EVERTON SHIGUEAKI YOSHIDA

Algoritmos para análise automática de faltas em sistemas elétricos de potência

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

São Paulo
2014

EVERTON SHIGUEAKI YOSHIDA

Algoritmos para análise automática de faltas em sistemas elétricos de potência

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Giovanni Manassero Junior

São Paulo
2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 30 de junho de 2014

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Yoshida, Everton Shigueaki

Algoritmos para análise automática de faltas em sistemas elétricos de potência / E.S. Yoshida. -- versão corr. – São Paulo, 2014.

154 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Proteção de sistemas elétricos 2. Redes de distribuição de energia elétrica 3. Subestações elétricas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

À minha família, pelo carinho e apoio.
Especialmente ao meu pai que sempre me
inspirou e a quem admiro muito.

AGRADECIMENTOS

Ao pessoal do LPROT pelo apoio e incentivo, principalmente ao professor Giovanni Manassero Junior pelo estímulo e dedicação durante a execução deste trabalho.

Ao pessoal da Schneider Electric pelo apoio e reconhecimento do trabalho desenvolvido.

À Juliane pelo carinho e compreensão durante esta jornada.

À Dirce e à Ticiany.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de algoritmos para a análise automática de eventos de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência. Os algoritmos propostos neste trabalho são baseados em registros de tensões e correntes, efetuados por dispositivos eletrônicos inteligentes (oscilógrafos digitais e/ou relés de proteção) instalados nas redes elétricas, e são capazes de avaliar o estado operativo dessas redes com base nessas informações. Os algoritmos integram um sistema automático de análise de eventos de sobrecorrente, que é capaz de estimar o instante de ocorrência do evento, identificar as fases envolvidas e classificar o tipo de falta por meio de fasores calculados a partir dos seus registros. Além disso, este trabalho apresenta uma comparação entre duas técnicas distintas para o cálculo do fasor (a primeira utiliza a Transformada Discreta de *Fourier*, com janela de um ciclo, e a segunda é baseada em algoritmos genéticos) e três técnicas distintas para a estimação do instante de ocorrência do evento (a primeira utiliza a transformada de *Fourier* associada a um filtro digital que implementa uma função densidade de probabilidade, a segunda substitui a transformada de *Fourier* pelos algoritmos genéticos e a terceira é baseada somente na Transformada de *Park*). Para a avaliação dos algoritmos desenvolvidos, foram elaboradas simulações de duas redes de distribuição no *software* ATP – *Alternative Electromagnetic Transients Program*, além de dados reais de sistemas de distribuição de concessionárias brasileiras.

Palavras-chave: Análise automática de faltas. Rede de distribuição. Algoritmos genéticos, Transformada de *Park*.

ABSTRACT

This work presents the development of algorithms for the automatic analysis of overcurrent events in electrical power systems. The algorithms proposed in this paper are based on data of voltages and currents recorded by intelligent electronic devices (digital oscillographs and / or protection relays) installed in electrical networks, which can evaluate the operating state of these networks based on this information. The algorithms incorporate an automatic system for overcurrent analysis, which is able to estimate the time of occurrence of the event, identify the steps involved and classify the fault type using the phasors of voltages and currents calculated from their records. Furthermore, this work presents a comparison between two distinct techniques for phasor calculation (the first one uses the Discrete Fourier Transform, with a cycle window, and the second one is based on genetic algorithms) and three distinct techniques to estimate the time of the occurrence of the event (the first is based on Fourier Transform and a digital filter that implements a probability density function, the second one replaces Fourier transform by Genetic Algorithm and the third one is based on Park transform). For the evaluation of the developed algorithms, cases from two distribution network model have been generated in the ATP software - Alternative Electromagnetic Transients Program, additionally, actual data from distribution Brazilian utilities systems were also analyzed by the developed algorithm.

Keywords: Automated fault analysis. Distribution network. Genetic algorithm. Park transform.

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	14
1.1	INTRODUÇÃO.....	14
1.2	APLICAÇÕES E BENEFÍCIOS.....	15
1.2.1	Operação.....	15
1.2.2	Gestão de ativos.....	16
1.2.3	Engenharia.....	17
1.2.4	Unidade de negócios.....	17
1.2.5	Benefícios.....	18
1.3	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	18
1.4	OBJETIVOS.....	20
1.5	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.1	PERTURBAÇÕES NOS SISTEMAS ELÉTRICOS.....	24
2.1.1	Eventos de qualidade de energia.....	24
2.1.2	Eventos de curto-circuito.....	29
2.1.2.1	Curtos-circuitos permanentes.....	30
2.1.2.2	Curtos-circuitos transitórios.....	32
2.2	METODOLOGIA GENERALIZADA DE ANÁLISE DE EVENTOS.....	33
2.2.1	Segmentação.....	34
2.2.2	Extração de atributos.....	35
2.2.3	Classificação.....	36
2.2.4	Tomada de decisão.....	37
2.3	EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS E CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS.....	37
2.3.1	Métodos de análise determinísticos.....	39
2.3.2	Métodos de análise não-determinísticos.....	41
2.4	ALGORITMOS GENÉTICOS.....	42
3	METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	46
3.1	INTRODUÇÃO.....	46
3.2	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA METODOLOGIA.....	48
3.2.1	Registro e leitura dos sinais de tensões e correntes.....	48
3.2.2	Cálculo das componentes fundamentais	49

3.2.2.1	TDF e filtragem da componente aperiódica.....	49
3.2.2.2	Algoritmos genéticos.....	51
3.2.3	Determinação dos instantes de transição.....	56
3.2.3.1	Diferença entre janelas adjacentes.....	57
3.2.3.2	Transformada de Park.....	58
3.2.3.3	Função densidade de probabilidade.....	60
3.2.4	Classificação da falta.....	64
4	SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	69
4.1	SIMULAÇÕES COM SINAIS SINTETIZADOS.....	69
4.2	SIMULAÇÕES NO ATP.....	70
4.2.1	Modelo do sistema de distribuição.....	71
4.2.2	Descrição dos casos de simulação.....	73
4.3	CASOS REAIS.....	74
5	RESULTADOS.....	77
5.1	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DOS ALGORITMOS DESENVOLVIDOS....	78
5.1.1	Avaliação do AG em relação à TDF.....	78
5.1.1.1	Teste do sinal representado por uma função.....	78
5.1.1.2	Obtenção dos resultados com o AG.....	82
5.1.2	Comparativo na determinação dos instantes de transição.....	84
5.1.3	Avaliação da transformada de Park.....	89
5.2	RESULTADOS DOS CASOS SIMULADOS NO ATP.....	91
5.2.1	Rede 0902 Caso ABC041.....	97
5.2.2	Rede GM03 Caso ABCN026.....	100
5.2.3	Rede 0902 Caso BC001.....	103
5.2.4	Rede GM03 Caso BCN012.....	107
5.2.5	Rede 0902 Caso AN055.....	110
5.3	RESULTADO DOS CASOS REAIS.....	112
5.3.1	Caso 1020111.....	118
5.3.2	Caso 1030048.....	122
5.3.3	Caso 1040050.....	124
5.3.4	Caso 1080029.....	127
5.3.5	Caso 1020063.....	130
5.3.6	Caso 1020068.....	133
5.3.7	Caso 1030006.....	135
5.3.8	Caso 1060054.....	138

6	CONCLUSÃO.....	143
	REFERÊNCIAS.....	146
	ANEXO.....	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Setores principais de uma concessionária.....	15
Figura 1.2 - Exemplo de uma rede de distribuição.....	19
Figura 2.1 - Exemplos de distúrbios de qualidade de energia.....	28
Figura 2.2 - Exemplos de registros de curto-circuito.....	31
Figura 2.3 - Exemplos de curtos-circuitos transitórios.....	32
Figura 2.4 - Diagrama de blocos generalizado para análise de eventos.....	34
Figura 2.5 - Processo de segmentação do sinal	35
Figura 2.6 - Extração dos atributos - Exemplo para a transformada de Fourier de um ciclo...36	
Figura 2.7 - Métodos para extração de atributos e classificação de eventos.....	38
Figura 2.8 - Fluxograma simplificado do AG.....	44
Figura 3.1 - Arquitetura simplificada do sistema.....	46
Figura 3.2 - Forma de classificação dos indivíduos.....	53
Figura 3.3 - Fluxograma da diferença de janelas adjacentes.....	57
Figura 3.4 - Fluxograma do método da função densidade de probabilidade.....	63
Figura 4.1 - Topologia da rede GM03.....	72
Figura 4.2 - Topologia da rede 0902.....	73
Figura 4.3 - Caso 1060054 Exemplo de evolução de falta.....	74
Figura 4.4 - Caso 1030112 Exemplo de falta temporária de curta duração.....	75
Figura 4.5 - Caso 1040062 Exemplo de falta com presença de exponencial amortecida.....	76
Figura 5.1 - Sinal de corrente com a presença da componente aperiódica.....	79
Figura 5.2 - Módulo do sinal obtido por meio do AG e da TDF de um ciclo.....	80
Figura 5.3 - Módulo e fase do sinal obtidos por meio do AG.....	81
Figura 5.4 - Módulo do sinal obtido por meio do AG e da TDF de meio ciclo.....	82
Figura 5.5 - Exemplo de aproximação realizada pelo AG.....	83
Figura 5.6 - Erro de aproximação realizado pelo AG no instante de transição.....	84
Figura 5.7 - Comparativo entre AG e TDF de um ciclo.....	85
Figura 5.8 - Comparativo entre AG e TDF de meio ciclo.....	86
Figura 5.9 - Comparativo no método de diferença de janelas.....	87
Figura 5.10 - Transformada de Park - Exemplo com evolução de falta.....	90
Figura 5.11 - 0902/ABC041 – Avaliação pelo programa com o AG	97
Figura 5.12 - 0902/ABC041 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	98
Figura 5.13 - 0902/ABC041 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	99

Figura 5.14 - GM03/ABCN026 – Avaliação pelo programa com o AG	101
Figura 5.15 - GM03/ABCN026 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	102
Figura 5.16 - GM03/ABCN026 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.	103
Figura 5.17 - 0902/BC001 – Avaliação pelo programa com o AG	104
Figura 5.18 - 0902/BC001 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	105
Figura 5.19 - 0902/BC001 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	106
Figura 5.20 - 0902/BC001 – Sinal de tensão Vbn.....	106
Figura 5.21 - GM03/BCN012 – Avaliação pelo programa com o AG	108
Figura 5.22 - GM03/BCN012 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	109
Figura 5.23 - GM03/BCN012 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	109
Figura 5.24 - 0902/AN055 – Avaliação pelo programa com o AG	111
Figura 5.25 - 0902/AN055 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	111
Figura 5.26 - 0902/AN055 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	112
Figura 5.27 - Caso 1020111 - Avaliação pelo programa com o AG.....	120
Figura 5.28 - Caso 1020111 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	120
Figura 5.29 - Caso 1020111 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	121
Figura 5.30 - Caso 1030048 - Avaliação pelo programa com o AG.....	123
Figura 5.31 - Caso 1030048 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	123
Figura 5.32 - Caso 1030048 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	124
Figura 5.33 - Caso 1040050 - Avaliação pelo programa com o AG.....	125
Figura 5.34 - Caso 1040050 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	126
Figura 5.35 - Caso 1040050 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	127
Figura 5.36 - Caso 1080029 - Avaliação pelo programa com o AG.....	129
Figura 5.37 - Caso 1080029 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	129
Figura 5.38 - Caso 1080029 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	130
Figura 5.39 - Caso 1020063 - Avaliação pelo programa com o AG.....	131
Figura 5.40 - Caso 1020063 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	132
Figura 5.41 - Caso 1020063 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	132
Figura 5.42 - Caso 1020068 - Avaliação pelo programa com o AG.....	134
Figura 5.43 - Caso 1020068 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	134
Figura 5.44 - Caso 1020068 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	135
Figura 5.45 - Caso 1030006 - Avaliação pelo programa com o AG.....	137
Figura 5.46 - Caso 1030006 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	137
Figura 5.47 - Caso 1030006 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	138
Figura 5.48 - Caso 1060054 – Fase A - Avaliação pelo programa com o AG.....	140

Figura 5.49 - Caso 1060054 – Fase B - Avaliação pelo programa com o AG.....	140
Figura 5.50 - Caso 1060054 – Fase C - Avaliação pelo programa com o AG.....	141
Figura 5.51 - Caso 1060054 - Avaliação pelo programa com a TDF.....	141
Figura 5.52 - Caso 1060054 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação de fenômenos causadores de distúrbios eletromagnéticos.....	25
Tabela 2.2 - Características típicas de fenômenos eletromagnéticos em sistemas elétricos.....	27
Tabela 3.1 - Critérios para classificação dos tipos de falta.....	66
Tabela 3.2 - Defasagem entre as componentes de sequência positiva e negativa.....	67
Tabela 4.1 - Características da falta simulada.....	73
Tabela 5.1 - Instantes de transição.....	87
Tabela 5.2 - Resultados obtidos para determinação dos instantes de transição.....	88
Tabela 5.3 - Resumo dos resultados.....	89
Tabela 5.4 - Resumo da avaliação dos resultados.....	91
Tabela 5.5 - Resultados para casos do ATP, rede 0902.....	93
Tabela 5.6 - Resultados para casos do ATP, rede GM03.....	94
Tabela 5.7 - Resumo dos resultados obtidos para oscilografias da rede 0902 e GM03.....	96
Tabela 5.8 - 0902/ABC041 – Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	97
Tabela 5.9 - GM03/ABCN026 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	100
Tabela 5.10 - 0902/BC001 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	104
Tabela 5.11 - GM03/BCN012 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	107
Tabela 5.12 - 0902/AN055 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	110
Tabela 5.13 - Resultados obtidos para casos reais com evolução da falta.....	113
Tabela 5.14 - Resultados obtidos para casos reais com defeito temporário de curta duração	114
Tabela 5.15 - Resultados obtidos para casos reais de defeito permanente no sistema.....	116
Tabela 5.16 - Resumo da avaliação dos resultados para os 38 casos.....	117
Tabela 5.17 - Caso 1020111 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	119
Tabela 5.18 - Caso 1030048 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	122
Tabela 5.19 - Caso 1040050 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	125
Tabela 5.20 - Caso 1080029 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	128
Tabela 5.21 - Caso 1020063 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	131
Tabela 5.22 - Caso 1020068 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	133
Tabela 5.23 - Caso 1030006 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	136
Tabela 5.24 - Caso 1060054 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição.....	139
Tabela 6.1 - Vantagens e desvantagens.....	144

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

As concessionárias do setor de energia elétrica têm aumentado sua preocupação com a redução de custos, com o aumento da confiabilidade dos seus sistemas e com a melhoria nos índices de qualidade dos serviços prestados aos seus consumidores. A reestruturação do setor elétrico contribuiu positivamente para a melhoria desse cenário, uma vez que as concessionárias foram estimuladas a operar em um regime de competição, que demanda crescentes investimentos para a modernização de procedimentos de operação, de processos de engenharia, de métodos de manutenção, bem como crescentes investimentos em tecnologias emergentes e em programas de pesquisa e desenvolvimento, com o objetivo de otimizar a sua forma de trabalho e atender às necessidades impostas pela reestruturação do setor.

