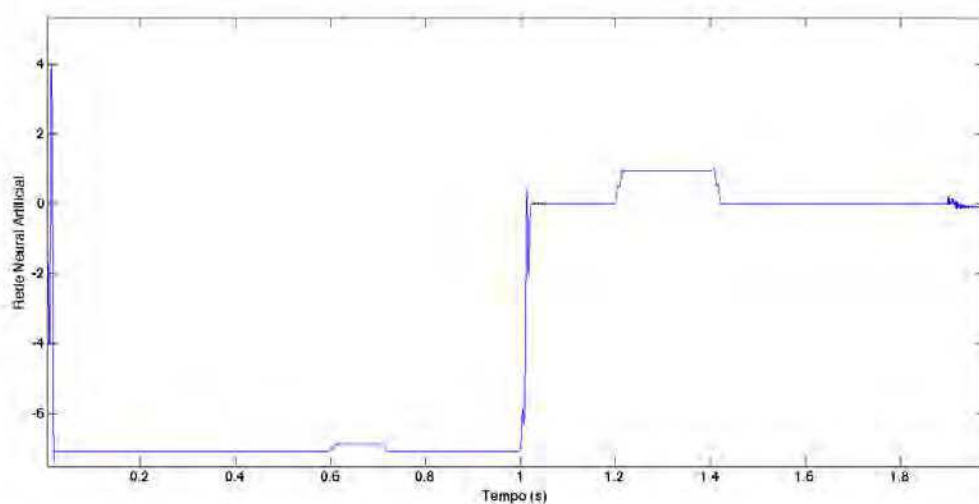


Figura 4.33: Resultado da aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) no circuito simulado no caso 4.

4.5 Considerações sobre os Resultados

Neste capítulo foram comparadas cinco técnicas consagradas na literatura para detecção de FAI. Elas foram testadas em um sistema de distribuição no qual foram criados 4 casos e para cada um deles as técnicas escolhidas foram aplicadas e seus resultados analisados. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que nenhuma das técnicas estudadas apresenta um comportamento ótimo em relação à detecção de faltas de alta impedância. Entretanto,

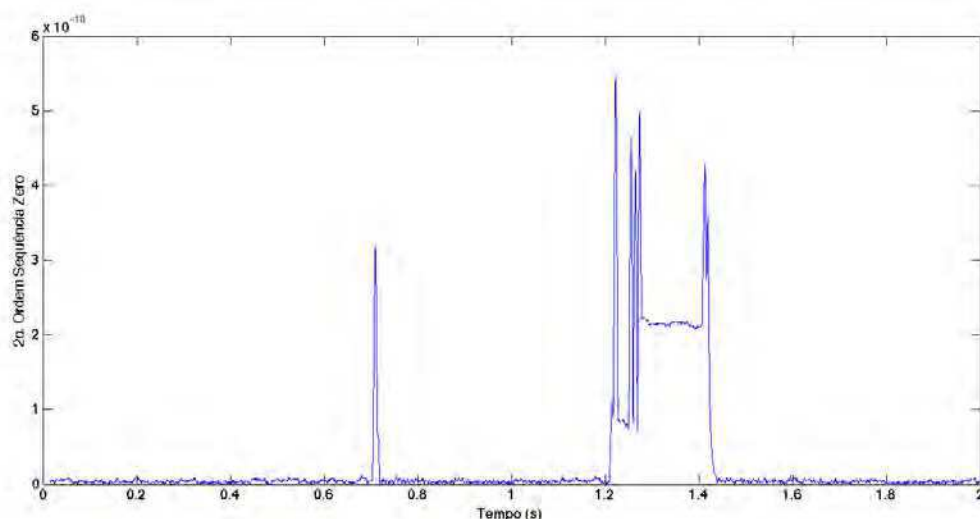


Figura 4.34: Harmônicos não característicos de Sequência Zero – Neste caso segunda harmônica de sequência zero para o caso 4.

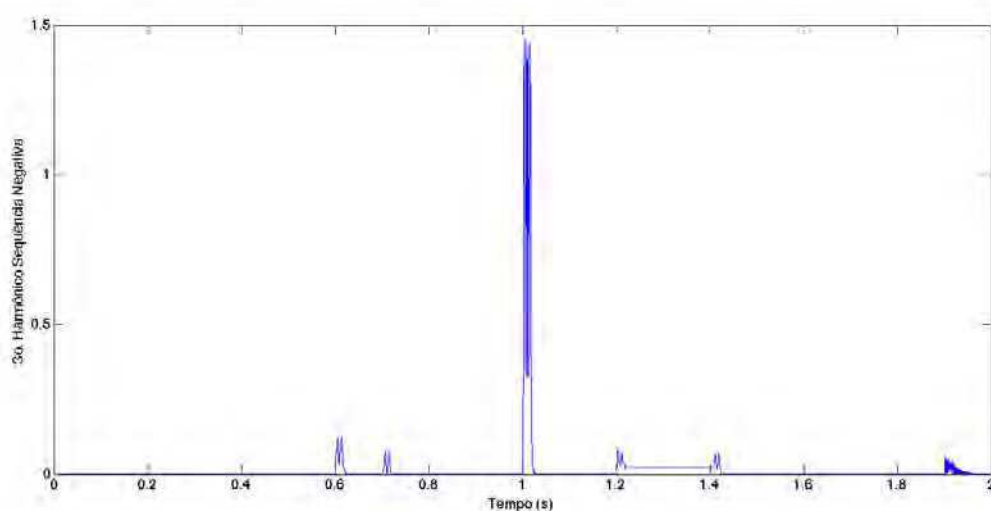


Figura 4.35: Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa - Neste caso Terceira harmônica de sequência negativa para o caso 4.

várias observações puderam ser realizadas a partir dos resultados.

A transformada wavelet é bastante sensível aos eventos transitórios do sistema. Assim, ela consegue perceber toda e qualquer condição de falta do sistema. Entretanto, operações normais como, variações abruptas de carga e chaveamento de bancos de capacitores, também são detectadas por ela como uma condição de falta. Mesmo considerando suas deficiências o fato da técnica baseada em wavelets perceber a totalidade dos casos de faltas não pode ser desprezada.

A conclusão parcial sobre a técnica baseada em Redes Neurais Artificiais é que se esta for corretamente treinada, possui entre todas, o melhor desempenho para o reconhecimento de padrões específicos no sistema. No entanto, a previsão de todos os eventos normais do sistema, bem como, as perturbações de carga específicas que podem acontecer no mesmo, são impossíveis de ser modeladas. Assim, o treinamento da rede neural é fator decisivo para o bom desempenho da mesma.

Em todos os casos, a técnica baseada em Harmônicos não característicos de Sequência Zero (no caso específico foram observados os Harmônicos de segunda ordem), demonstrou falhas na detecção de faltas de alta impedância. Principalmente, na detecção do início da falta, o que ocorreu em condições de falta distintas e aleatórias. Assim, esta técnica não apresenta confiabilidade, para este tipo de detecção. Por outro lado, em todos os casos aqui estudados, os eventos ditos normais do sistema, não foram, na sua totalidade, detectados. Ou seja, apesar de não detectar com precisão as Faltas de Alta impedância, esta técnica consegue ser imune (ao menos nos casos aqui estudados) aos eventos normais do sistema.

Para a técnica baseada na observação dos Harmônicos de baixa ordem de sequência negativa, conclui-se que a mesma possui um desempenho limitado. Principalmente, se levarmos em conta que todos os eventos do sistema interferem neste sinal tornando quase impossível determinar utilizando esta técnica. Ainda no caso da técnica três fica evidente que, qualquer evento no sistema altera ainda mais o desempenho desta técnica.

A técnica baseada na Transformada de Fourier Janelada, apresentou um bom desempenho. Entretanto, como já consolidado na literatura, esta técnica depende da correta amostragem da janela e portanto o truncamento inadequado para o cálculo pode provocar erros ou inclusive a não percepção de uma falta.

Destaca-se que todos os casos aqui apresentados foram também testados em 60Hz, aterando-se características de cabos e demais componentes do sistema para valores usuais do Brasil. Os resultados foram muito semelhantes e pode-se afirmar que todas as conclusões são validadas para este cenário também.

Conclui se, portanto, que uma avaliação, verificando mecanismos de combinação das técnicas apresentadas, corresponde a um estudo que pode contribuir na implementação de uma metodologia mais eficiente na detecção das faltas de alta impedância.

5

Método Ativo de Detecção de Falta de Alta Impedância

Este capítulo apresenta o estudo e a reprodução do método proposto por Zamora (ZAMORA et al., 2007). Este método foi reproduzido no MATLAB/SIMULINK tal como os casos anteriores. São apresentadas as fragilidades deste método e seus limites. A partir disto é proposto um novo método ativo, que através da inclusão de um identificador de mínimos quadrados recursivo estendido, aumenta consideravelmente o seu desempenho.

5.1 Método Ativo de Detecção de Falta de Alta Impedância proposto por Zamora

Em (ZAMORA et al., 2007) foi apresentado um método de detecção de faltas de alta impedância, que apresentou resultados satisfatórios no modelo de sistema de distribuição de energia elétrica propostos pelo mesmo. O objetivo da primeira seção deste capítulo é replicar tal método, no sistema proposto na própria referência. Uma vez que este é o modelo europeu discutido no capítulo 3.

O método proposto por Zamora, implica na superposição de um sinal de tensão a uma frequência fixa que é escolhido, dentro de certos limites, para um sistema específico, que

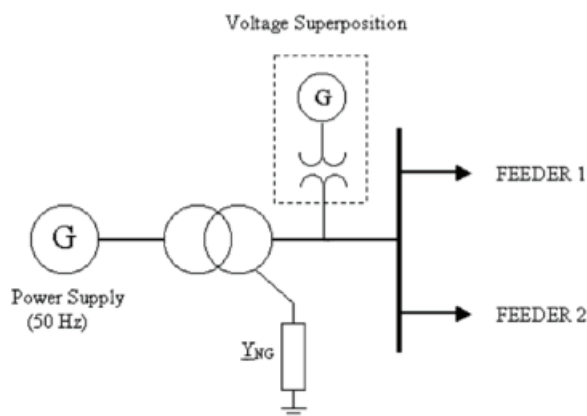


Figura 5.1: Tensão sobreposta ao sistema. Fonte:(ZAMORA et al., 2007)

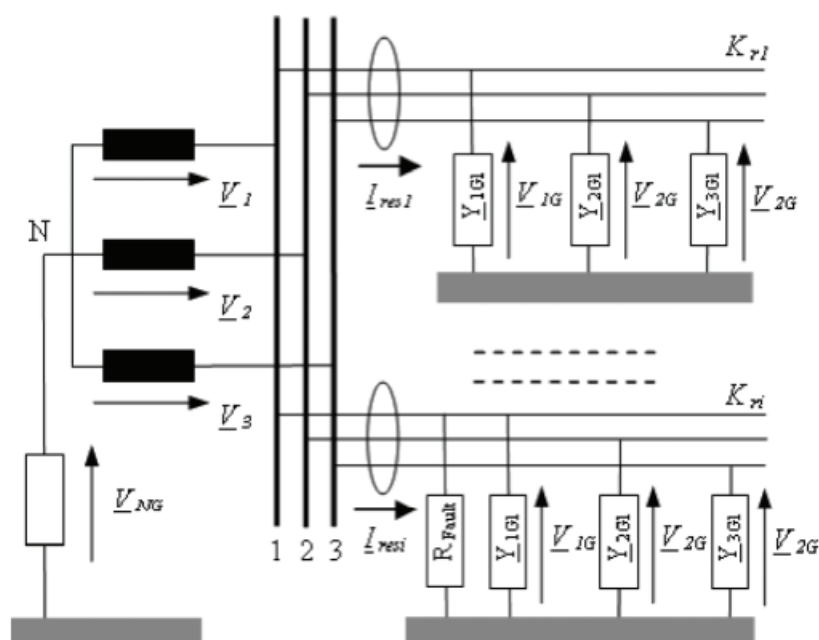


Figura 5.2: Sistema genérico com falta de alta impedância. Fonte:(ZAMORA et al., 2007)

opera de forma independente dos sinais de distribuição. A Figura 5.1 mostra a configuração para um caso genérico. A Figura 5.2 mostra a configuração do sistema genérico com a falta de alta impedância.

O método apresentado por (ZAMORA et al., 2007) considera exclusivamente a análise estacionária dos sinais de tensão e corrente. Sendo assim, a primeira consideração é que durante o transiente eletromagnético do sistema elétrico, o algoritmo é impreciso. Além disto, o algoritmo considera que as faltas de alta impedância são monofásicas e modeladas como um elemento puramente resistivo. Estas limitações, ficam evidentes se considerado que

na literatura técnica, muitos estudos consideram o modelo da falta com comportamento não linear.

A metodologia generalizada, estendida para diversos tipos de aterramentos citados pelo autor, tem base no cálculo da resistência de falta de cada fase e alimentador. O valor desta resistência pode ser obtido por meio das variações registradas na tensão de neutro-terra e a corrente residual dos alimentadores. Dessa forma, a resistência de falta fase-terra da fase “p” correspondente ao alimentador “i” é obtida por:

$$R_{fpi} = \frac{V_{pG}}{(I_{resi} - I_{resi}^{(a)}) - \left(\frac{I_{resi}^{(b)} - I_{resi}^{(a)}}{V_{NG}^{(b)} - V_{NG}^{(a)}} \right) (V_{NG} - V_{NG}^{(a)})} \quad (5.1)$$

$$I_{resi} = I_{1i} + I_{2i} + I_{3i}. \quad (5.2)$$

onde:

- R_{fpi} = Resistência de falta da fase “p”, alimentador “i”.
- I_{resi} = Corrente residual do alimentador “i”.
- V_{NG} = Tensão do Neutro
- V_{pG} = Tensão da fase “p”
- V_h = Tensão Homopolar.
- K_i = Assimetria do alimentador “i”.
- ΔK_{ri} = Relativa variação da assimetria do alimentador “i”.
- (a) Situação pré-falta
- (b) Situação de Superposição

Os índices (a) e (b) se referem às etapas de superposição de sinal. No método descrito por (ZAMORA et al., 2007) existem três diferentes momentos de cálculo da falta. Nestes três momentos são inseridos 2 sinais: sequência positiva e sequência negativa.

1. Situação pré-falta. Somente sequência positiva. Operação normal do sistema. Índice (a).
2. Situação de superposição de sinal. Sequência positiva e sequência zero. Índice (b)
3. Situação presente. Momento que o cálculo da resistência é realizado. Somente sequência positiva. Representa as variáveis sem índice.

Em cada momento são necessárias as aquisições de fase e corrente residual de cada alimentador. Os dados são memorizados para o cálculo da resistência de falta no terceiro período.

Para o cálculo da resistência de falta é necessário a medição da corrente e tensão das fases, individualmente, em 3 situações diferentes. No primeiro momento a tensão sobreposta é composta somente pela sequência positiva (momento “a”). No segundo momento é adicionado a sequência positiva à sequência zero (momento “b”). Por fim, somente a sequência positiva permanece em operação, no momento que a resistência de falta é calculada.

Um dos requisitos do algoritmo é que exista um determinado período, em que as medições do momento “a” e “b” possam ser realizadas, em que não haja faltas no sistema. Este requisito é uma desvantagem deste método uma vez que durante o período da varredura (momento “a” e “b”), o sistema esta vulnerável a falta.