Nesse contexto, os investimentos para a modernização dos sistemas de monitoramento, controle, automação e proteção das redes elétricas concentraram-se no aumento da aplicação da tecnologia digital. Essa tecnologia tornou disponível uma ampla gama de recursos para a operação das redes elétricas em condições normais e também na ocorrência de eventos pouco usuais, tais como eventos de qualidade de energia elétrica e eventos de curto-circuito. Atualmente, é possível operar as redes elétricas de forma a minimizar eventuais problemas e posteriormente analisar suas causas e consequências, com o objetivo de reduzir os impactos desses problemas em eventos futuros. Para tanto, é possível utilizar informações fornecidas por registradores de perturbação, sequenciadores de eventos, bem como dados provenientes de dispositivos eletrônicos inteligentes e de sistemas supervisórios de modo a compreender o comportamento dinâmico dessas redes elétricas.

No entanto, a ampla utilização desses recursos resulta em um excesso de informações sobre as redes elétricas e, embora possa colaborar para uma avaliação minuciosa dos eventos a que essas redes estão sujeitas, pode tornar o trabalho de síntese dessa avaliação bastante demorado, principalmente se realizado manualmente por um engenheiro ou mesmo por uma equipe dentro da concessionária. Em redes de distribuição de energia elétrica esse problema pode ser ainda mais acentuado, dado que o número de ocorrências a que essas redes estão

submetidas é maior. Por essas razões, o trabalho de análise e classificação de eventos em redes elétricas é de grande importância para as concessionárias do setor de energia elétrica, e pode trazer inúmeros benefícios.

1.2 APLICAÇÕES E BENEFÍCIOS

De acordo com a referência (NORTHCOTE-GREEN, 2007), as concessionárias de energia elétrica podem ser divididas de acordo com quatro setores-chave, que estão ilustrados na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Setores principais de uma concessionária

Fonte: Elaborado a partir da referência (NORTHCOTE-GREEN, 2007)

Cada um desses setores pode se beneficiar com o uso de informações detalhadas sobre as ocorrências nas redes elétricas. Esses benefícios estão descritos nos itens 1.2.1 a 1.2.4

1.2.1 Operação

O setor de operação é responsável pelas tarefas diárias de operação das redes elétricas e tem como objetivo primordial manter a continuidade do serviço prestado aos consumidores. Esse setor utiliza os tradicionais sistemas SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition* para a operação remota de chaves, disjuntores, religadores, bem como para a obtenção das informações sobre o estado operativo das redes elétricas. Além disso, o setor utiliza o mapeamento geográfico dessas redes para coordenar as operações, realizar a programação das atividades de manutenção, bem como providenciar o atendimento às ocorrências. Os benefícios que a análise automática de eventos pode trazer a esse setor são:

- Considerando eventos de sobrecorrente, a análise automática pode fornecer subsídios para a correta localização das faltas, bem como os possíveis equipamentos envolvidos,

com o objetivo de direcionar as equipes de campo minimizando os tempos de interrupção do fornecimento;

- Considerando eventos de qualidade de energia elétrica, a análise automática pode fornecer subsídios para a identificação das suas causas, por exemplo, variações nos sinais de tensão decorrentes de partida de motores, da energização de grandes blocos de cargas etc; e
- Considerando ambos os tipos de evento, a análise automática pode estabelecer relações de causa e efeito, de forma a associar os equipamentos envolvidos e minimizar o tempo despendido com a sua manutenção.

1.2.2 Gestão de ativos

O setor de gestão de ativos é responsável pela gestão do ciclo de vida de todos os ativos da concessionária de energia elétrica, desde sua aquisição até o seu descarte. As atividades normalmente desenvolvidas por esse setor envolvem todos os equipamentos de propriedade da concessionária de energia elétrica com o objetivo de otimizar o seu uso durante todo o ciclo de vida, aumentar a sua disponibilidade durante a operação normal, otimizar as atividades de manutenção e reduzir os seus custos. Atualmente as concessionárias utilizam sistemas GIS – Sistemas de Informação Geográfica como ferramenta de suporte a essas atividades. Para esse setor, os benefícios que decorrem do emprego de sistemas de análise automática de eventos são:

- Considerando eventos de sobrecorrente, a análise automática pode fornecer subsídios para a correta manutenção de equipamentos, a partir de dados como número de religamentos, valores das correntes de curto-circuito e sua duração, etc. Além disso, a análise automática de eventos de sobrecorrente transitórios permite a identificação de equipamentos suscetíveis a falhas transitórias, ou até mesmo a necessidade de poda de árvores ou manutenção preventiva nas redes; e
- Considerando eventos de qualidade de energia a análise automática pode fornecer subsídios para avaliação do estado operativo de equipamentos pela análise do seu comportamento dinâmico durante tais ocorrências.

1.2.3 Engenharia

O setor de engenharia é responsável pelo projeto de novas instalações elétricas, bem como ampliações e reforços nas instalações elétricas existentes, de modo a garantir o atendimento à crescente demanda. Novos projetos, ampliações e reforços são elaborados a partir de padrões e normas técnicas desenvolvidas pelas próprias concessionárias ou por associações nacionais e internacionais, e a otimização dessas instalações depende de ferramentas computacionais de análise de redes que têm como objetivo avaliar as condições operativas das instalações elétricas em condições normais e durante eventos de curto-circuito, de modo a fornecer subsídios para a especificação dos equipamentos primários, bem como os sistemas de monitoramento, controle, automação e proteção.

Atualmente, as condições operativas reais não são utilizadas para realimentar e aprimorar esse procedimento e, nesse contexto, os benefícios que a análise automática pode trazer ao setor de engenharia são:

- Permitir a correção e/ou otimização da filosofia dos novos projetos, ampliações e reforços, considerando a especificação dos equipamentos primários, e a especificação e os ajustes dos sistemas de monitoramento, controle, automação e proteção;
- Fornecer informações que permitam avaliar o estado das instalações elétricas, de modo a identificar a necessidade de reforços e/ou ampliações; e
- Permitir a avaliação de desempenho dos sistemas de monitoramento, controle, automação e proteção, de modo a modificar seus ajustes, ampliando a confiabilidade das instalações elétricas.

1.2.4 Unidade de negócios

A unidade de negócios é o setor responsável por todas as atividades comerciais da concessionária de energia elétrica. É esse setor que representa a concessionária perante os consumidores e, por essa razão, qualquer melhoria nos índices de qualidade de energia elétrica traduz-se em melhorias no relacionamento com esses consumidores.

1.2.5 Benefícios

Pelas razões descritas nos itens 1.2.1 a 1.2.4, pode-se concluir que um sistema capaz de centralizar dados sobre ocorrências nas redes elétricas e fornecer informações sobre essas ocorrências para as equipes responsáveis pela sua análise pode ser extremamente útil para os diversos setores de uma concessionária de energia elétrica.

Além disso, a partir do momento em que esse sistema é capaz de fornecer as informações de forma automática, garante-se que uma maior quantidade de informações pode ser levada em consideração no mesmo período de tempo, sem ônus adicional para as equipes de análise das concessionárias de energia. Em resumo, esse sistema possibilita que todas as ocorrências sejam tratadas e não somente as ocorrências de maior gravidade, fato esse que amplia a visibilidade com relação à situação das redes elétricas e pode aumentar a sua confiabilidade.

1.3 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Conforme mencionado no item 1.1, o número de eventos de qualidade de energia elétrica e de curto-circuito em redes de distribuição de energia elétrica pode ser bastante elevado, em virtude da topologia dessas redes, que normalmente abrangem áreas geográficas bastante amplas.

De um modo geral, redes de distribuição de energia elétrica são tipicamente compostas por subestações de distribuição, que são conectadas ao sistema elétrico interligado por meio de linhas de transmissão no nível de tensão de subtransmissão. Essas linhas de transmissão são conectadas ao primário dos transformadores instalados dentro das subestações, que são responsáveis por reduzir as tensões ao nível de tensão de distribuição. O secundário desses transformadores é conectado aos alimentadores de distribuição, que percorrem as áreas de atendimento das concessionárias de distribuição.

A Figura 1.2 ilustra uma subestação típica de distribuição, com um transformador que possui secundário duplo. O primário desse transformador está conectado a um vão de linha de transmissão, no nível de tensão de 138 [kV], e cada secundário é conectado a um barramento de onde saem quatro alimentadores de distribuição, totalizando oito alimentadores.

Figura 1.2 - Exemplo de uma rede de distribuição

Fonte: Elaborado a partir da referência (MANASSERO, G.; YOSHIDA, E. et al 2013)

A saída de cada um dos oito alimentadores é protegida por um IED – *Intelligent Electronic Device*, que possui diversas funções de proteção e é capaz de atuar sobre seu respectivo disjuntor. Cada um dos alimentadores é composto por um trecho de rede denominado tronco, ou ramal principal, de onde partem ramais laterais. Os ramais laterais são protegidos por chaves fusíveis e o tronco é protegido pelo respectivo disjuntor e, eventualmente, pode também ser protegido por chaves religadoras ao longo do seu comprimento.

Na Figura 1.2 são apresentados detalhes do alimentador de número quatro. Esse alimentador está conectado ao secundário do transformador TR-01 por meio do barramento denominado *Barra 1*. O IED-4 é responsável pela identificação de falhas no alimentador de número quatro e atua sobre o disjuntor DJ-4. Esse disjuntor atua de forma coordenada com os demais elementos de proteção do alimentador, isto é: fusíveis (FU-41 a FU-57); e o religador (RE-4).

Nesse exemplo, os equipamentos IED-4 e RE-4 são responsáveis pelo registro dos eventos no alimentador quatro. Na ocorrência de curtos-circuitos e/ou eventos de qualidade de energia elétrica esses equipamentos registram sinais de tensões e correntes e enviam esses dados ao centro de operação da distribuição, para que sejam analisados pelas equipes da concessionária.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de algoritmos para a análise automática de eventos de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência. Os algoritmos propostos neste trabalho integram um sistema para análise automática de oscilografias de redes de distribuição de energia elétrica e são baseados em registros de tensões e correntes efetuados por dispositivos eletrônicos inteligentes (oscilógrafos digitais e/ou relés de proteção) instalados nas subestações de distribuição e ao longo dos alimentadores, conforme apresentado no item 1.3

O sistema automático apresentado neste trabalho realiza a análise de forma *offline*, isto é, reúne as oscilografias obtidas em um determinado período para posteriormente realizar a análise e gerar relatórios ao operador. Esse sistema é composto por módulos de *software* e uma interface humano-máquina que são capazes de: efetuar a leitura dos sinais; eliminar a

componente aperiódica presente nos sinais de corrente; calcular os fasores; identificar os instantes de início e término dos eventos; e efetuar a sua classificação, indicando o tipo de falta e as fases envolvidas.

Além disso, esse trabalho pretende avaliar dois algoritmos distintos para a eliminação da componente aperiódica presente nos sinais de corrente e cálculo dos fasores dos sinais de tensões e correntes, bem como três algoritmos distintos para a estimação do instante de ocorrência do evento.

1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em capítulos, cujo conteúdo é composto por:

- *1. Considerações Iniciais:* apresenta uma introdução acerca dos procedimentos de análise de eventos em sistemas elétricos de potência e, em especial, os benefícios para os diversos setores das concessionárias de energia elétrica. Além disso, apresenta a topologia de um sistema de distribuição típico, que configura o cenário de aplicação de um sistema automático de análise de eventos de sobrecorrente e as fontes primárias de informação para esse sistema. Citando também os objetivos propostos do trabalho em questão;
- *2. Revisão da Literatura:* apresenta o estado da arte em identificação e classificação de eventos de qualidade de energia e de sobrecorrente considerando os métodos determinísticos e não-determinísticos existentes para realizar essa tarefa. Além disso, discute a metodologia generalizada de análise de eventos e a utilização de algoritmos genéticos para a solução de problemas relacionados aos sistemas elétricos de potência;
- *3. Metodologia para análise de faltas em sistemas elétricos de potência:* descreve a metodologia para análise automática de faltas nos sistemas elétricos de potência considerando os diversos algoritmos desenvolvidos para registro e leitura dos sinais de tensões e correntes; para eliminação da componente aperiódica dos sinais de corrente, bem como cálculo dos fasores dos sinais de tensões e correntes; determinação dos instantes de transição; e classificação da falta;

- 4. *Simulações para avaliação da metodologia proposta:* É apresentado o protótipo elaborado em MATLAB e descrito o sistema implementado, além do detalhamento de cada módulo de *software* para as metodologias citadas no capítulo que antecede, com a utilização de fluxogramas e exemplo de implantação. Descrição dos casos de simulação do ATP, bem como a apresentação de casos reais obtidos de concessionárias. Além disso, são detalhados os testes realizados em cada algoritmo;
- 5. *Resultados:* apresentação dos resultados obtidos nas simulações realizadas, comparando os algoritmos testados e analisando a resposta dos algoritmos frente às simulações efetuadas e o desempenho com casos reais;
- 6. *Conclusão:* apresentação das considerações finais deste trabalho, das vantagens e desvantagens de cada rotina computacional proposta e a conclusão sobre a viabilidade do uso dos algoritmos propostos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Estudos e pesquisas sobre análise automática de eventos em sistemas elétricos de potência têm sido desenvolvidos desde a elaboração e a introdução dos primeiros sistemas supervisórios (KEZUNOVIC et al, 2001). Avanços significativos na tecnologia digital têm promovido o desenvolvimento de novos equipamentos para automação, monitoramento, controle e proteção das redes elétricas e, por essa razão, a quantidade de dados acerca do estado operativo dessas redes tem ampliado consideravelmente. Isso significa que os operadores e engenheiros das concessionárias do setor elétrico possuem atualmente um grande número de dados para efetuar a análise de eventos em seus sistemas e, por conseguinte, há a necessidade de que parte desses dados possa ser processada automaticamente, de forma a produzir informações concisas.

Ademais, os avanços da tecnologia digital ocorreram em todos os setores, desde a geração até o consumidor final. Os dispositivos convencionais têm sido substituídos por dispositivos digitais e, atualmente, novas subestações já iniciam as suas atividades dotadas de dispositivos eletrônicos inteligentes.

Pode-se incluir nesses avanços o setor de distribuição de energia elétrica, cujas redes normalmente são responsáveis pelo fornecimento de milhares de consumidores, por meio de centenas de alimentadores que possuem dezenas de quilômetros de cabos. Esse cenário somado à possibilidade de intempéries pode resultar em centenas de perturbações em um curto período de tempo. Caso isso ocorra, há chances reais de sobrecarga de dados nos setores das concessionárias que necessitam agir de forma rápida e eficiente para restabelecer o fornecimento de energia elétrica.

Essas perturbações podem ser predominantemente caracterizadas como: curtos-circuitos transitórios, com ou sem a atuação de religadores, geralmente ocasionados pelo contato com árvores em trechos de linha aérea com cabos nus; curtos-circuitos permanentes nos ramais, com a atuação dos respectivos fusíveis; ou curtos-circuitos permanentes no tronco, com a atuação dos disjuntores e/ou religadores. Normalmente, os curtos-circuitos permanentes são decorrentes de rompimento de trechos de linha, queda de postes, etc. Além dos eventos de

curto-circuito, os equipamentos digitais podem registrar perturbações nas redes elétricas caracterizadas como eventos de qualidade de energia, que normalmente se tratam de distorções nos sinais de tensões e/ou correntes, usualmente provocadas pela presença de cargas não lineares conectadas às redes elétricas.

Nesse sentido, são descritos no item 2.1 as perturbações nos sistemas elétricos, bem como algumas abordagens existentes para a análise de tais perturbações.