A determinação das características elétricas do sinal de sobreposição é vista em (ZAMORA et al., 2007). Conforme estes trabalhos, a precisão do método da identificação da falta esta relacionada à frequência e amplitude do mesmo. Segundo o autor, deve ser estudado o nível e frequência de ruídos da rede e ainda, considerar seus aspectos construtivos para a escolha dos critérios do sinal de sobreposição.

Para o sistema brasileiro modelado neste trabalho foi utilizado um sinal de tensão na frequência de 485 Hz e amplitude de 225 V (Aplicados na média tensão). A escolha de frequências elevadas é preferencial por influenciar menos o consumidor, porém está restrita a precisão do método conforme mostrado em (ZAMORA et al., 2007). A tabela proposta pelo autor com os níveis de tensão e frequência dos sinais de superposição são mostrados na Tabela 5.1.

A aplicação do método de detecção proposto necessita de circuitos adicionais capazes de

injetar e medir os sinais de superposição.

Tabela 5.1: Frequências recomendadas para superposição do sinal segundo Zamora

Frequencia (Hz)	Valor Máximo(%)
110	1,7
168	1,7
183	3
206	2
217	3
270	3
317	3
383	3
425	3
485	4

Fonte: (ZAMORA et al., 2007)

5.1.1 Resultados

Para fins de comparação, foi modelado o segundo alimentador do sistema europeu apresentado em (ZAMORA et al., 2007), este sem a adição de ruído. O sinal de excitação compreende três momentos como citado anteriormente. Para que não haja transiente na linha, é recomendado que a mudança entre um momento e outro seja gradual. Considerando isto, a forma de onda para excitação é visto na Figura 5.3. O sinal de excitação foi filtrado com o uso de filtros digitais do tipo Butterworth, sintonizados para a frequência do mesmo. Apesar dos filtros resultarem em um defasamento angular, a frequência de excitação é constante e o sinal de sobreposição de tensão e corrente possuem o mesmo defasamento, e, por fim, desta forma são compensados.

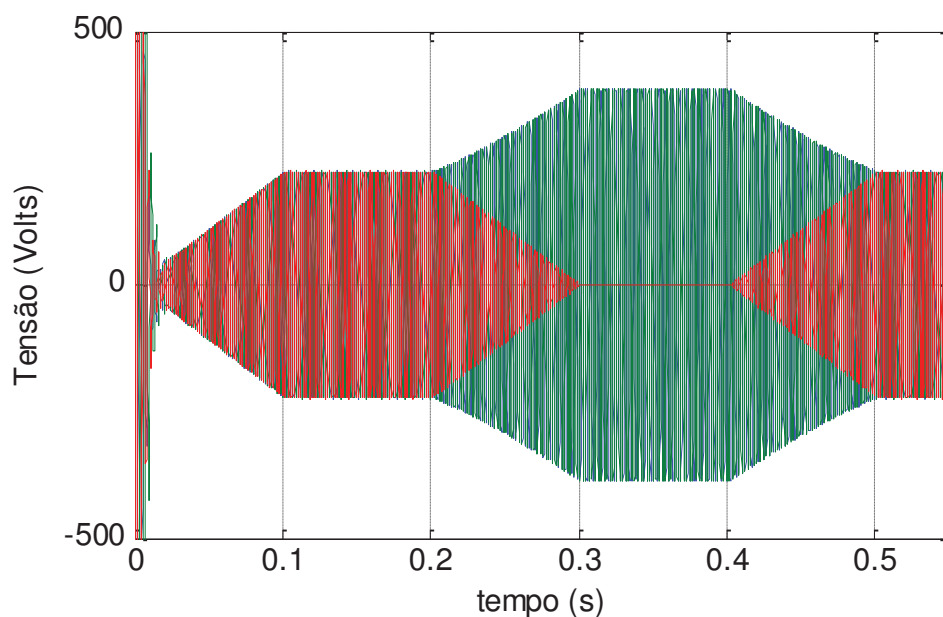


Figura 5.3: Sinal de excitação sobreposto aos níveis de tensão da linha para processo de identificação da falta.

O sinal sobreposto a onda senoidal característica do sistema elétrico é apresentado na Figura 5.4. Desta forma, é possível observar o aspecto negativo da adição de harmônicos pelo sistema de proteção, resultando na distorção da fundamental.

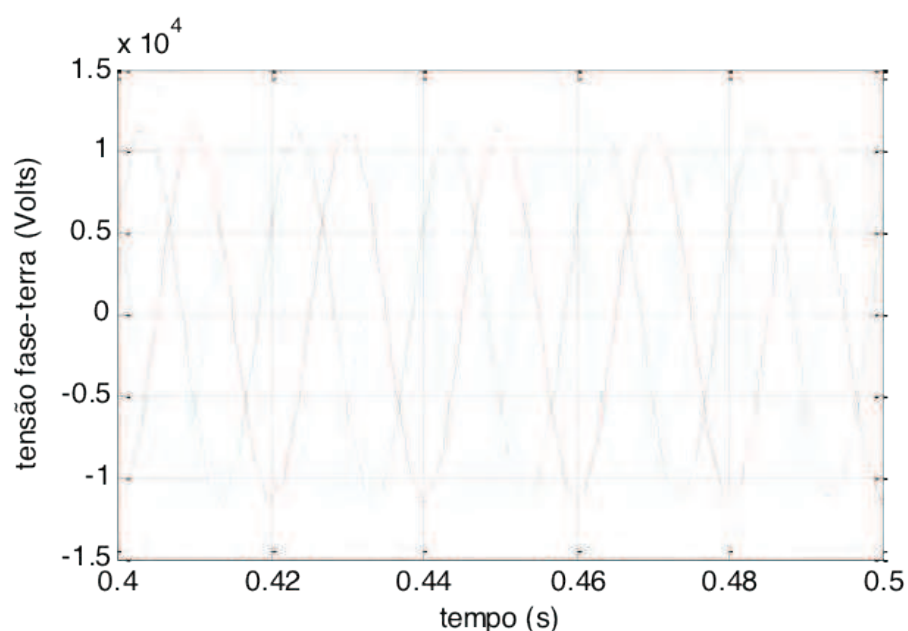


Figura 5.4: Forma de onda medida na subestação com o sinal sobreposto no momento do cálculo de resistência de falta.

Para a validação do algoritmo no modelo europeu criado são avaliados quatro cenários.

No primeiro cenário é simulada uma falta de $2\text{ k}\Omega$, no segundo cenário, uma falta de $10\text{ k}\Omega$, e no terceiro cenário, uma falta de $15\text{ k}\Omega$. No quarto cenário ocorre o fechamento de um banco capacitivo. A Figura 5.5 mostra os níveis de corrente para os quatro cenários simulados. Como pode ser visto, estes níveis são baixos para a detecção destas faltas através dos dispositivos de sobrecorrente. Cabe ressaltar aqui, que as faltas aqui testadas são na sua maioria monofásicas uma vez que são estas as que ocorrem com mais frequência.

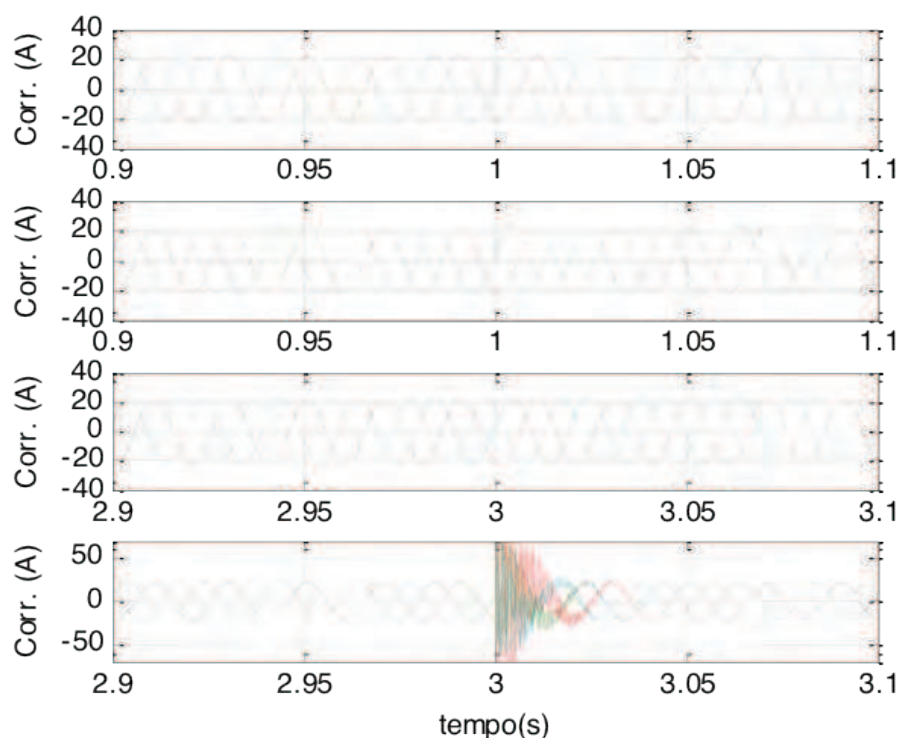


Figura 5.5: Sinais de corrente para os quatro cenários simulados no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu.

A Figura 5.6 mostra o sinal do algoritmo de cálculo de resistência de falta on-line. Nesta são apresentados três sinais, os quais representam a resistência de cada fase do alimentador. Neste sinal percebe-se a oscilação pseudo-caótica do sinal. O sinal foi limitado em $100\text{ k}\Omega$, por este estar acima da capacidade de detecção do algoritmo. Esta limitação é conveniente para visualização e condicionamento para a filtragem posterior. A Figura 5.7 mostra os sinais de saída do valor de resistência de falta no momento de ocorrência do evento da falta. Nestas observa-se que enquanto uma das resistências converge para um determinado valor, as outras, continuam a oscilar de forma pseudo aleatória. Sendo assim, é possível detectar a ocorrência da falta e estipular com certa precisão o seu valor.

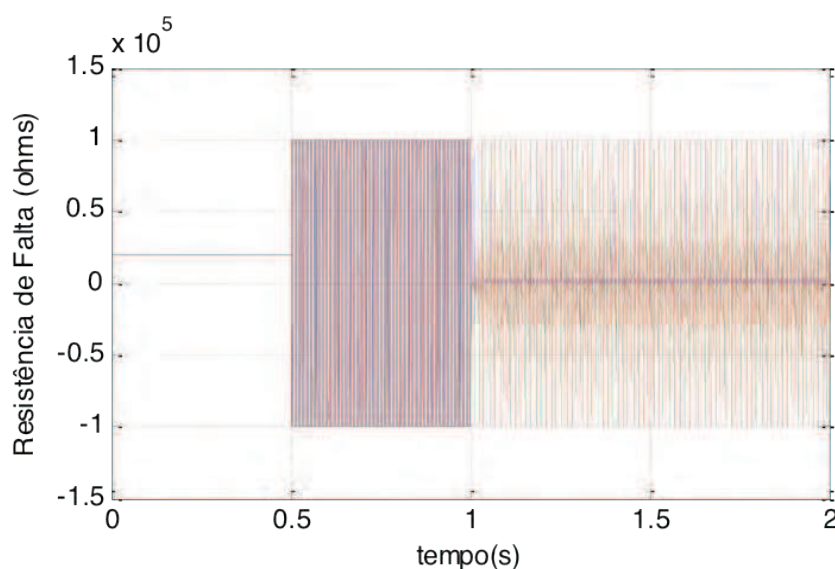


Figura 5.6: Sinal de saída do cálculo de resistência de falta para o primeiro cenário simulado no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu.

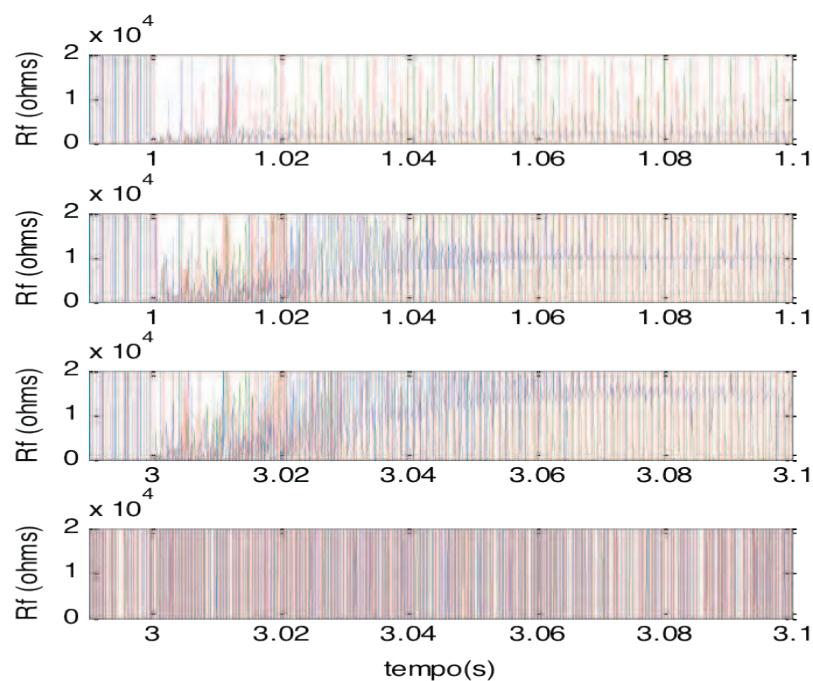


Figura 5.7: Sinal de saída do cálculo de resistência de falta para os quatro cenários simulados no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu.

Por fim, as Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram o sinal filtrado com diferentes graus de ampliação. Nestas é possível observar de forma evidente a convergência dos parâmetros no momento da ocorrência da falta. Ainda é possível obter com maior precisão o valor da resistência calculada.

Os resultados encontrados no sistema europeu descrito por (ZAMORA et al., 2007) e

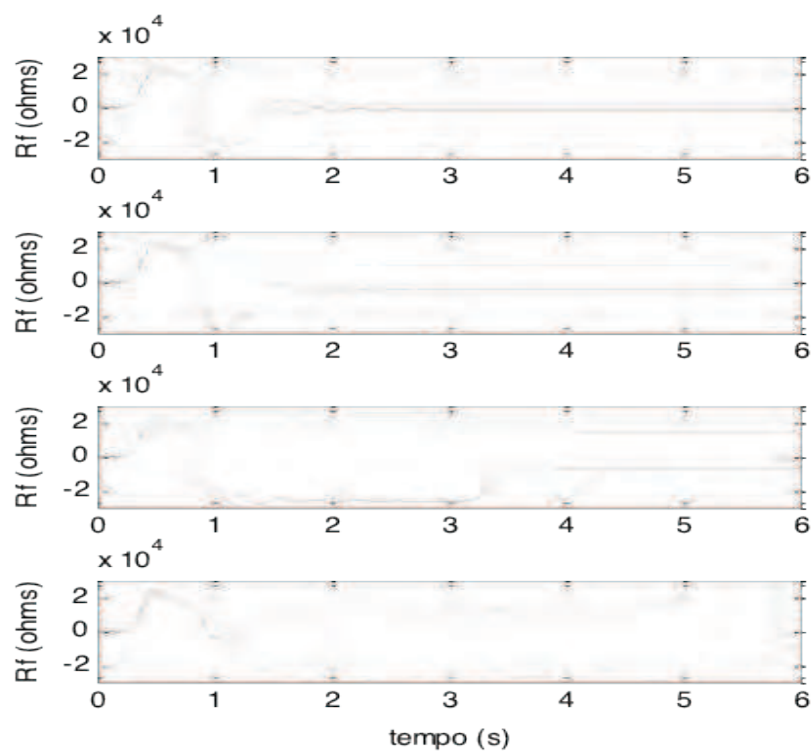


Figura 5.8: Sinal de saída do cálculo de resistência de falta, filtrado, para os quatro cenários criados no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu.