2.1 PERTURBAÇÕES NOS SISTEMAS ELÉTRICOS

É possível dividir as perturbações nos sistemas elétricos de potência em dois grupos principais, o primeiro compreende os eventos de qualidade de energia elétrica e o segundo, os eventos de curto-circuito. Os eventos de qualidade de energia elétrica são caracterizados por distúrbios transitórios ou permanentes nas formas de onda das tensões e/ou correntes, geralmente ocorrem devido à presença de cargas não lineares conectadas às redes elétricas, e podem ser classificados segundo a referência (IEEE Std 1159TM, 2009). Por outro lado, os eventos de curto-circuito, embora também possam ser de caráter transitório ou permanente, são variações anormais nos sinais das correntes causadas por falhas decorrentes de intempéries, defeitos em equipamentos, acidentes, etc. e que podem eventualmente resultar em eventos de qualidade de energia elétrica. Usualmente estes eventos são tratados de forma separada e, inclusive, por meio de medidores e transformadores de instrumentos distintos, cada um projetado para a sua finalidade.

2.1.1 Eventos de qualidade de energia

Segundo a referência (IEEE Std 1159TM, 2009), o termo qualidade de energia refere-se a uma ampla variedade de fenômenos que caracterizam deteriorações nos sinais de tensões e correntes em um determinado instante de tempo e em um determinado local nos sistemas elétricos de potência. Segundo a referência (DWIVEDI et al, 2008) o termo qualidade de energia está associado a qualquer desvio manifestado nos sinais de tensões, correntes e/ou frequência que resulte em falha ou mau funcionamento de equipamentos conectados às redes elétricas.

Para se determinar o que deve ser considerado como um problema de qualidade de energia elétrica e a forma de se realizar a sua supervisão, deve-se adotar as práticas recomendadas na referência (IEEE Std 1159TM, 2009). Essa referência descreve as condições nominais e desvios dessas condições nominais que caracterizam eventos de qualidade de energia decorrentes de problemas nos alimentadores ou cargas, ou também da interação entre ambos. Os principais fenômenos que podem causar distúrbios eletromagnéticos são classificados pela referência (IEC 61000-2-5:2011) e mencionados em (IEEE Std 1159TM, 2009), conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação de fenômenos causadores de distúrbios eletromagnéticos

Grupo	Exemplos
Fenômeno conduzido de baixa frequência	Harmônicas, inter-harmônicas
	Flutuação de tensão
	Afundamentos e interrupções
	Desbalanço de tensão
	Variação da frequência
Fenômenos irradiados de baixa frequência	Componente de corrente contínua
	Campos magnéticos
	Campos Elétricos
Fenômenos conduzidos de alta frequência	Ondas contínuas induzidas de tensão ou corrente
	Transitórios unidirecionais
	Transitórios oscilantes
Fenômenos irradiados de alta frequência	Campos Magnéticos
	Campos Elétricos
	Campos Eletromagnéticos
	Ondas contínuas induzidas de tensão ou corrente
	Transitórios
Fenômeno de descarga eletrostática	-
Pulso eletromagnético nuclear	-

Fonte: IEEE Std 1159TM: 2009

Pode-se associar cada um dos grupos apresentados na Tabela 2.1 com as categorias, conteúdo espectral, duração e magnitude apresentados na Tabela 2.2. Essa tabela também está apresentada na referência (IEEE Std 1159TM, 2009) e torna possível classificar os fenômenos a partir de medições dos sinais de tensões e correntes para o propósito de análise das perturbações dessa natureza nos sistemas elétricos de potência. A classificação desses fenômenos permite determinar as características dos eventos de qualidade e os fenômenos eletromagnéticos causadores típicos, além disso, permite definir a forma para a solução dos problemas de qualidade de energia elétrica.

Por exemplo, fenômenos impulsivos de tensão são descritos, na referência (IEEE Std C62.41-1995), como fenômenos que possuem tempo de elevação típico de 1,2 [μs] e tempo de decaimento típico de 50 [μs], cuja causa mais comum são descargas atmosféricas. Esses fenômenos impulsivos podem produzir ressonâncias em sistemas de potência e resultar em transitórios oscilatórios.

Por outro lado, variações de curta duração nos valores eficazes das formas de onda de tensão (*sag* e *swell*) são quase sempre causadas por curtos-circuitos, energização de grandes blocos de carga, energização de transformadores que requerem elevadas correntes de magnetização, etc.

Ainda, desbalanços nos sistemas trifásicos em regime permanente são definidos como variações na relação entre a magnitude da componente de sequência negativa e a magnitude da componente de sequência positiva que excedem 3 [%] para sistemas operando em condições normais, conforme apresentado na referência (IEEE Std 1159TM, 2009).

Distorções nas formas de onda de tensões e correntes, geralmente associadas à presença de cargas não lineares, são distúrbios que normalmente possuem um tempo de duração bem elevado. Segundo a referência (IEEE Std 1159TM, 2009) há cinco tipos primários de distorções:

- Presença de componente de corrente contínua;
- Presença de conteúdo harmônico;
- Inter-harmônicas;
- *Notching* – corte de tensão na forma de onda; e
- Ruído.

• Tabela 2.2 - Características típicas de fenômenos eletromagnéticos em sistemas elétricos

Categorias	Conteúdo espectral típico	Duração típica	Magnitude típica da tensão
1.0 Transitórios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1. Nanossegundos	5 [ns] de elevação	< 50 [ns]	
1.1.2. Microssegundos	1 [μs] de elevação	50 [ns] - 1 [ms]	
1.1.3. Milissegundos	0,1 [ms] de elevação	> 1 [ms]	
1.2. Oscilatório			
1.2.1. Baixa Frequência	< 5 [kHz]	0,3–50 [ms]	0–4 [pu]
1.2.2. Média Frequência	5–500 [kHz]	20 [μs]	0–8 [pu]
1.2.3. Alta Frequência	0,5–5 [MHz]	5 [μs]	0–4 [pu]
2.0 Variação do valor eficaz (RMS) de curta duração			
2.1 Instantâneo			
2.1.1 Sag – Afundamento		0,5–30 ciclos	0,1–0,9 [pu]
2.1.2 Swell – Elevação		0,5–30 ciclos	1,1–1,8 [pu]
2.2 Momentâneo			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos – 3 [s]	< 0,1 [pu]
2.2.2 Sag – Afundamento		30 ciclos – 3 [s]	0,1–0,9 [pu]
2.2.3 Swell – Elevação		30 ciclos – 3 [s]	1,1–1,4 [pu]
2.3 Temporário			
2.3.1 Interrupção		>3 s – 1 [min]	< 0,1 [pu]
2.3.2 Sag – Afundamento		>3 s – 1 [min]	0,1–0,9 [pu]
2.3.3 Swell – Elevação		>3 s – 1 [min]	1,1–1,2 [pu]
3.0 Variação do valor eficaz (RMS) de longa duração			
3.1 Interrupção mantida		> 1 [min]	0,0 [pu]
3.2 Subtensões		> 1 [min]	0,8–0,9 [pu]
3.3 Sobreensões		> 1 [min]	1,1–1,2 [pu]
3.4 Sobrecorrentes		> 1 [min]	
4.0 Desbalanço			
4.1 Tensão		Regime Permanente	0,5–2%
4.2 Corrente		Regime Permanente	1,0–30%
5.0 Distorção da forma de onda			
5.1 Componente CC		Regime Permanente	0–0,1%
5.2 Harmônica	0–9 [kHz]	Regime Permanente	0–20%
5.3 Inter-harmônica	0–9 [kHz]	Regime Permanente	0–2%
5.4 Notching – Corte de tensão na forma de onda		Regime Permanente	
5.5 Ruído	Banda larga	Regime Permanente	0–1%
6.0. Flutuação de tensão	< 25 [Hz]	Intermitente	0,1–7% 0,2–2 [Pst]
7.0. Variações de frequência		< 10 [s]	± 0,10 [Hz]

Fonte: IEEE Std 1159TM: 2009

Variações na frequência dos sinais de tensões e correntes decorrem de alterações na fase dos sinais de tensão como consequência de alterações nos fluxos de potência dos sistemas, pois a frequência está diretamente ligada ao equilíbrio entre cargas e a capacidade de geração dos sistemas. Quando este equilíbrio é alterado dinamicamente, pequenas variações na frequência podem ocorrer.

Na Figura 2.1 são ilustrados alguns exemplos de distúrbios considerados como eventos de qualidade de energia.

Figura 2.1 - Exemplos de distúrbios de qualidade de energia

Fonte: Próprio autor

O monitoramento dos problemas de qualidade de energia é realizado dividindo-se os distúrbios em duas categorias básicas, conforme apresentado na referência (DWIVEDI et al, 2008):

- Anomalias transitórias nos sinais de tensões e/ou correntes, bem como variações nos seus valores eficazes: podem ser detectadas quando os valores instantâneos de pico ou os valores eficazes desses sinais excedem limiares pré-determinados, apresentando afundamentos ou elevações; e
- Anomalias permanentes nos sinais de tensões e/ou correntes: podem ser detectadas a partir do monitoramento das variações nos fasores dos sinais de tensões e correntes, bem como no conteúdo harmônico dessas grandezas comparando-as com limites pré-estabelecidos de desbalanço, conteúdo harmônico, frequência da componente fundamental, etc.

Essas anomalias normalmente são avaliadas ao longo do tempo e podem posteriormente ser classificadas conforme apresentado na Tabela 2.2. Existem inúmeras técnicas que podem auxiliar na realização da classificação de anomalias: técnicas baseadas na transformada *Wavelet*, conforme apresentado na referência (DWIVEDI, 2009), técnicas baseadas na Transformada S associada ao teorema de Parseval, conforme apresentado na referência (GARGOOM, 2008), dentre outras.

Embora o objetivo deste trabalho seja a análise de eventos de curto-circuito, a metodologia generalizada para a análise de distúrbios de qualidade de energia consolidada em (SAXENA et al, 2010), pode ser empregada. Essa metodologia está apresentada no item 2.2

2.1.2 Eventos de curto-circuito

Redes de distribuição de energia elétrica caracterizam-se por abranger uma grande área de cobertura, decorrente da necessidade de atendimento a consumidores comumente localizados de forma bastante dispersa. Por essa razão, as redes de distribuição encontram-se mais expostas a eventos naturais, tais como: tempestades, ventos, descargas atmosféricas, etc. Esses eventos podem produzir curtos-circuitos que ocasionam interrupções no fornecimento de energia elétrica e, por essa razão, devem ser classificados de forma rápida para minimizar o tempo de identificação do estado da rede e de restabelecimento.

As características dos eventos de curto-circuito são:

- *Imponderabilidade*: curtos-circuitos são eventos imprevisíveis que podem ocorrer devido às condições atmosféricas adversas, falhas em equipamentos, acidentes, etc, por essa razão, a localização e a origem dos defeitos são informações desconhecidas;
- *Tipo*: curtos-circuitos nos sistemas elétricos de potência podem ser trifásicos, dupla-fase, dupla-fase-terra ou fase-terra. No entanto, esses eventos podem evoluir durante certo intervalo de tempo, como resultado de danos aos equipamentos afetados, que progridem devido à circulação das correntes de curto-circuito. Por exemplo, um curto-circuito fase-terra entre uma fase e a carcaça de um transformador de distribuição pode se tornar um curto-circuito dupla-fase-terra com a deterioração dos materiais isolantes desse equipamento, caso o sistema de proteção demore a atuar;
- *Fases envolvidas e resistência de falta*: todas as combinações possíveis entre as fases do sistema elétrico, com ou sem o envolvimento da terra, podem produzir curtos-circuitos nos sistemas elétricos. Devido à natureza imprevisível desses eventos, também as resistências de falta entre fases e/ou entre fase(s) e a terra são desconhecidas;
- *Duração*: curtos-circuitos podem ser transitórios, com ou sem a atuação de religadores ou disjuntores e geralmente são ocasionados pelo contato de galhos de árvores com trechos de linha aérea constituídos por cabos nus, ou podem ser permanentes, com a atuação de fusíveis, disjuntores ou religadores e geralmente são ocasionados pelo rompimento de trechos de linha, queda de postes, etc.; e
- *Deteção*: por se tratarem de eventos imprevisíveis a sua detecção depende do monitoramento constante do sistema elétrico, por meio de dispositivos eletrônicos inteligentes, que são responsáveis pela proteção da totalidade das redes de distribuição, coordenados com chaves fusíveis, que são responsáveis pela proteção dos ramais dessas redes.

2.1.2.1 Curtos-circuitos permanentes

Conforme descrito no item 2.1.2, curtos-circuitos permanentes resultam na interrupção do fornecimento de energia elétrica por meio da abertura do respectivo disjuntor, religador ou chave fusível. Quando esses eventos ocorrem nos ramais das redes de distribuição eles devem

ser isolados pelo fusível à montante, mais próximo do ponto de ocorrência desses eventos. Porém, quando esses eventos ocorrem no tronco do alimentador, eles devem ser isolados por meio da atuação do religador ou do disjuntor. A atuação do religador e do disjuntor normalmente segue um ciclo de religamentos com a expectativa de não interromper o fornecimento de energia elétrica, partindo do pressuposto de que se trata de um curto-circuito transitório.

A Figura 2.2 ilustra os sinais de corrente registrados na saída de um alimentador de distribuição, resultantes dos tipos de curto-circuito permanentes que podem ocorrer, considerando as situações já descritas.

Figura 2.2 - Exemplos de registros de curto-circuito

Fonte: Próprio autor

Na Figura 2.2-a pode-se observar que nos instantes iniciais apenas a corrente de carga circula pelo alimentador, no instante $t = 50$ [ms] há a sobrecorrente e no instante $t = 100$ [ms] há a primeira abertura do disjuntor. Após algum tempo, há duas tentativas de religamento, porém sem sucesso.

Na Figura 2.2-b pode-se observar que nos instantes iniciais apenas a corrente de carga circula pelo alimentador, no instante $t = 50$ [ms] há a sobrecorrente e no instante $t = 100$ [ms] há a primeira abertura do religador. Como o religador encontra-se à jusante do disjuntor, ainda há

corrente de carga após a sua abertura. Após algum tempo, há duas tentativas de religamento, porém sem sucesso.

Na Figura 2.2-c pode-se observar que nos instantes iniciais apenas a corrente de carga circula pelo alimentador, no instante $t = 50$ [ms] há a sobrecorrente e no instante $t = 60$ [ms] há a abertura do fusível. Visto que o fusível protege apenas uma pequena parte do alimentador, há somente uma pequena rejeição de carga após a sua abertura.

2.1.2.2 Curtos-circuitos transitórios

Conforme descrito no item 2.1.2, curtos-circuitos transitórios não resultam na interrupção do fornecimento de energia elétrica. Esses distúrbios não atingem o tempo de atuação de disjuntores, religadores ou fusíveis, ou então são isolados temporariamente pelo religador, que obtém sucesso ao religar o circuito durante o seu ciclo normal.

A Figura 2.3 ilustra os sinais de corrente registrados na saída de um alimentador de distribuição, resultantes dos tipos de curto-circuito transitórios que podem ocorrer, considerando as situações já descritas.

Figura 2.3 - Exemplos de curtos-circuitos transitórios

Fonte: Próprio autor.

A Figura 2.3-a ilustra o sinal de corrente de um evento em que houve a abertura do tronco pelo religador e após a sua reenergização o sistema retornou em condições normais de operação.