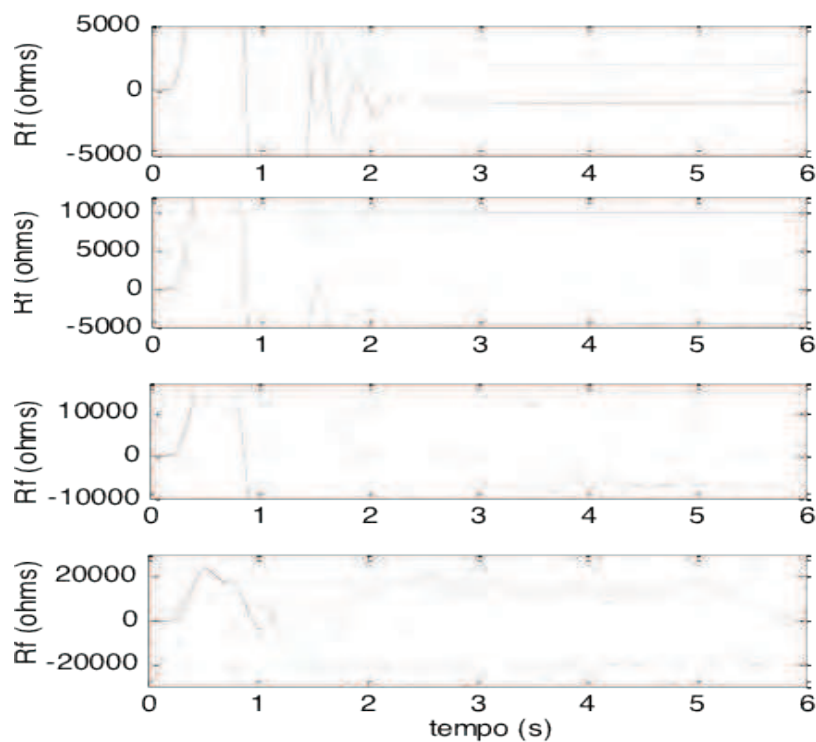


Figura 5.9: Sinal de saída do cálculo de resistência de falta, filtrado e aproximado, para os quatro cenários criados no modelo elétrico do sistema distribuição europeu.

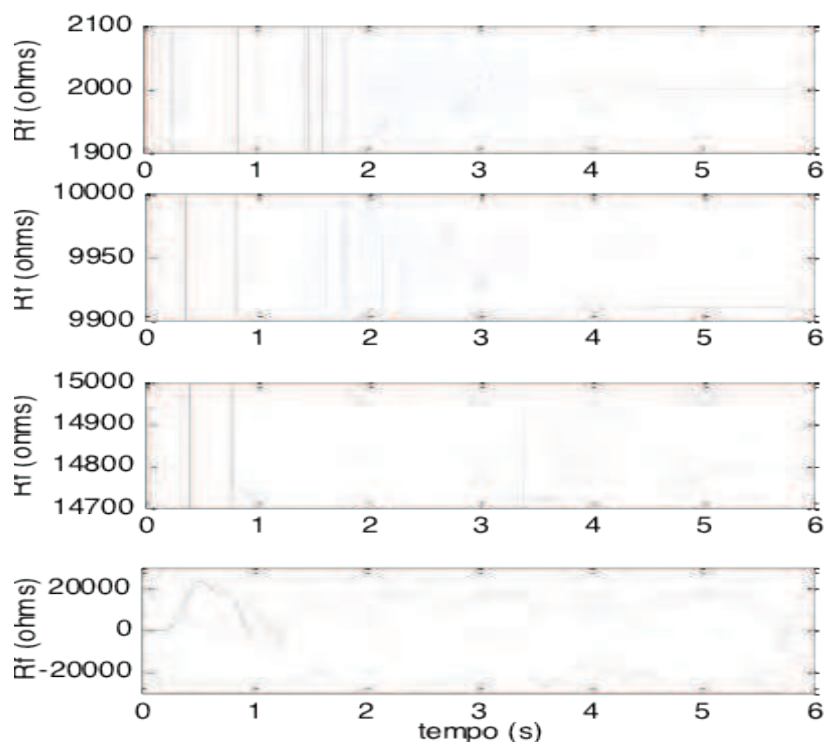


Figura 5.10: Sinal de saída do cálculo de resistência de falta para os quatro cenários criados no modelo do sistema elétrico de distribuição europeu.

reproduzido neste trabalho validam o algoritmo de detecção proposto pelo autor com grau de precisão satisfatória.

Para o sistema brasileiro também foram simulados 4 cenários. Porém, diferentemente do sistema europeu, estas faltas não ocorreram próximas ao alimentador, mas sim, perto da carga 14 ((L14) na Figura 3.7). Foram utilizados três níveis de resistência de falta diferentes do cenário europeu, por motivo da sensibilidade ser menor para este sistema. Isto porque as correntes nos ramais deste sistema são diferentes das do sistema europeu, e como já afirmado quanto menor a intensidade proporcional da corrente de falta, menor é a sensibilidade do sistema.

Os valores são: 1 k Ω , 4 k Ω e 10 k Ω . No quarto cenário, semelhante ao caso anterior, ocorre o acionamento de um banco capacitivo. A Figura 5.11 mostra os níveis de corrente para os cenários simulados. Observa-se que os níveis de corrente são baixos para o sistema de proteção baseado em sobrecorrente. Para o primeiro cenário é possível observar certo desequilíbrio nas fases. Para os outros sistemas, se torna ainda mais crítica a diferenciação dos instantes do evento.

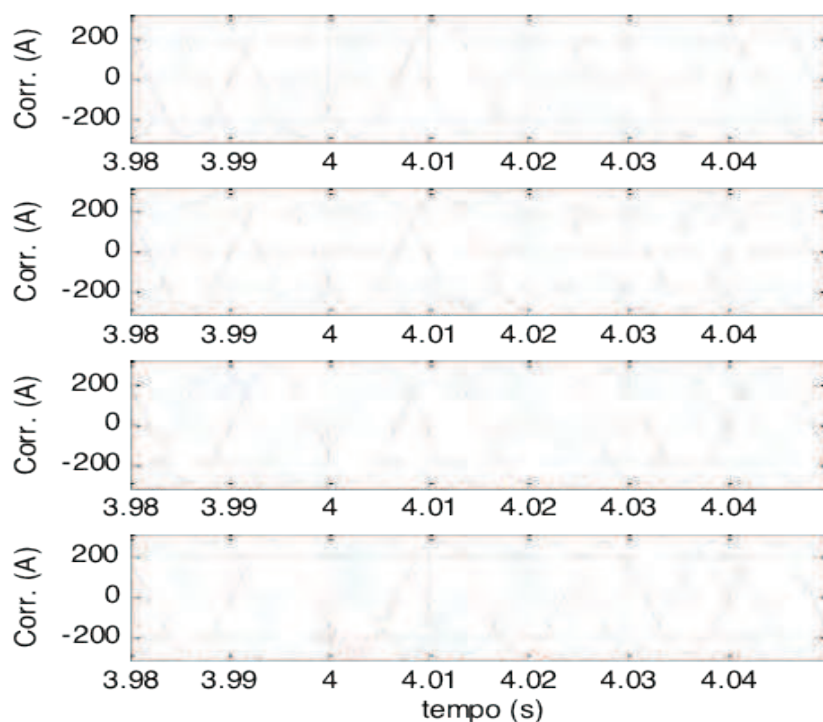


Figura 5.11: Sinais de corrente para os quatro cenários criados no modelo do sistema elétrico de distribuição brasileiro.

A Figura 5.12 mostra o sinal de saída do algoritmo de cálculo do valor de resistência de falta. É possível que no primeiro cenário exista um nível de convergência, porém os valores são de difícil interpretação visual. A Figura 5.13 mostra os sinais filtrados de valor de resistência de falta. No primeiro cenário a falta pode ser identificada, apesar da oscilação. No segundo e terceiro cenário não ocorre a convergência dos parâmetros, porém é possível observar que no momento da falta um nível de assimetria afeta os sinais de valor de resistência.

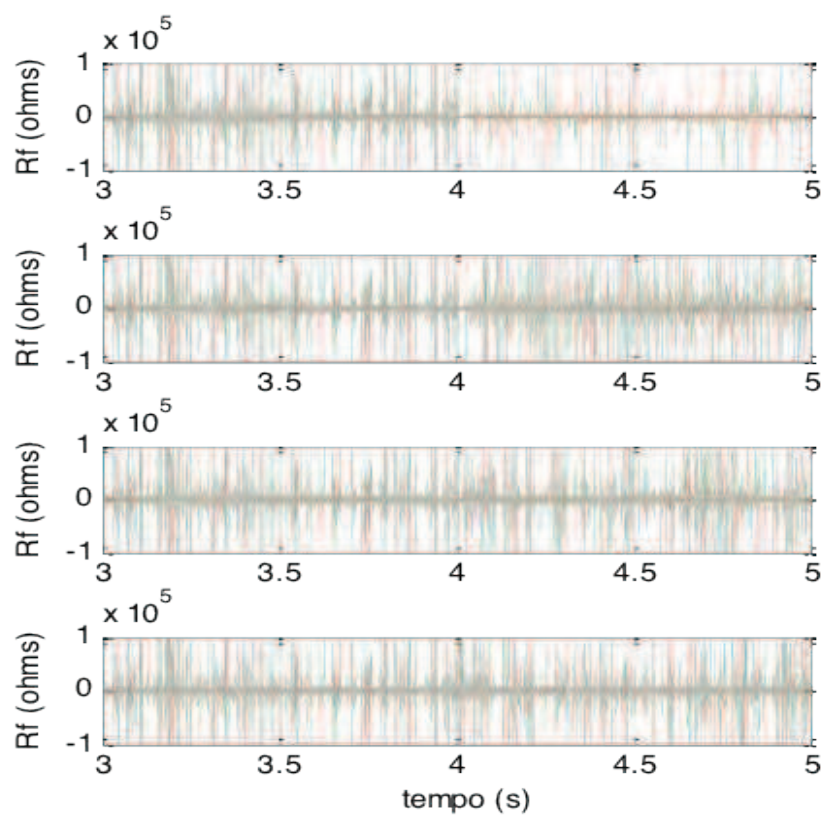


Figura 5.12: Sinal de saída do cálculo de resistência de falta para os quatro cenários simulados no modelo do sistema elétrico de distribuição brasileiro.

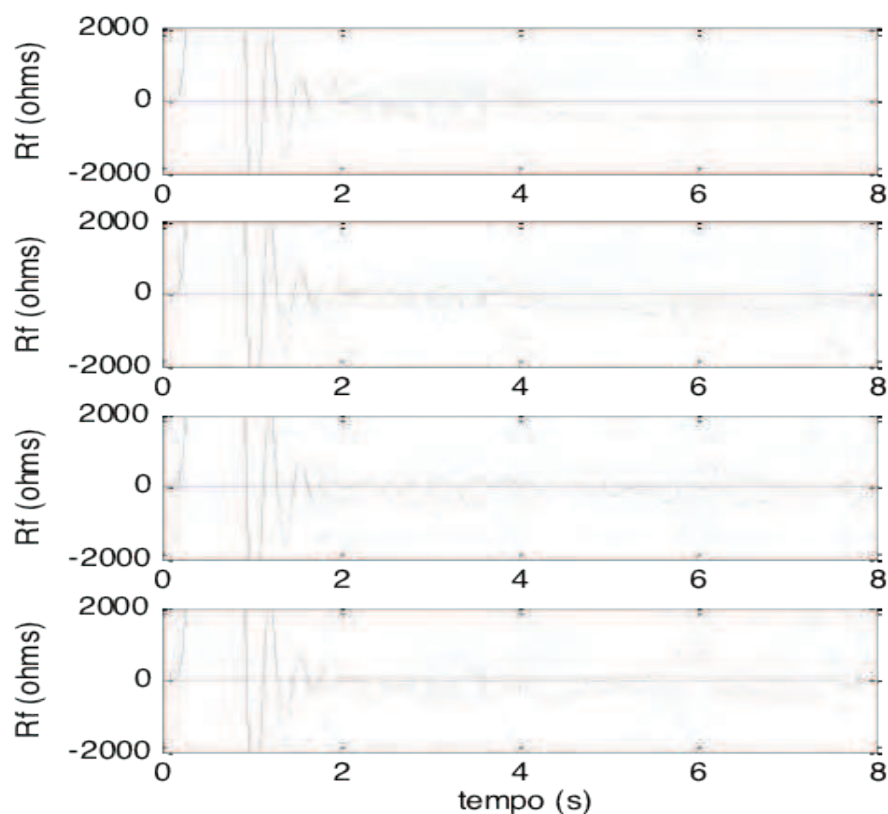


Figura 5.13: Sinal de saída do cálculo de resistência de falta, filtrado, para os quatro cenários simulados no modelo do sistema elétrico de distribuição brasileiro.

Sendo assim, fica evidente que o método de detecção de Zamora Et. Al. (ZAMORA et al., 2007), é limitado na detecção de faltas num sistema diferente do proposto no artigo original, evidenciando-se essa limitação quando foi utilizado um modelo brasileiro, não oferecendo a precisão no valor de cálculo de falta. Isto se deve ao fato, principalmente, do autor analisar a falta como uma simples resistência. Apesar destas faltas poderem ser identificadas pela análise dos sinais de cálculo de resistência de falta.

Ainda deve ser considerado que os resultados dos sinais filtrados dependem do projeto de filtro utilizado. O filtro que possibilite maior convergência (menor banda passante), também tem maior tempo de resposta. Ainda é possível, numa aplicação real, realizar filtros paralelos com diferentes níveis de banda passante que podem aprimorar a análise aqui realizada. Porém deve ser relevado o tempo de processamento para aplicações em dispositivos reais, que não encareça os custos dos mesmos.

5.2 Proposta de Alteração com Vistas ao Aumento do Desempenho do Método de Detecção de Falta de Alta Impedância Ativo proposto por Zamora

De todos os métodos testados nos capítulos anteriores, o método do Zamora (ZAMORA et al., 2007) sem dúvida, de forma isolada, se mostrou como um dos mais promissores. No entanto são observadas algumas limitações já citadas. Por exemplo, durante o transitório eletromagnético do sistema elétrico, o algoritmo é impreciso. Neste sentido, o método proposto por Zamora, apresenta dificuldades para determinar a ocorrência de uma falta não-linear.

Dentre as qualidades do método proposto por Zamora, a idéia da sobreposição de frequência, considerando uma frequência superior a nominal da rede, isola, para estes sinais, o sistema de distribuição de média potência. Isto permite que o “setor” analisado seja limitado. Ainda, apesar dos aspectos negativos na sobreposição de tensão em linhas de distribuição, esta técnica torna, tanto os algoritmos de análise espectral como aqueles de cálculo de resistência, mais eficientes.

Se considerarmos, conforme já foi comentado anteriormente, que as HIFs no sistema de distribuição são em sua maioria monofásicas, quando ocorre o rompimento de mais de um dos cabos é provável que os mesmos venham a se tocar provocando uma falta de baixa impedância e provocando o acionamento do sistema de proteção. Este é um dos motivos que por exemplo, muitas das técnicas de identificação de faltas desenvolvidas utilizam a análise das componentes simétricas. Neste sentido é bastante coerente que se busque de forma contínua, uma tensão sobreposta de sequência zero, que pode indicar a condição de falta. A teoria neste caso esta baseada no fato que uma falta monofásica altera a impedância de sequência zero.

Os métodos de superposição de tensão, tais como o do Zamora adicionam uma onda de tensão com frequência superior a fundamental (60Hz). Neste sentido foi estudada e testada a possibilidade de se utilizar um sinal de 1kHz. Considerada a frequência deste sinal, o mesmo é filtrado pelos transformadores abaixadores do sistema de distribuição, desta forma as cargas acopladas ao secundário são minimamente afetadas.

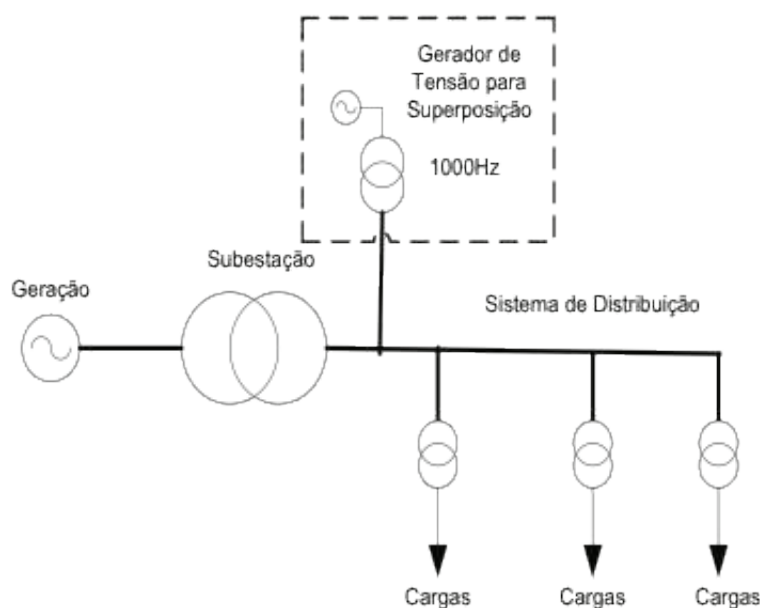


Figura 5.14: Injeção de sinal de tensão no sistema.

Neste sentido então, a idéia neste caso seria que ao invés de realizar o cálculo instantâneo da impedância baseado no modelo linear (puramente resistivo), seria utilizado o cálculo da impedância de forma recursiva, respeitando o histórico e tentando assim aumentar a precisão do resultado. Ainda, utilizando a frequência mais elevada como já afirmado para minimizar o impacto no sistema elétrico.

Para que isto fosse possível, foram utilizados além da injeção do sinal de alta frequência, um filtro discreto combinado com um estimador de parâmetros baseado num modelo AR-MAX e num identificador de mínimos quadrados recursivo estendido.

Partindo-se da equação característica de impedância dado pela equação abaixo:

$$\frac{I_0(s)}{V_0(s)} = \frac{1}{L_s} - \frac{1}{R} \quad (5.3)$$

onde:

$$V_0(t) = \frac{V_a(t) + V_b(t) + V_c(t)}{3} \quad (5.4)$$

e

$$I_0(t) = \frac{I_a(t) + I_b(t) + I_c(t)}{3} \quad (5.5)$$

Os parâmetros de Indutância e Resistência podem ser estimados através dos dados obtidos pela injeção de um sinal de alta frequência e consequentemente das medições realizadas no sistema de potência.

Para o processo de identificação ser *on-line*, devem ser considerados estimadores que tenham a capacidade de estimação de parâmetros variantes no tempo. Este trabalho utiliza o estimador recursivo dos mínimos quadrados estendidos (RMQE), cujo algoritmo é dado nas equações abaixo.

$$K_k = P_{k-1} \cdot \varphi_k \cdot [\varphi_k^T \cdot P_{k-1} \cdot \varphi_k + 1]^{-1} \quad (5.6)$$

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_{k-1} \cdot K_k \cdot [y(k) - \varphi_k^T \cdot \hat{\theta}_{k-1}] \quad (5.7)$$

$$P_k = P_{k-1} - K_k \cdot \varphi_k^T \cdot P_{k-1} \quad (5.8)$$

$$\xi(k) = y(k) - \varphi_k^T \cdot \hat{\theta}_k \quad (5.9)$$

onde: P_k = Matriz de Covariância; $\hat{\theta}$ = Vetor de Parâmetros; φ_k = Vetor de Regressores.

O vetor de regressores é determinado pelas leituras de tensão e corrente na subestação e tem seus termos determinados pelas técnicas de discretização aplicadas a equação diferencial apresentada acima. Utilizando a regra de integração trapezoidal o algoritmo RMQE resulta no equacionamento:

$$y(k) = I(k) \quad (5.10)$$

$$\varphi^T = [I_{(k-1)} \quad V_{(k)} \quad V_{(k-1)}] \quad (5.11)$$

$$\theta_T = [\alpha \quad \beta \quad \gamma] \quad (5.12)$$

$$R = \frac{2}{\beta + \gamma} \quad (5.13)$$

$$L = \frac{-2}{T_s \left(y - \frac{1}{R} \right)} \quad (5.14)$$

Para que sejam estimados os parâmetros variantes no tempo a matriz de covariância deve ser limitada, podendo isto ser realizado pelo ruído na amostragem, ou no próprio algoritmo.

O diagrama de blocos do model ARMAX utilizado na solução proposta pode ser observado na Figura 5.15, onde:

$$C_{(z^{-1})} = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc} \quad (5.15)$$

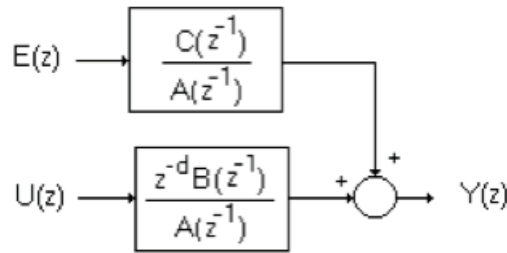


Figura 5.15: Diagrama de blocos do modelo ARMAX.

5.2.1 Resultados

Para a validação do método proposto, o mesmo foi utilizado no circuito de distribuição do Município de Ijuí, apresentado no capítulo 3.

Como já afirmado, o circuito elétrico de potência instalado neste município, se caracteriza como um circuito de distribuição, operando em 60 Hz com níveis de tensão de 23.1 kV. No circuito a carga distribuída foi concentrada em 19 pontos onde são localizados os aparelhos de medição de potência do sistema.

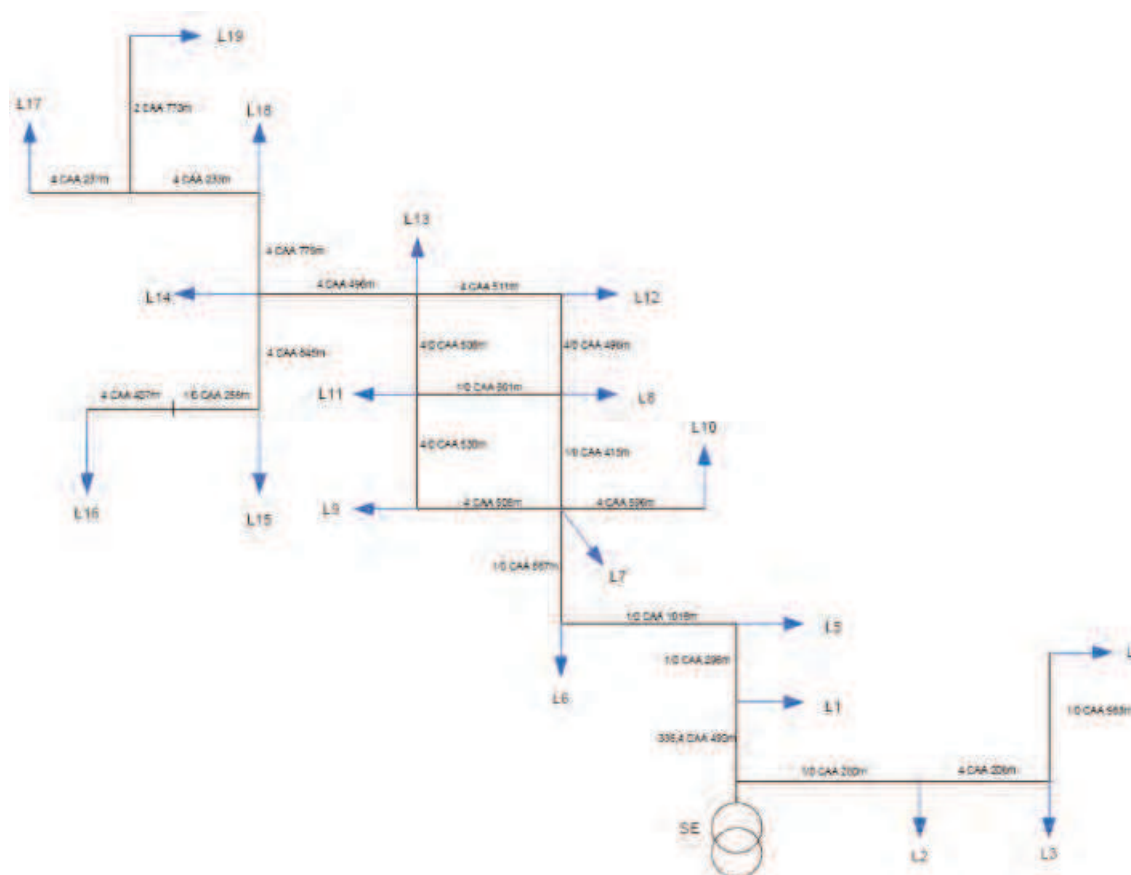


Figura 5.16: Sistema equivalente ao diagrama apresentado pelo DEMEI do alimentador 204.

Por se tratarem de trechos curtos, os modelos de linha utilizados para modelar o circuito de distribuição foram o PI-equivalente. As cargas, cujas potências foram obtidas a partir de medições, são representadas por cargas passivas equivalentes, para os níveis de tensão da linha.

É de se esperar que num sistema real exista ruído de medição, além do próprio ruído do sistema elétrico. Desta forma, além dos modelos determinísticos usuais na representação de sistemas de potência, foi inserido ruído branco e correlacionado.

Para a aplicação on-line do algoritmo foi criado no SIMULINK® o sistema de monitoramento dos sinais, excitação dos sinais e processamento do algoritmo de cálculo de resistência de falta. Para fins de comparação, foi modelado o segundo alimentador do sistema europeu apresentado no capítulo 3, sem a adição de ruído. Os sinais de tensão e corrente obtidos com a sobreposição do sinal podem ser vistos nas figuras 5.17 e 5.18.

O sinal sobreposto deforma a onda senoidal característica do sistema elétrico, como

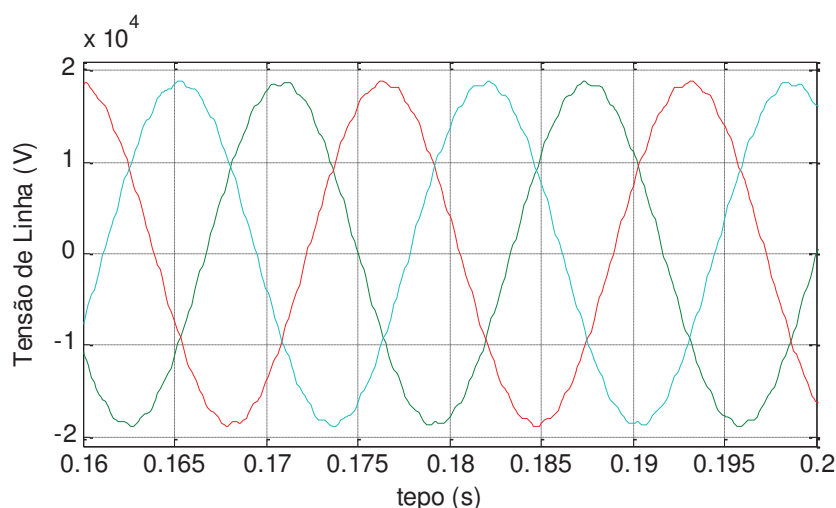


Figura 5.17: Sistema Equivalente do Alimentador 204 do DEMEI.

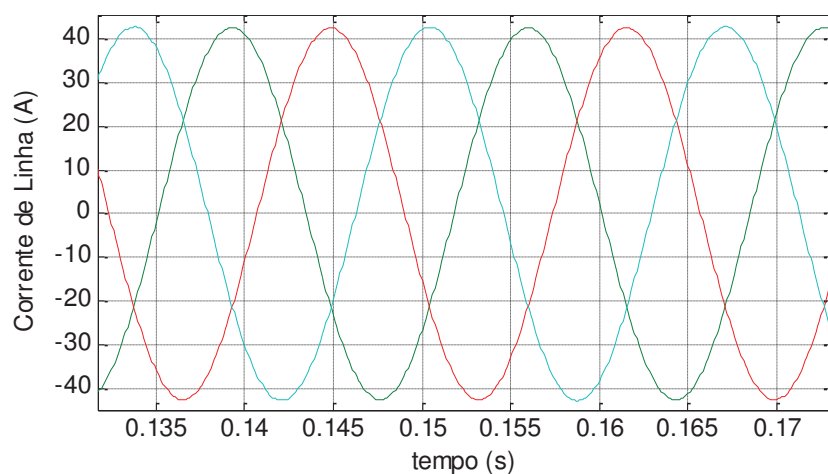


Figura 5.18: Sinais de corrente para o sistema de distribuição simplificado simulado.

pode ser visto na figura 5.17. Este é um dos aspectos negativos dos métodos de detecção de faltas de alta impedância por sobreposição de sinais, pois adicionam harmônicos e, ou, inter-harmônicos (dependendo da escolha da frequência). O critério de escolha de frequência e amplitude relevam os aspectos construtivos e níveis de ruído do sistema em que é aplicado. Sendo assim, um estudo prévio é necessário para determinar o sinal de sobreposição de forma que a proteção seja realizada e que não impeça o funcionamento correto do sistema.

Para a validação do algoritmo no modelo europeu é simulado um cenário com 6 eventos em sequência. No primeiro instante é adicionada uma carga assimétrica que é mantida na rede com o objetivo de testar a robustez do algoritmo contra o desbalanceamento do sistema. Após, é realizada uma sequência de faltas de alta impedância. Posteriormente as faltas são retiradas e um banco de capacitores é adicionado a rede. Ao final, uma falta de alta

Tabela 5.2: Eventos pré-definidos para simular as faltas.