A Figura 2.3-b ilustra o sinal de corrente de um evento em que não houve atuação de nenhum dispositivo de proteção, e o sistema retornou à condição normal no final do distúrbio.

2.2 METODOLOGIA GENERALIZADA DE ANÁLISE DE EVENTOS

Metodologias para análise de eventos em sistemas elétricos de potência dependem do tipo de análise que se pretende efetuar e dos dados de entrada disponíveis para a execução dessa tarefa. Para a análise de eventos de qualidade de energia elétrica e de curto-circuito normalmente são utilizadas as amostras dos sinais de tensões e correntes e, eventualmente, informações adicionais sobre o desempenho dos sistemas de proteção fornecidas pelos dispositivos eletrônicos inteligentes e demais equipamentos instalados nas redes elétricas. Quando a análise é feita de forma automática, cabe ao sistema computacional efetuar a avaliação dos sinais de tensões e correntes, sem a supervisão de qualquer operador, de modo a obter as informações de interesse, utilizando algoritmos desenvolvidos exclusivamente para essa finalidade.

Apesar deste trabalho ter como objetivo somente a análise automática de eventos de curto-circuito, é possível utilizar o mesmo procedimento para a análise de eventos de qualidade de energia elétrica caso os dados de entrada sejam de natureza semelhante, e vice-versa. Assim, a proposta de metodologia generalizada de análise de eventos de qualidade apresentada na referência (SAXENA et al, 2010), pode ser empregada para a análise de eventos de curto-circuito, sem qualquer prejuízo.

Nessa referência são descritos os módulos de processamento fundamentais que são necessários para a realização da análise de eventos de qualidade de energia elétrica e que utilizam registros de oscilografia de sinais de tensões e correntes. Para melhor compreensão da metodologia proposta em (SAXENA et al, 2010) é apresentado o diagrama de blocos ilustrado na Figura 2.4.

Fonte: Elaborado com base em (SAXENA et al, 2010)

A descrição de cada um dos módulos que compõem a metodologia generalizada de análise está apresentada nos itens a seguir.

2.2.1 Segmentação

Cada registro oscilográfico é processado de forma independente pelo módulo de segmentação, que deve distinguir os instantes em que ocorreram variações, também denominados *instantes de transição*, para compor uma linha de tempo do evento, respectiva àquele registro processado.

Os períodos compreendidos entre cada instante de transição são denominados segmentos e é a partir desses segmentos que é possível determinar a sequência de eventos e distúrbios que ocorreram nas redes elétricas. No caso de curtos-circuitos, a avaliação desses segmentos permite determinar a evolução ou isolação das faltas, bem como as possíveis tentativas de religamento, etc.

A Figura 2.5 exemplifica o processo de segmentação de um registro oscilográfico de um sinal de corrente que ilustra a operação normal de uma rede elétrica, seguida de um curto-circuito e a isolação da falta.

Figura 2.5 - Processo de segmentação do sinal

Fonte: Próprio autor

O defeito ocorre no instante $t = 52$ [ms] e ocasiona a abertura de um elemento de proteção no instante $t = 91$ [ms], interrompendo o fornecimento de energia elétrica.

2.2.2 Extração de atributos

Após a segmentação individual dos registros oscilográficos dos sinais de tensões e correntes, pode-se extrair os atributos de interesse. Dependendo da aplicação, os atributos extraídos podem ser o valor eficaz do sinal, o fasor da componente fundamental ou mesmo o seu conteúdo harmônico.

A extração desses atributos é realizada para cada segmento separadamente e pode ser efetuada utilizando-se métodos determinísticos (p. ex. técnicas baseadas na transformada discreta de *Fourier*) ou métodos não-determinísticos (p. ex. técnicas baseadas em redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, lógica nebulosa – *fuzzy*, etc.).

Para exemplificar o processo de extração de atributos, pode-se analisar a Figura 2.6 e acrescentar as seguintes informações para contextualizar a oscilografia apresentada:

- O sinal de corrente ilustrado é fornecido por um dispositivo eletrônico inteligente instalado na saída de um alimentador de distribuição;
- O sinal de corrente ilustrado corresponde à fase A; e
- Os sinais de corrente das demais fases não apresentam indícios de curto-circuito.

Figura 2.6 - Extração dos atributos - Exemplo para a transformada de *Fourier* de um ciclo

Fonte: Próprio autor

Nesse exemplo, o registro oscilográfico do sinal de corrente já foi processado pelo módulo de segmentação, que forneceu como resultado dois instantes de transição e, portanto, três segmentos distintos. O módulo de extração de atributos, aqui exemplificado, utiliza a transformada discreta de *Fourier*, para cálculo dos fasores desse sinal e a Figura 2.6 ilustra o posicionamento das janelas de cálculo dentro dos três segmentos distintos.

2.2.3 Classificação

A partir de cada uma das linhas de tempo individuais, obtidas no processo de segmentação dos sinais, é possível compor uma linha de tempo única. Essa linha de tempo permite que todos os sinais sejam observados sob a mesma ótica e assim é possível inferir sobre o evento analisado.

O módulo de classificação depende do tipo de evento que se pretende analisar e pode contar com várias ferramentas matemáticas distintas, para que seja possível obter com precisão as informações de interesse. Para eventos de curto-circuito, por exemplo, podem-se desenvolver algoritmos de classificação baseados nas características das componentes de fase e/ou das componentes simétricas dos sinais de tensões e correntes, com o objetivo de se determinar o tipo de falta, as fases envolvidas, a duração da falta, o estado do alimentador após a atuação dos dispositivos de proteção, etc.

2.2.4 Tomada de decisão

O módulo de tomada de decisões está intimamente ligado à área da concessionária que pretende utilizar as informações fornecidas pelos demais módulos. Dada a grande quantidade de informações que podem ser extraídas de cada evento, podem-se desenvolver módulos de tomada de decisão distintos para cada aplicação, por exemplo, para área de gestão de ativos pode ser interessante conhecer o número de manobras dos disjuntores, a taxa de falhas ao ano, a integral de i^2t , etc. Para tanto, é possível desenvolver um módulo exclusivo para essa finalidade.

2.3 EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS E CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS

A metodologia genérica de análise de eventos apresentada no item 2.2 descreve todos os módulos de software responsáveis pelo processamento dos dados de entrada, para que seja possível efetuar a análise de eventos nos sistemas elétricos.

No que diz respeito aos módulos de extração de atributos e classificação de eventos há diversos algoritmos distintos que podem cumprir essa tarefa. Estes algoritmos podem ser classificados como determinísticos e não-determinísticos, conforme ilustrado na Figura 2.7.

De modo geral os métodos determinísticos são baseados em equações que descrevem os fenômenos elétricos característicos das ocorrências analisadas. Pode-se citar como exemplo, a detecção de sobrecorrente pela comparação do valor eficaz dos sinais de corrente com valores preestabelecidos.

Já os métodos não-determinísticos procuram emular o processo de raciocínio do operador, comumente empregado na análise manual de registros de oscilografia. Esse grupo de métodos possui algumas vertentes diversas, como por exemplo inteligência artificial, lógica *fuzzy*, algoritmos evolutivos, etc.

Figura 2.7 - Métodos para extração de atributos e classificação de eventos

Fonte: Próprio autor

Cada um desses algoritmos possui vantagens e desvantagens em sua aplicação, no próximo item serão detalhados alguns exemplos na literatura do uso desses métodos, a fim de realizar uma comparação entre os algoritmos existentes.

2.3.1 Métodos de análise determinísticos

Os métodos determinísticos tradicionalmente utilizados são a Transformada Discreta de *Fourier* (TDF) e a Transformada *Wavelets* (TW), principalmente para a realização da extração dos atributos dos sinais, como em (FAN; LIAO, 2012; KEZUNOVIC et al, 1993 ; KANG et al, 2010).

Em (FAN; LIAO, 2012) a análise automática de faltas é realizada por meio de regras heurísticas onde são pré-determinados valores limiares para detectar anomalias nos sinais. Essa análise é exclusivamente realizada por meio dos fasores estimados pela TDF e uma das vantagens destacadas pelos autores é que a análise proposta não se restringe aos fasores de pós-falta dos sinais, mas inclui um fasor de diferença entre os sinais de pós-falta e os sinais de pré-falta, denominado *fasor sobreposto*, que contribui para a melhoria do processo.

Uma abordagem semelhante também foi realizada em (PEREIRA, 1999) com a definição de valores limítrofes para a determinação do tipo de falta por meio de uma árvores de decisão. A classificação realizada a partir de valores pré-determinados é considerada determinística, assim como na metodologia proposta em (KEZUNOVIC et al, 1993) em que é apresentado um sistema especialista para a classificação dos eventos.

O sistema especialista proposto é composto por uma árvore de decisão baseada em uma extensiva análise de dados para determinar os valores limiares das variáveis de interesse, como um valor de corrente de sequência zero durante uma falta, ou o valor eficaz da componente fundamental, etc. Estes valores são obtidos por meio de casos reais, bem como simulações, considerando cenários com configurações distintas.

Essas referências, que utilizam metodologias determinísticas tanto para extração dos atributos quanto para a classificação do evento, são menos usuais na literatura. Normalmente encontra-se literatura profusa sobre métodos não-determinísticos para classificação dos eventos com base nos dados de interesse.

A abordagem proposta em (SAXENA et al, 2010) utiliza ambos os métodos (determinísticos e não-determinísticos), esta abordagem permite superar as limitações dos métodos

determinísticos na tarefa de classificação, limitações essas que foram demonstradas na referência (BOLLEN et al, 2007). Nessa referência é feita uma comparação entre sistemas especialistas e redes neurais artificiais, e como conclusão, foi relatado que a principal diferença entre ambos é a necessidade de extensivos treinamentos com conjuntos de dados realistas sobre os distúrbios, para melhorar o desempenho do algoritmo não-determinístico. Mas também é informada a desvantagem do sistema determinístico avaliado, ao necessitar de um vasto conhecimento sobre os distúrbios para definir as premissas da árvore de decisão.

A metodologia apresentada na referência (KANG et al, 2010) realiza o monitoramento da qualidade de energia com a utilização da TW em conjunto com redes neurais artificiais. A TW decompõe o sinal de entrada em conjuntos hierárquicos para que sejam extraídos os atributos de interesse. Esses atributos, que são os coeficientes *Wavelets* de cada nível, são utilizados como dados de entrada das redes neurais, que identificam de forma quantitativa e qualitativa o distúrbio ocorrido.

O trabalho apresentado na referência (KIESSLING et al, 2004) descreve um *software* para análise automática da faltas, porém para um propósito específico, que é a localização do ponto de ocorrência da falta. O programa analisa a componente de sequência positiva dos sinais de corrente no início e no final da rede e utiliza um software com o método dos mínimos quadrados para a estimação da localização da falta.

O estudo descrito em (BAKAR et al, 2003) apresenta as análises de afundamentos de tensão em uma instalação pertencente a uma rede de distribuição. Nessa referência são apresentadas as simulações de fluxo de potência e curto-circuito que tem o objetivo de observar o comportamento da rede para curtos-circuitos trifásicos e fase-terra.

Em substituição à TDF, a referência (MANMEK et al, 2010) apresenta um algoritmo baseado no método dos mínimos quadrados para a extração dos atributos dos sinais de tensão e corrente, em tempo real. Nessa abordagem, o método dos mínimos quadrados fornece os valores instantâneos da componente fundamental dos sinais, bem como seus conteúdos harmônicos, valores eficazes, potência, fator de potência, etc.

Além das informações sobre os sinais de tensões e correntes nas redes elétricas, podem-se empregar as metodologias de análise para a determinação do valor da frequência desses

sinais. Essa informação é importante para concessionárias de geração e transmissão de energia elétrica, visto que a estabilidade dos sistemas elétricos de potência depende desse parâmetro. Nesse contexto, a referência (SARKAR et al, 2006) propõe um método para a determinação de frequência com a utilização de filtros digitais (na referência é apresentado um filtro de resposta finita ao impulso – filtro FIR).

2.3.2 Métodos de análise não-determinísticos

Dentre os métodos não-determinísticos, destaca-se na literatura a aplicação de redes neurais artificiais e lógica *fuzzy*. Estas metodologias são utilizadas principalmente para a classificação de eventos, como em (KANG et al, 2010; DAS, 2006).

A principal desvantagem das metodologias que empregam redes neurais é a necessidade de se elaborar um roteiro adequado para o seu treinamento, com um conjunto bastante abrangente de situações distintas. Essa tarefa tem o objetivo de melhorar a precisão da classificação e pode ser bastante demorada. Além disso, caso ocorram eventos diferentes das situações que integram o conjunto de treinamento há o risco de ocorrência de erros na tarefa de classificação, conforme observado em (SAXENA et al, 2010). Por essa razão, a seleção do conjunto de treinamento é crucial para garantir o desempenho do sistema de classificação.

As redes neurais apresentadas em (KANG et al, 2010) utilizam sinais que possuem ruídos inseridos aleatoriamente para o seu treinamento, com o intuito de tornar a rede mais robusta. A proposta dessa referência é a utilização de redes neurais para a classificação de distúrbios de qualidade de energia e, nesse caso, é necessária uma grande quantidade de casos para o treinamento, a fim de abranger todos os distúrbios possíveis.

Outra aplicação para a classificação de eventos de qualidade de energia elétrica é apresentada na referência (VEGA, 2009). Nessa referência utilizam-se redes neurais artificiais e máquinas de vetores de suporte – *Support Vector Machine* (SVM) para a classificação de afundamentos, elevações, transitórios, conteúdo harmônico e flutuação de tensão. Ambos os métodos são comparados e possuem vantagens e desvantagens. Cabe ressaltar que a ferramenta de extração de atributos utilizada nessa referência é a TW.

Um dos métodos que pode ser empregado para a classificação dos tipos de falta é a lógica *fuzzy*. Em (DAS, 2006) essa técnica utiliza os sinais de corrente registrados na subestação de distribuição e realiza a classificação e a análise das faltas pelas fases das componentes simétricas dos sinais. Essa referência pressupõe que os curtos-circuitos tenham duração mínima de um ciclo, o que pode não corresponder à realidade, visto que fusíveis podem abrir em um tempo menor que a janela estipulada.

Metodologias não-determinísticas também podem ser empregadas para a determinação da frequência dos sinais de tensões e correntes e estimação dos fasores desses sinais. Nesse contexto, a referência (SILVA, 2012) apresenta uma metodologia para estimação de fasores e de frequência para a aplicação em unidades de medição fasorial sincronizada *Phasor Measurement Unit* (PMU), com o objetivo de monitorar um sistema elétrico de potência. A metodologia proposta é baseada em algoritmos genéticos e os dados para testes foram obtidos por meio de simulações com o uso do *software Alternative Transient Program* (ATP). O algoritmo genético realiza o ajuste da curva para uma janela de um ciclo dos sinais de entrada e a função de aproximação utiliza como variáveis a amplitude, frequência da fundamental e fase. Nos casos simulados a metodologia proposta apresenta uma boa estimativa de frequência, mesmo quando são simuladas alterações nos sinais de entrada, tais como inserções de um degrau de amplitude, mudanças de fase e mudanças na frequência. Embora a estimativa fique comprometida durante as transições nos sinais de entrada, visto que o algoritmo genético utiliza uma janela de um ciclo, esse intervalo de tempo é aceitável para a aplicação em PMUs uma vez que a norma C37.118 (IEEE, 2005) não define o desempenho para condições transitórias, apenas o tempo de retorno e o erro posterior, em regime. Uma opção para a redução do período comprometido pela transição é a utilização do algoritmo genético com uma janela menor de análise. Essa abordagem pode apresentar vantagem quando comparada com métodos determinísticos que utilizam a TDF.