Evento	Períodos(s)	Descrição
A	1-2	Adição de Carga Assimétrica
B	3-5	Falta de 5000 Ohms
C	5-7	Falta de 1000 Ohms
D	7-9	Volta ao estado original
E	9-11	Fechamento de Banco de Capacitores
F	11-final	Falta Não-Linear

impedância não linear ocorre no sistema. A figura 5.19 mostra os parâmetros da resistência e indutância estimados on-line. Os eventos de A até F são descritos na tabela 5.2.

Como pode ser observado na figura 5.19, apesar do desbalanceamento de fases não são percebidas alterações significativas nos parâmetros estimados. Quando a falta resistiva ocorre, os parâmetros de resistência e indutância são afetados, sendo que o primeiro aumenta enquanto o segundo decresce. O presente método não busca estipular valores absolutos, mas relativos.

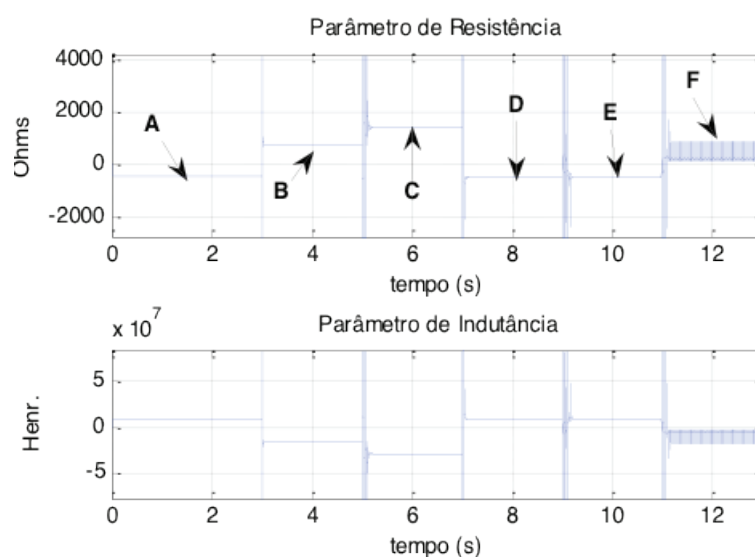


Figura 5.19: Sinais dos parâmetros de impedância para o sistema de distribuição simplificado simulado.

Uma vez verificado os parâmetros normais de operação, rodando o algoritmo numa primeira experiência, podem ser ajustados os limites de proteção com base na variação destes parâmetros. Diferente dos métodos com base no cálculo determinístico da resistência de falta, este método detecta a falta não-linear vista no último evento. As faltas não-lineares não permitem a convergência da matriz de covariância e dessa forma apresentam

uma oscilação, além da variação da magnitude do parâmetro. O banco de capacitores neste caso não afetou de forma significativa os parâmetros. Cabe ainda dizer que os resultados para bancos de capacitores são validos tanto para trifásicos como monofásicos.

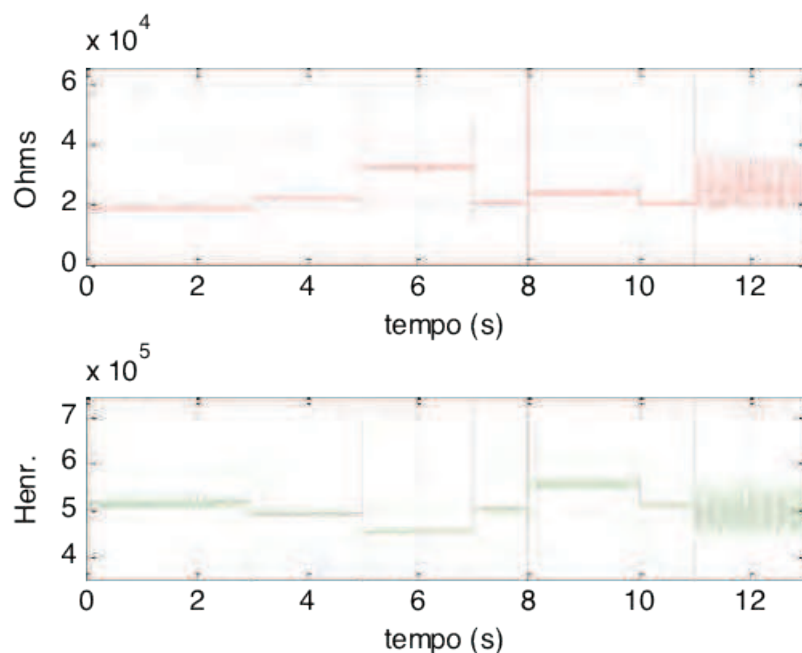


Figura 5.20: Sinais dos parâmetros de impedância para o sistema de distribuição simplificado simulado.

O mesmo cenário foi construído no sistema de distribuição brasileiro, com exceção do banco capacitivo, que para este caso, teve um valor de corrente drenada da rede aumentada. As principais diferenças entre o sistema brasileiro simulado e o sistema europeu é que, o primeiro apresenta maiores magnitudes de corrente de carga, ou seja, para este caso, as correntes de falta serão menores em proporção a carga, e existe ruído de medição incorporado ao modelo, além da magnitude e quantidade de parâmetros serem bem maiores que o sistema europeu estudado.

Os resultados para a estimação de parâmetros da impedância podem ser vistos na figura 5.20. Os resultados dos parâmetros estimados mostram que a técnica da falta opera de forma semelhante em ambos os sistemas. Por se tratar de um algoritmo estocástico, as variáveis de saída são filtradas de forma adaptativa, possibilitando o correto funcionamento da técnica de proteção.

5.3 Considerações sobre os Resultados

Neste capítulo foi proposto um novo método ativo de detecção de faltas de alta impedância. Este método é inspirado no proposto por Zamora, o qual também foi estudado. O método ativo permite a identificação da condição de FAI através da injeção de um sinal de alta frequência no circuito monitorado. No Quadro 5.21 pode-se observar a comparação dos resultados das duas técnicas.

	FP	FAI	
Método Zamora	S	S 	
	100 %	100 %	
Método Proposto Ativo	N	S	
	0%	100 %	

Figura 5.21: Quadro comparativos dos resultados da aplicação dos métodos ativos

O desempenho do novo método foi superior ao do método original. E ainda, a nova proposta consegue perceber as faltas sem gerar condições de falso positivo para eventos do sistema, tais como, bancos de capacitores.

6

Nova Metodologia para Detecção de Faltas de Alta Impedância Baseado na Combinação de Métodos Passivos

Conforme apresentado no capítulo IV, as técnicas passivas individualmente e em determinadas condições, apresentam resultados satisfatórios. No entanto, quando comparadas sob mesmas condições, e dependendo do caso, elas podem ter seu desempenho comprometido. Assim, pode ocorrer de que quando detectam uma situação de falta corretamente, acabam por atribuir a eventos normais do sistema a classificação também de uma condição de falta (Falso Positivo).

Este capítulo apresenta uma metodologia para combinar três métodos passivos de forma a potencializar seus resultados. Ressalta-se que diversas tentativas de combinação foram realizadas até obter os resultados aqui apresentados. A combinação da técnica baseada em harmônicos de baixa ordem de sequência negativa com a transformada wavelets permite, baseado na comparação de dois gráficos distintos, perceber os eventos de falta e destaca-los dos eventos normais do sistema. Para fazer essa seleção automaticamente foi treinada uma rede neural artificial que apresenta o resultado final de forma clara.

6.1 Combinação da Técnica de Harmônicos de Baixa Ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelets

Uma das técnicas que possui uma boa imunidade a detecção dos ruídos e eventos normais do sistema é a técnica baseada na observação de harmônicos de baixa ordem de sequência negativa. Assim, a técnica baseada em transformada de wavelet foi combinada com a técnica de harmônicos de baixa ordem de sequência negativa, a fim de potencializar as qualidades desta última. No entanto, como poderá ser observado a seguir, a transformada wavelet apresenta conforme o Nível (do inglês level) resultados distintos. A correta detecção da falta se dá a partir da combinação dos resultados, para estes casos, do nível 1 com o nível 8.

Visualmente é possível perceber essa distinção, no entanto, era necessário automatizar este processo. Para isto foi utilizada uma Rede Neural Artificial especialmente treinada para este fim. Os resultados da RNA são apresentados no final deste capítulo. O diagrama de blocos que representa o sistema completo, proposto neste caso pode ser observado na Figura 6.1.

Novamente o primeiro caso apresentado no capítulo IV foi testado a fim de se observar a aplicação da nova metodologia e os seus resultados, que estão apresentados na Figura 6.2.

Em uma primeira análise, no segundo gráfico de cima para baixo (que representa o nível um da wavelet utilizada) a técnica identifica corretamente as faltas tanto seu início como seu final, no entanto, o evento normal do sistema também é identificado gerando um falso positivo. Observando-se os gráficos na sequência, conforme a intensidade (nível) da transformada wavelet é incrementado, o sinal resultante passa a potencializar o evento do sistema e atenuar significativamente os sinais de falta. Assim, se for comparado o sinal resultante de nível um com o nível oito percebe-se que essa diferença é significativa.

Nas Figuras 6.3 e 6.4 tem-se de forma mais clara o exposto. Assim, baseada na comparação dos dois resultados é possível obter a informação de qual sinal é efetivamente de falta e qual corresponde a um falso positivo (evento do sistema). No entanto, cabe informar aqui que o caso 1 é o mais simples em termos de observação e, portanto, é necessário que

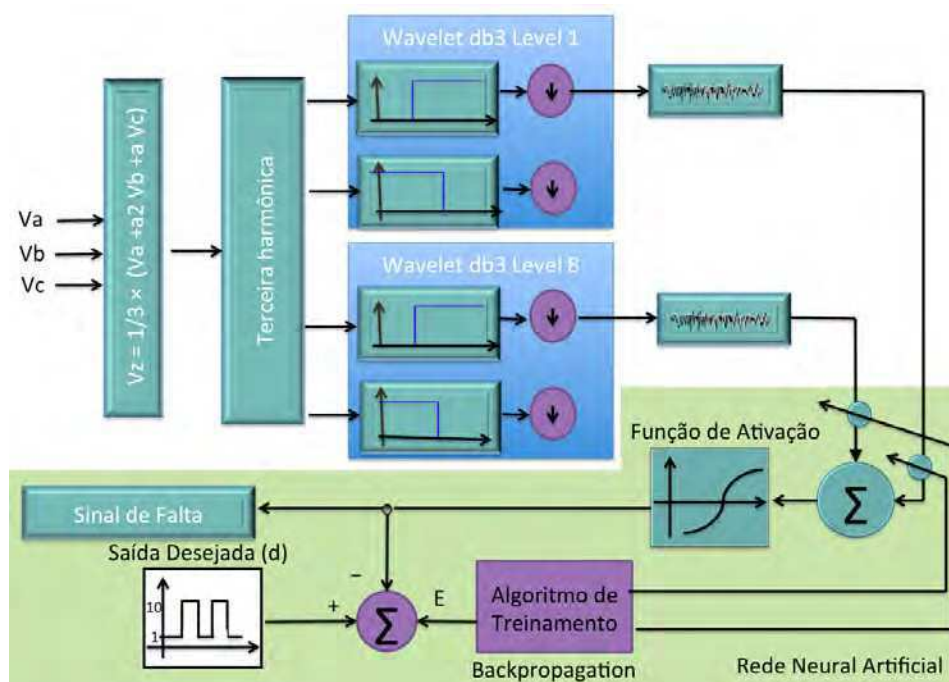


Figura 6.1: Diagrama de Blocos da técnica baseada na combinação da técnica de análise de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a transformada de Wavelets utilizando uma Rede neural para compor e determinar o resultado final.



Figura 6.2: Combinação da técnica de observação de Harmônicos de baixa ordem de Sequência negativa com a Transformada de Wavelet para o caso 1

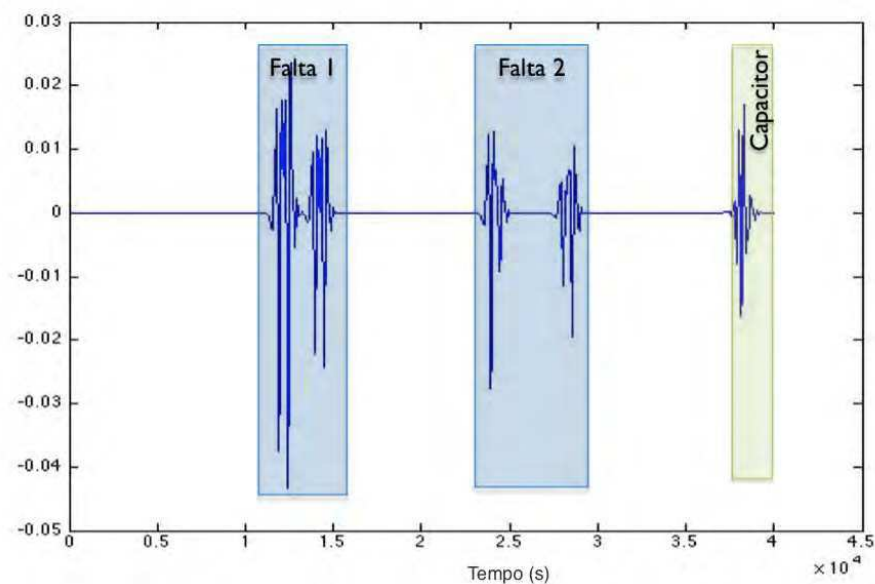


Figura 6.3: Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 1, considerando o Nível 1 (db3).

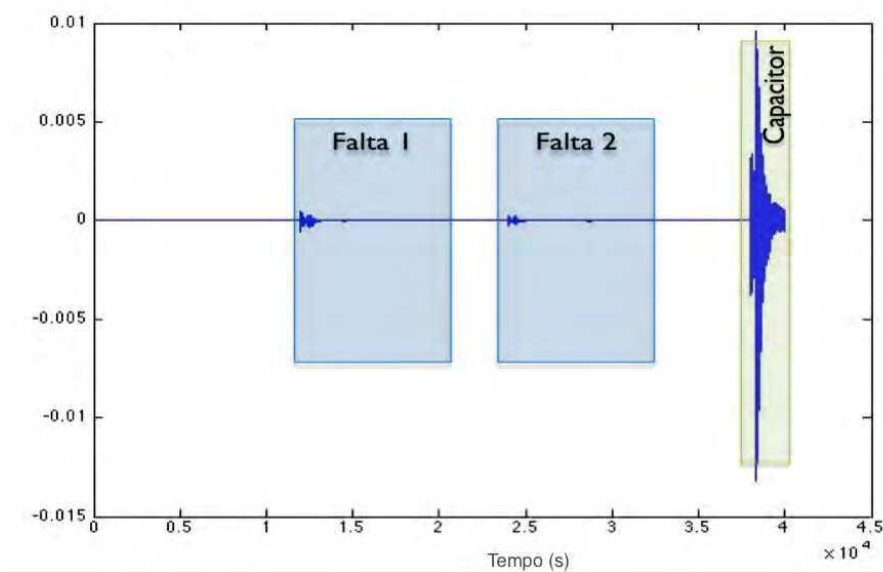


Figura 6.4: Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 1, considerando o Nível 8 (db3).

a técnica seja submetida aos casos 2 e 3 que representam eventos mais significativos para avaliar a proposta.

Assim, o caso 2 foi submetido a esta combinação e o resultado é apresentado na Figura 6.5. Nas Figuras 6.6 e 6.7 estão novamente destacados os níveis 1 e 8 onde tem-se o mesmo efeito da simulação anterior. Ou seja, novamente no nível 1 todos os eventos do sistema

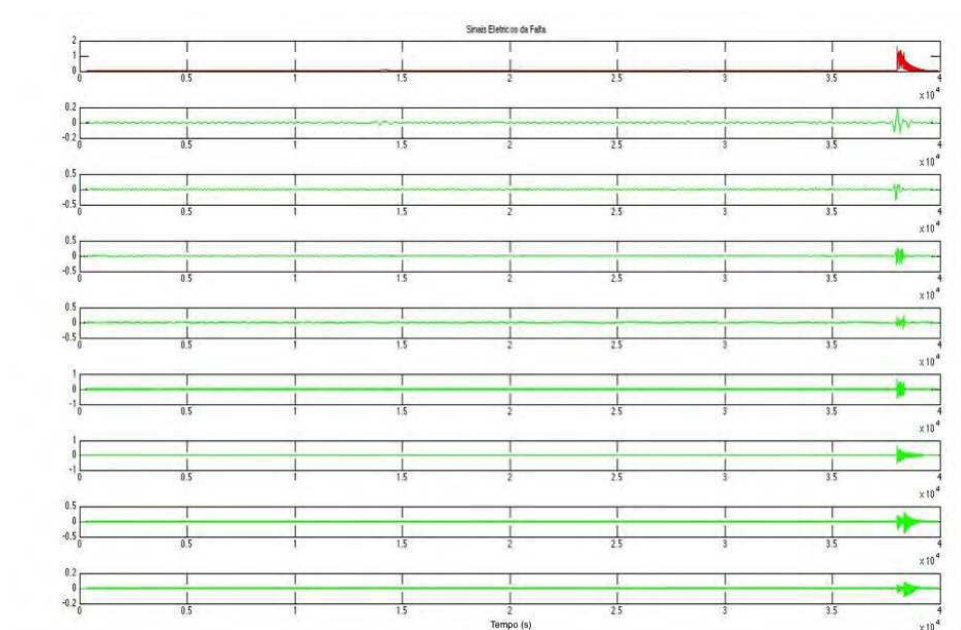


Figura 6.5: Combinação da técnica de observação de Harmônicos de baixa ordem de Sequência negativa com a Transformada Wavelet para o caso 2.

(neste caso faltas e a perturbação por conta de energização de um banco de capacitores) são observados. Já no nível 8 percebe-se que está potencializado apenas o evento "normal" do sistema, ou seja a entrada do banco de capacitores. Assim é possível novamente, através da combinação dos dois resultados, identificar as faltas no sistema.

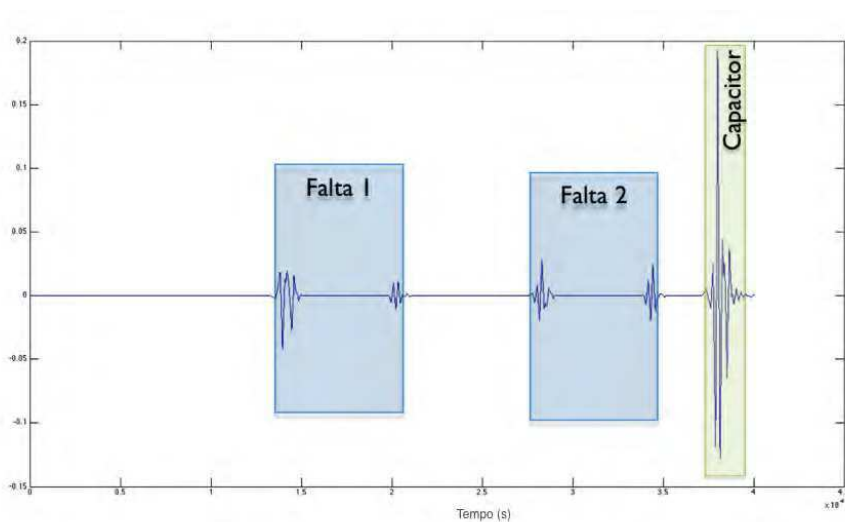


Figura 6.6: Combinação da técnica de observação de Harmônicos de baixa ordem de Sequência negativa com a Transformada Wavelet para o caso 2.

Em seguida, foi simulado novamente essa combinação de técnicas para o terceiro caso. Neste, além de uma terceira falta o banco de capacitores foi propositalmente adicionado a um ramal cuja corrente é superior aos demais e ainda o mesmo foi conectado no primeiro

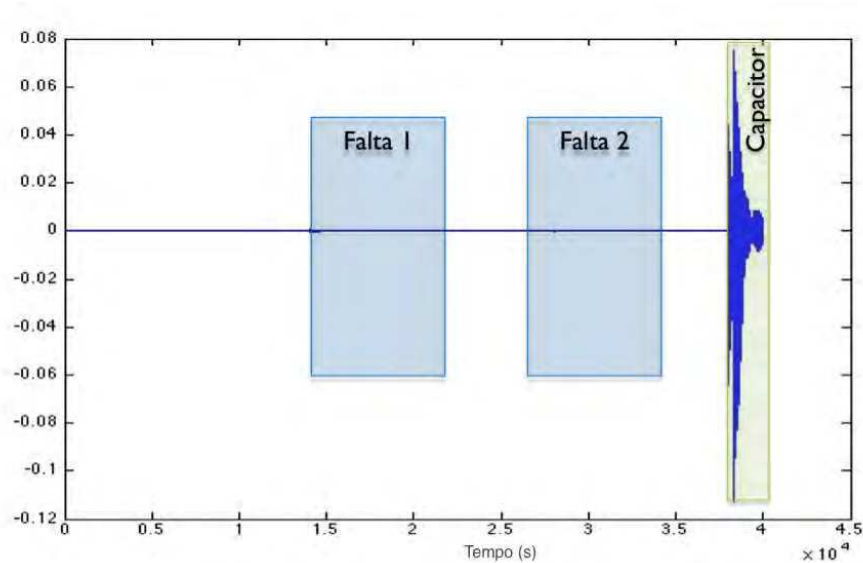


Figura 6.7: Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 2, considerando o Nível 8 (db3).

trecho do alimentador. O resultado desta simulação é apresentado na Figura 6.8.

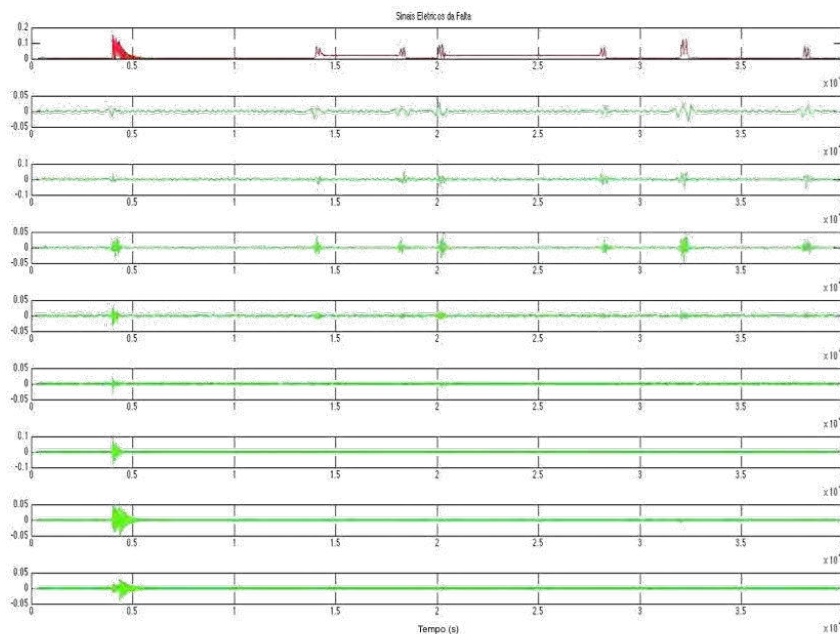


Figura 6.8: Combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 3.

Novamente o mesmo efeito é percebido, onde no primeiro nível tem-se as três faltas destacadas e a entrada do banco de capacitores e no nível oito apenas o destaque significativo

da energização do banco de capacitores. Estes resultados podem ser percebidos de forma mais nítida nos destaques do nível 1 e 8 apresentados nas Figuras 6.9 e 6.10 respectivamente.

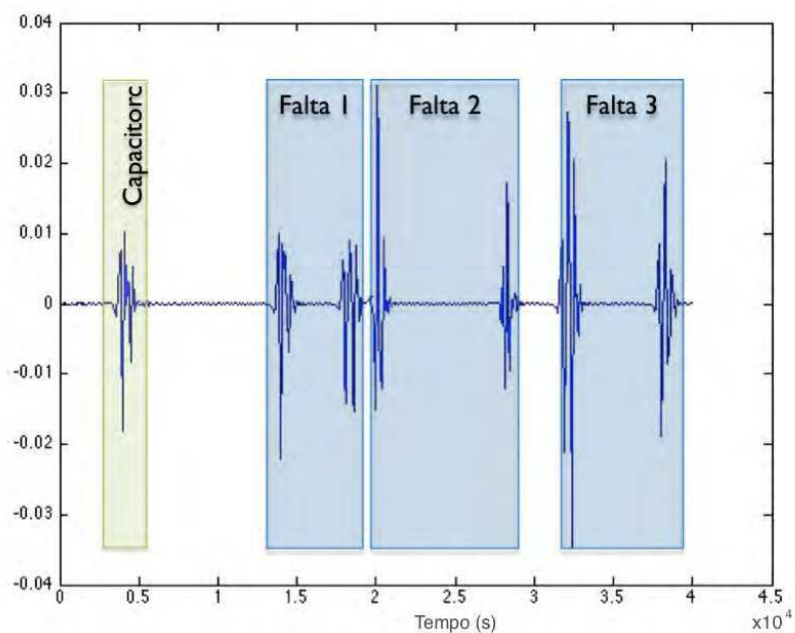


Figura 6.9: Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 3, considerando o Nível 1 (db3).

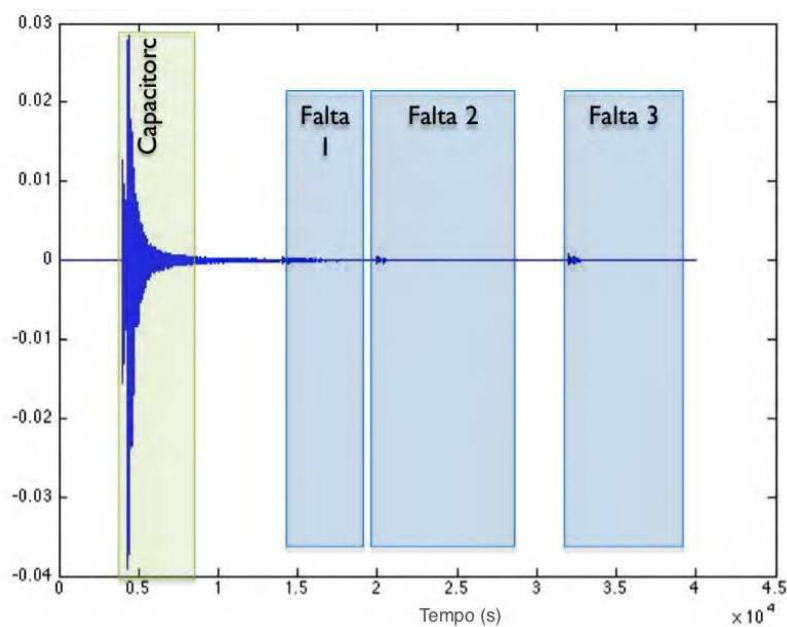


Figura 6.10: Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 3, considerando o Nível 8 (db3).

Considerando os resultados obtidos até aqui, foi simulado novamente essa combinação de técnicas para o quarto caso. Este caso no capítulo 4, não apresentou um resultado

satisfatório em nenhuma das técnicas isoladas. Neste caso, além do banco de capacitores inserido no sistema, é realizada a energização de um dos alimentadores em degrau. Este evento com grande quantidade de energia acaba, nas técnicas individualmente estudadas, sendo confundido com uma situação de falta.

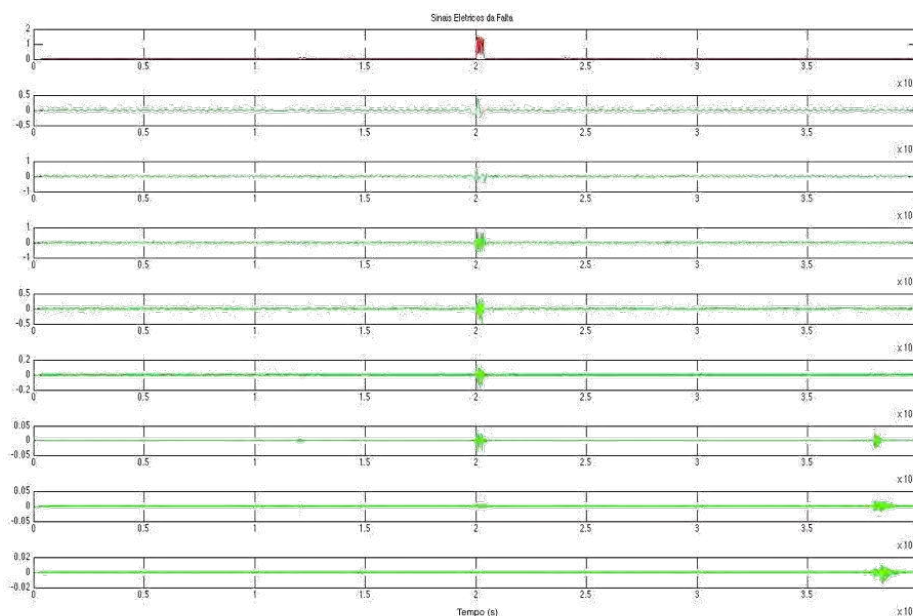


Figura 6.11: Combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 4.

O mesmo efeito relatado anteriormente ocorre neste caso, mesmo com a inclusão de uma novo evento no sistema, é possível através da combinação dos resultados do nível 1 e 8 obter uma clara distinção nos eventos de falta se comparado com estes eventos normais. O destaque a estes níveis pode ser observado nas Figuras 6.12 e 6.13.

No destaque apresentado na Figura 6.13 observa-se, que o evento característico da entrada em degrau de um alimentador é destacado, mas não de forma tão intensa como no caso do banco de capacitores mesmo assim, é possível definir limites que permitem a distinção do mesmo em face a um evento de falta.