2.4 ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos genéticos (AG) são ferramentas computacionais que pertencem a uma classe particular de algoritmos evolutivos e têm como premissa a Teoria da Evolução das Espécies, isto é, indivíduos melhor adaptados ao ambiente possuem maiores chances de sobrevivência e passam adiante a sua herança genética.

Algoritmos genéticos são usualmente empregados em problemas de otimização e de busca, onde cada indivíduo representa uma solução para o problema e uma população de indivíduos, um conjunto de soluções. No processo de otimização e de busca são selecionados os indivíduos com melhor desempenho e com base nesses é criada uma nova população, por meio de cruzamento dos indivíduos e mutação. O processo de criação de novas populações ocorre sucessivamente de forma a encontrar o melhor indivíduo.

Ferramentas de otimização baseadas em AG podem ser empregadas em diversas áreas de pesquisa, realizando a aproximação de funções matemáticas, encontrando os parâmetros ótimos para um determinado problema, etc.

Na área de sistemas elétricos de potência é comum encontrar o uso de AGs para a otimização da configuração de redes de transmissão (WANG, C. et al, 2013), na estimação de frequências harmônicas como em (BETTAYEB, M. et al, 2003), na estimação de afundamentos de tensão no sistema elétrico (LUCIO, J. et al, 2011), na proteção de transformadores (BARBOSA, D. et al, 2010) ou mesmo para a estimação fasorial (SILVA, 2012).

Segundo a referência (GOLDBERG, 1989), pode-se descrever o processo por meio da sequência descrita a seguir:

- *Passo 1:* é criada uma população inicial aleatória, onde cada indivíduo representa uma solução para o problema;
- *Passo 2:* o algoritmo avalia a população inicial e verifica se o critério de parada foi atingido;
- *Passo 3:* enquanto o critério de parada não for atingido, o algoritmo cria uma sequência de novas populações utilizando indivíduos da população anterior para gerar os indivíduos da geração subsequente, considerando a metodologia descrita a seguir:
 - *Passo 3.1:* Para cada indivíduo da população atual é dada uma nota de acordo com o seu desempenho;
 - *Passo 3.2:* Colocam-se os indivíduos em uma ordem decrescente de acordo com a pontuação;

- *Passo 3.3:* Selecionam-se os indivíduos para serem os progenitores baseados em suas notas ou colocação;
- *Passo 3.4:* Os melhores indivíduos de acordo com seus desempenhos são escolhidos como elite e passados diretamente para a próxima geração;
- *Passo 3.5:* os indivíduos chamados de progenitores geram novos indivíduos por meio de uma simples mudança aleatória de um único membro, também chamada de mutação. Ou ainda, combinando-se dois membros, também chamada de *crossover*.
- *Passo 4:* substitui-se a população atual pela população formada pelos novos indivíduos; e
- *Passo 5:* o algoritmo finaliza o processo de otimização ou busca quando a geração possui indivíduos que atendem aos critérios de parada do processo.

De forma simplificada, este mesmo processo pode ser visualizado no fluxograma representado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Fluxograma simplificado do AG

Fonte: Próprio autor

No próximo capítulo será abordada a metodologia utilizada neste trabalho e especificamente no item 3.2.2.2 serão apresentados mais detalhes sobre o funcionamento de cada processo do AG, bem como os parâmetros selecionados.

3 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

3.1 INTRODUÇÃO

Conforme mencionado nos capítulos 1 e 2, a metodologia proposta neste trabalho tem como objetivo efetuar a análise de eventos de curto-circuito em redes elétricas de distribuição. De modo geral, essa metodologia consiste na análise automática de registros de oscilografia fornecidos por dispositivos eletrônicos inteligentes instalados nas subestações de distribuição e ao longo dos alimentadores de distribuição. Esses registros de oscilografia normalmente são armazenados em arquivos que são automaticamente criados pelos IEDs durante os eventos de curto-circuito dentro da sua zona de proteção.

A metodologia proposta é baseada em um sistema computacional desenvolvido no Laboratório de Pesquisa em Proteção e Automação de Sistemas Elétricos – L•PROT, que possui a arquitetura representada de forma simplificada na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Arquitetura simplificada do sistema

Fonte: Elaborado com base em (MANASSERO, G.; YOSHIDA, E. et al 2013)

Esse sistema é composto por cinco módulos de *software* e uma interface humano-máquina que utiliza registros oscilográficos de tensões e correntes armazenados em arquivos no formato *Common format for transient data* (COMTRADE), definido em (IEC 60255-24, 2013; IEEE Std C37.111, 2013).

O primeiro módulo de *software* do sistema é responsável pela extração das amostras de tensões e correntes armazenadas nos arquivos em formato COMTRADE e pelo armazenamento dessas amostras em um banco de dados relacional. Esse módulo permite que o resto do sistema seja independente do formato dos dados de entrada, de tal maneira que futuras modificações não resultem em grandes atualizações de *software*.

Em seguida, o segundo módulo de *software* filtra os sinais de corrente armazenados no banco de dados, com o objetivo de eliminar a componente aperiódica, conforme apresentado na referência (SENGER, E. C., SANTANA, N. N., 1998)

Após essa etapa, o terceiro módulo de software calcula os fasores dos sinais de tensões e correntes para que seja possível determinar os instantes de transição e os respectivos segmentos.

Esses três primeiros módulos de software atuam de forma individual sobre o conjunto de sinais resultante de um determinado evento. A partir da segmentação e cálculo dos fasores é possível elaborar linhas de tempo independentes que servem de base para a determinação de uma linha de tempo única e concisa.

O quarto módulo de *software* é responsável pela unificação da linha de tempo serve como base para a determinação do tipo de falta e das fases envolvidas, bem como a duração do evento de curto-circuito e o estado da rede de distribuição após o evento.

O último módulo de *software* elabora relatórios para cada um dos eventos analisados, de forma a dar suporte à tomada de decisões pelo centro de operação da distribuição.

Todas as informações processadas pelos cinco módulos de software ficam armazenadas no banco de dados relacional e podem ser acessadas pelos operadores e engenheiros responsáveis pela sua análise por meio da interface humano-máquina.

Nos itens a seguir são descritos os algoritmos empregados nos módulos de software do sistema automático para análise de oscilografias.

3.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA METODOLOGIA

3.2.1 Registro e leitura dos sinais de tensões e correntes

O aumento do uso de equipamentos digitais, registradores de perturbação e instrumentos de medição, em conjunto com a criação deliberada de formatos de armazenamento de dados por parte dos fabricantes desses equipamentos, resultou em problemas para os usuários dessas informações, que necessitavam gerenciar diversos tipos de dados bem como os respectivos *softwares* de leitura. Com o intuito de solucionar este problema, as normas (IEC 60255-24, 2013; IEEE Std C37.111, 2013) padronizaram o formato de armazenamento desses dados e o denominaram *Common Format for Transient Data* (COMTRADE).

De modo geral, esse formato armazena dados de sistemas elétricos de potência em um conjunto de quatro arquivos. Cada arquivo possui uma classe diferente de informação e uma finalidade específica. São eles: o arquivo de cabeçalho (extensão <.HDR>), arquivo de configuração (extensão <.CFG>), arquivo de dados (extensão <.DAT>) e arquivo de informação (extensão <.INF>).

O arquivo de cabeçalho pode possuir informações que auxiliem o usuário na compreensão das condições do registro durante a ocorrência do evento e normalmente são inseridas identificações e detalhamento do sistema, local ou mesmo dos equipamentos presentes.

O arquivo de configuração possui as informações necessárias para que sejam interpretadas as informações contidas nos arquivos de dados, normalmente esse arquivo é composto pelas seguintes informações:

- Identificação da subestação, do dispositivo de registro, da revisão do COMTRADE;
- Número e tipos de canais;
- Nomes dos canais, unidades e fatores de conversão;
- Frequência nominal;
- Frequência(s) de amostragem;

- Registro de tempo do primeiro ponto, da ocorrência de disparo e outras informações do registro de tempo; e
- Tipo do arquivo de dados;

O arquivo de dados contém os valores das amostras que representam o evento e é composto pelo número da amostra, registro do tempo, valor de cada amostra de cada canal.

E por fim, o arquivo de informação é um arquivo opcional que fornece quaisquer informações adicionais que o equipamento ou programa que o gera deseja compartilhar com o usuário, ou mesmo informações privadas com restrição de acesso.

Na última revisão das normas (IEC 60255-24, 2013; IEEE Std C37.111, 2013) é apresentada uma proposta de substituição dos quatro arquivos originais por um arquivo único, cuja extensão é <.CFF>, que sintetiza os quatro arquivos. Esta proposta visa facilitar o controle de grandes volumes de registros no formato COMTRADE, e estende sua abrangência ao registro de distúrbios nos sistemas elétricos de potência, não apenas para a troca de informações entre os equipamentos e as concessionárias.

3.2.2 Cálculo das componentes fundamentais

Seguindo a metodologia generalizada de análise a etapa que compreende o cálculo das componentes fundamentais dos sinais de tensões e correntes se trata, neste caso, da etapa de extração dos atributos dos sinais. Para a execução desta tarefa são utilizadas duas metodologias que podem ser utilizadas de forma independente ou em conjunto: a TDF e o AG.

3.2.2.1 TDF e filtragem da componente aperiódica

A extração de atributos do sinal com a TDF tem a finalidade de fornecer o módulo e a fase da componente fundamental do respectivo sinal. Com esses dados é possível obter as características do sinal, observando-se os valores dos fasores de corrente e de tensão, as potências ativa, reativa e aparente e o fator de potência, além de fornecer informações para o algoritmo que determina os instantes de transição.

Para o cálculo dos fasores utilizam-se as equações (3.1) e (3.2):

$$\Re \{ \dot{X}_k \} = \frac{2}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \left[x_{k+l-N+1} \cos \left(\frac{2\pi}{N} l \right) \right] \quad (3.1)$$

$$\Im \{ \dot{X}_k \} = \frac{2}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \left[x_{k+l-N+1} \sin \left(\frac{2\pi}{N} l \right) \right] \quad (3.2)$$

Onde:

N : número de amostras da janela;

k : k -ésimo elemento;

x : amostra da janela analisada; e

X : fasor calculado pela TDF.

A partir destas equações pode-se obter o número real e imaginário do fasor do sinal amostrado x seu valor eficaz, valor de pico e sua fase.

A TDF descrita pelas equações 3.1 e 3.2 utiliza um ciclo completo do sinal amostrado para determinar os valores de módulo e fase do fasor desse sinal. Cabe ressaltar que existe a possibilidade de se utilizar a TDF com janela de meio ciclo do sinal amostrado caso exista a necessidade de tempos menores de resposta.

Contudo, a presença da componente aperiódica no sinal é uma das principais fontes de erro das técnicas baseadas na TDF, principalmente a TDF com janela de meio ciclo. Essa componente normalmente está presente nos sinais de corrente, em virtude da natureza indutiva dos sistemas elétricos.

Por essa razão é necessário efetuar a filtragem dessa componente para que o cálculo dos fasores pela TDF não apresente erros. A referência (SENGER et al, 1998) descreve um filtro digital que é capaz de eliminar completamente a componente aperiódica e ao mesmo tempo, manter o ganho unitário para a componente fundamental.

O filtro proposto é definido pela seguinte equação de diferenças:

$$x_k = G \cdot \{a \cdot i_k - i_{k-m}\} \quad (3.3)$$

Onde:

- x : saída do filtro digital;
- i : amostra do sinal de corrente; e
- m : tamanho da janela do filtro.

E:

$$a = e^{\alpha \cdot m \cdot T} \quad (3.4)$$

$$G = \left[a^2 - 2 \cdot a \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot m\right) + 1 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

Onde:

- α : inverso da constante de tempo do sistema elétrico;
- T : período da componente fundamental; e
- N : número de amostras por ciclo.

Cabe ressaltar que esse filtro deve ser ajustado de acordo com a constante de tempo do sistema elétrico, que pode variar. Por essa razão, mesmo com a sua utilização, o cálculo dos fasores pela TDF pode ainda apresentar algum grau de imprecisão. Na metodologia proposta neste trabalho, foi utilizada a constante de tempo $\alpha = 50$.

3.2.2.2 Algoritmos genéticos

Uma das aplicações dos AG em problemas de otimização é a aproximação de funções, ou seja, a caracterização dos parâmetros da função que melhor se adapta ao sinal observado. A metodologia para análise de eventos de curto-circuito, proposta neste trabalho, faz uso dessa técnica com o objetivo de substituir a TDF para a estimativa dos fasores dos sinais.

Para tanto, é necessário ajustar as características do AG de modo a que se tenham melhores resultados, reduzindo o tempo de convergência na realização do processo de otimização. As características que se podem ajustar estão apresentadas a seguir:

- *Tamanho da população*: uma das características do AG é o número de indivíduos em cada geração. Quanto maior o número de indivíduos de uma população maior é o espaço de soluções que o algoritmo pode buscar, e menor é a chance de que as soluções recaiam em mínimos locais. No entanto, o tempo de processamento é proporcional ao número de indivíduos (MATLAB, 2009). Desta forma, a escolha do tamanho da população pode ser feita analisando o tempo total de otimização ou de convergência do resultado. A cada geração é possível visualizar o indivíduo com melhor resultado e, em uma simulação controlada, analisar se o algoritmo está recaindo em um mínimo local ou global;
- *População inicial*: a população inicial pode ser gerada aleatoriamente, com ou sem restrições dentro da especificação de um determinado problema. Pode-se inclusive utilizar alguns indivíduos pré-determinados da população, para direcionar a solução à região onde se encontra o mínimo global;
- *Seleção dos indivíduos*: o processo de seleção para definir os progenitores da próxima geração envolve as etapas de classificação dos indivíduos e do modo de seleção. No processo de classificação, pode-se escalonar o indivíduo simplesmente ordenando pelo seu valor de avaliação da função objetivo. Entretanto, este método pode influenciar negativamente no desempenho do AG, pois caso haja uma grande variação nos valores de avaliação dos indivíduos, os melhores indivíduos se reproduzirão rapidamente tornando-se maioria na população e deixando uma menor diversidade genética que restringirá as áreas de buscas do AG. Ao mesmo tempo, se os valores de avaliação tiverem pouca variação entre os indivíduos, todos os indivíduos terão aproximadamente a mesma chance de seleção, tornando a busca demorada. Desta forma, outra forma de classificação é distribuir os indivíduos, baseados em suas posições ao ordenar do melhor indivíduo para o pior, e não no valor de avaliação. E a fim de favorecer os melhores indivíduos sem suprimir o restante, pode-se escaloná-los exponencialmente, conforme a Figura 3.2 em que a distribuição é realizada considerando a equação (3.6).

$$S = r^{-\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

Onde:

S : valor final de classificação; e

r : posição na classificação.

Fonte: Elaborado com base em (MATLAB, 2009).

Após a classificação, é na etapa de seleção que são escolhidos os progenitores da nova geração baseados nos valores classificados anteriormente. Cada indivíduo pode ser escolhido mais de uma vez, resultando em mais de um descendente.