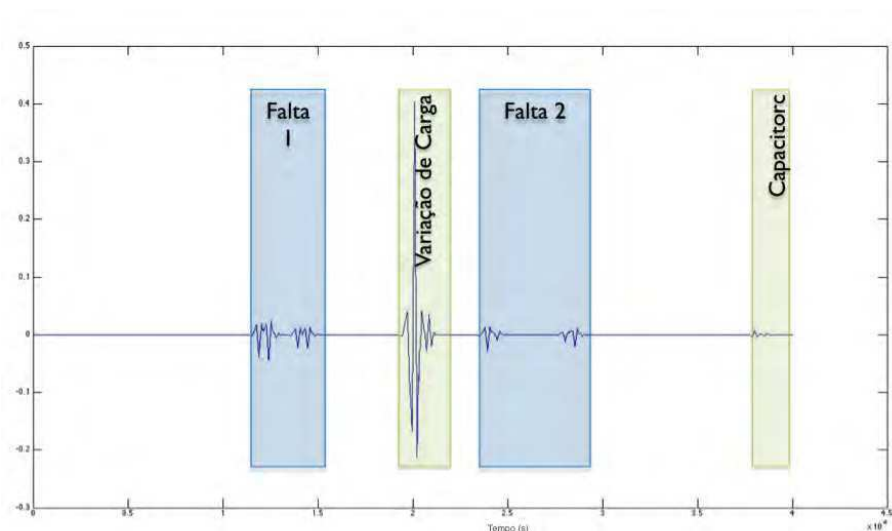


Figura 6.12: Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 4, considerando o Nível 1 (db3).

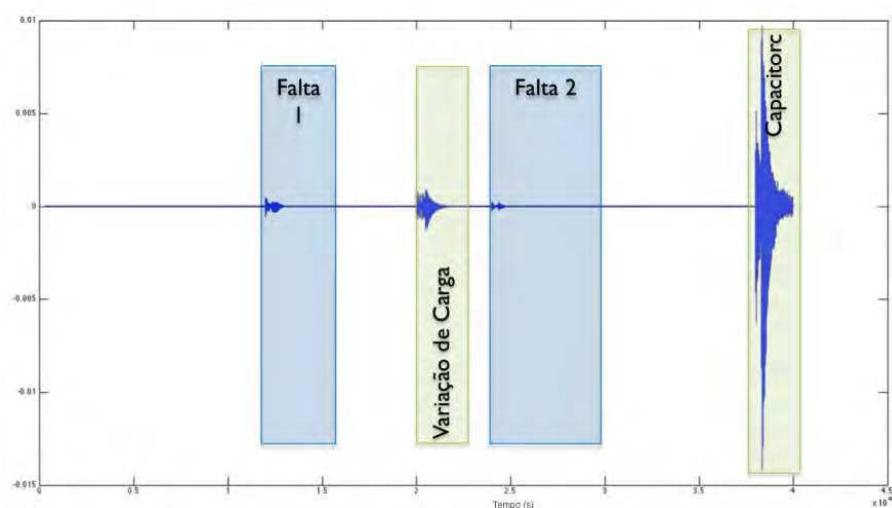


Figura 6.13: Destaque da combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelet para o caso 4, considerando o Nível 8 (db3).

6.2 Utilização de RNA para Determinação da Condição de Falta em Conjunto com a Combinação da Técnica de Harmônicos de Baixa Ordem de Sequência Negativa com a Transformada Wavelets

Neste capítulo, foram combinadas algumas técnicas passivas, onde, a partir da com-

binação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de sequência negativa com a Transformada Wavelets, obteve-se um resultado positivo com desempenho superior a aplicação das técnicas de detecção de forma isolada. No entanto, a aplicação efetiva desta metodologia depende da análise combinada de dois resultados que permitem a detecção mais confiável de faltas de alta impedância nos casos estudados.

Para que se possa discutir o estudo que segue, tem-se em todos os resultados apresentados anteriormente, que os sinais no nível 1 destacam todas as perturbações do sistema, sejam elas situações de falta ou eventos do sistema. Já nos resultados do nível 8, exclusivamente os eventos de falta são atenuados e os eventos do sistema são potencializados. Assim, a combinação das duas como já afirmado, podem apresentar um resultado confiável para detecção de uma FAI.

A partir destas informações, foi realizado o treinamento de uma rede neural para que esta determinasse, baseado na combinação dos dois sinais, as situações de falta de alta impedância. O primeiro treinamento foi realizado da mesma forma que nos estudos anteriores prevendo um sinal igual a zero quando o sistema operava normalmente, incluindo situações transitórias normais (cargas e capacitores) e igual a 1 quando o sistema estivesse em condição de falta de alta impedância.

O resultado da aplicação da combinação das três técnicas é apresentado na Figura 6.14. O resultado apresenta as faltas de alta impedância, no entanto, os eventos normais do sistema continuam no resultado final, se confundindo com os eventos de falta. Esta falha foi atribuída ao grande esforço computacional e da própria rede neural uma vez que foram utilizados valores nulos para a condição de funcionamento normal do sistema. Desta forma os sinais resultantes, permanecem diferentes de zero em períodos curtos.

Na tentativa de melhorar o desempenho da rede foi alterado o número de neurônios tanto na primeira camada de 100 para 200 quanto na camada escondida de 10 para 100. Ainda, foi alterado o resultado do sinal de alvo para o treinamento para níveis 1 (funcionamento normal) e 10 (condição de falta de alta impedância).

Na Figura 6.15 é possível observar que as alterações no treinamento e na estrutura da rede apresentam um bom resultado e o evento do sistema é completamente descartado.

Considerando os resultados promissores obtidos até aqui, foi realizada a simulação do

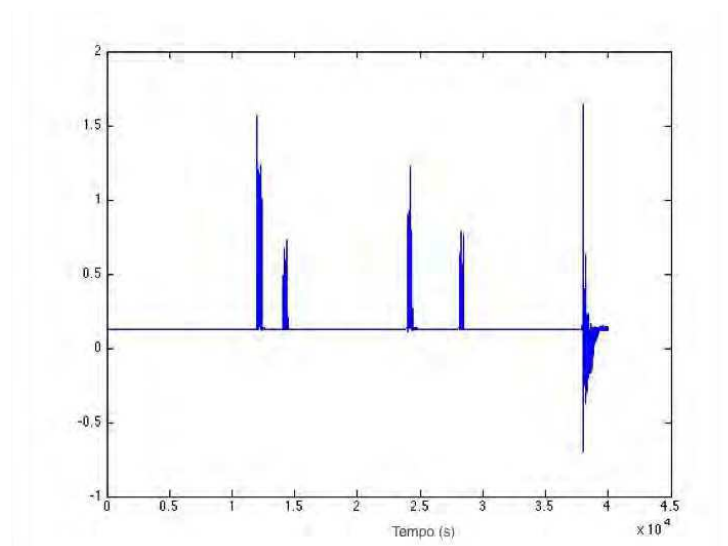


Figura 6.14: Resultado baseado na combinação da técnica de análise de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a transformada de Wavelets utilizando uma Rede neural para compor e determinar o resultado final treinada em níveis 0 e 1, para o caso 1.

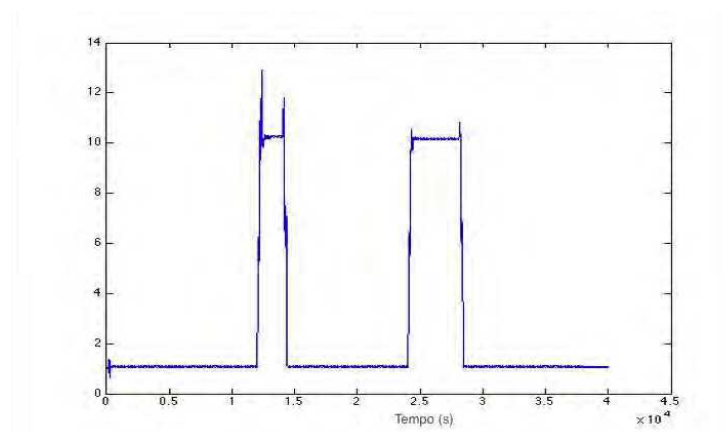


Figura 6.15: Resultado baseado na combinação da técnica de análise de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a transformada de Wavelets utilizando uma Rede Neural para compor e determinar o resultado final treinada em níveis 1 e 10; para o caso 1.

caso 4, que apresenta maior complexidade em termos de ocorrência de eventos de falta e eventos normais do sistema, aplicando a técnica descrita acima, que faz uso dos níveis 1 e 8 da Transformada Wavelet e utiliza uma RNA como descritor dos eventos do sistema.

Este caso conforme os estudos anteriores é o mais complexo com a maior dificuldade de identificar a falta, pois além do banco de capacitores inserido no sistema, ele possui a energização de um dos alimentadores em degrau, o que acarreta um evento com grande quantidade de energia sendo gerado naquele ponto confundido as técnicas individuais.

O resultado gerado pela técnica proposta observado para o caso 1, foi replicado para o caso 4, mesmo com a inclusão de uma novo evento no sistema.

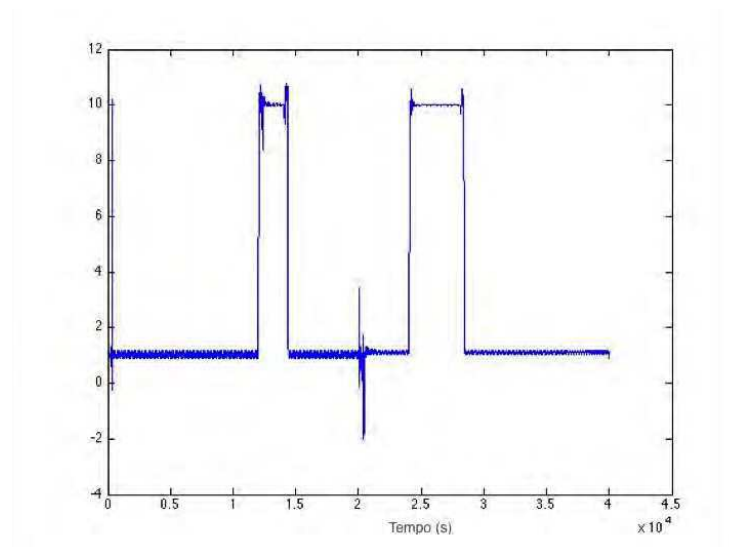


Figura 6.16: Resultado técnica baseada na combinação da técnica de análise de Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa com a transformada de Wavelets utilizando uma Rede Neural para compor e determinar o resultado final treinada no caso 1 e aplicada caso 4.

No destaque apresentado na Figura 6.16 o evento característico da entrada em degrau de um alimentador é destacado, mas não de forma tão intensa como no caso do banco de capacitores mesmo assim, é possível definir limites que permitiriam a distinção do mesmo em face a um evento de falta.

Estes resultados então são submetidos a rede neural treinada (1 e 10) para o caso, para que fosse avaliado seu resultado. Como pode ser observado na Figura 6.16, o resultado obtido é satisfatório, os valores durante a condição de falta convergem para o esperado.

6.3 Considerações sobre os Resultados

Neste capítulo foi apresentada uma proposta de uma nova metodologia para detecção de FAI, baseada na combinação de técnicas passivas. A combinação da técnica de Harmônicos de baixa ordem de sequência negativa com a Transformada Wavelets, permite resultados positivos com desempenho superior a aplicação das técnicas de detecção de forma isolada este metodo foi apresentado em (CAMPOS et al., 2016) . A partir destes resultados uma

Rede Neural Artificial é utilizada para destacar os eventos de falta.

O desempenho desta metodologia foi superior ao dos métodos originais aplicados individualmente, isto pode ser observado no quadro 6.17 .

Técnica \ Cenários	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4		
	FP	FAI	R	FP	FAI	R	FP	FAI	R	FP	FAI	R
Wavelets	S 100%	S 100%	✗	S 100%	S 100%	✗	S 100%	S 100%	✗	S 100%	S 100%	✗
Rede Neural Artificial	N 0%	S 100%	✓	S 100%	S 100%	✗	S 100%	S 100%	✗	N 0%	S 50%	✗
Harmônicos de Baixa Ordem de Sequência Zero	N 0%	S 50%	✗	N 0%	S 50%	✗	N 0%	S 25%	✗	N 0%	S 50%	✗
Harmônicos de Baixa Ordem de Sequência Negativa	S 100%	S 100%	✗	S 100%	S 100%	✗	S 100%	S 100%	✗	S 100%	S 100%	✗
Método Proposto Passivo	N 0%	S 100%	✓	N 0%	S 100%	✓	N 0%	S 100%	✓	N 0%	S 100%	✓

Figura 6.17: Quadro comparativo dos resultados das técnicas passivas isoladas e da nova metodologia proposta, para todos os casos.

Como pode-se verificar a nova proposta consegue perceber as faltas sem gerar condições de falso positivo para eventos do sistema. Além disso, conseguiu em todos os casos estudados a correta detecção de FAI.

7

Conclusões

Redes de distribuição de energia elétrica são fundamentais não só para o bem estar e para o desenvolvimento de nossa sociedade, mas também determinantes da maioria dos avanços tecnológicos atuais. No entanto, de uma forma geral, todos os sistemas elétricos estão susceptíveis a falhas.

Entre os resultados deste trabalho podem-se destacar a comparação entre um conjunto de métodos passivos encontrados na literatura. Para isto criou-se um cenário e a partir deste foram criados um conjunto de casos de análises aos quais foram submetidas cada uma das técnicas estudadas. Pode-se concluir nestes casos que apesar das técnicas funcionarem adequadamente nos cenários originais, aos quais foram submetidas, em cenários distintos daqueles dos estudos originais em que as técnicas foram avaliadas as mesmas não apresentam o mesmo desempenho, com tendência a apresentar falhas e principalmente, apresentarem resultados de falsos positivos. Ou seja, apesar de muitas vezes conseguirem perceber a condição de falta ao qual o sistema está operando, normalmente eventos normais do sistema tais como, energização de banco de capacitores e transformadores são confundidos com faltas.

Além dos métodos de detecção de faltas de alta impedância baseados na análise espectral este trabalho também testou uma técnica baseada na superposição de sinais (técnica ativa). Esta técnica foi simulada utilizando os cenários apresentados neste trabalho. Neste caso, os resultados mostram que o método é válido, desde que a corrente de falta não seja uma

parcela muito pequena em relação à corrente total e ainda, que esta ocorra durante o regime permanente do sistema. A fragilidade da técnica esta em não detectar adequadamente faltas não lineares e ainda quando ocorre um evento normal do sistema a mesma não consegue perceber a falta.

Neste sentido, este trabalho propos um conjunto de alterações no método, entre elas o aumento significativo da frequência e a inclusão de um identificador de parâmetros. O sistema de detecção proposto foi simulado nos dois sistemas de distribuição modelados e apresentados neste trabalho, sendo um europeu e outro brasileiro. É verificado que em ambos os modelos de distribuição o algoritmo de detecção de falta modificado apresentou um desempenho superior.

A partir da utilização das técnicas de detecção passivas de faltas de alta impedância, foi apresentando um estudo da possibilidade de combinação das mesmas. A técnica baseada na observação dos Harmônicos de baixa ordem de Sequência Negativa, foi combinada com a técnica baseada em Wavelets. Com a observação desta combinação pode-se verificar que a Wavelet em vários níveis de decomposição possui resultados muito distintos. A Wavelet do tipo Daubechies 3 (db3) quando executada em Nível 1 apresenta todos os eventos do sistema sem permitir a distinção de eventos ditos normais do sistema e das faltas de alta impedância. No entanto no nível 8 de decomposição, para os casos estudados, ela potencializa significativamente os resultados dos eventos normais do sistema minimizando os demais. Esta combinação permitiu nos 4 cenários a distinção dos eventos do sistema e a correta detecção das faltas em todos os casos. Se generalizarmos a técnica baseado na identificação adequada do nível de decomposição, esta técnica pode ser utilizada em qualquer sistema para detecção de faltas de alta Impedância.

Finalmente, para a seleção adequada da condição de falta, foi utilizada uma Rede Neural Artificial para que produzisse um resultado final, uma vez que é necessária a combinação de dois resultados para permitir o diagnóstico preciso. Assim, a rede neural, baseado nos dois resultados da combinação anterior, consegue selecionar e apresentar os intervalos onde o sistema opera em condição de falta. Este conjunto de técnicas combinadas apresentou um bom desempenho, melhorando significativamente a detecção de faltas nos casos estudados, bem como foi imune em todos os casos, ao falso positivo vinculado aos eventos normais do sistema aqui estudados.

Na proposição de continuidade deste trabalho e trabalhos futuros, a combinação de estudos e técnicas, se apresenta como uma linha promissora de pesquisa nesta área, uma vez que, os desafios de capacidade computacional estão sendo superados, em função dos avanços do desenvolvimento tecnológico. A proposição da combinação apresentada neste trabalho apresenta melhores resultados frente aos estudados de forma individual, o que indica e confirma esta afirmação. Existe ainda um grande conjunto de técnicas propostas na literatura que não foram contempladas neste trabalho. Neste sentido, sugere-se o estudo de outras combinações, inclusive com as estudadas neste trabalho, no sentido de se obter novas metodologias de detecção deste tipo de falha.

As técnicas por análise espectral são mais simples do ponto de vista de implementação, pois necessitam apenas de instrumentação adequada e poder computacional compatível a cada uma, ou ao conjunto de técnicas aplicadas. No entanto em um cenário futuro, onde tende-se a modernização dos sistemas elétricos a partir das chamadas redes inteligentes as técnicas ativas podem se tornar uma opção qualificada. Imaginando-se por exemplo a intensificação da utilização de sistemas PLC (*Power Line Communication*) nas chamadas redes primárias de distribuição, existem fortes indícios a partir dos estudos iniciados neste trabalho, que estes sinais podem ser utilizados para auxiliar na detecção de faltas de alta impedância.

Por fim cabe ressaltar que técnicas baseadas em Logica Fuzzy e Redes Neurais Convolutivas tem nos últimos anos sido utilizadas na detecção de FAI. Neste sentido ainda, uma continuidade neste estudo poderia incluir a comparação dos resultados aqui apresentados com estas novas possibilidades.

Referências Bibliográficas

- ALEKSEEV, V. V. e KALIAKIN, I. V., The Role of Sampling Rate in Wavelet Transform Decomposition, *XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2016, v. 1, n. 19, p. 1 – 3, 2016.
- ALI, M. S.; A., B. A. H.; MOKHLIS, H.; AROFF, H.; ILLIAS, H. A. e AMAN, M. M., High impedance fault localization in a distribution network using the discrete wavelet transform, In: *Proceedings of 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia, 2012*, 2012., pp. 349–354.
- ATWELL, R. A.; SHAFFER, A. W.; JERRINGS, D. I. e LINDERS, J., Unique Aspects of Distribution System Harmonics due to High Impedance Ground Faults, In: *34th Annual Conference in Rural Electric Power*, 1990., pp. C6/1–C6/7.
- AUCOIN, B. e RUSSELL, B., Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components., *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, n. 6, p. 1596–1606, 1982.
- AUCOIN, B. M. e JONES, R. H., High Impedance Detection Implementation Issues., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 1, p. 589–594, 1996.
- AUCOIN, M., High Impedance Detection Implementation Issues., *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-104, n. 3, p. 637–644, 1985.
- AUCOIN, M. e RUSSELL, B. D., Detection of Distribution High Impedance Faults Using Burst Noise Signals Near 60 Hz., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. PWRD-2, n. 2, p. 342–348, 1987.
- BALSER, S. J.; C’LEMENTS, K. A. e LAWRENCE, D. J., A Microprocessor-based Technique for Detection of High Impedance Faults., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. PWRD-1, n. 3, p. 252–258, 1986.

- BARAN, M. E. e KIM, J., A Classifier for Distribution Feeder Overcurrent Analysis., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 1, p. 456–462, 2006.
- BARRETO, J. M., *Indrodução as Redes Neurais Artificiais*, Editora da UFSC, 2002.
- BENNE, C. L. e RUSSELL, B. D., Practical High-Impedance Fault Detection on Distribution Feeders., *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 3, p. 635 – 640, 1997.
- BINGYIN, X.; YONGDUAN, X.; JING, L. e YU, C., Single phase fault detection technique based on transient current and its application in non-solid grounded network., In: *Seventh (IEE) International Conference on Developments in Power System Protection*,, 2001., pp. 141–144.
- CALHOUN, H.; BISHOP, M. T.; EICHLER, C. H. e LEE, R. E., Hevelopment and Testing of an Electro-Mechanical Relay to Detect Fallen Distribution Conductors, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, n. 6, p. 1643–1650, 1982.
- CAMPOS, M.; SAUSEN, P. S.; OLIVEIRA, A. C. e LIMA, A. N. N., Proposição De Uma Nova Técnica De Detecção De Faltas De Alta Impedância Em Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica, *Revista Eletrônica de Potência*, v. 21, n. 2, p. 134 – 147, 2016.
- CHAARI, O.; MEUNIER, M. e BROUAYE, F., Decision Tree-Based Methodology for High Impedance Fault Detection., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 3, p. 1301–1308, 1996.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SILVA, J. A. C. B. e SANTOS, W. C., Real-Time Detection of Transients Induced by High-Impedance Faults Based on the Boundary Wavelet Transform, *IEEE Transaction on Industry Applications*, v. 51, n. 6, p. 5312 – 5323, 2015.
- DARWISH, H. A.; TAALAB, A.-M. I. e AHMED, E. S., Investigation of power differential concept for line protection., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 1, p. 617–624, 2005.
- DWIVELDI, U.; SINGH, S. e SRIVASTAVA, S. C., A Wavelet based Approach for Classification and Location of Faults in Distribution Systems, In: *IEEE Conf. and Exhibition on Control, Communication and Automation (INDICON), India, 2008*, 2008., pp. 488–493.
- EBRON, S.; LUBKEMAN, D. L. e WHITE, M., Neural Network Approach to the Detection of Incipient Faults on Power Distribution Feeders., *IEEE Transactions on Power Delivery*,

- v. 5, n. 2, p. 905–914, 1990.
- ELKALASHY, N. I.; LEHTONEN, M.; DARWISH, H. A.; IZZULARAB, M. A. e TAALAB, A.-M. I., Modeling and Detection of High Impedance Arcing Fault In Medium Voltage Networks., *IEEE Transactions on ielectrics and Electrical Insulation*, v. 14, n. 2, p. 375–383, 2007.
- ELNEWEIHI, A. F. e SCHWEITZER, EDMUND O.AND FELTIS, M. W., 1997. Coordenação e Aplicação do Elemento de Sobrecorrente de Seqüência-Negativa na Proteção da Distribuição., Rel. Téc., ELECTRIC COUNCIL OF NEW ENGLAND PROTECTIVE RELAYING COMMITTEE MEETING.
- EMANUEL, A. E.; CYGANSKI, D.; ORR, J. A.; SHILLER, S. e M., G. E., NHigh Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15kV Distribution Feeders: Contributions to the Evaluation of the Low Frequency Spectrum., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 676–685, 1990.
- FARIAS, P. E. M. A. P. C. J. G. e L., O. A., Transients detection and classification in distribution networks for high impedance faults identification, In: *Proceedings 49th International Power Engineering Conference (UPEC), 2014*, 2014., pp. 978–986.
- HANNAH, A., Negative sequence relay protection for blown high side transformer fuse detection., In: *42th Annual Conference in Rural Electric Power*, 1998., pp. C4–1–7.
- HOU, D., 2006. Detecção de Faltas de Alta Impedância nos Sistemas de Distribuição de Energia., Rel. Téc., Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial LTDA. Campinas - SP - Brasil.
- JEEFINGS, D. I. e LINDERS, J. R., Unique Aspects of Distribution System Harmonics due to High Impedance Ground Faults, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 086–094, 1990.
- KARIMI, M.; MOKHTARI, H. e IRAVANI, M. R., Wavelet Based On-Line Disturbance Detection for Power Quality Applications., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 4, p. 1212–1220, 2000.
- KILAR, L. A.; ROSADO, M.; FARNSLER, H. F. e E., L. R., nnovative Relay Methods for Detecting High Impedance Faults on Distribution Circuits, In: *American Power Conference*,, 1979., pp. 1180–1183.

- KIM, C. J. e RUSSELL, B. D., Classification of Faults and Switching Events by Inductive Reasoning and Expert System Methodology., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 3, p. 1631–1637, 1989.
- KWON, W. H.; LEE, G. W.; PARK, Y. M.; YOON, M. C. e YOO, M. H., High impedance fault detection utilizing incremental variance of normalized even order harmonic power., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 2, p. 557 – 564, 1991.
- LANDINI, L. A. R., A Teoria Objetiva, Administrativas ou do Risco Integral nos Serviços Públicos de Energia Elétrica., In: *II Congresso Brasileiro de Regulação de Serviços Públicos*, 2001., pp. 1206 –1211.
- LI, L. e REDFEM, M., A Review of Techniques to Detect Downed Conductors in Overhead Distribution Systems., In: *Seventh IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, 2001., pp. 169–172.
- LIN, Y.-H.; LIU, C.-W. e YU, C.-S., New Fault Locator for Three-Terminal Transmission Lines—Using Two-Terminal Synchronized Voltage and Current Phasors., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 2, p. 452–459, 2002.
- MASA, A. V.; COSTA, F. C.; WERBEN, S. e SOUZA, B. A., Overcoming Limitations of the Present Protection Technology for Smart Grid: Innovative Approaches to Detect High Impedance Faults, In: *Proceedings of IEEE PES 2014 Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2014*, 2014., pp. 1–5.
- MCCULLOCH, W. S. e PITTS, W., A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity., *Bulletin of Mathematical Biophysics*, v. 5, n. 1, p. 115–133, 1943.
- MILIOUDIS, A. N.; ANDREOU, G. T. e LABRIDIS, D. P., Detection and Location of High Impedance Faults in Multiconductor Overhead Distribution Lines Using Power Line Communication Devices, *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 6, n. 2, p. 894 – 902, 2015.
- MOKHTARI, H.; KARIMI-GHARTEMANI, M. e IRAVANI, M. R., Experimental Performance Evaluation of a Wavelet-Based On-Line Voltage Detection Method for Power Quality Applications., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 1, p. 161–172, 2002.

- MORLET, J. e GROSSMANN, A., Decomposition of Herdy function into square integrable wavelets os constante shape., *SIAM J. Math Anal.*, v. 15, n. 4, p. 723–736, 1984.
- NAYAK, P. K.; SARWAGYA, K. e BISWAL, T., A Novel High Impedance Fault Detection Technique in Distribution Systems With Distributed Generators., , p. 23 – 32, 2016.
- PASDAR, A. M. ; SOZER, Y. e HUSAIN, I., Suppression of Numerical Oscillations in the EMTP., *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 4, n. 2, p. 1067 – 1075, 2013.
- ROBERTSON, D. C.; CAMPS, O. I.; MAYER, J. S. e GISH, W. B., Wavelets and Electromagnetic Power System Transients., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 1050–1058, 1996.
- RUSSELL, B.; AUCOIN, B. e TALLEY, T. J., 1982. Detection of Arcing Faults on Distribution Feeders, Rel. Téc., EPRI Report EL-2757, Prepared by Texas A & M University.
- RUSSELL, B. D. e CHINCHALI, R. P., BA digital signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 132–140, 1989.
- RUSSELL, B. D.; CHINCHALI, R. P. e KIM, C. J., Behaviour of Low Frequency Spectra During Arcing Fault and Switching Events., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 4, p. 1485–1492, 1988.
- SANTOS, W. C.; COSTA, F. B.; SILVA, J. A. C. B.; LIRA, G. R. S.; SOUZA, B. A.; D., B. N. S. e JR., P. M. R. C., Automatic Building of a Simulated High Impedance Fault Database, In: *Proceedings of IEEE/PES 2010 Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2010*, 2010., pp. 550–554.
- SANTOS, W. C.; LOPES, F. V.; BRITO, N. S. D. e SOUZA, B. A., High-Impedance Fault Identification on Distribution Networks., *IEEE Transaction on Power Delivery*., v. 32, n. 1, p. 23 – 32, 2017.
- SHENG, Y. e ROVNYAK, S. M., Decision Trees and Wavelet Analysis for Power Transformer Protection., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 2, p. 429–433, 2002.
- SHENG, Y. e ROVNYAK, S. M., Decision Tree-Based Methodology for High Impedance Fault Detection, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 2, p. 533–536, 2004.
- SILVA, J. A. C. B.; B., C. F.; C., S. W.; A., N. W. L. e A., S. B., High Impedance Fault Location – Case Study Using Wavelet Transform and Artificial Neural Networks, In:

- Proceedings 22nd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 2014, 2013.*, pp. 1–4.
- SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; COSTA, F. B.; LEITÃO, J. J. A. L.; CAUPONI, S. G. A. e SILVA, S. S. B., Evolution of Oscillograph - How Did CHESF Transform Data Into Information?, *IEEE Latin America Transactions*, v. 8, n. 1, p. 45 – 51, 2010.
- STOUPIS, J.; MAHARSI, M.; NUQUI, R.; KUNSMAN, S. e R., D., 2004. Ground alert - Reliable detection of high-impedance faults caused by downed conductors., Rel. Téc., ABB Review.
- SULAIMAN, M. B.; TAWAFAN, Z. H. e B., I. Z., Detection of high impedance fault using a probabilistic neural-network classifier., *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, v. 53, n. 2, p. 180 – 191, 2013.
- TLEIS, N. D., *Power Systems Modelling and Fault Analysis - Theory and Practice*, Oxford : Elsevier Ltd., 2008.
- TONELLI-NETO, M. S.; DECANINI, J. G. M. S.; LOTUFO, A. D. P. e R., M. C., Fuzzy based methodologies comparison for high-impedance fault diagnosis in radial distribution feeders, *Journal IET Generation, Transmission e Distribution.*, v. 11, n. 6, p. 1557 – 1585, 2017.
- WIOT, D., A New Adaptive Transient Monitoring Scheme for Detection of Power System Events., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 1, p. 42–48, 2004.
- XIANGJUN, Z.; LI, K.; CHAN, W. L.; ZENG e XIANGGEN, Y., Novel Techniques for Earth Fault Feeder Detection Based on Negative Sequence Current in Industry Power Systems., In: *36th. IAS - Industry Applications Conference*, 2001., pp. 1831–1837.
- YU, D. C. e KHAN, S. H., An Adaptive High And Low Impedance Fault Detection Method., *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 4, p. 1812–1821, 1994.
- ZAMORA, I.; MAZON, A. J.; SAGASTABEITIA, K. J. e ZAMORA, J. J., New Method for Detecting Low Current Faults in Electrical Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 4, p. 2072–2079, 2007.
- ÖHRSTRÖM, M. e SÖDER, L., Fast Protection of Strong Power Systems With Fault Current Limiters and PLL-Aided Fault Detection, *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 26, n. 3, p. 1538 – 1544, 2011.