Como padrão no MATLAB é utilizado o método uniforme estocástico, nesta forma de seleção, é colocado em um eixo todos os progenitores. Em seguida, o eixo é segmentado para cada indivíduo de forma proporcional ao seu valor de classificação e o algoritmo move-se sobre o eixo em passos de tamanhos iguais, escolhendo um progenitor a cada passo.

- *Reprodução*: a forma de reprodução define como serão gerados os indivíduos da próxima geração, e pode ocorrer por meio de *crossover*, mutação ou elitismo. É necessário definir ainda a quantidade de indivíduos correspondente aos melhores

resultados que devem seguir para a próxima geração intactos. Esses indivíduos são chamados de “elite” e essa ação garante que a geração seguinte conserve o melhor resultado obtido a cada iteração. Entretanto, uma quantidade de indivíduos “elite” muito alta diminui a diversidade da população.

- *Crossover*: consiste em mesclar dois indivíduos em um único, utilizando parte dos genes de ambos os progenitores para a geração da prole. Há diversas formas de realizar este *crossover* e, neste trabalho, foi utilizado o método heurístico. Neste método é gerado um indivíduo em que possui mais características do progenitor melhor avaliado, com a taxa determinada por um fator R pela equação (3.7):

$$IG = PG_2 + R \cdot (PG_1 - PG_2) \quad (3.7)$$

Onde:

PG_1 : progenitor 1, melhor avaliado em relação PG_2 ;

PG_2 : progenitor 2; e

IG : indivíduo gerado.

- *Mutação*: o processo de mutação consiste na realização de pequenas alterações de forma aleatória nos indivíduos, no momento da criação da próxima geração, com o intuito de prover uma diversidade genética e para ampliar a área de busca do algoritmo. Esse processo é realizado em duas partes, primeiro o algoritmo seleciona as frações do indivíduo que passarão por mutação considerando uma probabilidade P , em seguida as partes selecionadas são trocadas por um valor aleatório respeitando os valores limites da fração selecionada.
- *Critério de parada*: podem-se utilizar critérios de parada considerando um número máximo de gerações obtidas, ou a convergência do processo de otimização.

Para a substituição da TDF na estimativa dos fasores dos sinais, o AG realiza a aproximação da forma de onda do sinal para a equação 3.8

$$x_k = X_0 e^{\left(-\lambda \frac{2\pi}{N\omega} k\right)} + X_1 \cos\left(\omega \frac{2\pi}{N} k\right) - Y_1 \sin\left(\omega \frac{2\pi}{N} k\right) \quad (3.8)$$

Onde:

X_0 : amplitude da componente aperiódica;

λ : constante de tempo da componente aperiódica; e

X_1 e Y_1 : constantes que definem a componente fundamental do sinal.

x_k : k-ésima janela; e

N : número de amostras por ciclo.

Para tanto, compara-se a janela de amostras produzida pelo AG com a janela de amostras contida nos registros de oscilografia, de modo a otimizar a função objetivo, que é composta por quatro variáveis – X_0 , λ , X_1 e Y_1 – e descrita pela equação 3.9.

$$f_k = \left(x_k - x_k^r\right)^2 \quad (3.9)$$

Onde:

x_k^r : k-ésima janela do registro oscilográfico; e

f_k : função objetivo.

Devendo ser minimizado o somatório de todos f_k no intervalo da janela analisada.

Dada a função objetivo, o AG realiza a sua otimização e obtém os valores da componente fundamental que mais se aproximam do sinal analisado. Na metodologia proposta neste trabalho foram definidas as características do AG que são necessárias para o processo de otimização. São elas:

- *Tamanho da população*: fixado em quinhentos indivíduos por geração;
- *Critérios de parada*:
 - Valor da função objetivo: inferior a $1 \cdot 10^{-13}$;
 - Número máximo de gerações: quinhentas gerações; e
 - Número de gerações sucessivas com alterações cujo valor é inferior à $1 \cdot 10^{-12}$: cinquenta gerações.

Vale ressaltar que um dos fatores determinantes para o tempo de convergência do AG é a geração da população inicial. A possibilidade de restringir ou direcionar o algoritmo para a solução do problema pode reduzir o tempo de processamento e evitar que o algoritmo recaia em um mínimo local.

A população inicial é gerada com uma parcela de indivíduos cujos valores de módulo e fase são calculados previamente pelas TDFs de meio ciclo e de um ciclo, e essa parcela de indivíduos é inserida na população inicial para cada janela de dados. Além disso, para cada nova janela de dados que o AG deve aproximar, são empregados os melhores resultados obtidos para a janela anterior na composição da população inicial.

Outras características do AG também foram adotadas para o desenvolvimento deste trabalho. São elas:

- *Forma de classificação e o modo de seleção dos indivíduos*: a classificação é realizada atribuindo-se uma nota para cada indivíduo e distribuindo-se a população exponencialmente de acordo com a sua posição no *ranking*. Já para o modo de seleção é utilizado o método uniforme estocástico, onde todos os progenitores são colocados em um eixo que é segmentado em um tamanho proporcional ao valor da classificação obtido por cada progenitor. Em seguida move-se sobre o eixo em passos de tamanhos iguais, escolhendo um progenitor a cada passo; e
- *Reprodução*: cada nova geração é composta por dez por cento dos melhores indivíduos da geração anterior – *elitismo*, setenta e dois por cento são gerados por *crossover* – método heurístico, e dezoito por cento são gerados por mutação, com probabilidade de quatro por cento.

3.2.3 Determinação dos instantes de transição

Conforme apresentado no item 2.2, a determinação dos instantes de transição é necessária para que seja possível obter as características dos sinais durante toda a evolução dos eventos de curto-circuito. Dessa maneira é possível determinar os tipo de falta e as fases envolvidas, bem como inferir sobre o estado das redes elétricas, antes, durante e após a ocorrência dos eventos. Existem diversos algoritmos para se determinar os instantes de transição nos sinais de tensões e correntes, sendo apresentado nos próximos itens os métodos abordados.

3.2.3.1 Diferença entre janelas adjacentes

Para a determinação de instantes de transição em um determinado sinal de tensão ou corrente, pode-se fazer a comparação entre a amplitude da componente fundamental desse sinal, em uma janela de um ciclo, com a amplitude da componente fundamental desse mesmo sinal, porém em um ciclo consecutivo. O cálculo da amplitude da componente fundamental pode ser efetuado utilizando-se a TDF ou o AG.

Subtraindo-se a amplitude da componente fundamental do sinal na primeira janela, da amplitude da componente fundamental do sinal na janela consecutiva, é possível obter um gráfico em que o pico indicado representa o maior valor de transição, que por sua vez seria o instante da transição. Na Figura 3.3 é apresentado o fluxograma que descreve o funcionamento do algoritmo de diferença entre janelas consecutivas.

Figura 3.3 - Fluxograma da diferença de janelas adjacentes

Na equação (3.10) é apresentado o cálculo dessa diferença.

$$\Delta I_k = |I_{k+n_{janela}}| - |I_k| \quad (3.10)$$

Onde:

ΔI_k : diferença das janelas para o instante k ;

$|I_k|$: módulo do fasor da corrente para a janela no instante k ; e

n_{janela} : número de amostras por ciclo.

n_{total} : número de amostras do segmento do sinal analisado

Esse método utiliza a diferença entre duas janelas consecutivas e, portanto, requer duas janelas inteiras como dados de entrada. Por essa razão, a determinação do instante de transição pode ficar comprometida quando os eventos têm durações inferiores a dois ciclos do sinal, isto é, quando há mais de um instante de transição que ocorrem em menos de um ciclo. É possível minimizar essa limitação do método utilizando a TDF de meio ciclo ou utilizando o AG que emprega menos de um ciclo para a aproximação de funções.

3.2.3.2 Transformada de *Park*

A transformada de *Park* possui como principal aplicação a área de máquinas elétricas. Essa transformada divide o sinal em três componentes distintas, que são: componente de sequência zero, componente de eixo direto e componente de eixo em quadratura. Partindo da premissa que o cálculo da componente de eixo direto de um sinal sem transições, seja feito tomando-se como referência a fase desse mesmo sinal, a magnitude da componente fundamental é igual ao valor da sua componente de eixo direto.

A transformada de *Park* para sinais trifásicos é definida conforme apresentado na matriz da equação (3.11).

$$\begin{bmatrix} s_0(t) \\ s_d(t) \\ s_q(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos(w_r t) & \cos(w_r t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(w_r t + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{sen}(w_r t) & \text{sen}(w_r t - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(w_r t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_a(t) \\ s_b(t) \\ s_c(t) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Onde:

w_r : frequência de referência [rad/s];

$s_0(t)$: sinal de sequência zero;

$s_d(t)$: sinal de eixo direto; e

$s_q(t)$: sinal de eixo de quadratura.

Considerando a premissa de que sinais em regime permanente senoidal não apresentam variações nas componentes de sequência zero, de eixo direto e de eixo em quadratura, as referências (IURINIC, L. U., 2012; LOPES, F. V., 2011) apresentam algoritmos para a detecção de instantes de falta em sistemas trifásicos, que comparam o comportamento da componente de sequência direta ao longo do tempo, em todo o registro oscilográfico. A proposta é avaliar as distorções na forma de onda dos sinais, que surgem no momento em que as faltas ocorrem, isto é: mudanças de magnitude e ângulo de fase e, eventualmente, qualquer desequilíbrio.

Essas distorções produzem variações na componente de sequência direta e de quadratura que podem evidenciar os instantes de transição. Conforme citado nessas referências, pode-se calcular o coeficiente de diferenças para a determinação dos instantes de transição, utilizando-se a equação (3.12).

$$(c_{dif}(k))^2 = [G [s_d(k) - s_d(k-1)]]^2 \quad (3.12)$$

Onde:

c_{dif} : valor da diferença entre sinais de eixo direto de duas amostras consecutivas;

$s_d(k)$: sinal de eixo direto; e

G : valor de ganho para normalização do sinal.

Monitora-se então o valor quadrático da diferença entre sinais de eixo direto, dado pela equação (3.12), utilizando apenas duas amostras consecutivas. O algoritmo proposto considera que há um instante de transição nos sinais observados, que ocorre quando há a maior variação no valor quadrático da diferença entre os valores de eixo direto. Visto que cada elemento dessa variação é calculado com apenas duas amostras consecutivas dos sinais, a sua determinação não necessita de uma janela extensa como ocorre normalmente para os outros algoritmos apresentados.

A metodologia proposta neste trabalho utiliza os sinais de tensão ao invés dos sinais de corrente para determinar os instantes de transição. Isto porque os sinais de corrente sofrem maiores distorções durante os eventos de curto-circuito, fato esse que pode tornar o método impreciso. São analisados os valores quadráticos da diferença entre sinais de tensão de eixo direto em todo o registro oscilográfico e determinado os instantes de ocorrência a partir dos maiores valores dessa diferença.

Esses instantes são os instantes de transição nos sinais e considera-se como transição todo valor quadrático da diferença entre tensões de eixo direto que for superior a vinte por cento da amplitude da maior amostra. Além disso, todos os instantes de transição encontrados são avaliados para eliminar possíveis instantes duplicados. Para tanto, elimina-se instantes de transição que delimitem segmentos com tamanho inferior a um quarto de ciclo.

3.2.3.3 Função densidade de probabilidade

Além dos algoritmos propostos nos itens 3.2.3.1 e 3.2.3.2, é possível determinar instantes de transição em sinais de tensões e correntes por meio da utilização de filtros digitais baseados na função densidade de probabilidade, conforme apresentado na referência (MANASSERO, G.; YOSHIDA, E. et al 2013). Nessa referência é apresentado um filtro digital que implementa a função densidade de probabilidade, descrita pela equação (3.13).

$$p_k = e^{-\frac{(X_k - M_k)^2}{(V_k)^{ep}}} \quad (3.13)$$

Onde o valor médio do módulo do fasor é dado pela equação (3.14).

$$M_k = (1 - l_m) X_k + l_m M_{k-1} \quad (3.14)$$

E a variância do módulo do fasor é dada pela equação (3.15).

$$V_k = (1 - l_v) (X_k - M_k)^2 + l_v V_{k-1} \quad (3.15)$$

Onde:

X_k : módulo do fasor $\dot{X}_k$;

l_m : fator de esquecimento do valor médio;

l_v : fator de esquecimento da variância;

ep : expoente da função densidade de probabilidade.

O fluxograma representado na Figura 3.4 ilustra o procedimento para a identificação dos instantes de transição. Esse procedimento, que é aplicado a todos os sinais registrados durante eventos, inicia-se com a normalização do vetor de amostras de cada sinal em análise, e, no exemplo dado, o sinal é representado por $x(t)$.

Na Figura 3.4 é representado o algoritmo, iniciando-se pela etapa de normalização do sinal. Este processo é necessário já que o valor absoluto do sinal alteraria o valor final de P_k para se determinar o instante de transição.

Após a etapa de normalização, são definidas as variáveis auxiliares: k , i e j . A variável k identifica o número da amostra. A variável de controle j é um marcador para se desprezar as primeiras amostras e para auxiliar na segunda etapa, zerando as amostras anteriores ao instante de transição. Enquanto que a variável i identifica o instante de transição encontrado.

Segue-se com o cálculo dos módulos do fasor, da média e variância, e da densidade de probabilidade para uma determinada amostra k , tal como descrito nas equações 3.13 a 3.15. O passo seguinte consiste em verificar se existem dois ciclos entre instantes de transição consecutivos. É necessário desprezar as primeiras amostras para que o algoritmo tenha uma quantidade de dados suficiente para se determinar uma anomalia no sinal que possa ser

classificada como transição. À exemplo da TDF que pode ser necessário um ciclo completo para se obter os primeiros valores representativos para o módulo do sinal.

Após o cálculo desses valores, procede-se com a comparação entre o valor da densidade de probabilidade e um valor pré-determinado. Quando um novo instante de transição (tr_i) é encontrado, o vetor com o sinal original é reduzido e passa a contemplar apenas o intervalo compreendido entre a amostra onde foi encontrada a nova transição, até o final do vetor do sinal. É necessário descartar os elementos anteriores para que a transição previamente encontrada não interfira na determinação do próximo distúrbio. Este procedimento tem fim quando a última amostra do sinal é avaliada.

Figura 3.4 - Fluxograma do método da função densidade de probabilidade

Fonte: Elaborado com base em (MANASSERO, G.; YOSHIDA, E. et al 2013)

A desvantagem desse algoritmo reside na determinação dos valores de ep e p_{min} que é efetuada por tentativa e erro, a partir da utilização de sinais simulados e/ou casos reais com a consequente verificação dos resultados obtidos. Outra desvantagem da utilização desse algoritmo é que a cada transição encontrada é necessário descartar todo sinal anterior para que não haja interferência com o próximo resultado, e também devem ser desconsideradas quaisquer transições que ocorram em um tempo inferior a dois ciclos, já que a magnitude dos sinais é calculada utilizando a TDF com janela de um ciclo. É possível reduzir esse tempo de dois ciclos para um ciclo apenas, utilizando a TDF com janela de meio ciclo, ou utilizar o AG.

Na metodologia proposta, os seguintes parâmetros foram utilizados:

N : número de amostras por ciclo do sinal;

$p_{min}=1 \cdot 10^{-3}$: valor de probabilidade mínima;

$ep=1,2$: expoente da função densidade de probabilidade;

$lm=0,90$: fator de esquecimento do valor médio; e

$lv=0,99$: fator de esquecimento da variância.

3.2.4 Classificação da falta

A partir da determinação dos instantes de transição dos sinais é possível estabelecer uma linha de tempo universal, com os instantes de transição de cada evento unificados. Esse procedimento é efetuado para cada conjunto de registros oscilográficos de tensões e correntes e permite que cada evento seja avaliado individualmente. Assim é possível determinar os valores das componentes de fase dos fasores das correntes e tensões nos segmentos delimitados por esses instantes de transição unificados, bem como os fasores das componentes simétricas desses mesmos sinais.

Uma vez que as condições operativas das redes elétricas são conhecidas, bem como os valores limites das correntes de carga é possível determinar quais segmentos dos sinais de cada um dos eventos constituem curtos-circuitos. Para determinar o tipo de falta e as fases envolvidas pode-se utilizar uma tabela de decisão, conforme apresentado em (KEZUNOVIC et al, 1993).

Os arquivos em formato COMTRADE normalmente registram anomalias nas redes elétricas que podem ou não representar eventos de curto-circuito, uma vez que a configuração de

disparo de registro dos IEDs e a condição operativa das redes podem resultar em disparos acidentais. É comum ocorrerem disparos para condições normais de operação como no caso de energização de alimentadores com grande quantidade de cargas, partidas de motores, etc.

Contudo as oscilografias que representam curtos-circuitos podem conter informações para determinar as suas origens, eventuais evoluções e instantes de isolamento. Desta forma, é importante considerar as seguintes premissas:

- Instantes de transição são determinados a partir de variações abruptas nas magnitudes dos sinais de tensões e correntes;
- Subtensões podem indicar a ocorrência de eventos de curto-circuito;
- Sobrecorrentes podem indicar a ocorrência de curtos-circuitos;
- Sobrecorrentes e subtensões em fases específicas podem indicar os tipos de falta e as fases envolvidas, bem como o comportamento dos sistemas de proteção (isolamento da falta, religamento, etc);
- Os contatos de estado dos IEDs e disjuntores podem fornecer informações sobre alterações nas topologias das redes elétricas, bem como informações acerca do desempenho dos sistemas de proteção, isto é:
 - Caso algum sistema de proteção tenha atuado para um determinado evento, porém não haja indicação de falta nos registros de oscilografia desse evento, então pode ter ocorrido alguma falha de segurança; e
 - Caso os registros de oscilografia indiquem a ocorrência de uma falta para um determinado evento, mas haja indicação da isolamento e extinção do problema por meio do sistema de proteção, então pode ter ocorrido uma falha de proteção.

Da mesma forma, considerou-se como premissa para que se considere que as redes elétricas estejam operando em condições normais quando:

- As componentes de fase das correntes são simétricas e a corrente de neutro é próxima de zero;
- A amplitude dos sinais de corrente nos segmentos delimitados pelos instantes de transição não possui variações significativas;

- As componentes de fase das tensões são simétricas e a tensão de sequência zero é próxima de zero; e
- A amplitude dos sinais de tensão nos segmentos delimitados pelos instantes de transição não possui variações significativas.

A Tabela 3.1, adaptada a partir das informações apresentadas em (KEZUNOVIC et al, 1993), demonstra as informações que podem ser empregadas para a classificação de faltas e determinação das fases envolvidas, para sistemas trifásicos aterrados. O aterramento permite a circulação de corrente de sequência zero, porém, vale ressaltar que essa configuração pode não ser tão comum em alguns países, como ocorre no Brasil.

Tabela 3.1 - Critérios para classificação dos tipos de falta

Tipo de Falta	Corrente de sequência zero	Corrente de falta	Corrente das fases não envolvidas	Tensão de sequência zero	Tensão de falta	Tensão das fases não envolvidas	Tensão de linha
Pré-falta	$I_0 \approx 0$		$I_{(Pós)} \approx I_{(Pré)}$	$V_0 \approx 0$		$V_{(Pós)} \approx V_{(Pré)}$	
AN	$I_0 > 0$	$I_{a(Pós)} > I_{a(Pré)}$	$I_b < I_a$ $I_c < I_a$	$V_0 > 0$	$V_a < V_n$	$V_b \approx V_n$ $V_c \approx V_n$	$V_{ab} \approx V_{ca}$
BC	$I_0 \approx 0$	$I_b \approx I_c$ $I_{b(Pós)} > I_{b(Pré)}$ $I_{c(Pós)} > I_{c(Pré)}$	$I_a < I_b$ $I_a < I_c$	$V_0 \approx 0$	$V_b < V_n$ $V_c < V_n$ $V_b \approx V_c$	$V_a > V_b$ $V_a > V_c$	$V_{bc} < V_{ab}$ $V_{bc} < V_{ca}$ $V_{ab} \approx V_{ca}$
BCN	$I_0 > 0$	$I_b \approx I_c$ $I_{b(Pós)} > I_{b(Pré)}$ $I_{c(Pós)} > I_{c(Pré)}$	$I_a < I_b$ $I_a < I_c$	$V_0 > 0$	$V_b < V_n$ $V_c < V_n$ $V_b \approx V_c$	$V_a > V_b$ $V_a > V_c$	$V_{bc} < V_{ab}$ $V_{bc} < V_{ca}$ $V_{ab} \approx V_{ca}$
ABC	$I_0 \approx 0$	$I_{a(Pós)} > I_{a(Pré)}$ $I_{b(Pós)} > I_{b(Pré)}$ $I_{c(Pós)} > I_{c(Pré)}$		$V_0 \approx 0$	$V_a < V_n$ $V_b < V_n$ $V_c < V_n$ $V_a \approx V_b \approx V_c$		$V_{ab} \approx V_{bc} \approx V_{ca}$
ABCN	$I_0 \approx 0$ ou $I_0 > 0$	$I_{a(Pós)} > I_{a(Pré)}$ $I_{b(Pós)} > I_{b(Pré)}$ $I_{c(Pós)} > I_{c(Pré)}$		$V_0 \approx 0$	$V_a < V_n$ $V_b < V_n$ $V_c < V_n$ $V_a \approx V_b \approx V_c$		$V_{ab} \approx V_{bc} \approx V_{ca}$

Fonte: Elaborado com base em (KEZUNOVIC et al, 1993)

Por meio da Tabela 3.1 os valores de pré-falta e pós falta de tensões e correntes podem ser analisados a fim de determinar quais as fases foram envolvidas e se há ou não corrente de sequência zero circulando.

Além da tabela de decisão apresentada em (KEZUNOVIC et al, 1993), pode-se utilizar o método descrito na referência (SENGER et al, 2001). Nesse método, a classificação do tipo de falta é realizada pela avaliação das componentes simétricas e superposta das correntes, que são calculadas a partir da subtração dos valores das componentes simétricas na janela de pré falta, das componentes simétricas na janela de pós falta.

A classificação da falta e a determinação das fases envolvidas são baseadas em uma árvore de decisão que inicia o processo de classificação da falta e de determinação das fases envolvidas pela comparação entre o módulo do fasor da componente superposta de sequência positiva, e os módulos das demais componentes. Caso seu valor seja significativamente maior, considera-se que o curto-circuito é trifásico, caso contrário deve-se proceder com a comparação entre a fase da componente de sequência positiva e a fase da componente de sequência negativa, conforme apresentado na Tabela 3.2, onde θ_1 é o ângulo da componente de sequência positiva e θ_2 é o ângulo da componente de sequência negativa.

Tabela 3.2 - Defasagem entre as componentes de sequência positiva e negativa

Tipo de falta	θ_2
AN	θ_1
BN	$\theta_1 + 120^\circ$
CN	$\theta_1 - 120^\circ$
BC	$\theta_1 + 180^\circ$
AB	$\theta_1 + 60^\circ$
CA	$\theta_1 - 60^\circ$

Fonte: Elaborado com base em (SENGER et al, 2001)

Desta forma, com uma árvore de decisão é possível determinar o tipo de falta observando o ângulo entre as componentes de sequência positiva e negativa da corrente superposta. Deve-se verificar a circulação de corrente de sequência zero para definir se há a corrente circulando pelo terra na falta analisada, de modo a classificar corretamente as faltas à terra.

Vale ressaltar que a determinação das defasagens típicas apresentadas na Tabela 3.2 foi efetuada considerando-se todos os tipos de curtos-circuitos fase-terra e dupla-fase. Para exemplificar o procedimento, considere uma carga monofásica ligada à fase B de uma fonte trifásica ideal, simétrica e de sequência positiva, conectada em estrela aterrada. Nesse contexto, as correntes de fase podem ser expressas conforme a Equação 3.16.

$$\dot{I}_a = \dot{I}_c = 0, \quad \dot{I}_b = \dot{I} \quad (3.16)$$

Onde:

$\dot{I}_a$: corrente na fase A da fonte;

$\dot{I}_b$: corrente na fase B da fonte; e

$\dot{I}_c$: corrente na fase C da fonte.

As componentes simétricas das correntes são dadas pela Equação 3.17.

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = \frac{\dot{I}}{3} \\ \dot{I}_1 &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \alpha \dot{I}_b + \alpha^2 \dot{I}_c) = \alpha \frac{\dot{I}}{3} \\ \dot{I}_2 &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_b + \alpha \dot{I}_c) = \alpha^2 \frac{\dot{I}}{3} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Onde:

α : operador para componentes simétricas;

$\dot{I}_0$: corrente de sequência zero da fonte;

$\dot{I}_1$: corrente de sequência positiva da fonte; e

$\dot{I}_2$: corrente de sequência negativa da fonte.

Observando-se os valores obtidos para a componente de sequência positiva e negativa, pode-se concluir que no caso de uma falta monofásica, BN, a diferença de fases estará bem definida, podendo-se classificar o tipo de falta em análise por meio da tabela 3.2.

4 SIMULAÇÕES PARA AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta detalhes sobre as simulações que foram elaboradas com o intuito de avaliar os algoritmos propostos neste trabalho. Para tanto, foram elaborados testes comparativos entre algoritmos que desempenham a mesma função, de forma a avaliar o seu comportamento frente às diversas situações possíveis.

Inicialmente, os algoritmos para cálculo dos fasores dos sinais de tensões e correntes foram avaliados utilizando-se sinais sintetizados artificialmente no MATLAB. Esses sinais foram constituídos de forma a representarem sinais típicos de sistemas elétricos de potência, porém não estão relacionados com nenhum evento em redes elétricas.

Em seguida, foram elaboradas simulações em redes de distribuição de energia elétrica no software ATP/EMTP, com o objetivo de testar os algoritmos propostos, considerando um ambiente mais semelhante ao ambiente real. Nessa etapa são analisados os algoritmos responsáveis pelo cálculo dos fasores, pela determinação dos instantes de transição, pela classificação da falta e determinação das fases envolvidas.

Por último, os algoritmos propostos foram avaliados utilizando-se sinais registrados em duas subestações de distribuição de energia elétrica, de concessionárias no Brasil.

Vale ressaltar que cada um dos algoritmos apresentados no capítulo anterior possui uma aplicação específica e, portanto, pode ter o seu desempenho testado de forma independente.

4.1 SIMULAÇÕES COM SINAIS SINTETIZADOS

Para a comparação de desempenho entre os algoritmos para o cálculo dos fasores dos sinais de tensões e correntes, isto é, o algoritmo baseado na TDF com janela de um ciclo, o algoritmo baseado na TDF com janela de meio ciclo e o AG, foi utilizado o sinal descrito pela equação (4.1).

$$s(t) = S_p \cos(w \cdot t + \theta) - S_0 e^{(-\alpha t)} \quad (4.1)$$

Onde:

S_p : magnitude da componente fundamental do sinal;

S_0 : valor inicial da componente aperiódica;

α : constante de tempo da componente aperiódica; e

w : frequência angular do sinal.

O objetivo dessa comparação é avaliar outras ferramentas disponíveis para o cálculo dos fasores, visto que os algoritmos baseados na TDF são bastante recorrentes e difundidos na literatura. Esse fato decorre da sua fácil implementação e seu reduzido tempo de processamento. Entretanto, a presença da componente aperiódica na ocorrência de um defeito, pode ocasionar um erro na obtenção dos fasores dos sinais, principalmente se não houver nenhum tipo de filtragem associado ao seu uso.

4.2 SIMULAÇÕES NO ATP

O ATP/EMTP – *Alternative/Electromagnetic Transients Program* é um programa para simulações de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética, amplamente utilizado na área de sistemas de potência. O programa é capaz de simular redes elétricas complexas, a partir de elementos de rede, tais como linhas de transmissão, máquinas elétricas, transformadores, etc. É por meio de um arquivo texto com formatação padronizada, ou por meio de *interfaces* gráficas, tais como o ATPDRAW, que o usuário pode elaborar os casos de simulação de seu interesse.

Contudo, a elaboração de casos de simulação que possuam um grande número de elementos de rede, com o objetivo de simular o comportamento elétrico de inúmeras ramificações e cargas distintas, sob condições normais e curtos-circuitos, pode ser bastante exaustiva.

Esse problema normalmente ocorre quando é necessário elaborar casos de simulação para redes de distribuição de energia elétrica. Com o objetivo de minimizá-lo, o L•PROT desenvolveu um *software* para a modelagem de redes de distribuição denominado ATPCAD (NAKAGOMI, 2006). Esse *software* permite a modelagem de redes de distribuição a partir da

utilização de dados sobre a topologia e os parâmetros elétricos dessas redes, que são armazenados em um banco de dados relacional. Os dados são obtidos junto às concessionárias e possibilitam a simulação de quaisquer tipos de faltas nos sistemas de distribuição, a alteração dos parâmetros dos alimentadores, das cargas, das características dos eventos (local, instante, resistência, etc).

O ATPCAD foi utilizado neste trabalho para realizar as simulações do sistema de distribuição com a finalidade de possibilitar a avaliação de desempenho dos algoritmos propostos de análise automática de faltas.

O ATPCAD gera um arquivo no formato de entrada de dados do ATP, que contém todas as informações da rede e do evento simulado. Esse arquivo é processado pelo ATP e os resultados são transformados em arquivos no formato COMTRADE. Em seguida, esses arquivos são analisados pelo sistema proposto. Esse procedimento permite a geração de dados de falta conhecidos para que sejam avaliados os desempenhos dos algoritmos que integram o sistema automático de análise de ocorrências.

No ANEXO está apresentado um excerto de um dos arquivos gerado pelo ATPCAD.

4.2.1 Modelo do sistema de distribuição

Os alimentadores de distribuição que foram simuladas pelo *software* ATPCAD são alimentadores reais de uma concessionária de distribuição elétrica brasileira. Foram simulados dois alimentadores distintos, o alimentador GM03 e o alimentador 0902. O alimentador GM03 está ilustrado na Figura 4.1 e possui as seguintes características:

- Número de trechos: 1386;
- Número de estações transformadoras: 592;
- Número de chaves fusíveis: 78;
- Área de cobertura: 21,26 x 13,22 [km], que equivale a 281,1 [km²];
- Comprimento total do alimentador: 242,89 [km]; e
- Potência total instalada: 14,42 [MVA].

Figura 4.1 - Topologia da rede GM03

Fonte: Extraído do software ATPCAD (NAKAGOMI, 2006)

O alimentador 0902 está ilustrado na Figura 4.2 e possui as seguintes características:

- Número de trechos: 1142;
- Número de estações transformadoras: 471;
- Número de chaves fusíveis: 59;
- Área de cobertura: 15,29 x 11,06 [km], que equivale a 169,1 [km²];
- Comprimento total do alimentador = 185,17 [km]; e
- Potência total instalada = 22,61 [MVA].

Figura 4.2 - Topologia da rede 0902

Fonte: Extraído do software ATPCAD (NAKAGOMI, 2006)

4.2.2 Descrição dos casos de simulação

Cada um dos alimentadores modelados no ATPCAD foi submetido a diversas situações de curto-circuito variando-se o local de ocorrência da falta, o instante de sua ocorrência, fases envolvidas e tipo de falta. A Tabela 4.1 ilustra todos os tipos de falta simulados.

Tabela 4.1 - Características da falta simulada

Alimentador	Tipo de falta	Resistência de falta [Ω]	Instante de ocorrência [ms]	Ponto de falta
GM03 0902	AN, BC, BCN, ABC e ABCN	0,5; 1,0; e 2,5	50, 52, 54, 56 e 58	X0310, X3915, X5485 e X6585
				X1945, X2250, X2765 e X3505

Foram gerados 600 casos no total, cujos dados de entrada de cada falta é uma variação das opções apresentadas na Tabela 4.1.

Ou seja, foram simulados para dois alimentadores, vários tipos de defeitos, em que se alterou a resistência do ponto de falta, o instante de ocorrência e a sua localização.

Os seiscentos arquivos de saída do ATPCAD são simulados no ATP/EMTP e seus resultados convertidos em formato COMTRADE.

4.3 CASOS REAIS

Para a avaliação da rotina computacional de análise automática de faltas foram selecionados trinta e oito casos reais de duas concessionárias brasileiras de distribuição de energia elétrica, uma da região sul e outra da região sudeste. A seleção dos casos reais foi realizada levando em consideração os sinais que não possuíam nenhum tipo de erro em sua aquisição, seja devido a ruídos inerentes do processo ou mesmo imprecisão dos equipamentos de medição utilizados.

As Figuras 4.3 a 4.5 apresentam três exemplos de registros oscilográficos processados pelos algoritmos propostos neste trabalho.

Figura 4.3 - Caso 1060054 Exemplo de evolução de falta

Fonte: Próprio autor

O primeiro evento, ilustrado na Figura 4.3, apresenta um evento de sobrecorrente que se inicia como um curto-circuito fase-terra, na fase azul. Cerca de três ciclos após o início do evento de

sobrecorrente, o curto-circuito fase-terra evolui para um curto-circuito dupla-fase-terra (ou dupla-fase), com o envolvimento da fase verde. Em seguida, há uma nova evolução do evento para um curto-circuito trifásico, com a sobrecorrente na fase vermelha, que ocorre por volta de três ciclos após a sobrecorrente na fase verde. É importante ressaltar que há presença da componente aperiódica bastante acentuada nos sinais ilustrados na Figura 4.3, principalmente o sinal das fases azul e verde.

O segundo evento, ilustrado na Figura 4.4, apresenta um curto-circuito fase-terra na fase vermelha, que tem duração inferior a meio ciclo. Esse tipo de evento pode ser bastante difícil de avaliar de forma automática, principalmente se a ferramenta de análise for baseada na TDF com janela de um ciclo. Vale ressaltar que a duração do evento pode indicar que houve atuação de alguma chave fusível no alimentador.

Figura 4.4 - Caso 1030112 Exemplo de falta temporária de curta duração

Fonte: Próprio autor

O terceiro evento, ilustrado na Figura 4.5, apresenta um curto-circuito fase-terra na fase vermelha. Há presença da componente aperiódica bastante acentuada na fase vermelha, e também se pode notar que as demais fases são distorcidas quando do início da sobrecorrente.

Figura 4.5 - Caso 1040062 Exemplo de falta com presença de exponencial amortecida

Fonte: Próprio autor

Foram então apresentadas as metodologias aplicadas no trabalho, as simulações realizadas e casos reais utilizados para a realização de testes que avaliam cada algoritmo e as rotinas computacionais. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos em cada um desses testes e comentado seu desempenho.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as avaliações individuais de cada um dos algoritmos implementados, bem como avaliações da rotina computacional que implementa o sistema automático de análise de oscilografias. As avaliações individuais são necessárias para que seja possível verificar o desempenho de um algoritmo específico do processo e a viabilidade de seu uso agregado ao software. Já as avaliações sobre a rotina computacional buscam atestar a viabilidade do conjunto de algoritmos para o fornecimento dos resultados finais de detecção dos instantes de transição e classificação da falta.

Primeiramente, é comparada a extração dos atributos por meio do algoritmo baseado na TDF e por meio do AG. Em seguida é detalhado o processo de extração de atributos realizado pelo AG.

Após essa comparação, é realizada a avaliação dos algoritmos de detecção dos instantes de transição que utilizam a TDF e o AG, além do método de subtração de janelas consecutivas. Após essa comparação são introduzidos os resultados obtidos com o algoritmo baseado na transformada de *Park* e, por fim, são realizados comparativos entre os algoritmos.

Para finalizar, cada um desses algoritmos foi incorporado à rotina computacional e foram gerados três sistemas distintos, o primeiro baseado na TDF para extração dos atributos e com a determinação do instante de transição pelo filtro com a função densidade de probabilidade, o segundo baseado no AG, que substitui a TDF, e o terceiro baseado na transformada de *Park* para monitoração da tensão de eixo direto e para a determinação dos instantes de falta.

Cada um dos sistemas é submetido às oscilografias obtidas pelas simulações realizadas no ATP e às oscilografias dos casos reais. Esse procedimento possibilita a comparação entre os algoritmos elaborados.

5.1 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DOS ALGORITMOS DESENVOLVIDOS

5.1.1 Avaliação do AG em relação à TDF

Os efeitos gerados pela não linearidade dos transformadores de instrumentos, bem como os transitórios gerados pela rede propiciam o aparecimento de ruídos e de componentes aperiódicas, oscilações harmônicas, etc (SENGER, E. C.; SANTANA, N. N.; 1998).

Nesse intuito, foi desenvolvido um algoritmo para determinar o correto valor do módulo do sinal, mesmo com a interferência da componente aperiódica, que possui como objetivo determinar com maior precisão os instantes e tipos de falta.

Técnicas não determinísticas, como algoritmos genéticos podem ser empregadas para a execução dessa tarefa na definição da componente que melhor reproduz o sinal amostrado.

Com a finalidade de avaliar o desempenho do AG desenvolvido no âmbito deste trabalho, foi realizado um comparativo com a TDF com janela de um ciclo e também com a TDF com janela de meio ciclo. Essa avaliação foi efetuada utilizando-se um sinal sintetizado a partir de uma função com valores conhecidos. Desta forma é possível verificar a resposta dos algoritmos em relação a esse sinal.

5.1.1.1 Teste do sinal representado por uma função

O teste da resposta dos algoritmos para cálculo dos fasores, com o emprego do sinal sintetizado permite a avaliação dos algoritmos na estimação dos parâmetros, verificando-se o correto funcionamento da extração dos atributos. Para a realização deste teste, foi considerado o sinal apresentado em (SENGER, E. C.; SANTANA, N. N.; 1998) que representa um sinal senoidal composto por uma componente aperiódica definida pela equação (4.1). Onde:

$$S_0 = 1$$

$$S_p = 1 \quad ;$$

$$\theta = 0 \quad ; e$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{T} \right) = 27,68 \quad .$$

Considerando que sinal descrito pela equação (4.1) representa um sinal de corrente arbitrário, seu comportamento pode ser observado o gráfico na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Sinal de corrente com a presença da componente aperiódica

Fonte: Próprio autor

Esse sinal é elaborado com uma frequência de amostragem que garante trinta duas amostras por ciclo. No primeiro teste foi realizado um comparativo com a TDF com uma janela de um ciclo para a obtenção do módulo do fasor do sinal senoidal e o resultado está apresentado na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Módulo do sinal obtido por meio do AG e da TDF de um ciclo

Fonte: Próprio autor

O AG utilizou uma janela de doze amostras para realizar a extração dos atributos, que corresponde a três oitavos de ciclo.

Nesse teste, o algoritmo é capaz de estimar de forma precisa, e em pouco tempo, o módulo do sinal de corrente. No entanto, é possível que nas primeiras amostras o AG não consiga realizar o cálculo do módulo e fase corretamente, pelo fato da janela não estar completa de amostras do sinal. A Figura 5.3 evidencia esse comportamento do algoritmo, que pode ser verificado a partir da estimação da fase do sinal nas primeiras três amostras.

Figura 5.3 - Módulo e fase do sinal obtidos por meio do AG

Fonte: Próprio autor

A fase, que foi definida como zero, foi corretamente estimada pelo AG, com exceção das amostras iniciais. Nesse período inicial não foi possível para o algoritmo determinar corretamente a fase e o módulo do sinal, uma vez que a janela de dados no início do registro se encontra incompleta.

A TDF com uma janela de meio ciclo apresenta um comportamento ainda mais afetado pela presença da componente aperiódica. Esse comportamento está ilustrado na Figura 5.4.

Figura 5.4 - Módulo do sinal obtido por meio do AG e da TDF de meio ciclo

Fonte: Próprio autor

Os resultados ilustrados na Figura 5.2 e na Figura 5.4 destacam as vantagens de se considerar o cálculo dos fasores com a utilização do AG em substituição à TDF. Além disso, vale ressaltar que o tempo de resposta do AG foi de apenas 6,25 [ms] que é o tamanho necessário da janela desse algoritmo. Ainda com relação à TDF pode-se observar nessas figuras que a sua estabilidade ocorre para períodos superiores a cinco ciclos, o que pode ser crítico na classificação de faltas.

5.1.1.2 Obtenção dos resultados com o AG

Conforme mencionado no capítulo 3, os algoritmos genéticos são aplicados na aproximação de funções. Nesse contexto, a Figura 5.5 ilustra a curva de um sinal de corrente de um caso real, aproximado pelo AG com base na janela de intervalo da amostra 49 a 60 (janela com doze amostras). No tracejado azul, é possível observar o sinal real e em vermelho está representada a função de aproximação encontrada pelo AG para a janela delimitada entre os dois asteriscos.

Para a obtenção dos valores do fasor do sinal, o AG possui como objetivo encontrar a solução ótima da equação (3.8).

Dado que a frequência angular é 377 [rad/s] e que a amostra inicial do sinal ocorre em $t = 0$ [s], o algoritmo foi capaz de encontrar a seguinte solução ótima para a equação:

$$X_0 = 31,8020 \quad ;$$

$$\lambda = 14,8384 \quad ;$$

$$X_1 = -28,9686 \quad ; e$$

$$Y_1 = 17,3801$$

Devido ao fato da janela analisada estar localizada completamente após o instante de transição, isto é, posicionada entre as amostras 49 e 60, o AG foi capaz de realizar uma boa aproximação para a função, possibilitando extrair os valores de módulo e fase para a janela em questão.

Fonte: Próprio autor

No entanto, o algoritmo pode não conseguir realizar uma boa aproximação do sinal no período de transição devido à descontinuidade na forma de onda, isto é, quando a janela de dados possui dados de pré-falta e de pós falta. Na Figura 5.6 é possível observar esse comportamento.

Figura 5.6 - Erro de aproximação realizado pelo AG no instante de transição

Fonte: Próprio autor

Nessa figura nota-se que a variação do sinal na janela de dados utilizada resulta em uma solução incorreta para o problema.

5.1.2 Comparativo na determinação dos instantes de transição

No item anterior foi verificado o comportamento do AG para a aproximação de uma função sintética e exemplificado um resultado obtido no caso de uma descontinuidade no sinal.

No comparativo apresentado neste item, foram extraídos os valores de módulo do sinal por meio do AG, TDF de um ciclo e TDF de meio ciclo, com o intuito de determinar o instante da falta pelo método de subtração de janelas adjacentes. Desta forma, cada algoritmo foi avaliado em relação à exatidão da sua resposta quanto à determinação do instante de ocorrência da falta.

A Figura 5.7 ilustra o sinal de corrente de um dos casos reais. Nessa figura são apresentados os valores de módulo encontrados por meio do AG e também pela TDF de um ciclo.

Pode-se perceber nessa figura que o tempo para o AG atingir o valor correto de módulo é menor que a TDF de um ciclo, em aproximadamente 10 [ms], embora haja uma oscilação em seu valor.

Fonte: Próprio autor

A Figura 5.8 ilustra o mesmo sinal da Figura 5.7. Nessa figura são apresentados os valores de módulo encontrados por meio do AG e também pela TDF de meio ciclo. Pode-se perceber que, embora o tempo de resposta da TDF tenha melhorado, a presença da componente aperiódica resulta em erro no cálculo do módulo após a transição, que pode se agravar dependendo da magnitude dessa componente, conforme observado no item 5.1.1.1.

Figura 5.8 - Comparativo entre AG e TDF de meio ciclo

Fonte: Próprio autor

A seguir é apresentada a avaliação da determinação dos instantes de transição a partir da metodologia de diferença de módulo do sinal entre duas janelas consecutivas. Para tanto, leva-se em consideração que o módulo é calculado utilizando-se o AG, a TDF de um ciclo e a TDF de meio ciclo.

Observando o sinal de corrente ilustrado na Figura 5.9, pode-se perceber que o instante de transição ocorre no instante $t = 20,31$ [ms].

Figura 5.9 - Comparativo no método de diferença de janelas

Fonte: Próprio autor

Ainda na Figura 5.9, estão representados os vetores resultantes da metodologia de detecção do instante de ocorrência da falta em que o pico indica o momento de transição. Desta forma, os instantes determinados para cada um dos métodos estão representados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Instantes de transição

Método	t [ms]	Erro [ms]
Fourier de 1/2 ciclo	26,56	6,25
Fourier de 1 ciclo	26,56	6,25
Algoritmo Genético	22,4	2,09

A Tabela 5.2 apresenta o resultado do algoritmo em questão para trinta e oito casos reais, considerando somente a primeira transição existente.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos para determinação dos instantes de transição

Caso analisado		Algoritmo Genético		Fourier de 1 ciclo		Fourier de 1/2 ciclo	
Identificação	Instante de transição real [ms]	Instante de transição estimado [ms]	Erro [ms]	Instante de transição estimado [ms]	Erro [ms]	Instante de transição estimado [ms]	Erro [ms]
Caso 1020063	145,70	146,74	1,04	151,43	5,73	151,43	5,73
Caso 1020068	120,30	119,78	0,52	121,34	1,04	121,34	1,04
Caso 1020093	138,70	147,04	8,34	138,70	0,00	138,70	0,00
Caso 1020111	129,30	137,11	7,81	130,34	1,04	128,25	1,05
Caso 1030006	141,00	143,61	2,61	142,05	1,05	142,57	1,57
Caso 1030048	117,70	119,78	2,08	123,43	5,73	123,95	6,25
Caso 1030053	166,30	167,35	1,05	167,87	1,57	169,43	3,13
Caso 1030074	142,00	144,60	2,60	143,04	1,04	145,64	3,64
Caso 1030077	137,70	139,78	2,08	144,47	6,77	144,47	6,77
Caso 1030080	152,30	154,38	2,08	152,82	0,52	152,82	0,52
Caso 1040050	138,30	136,74	1,56	138,30	0,00	138,30	0,00
Caso 1040061	117,30	117,82	0,52	119,38	2,08	119,38	2,08
Caso 1040062	145,00	150,21	5,21	145,52	0,52	145,52	0,52
Caso 1060022	113,70	114,22	0,52	115,26	1,56	116,31	2,61
Caso 1060043	121,00	144,44	23,44	142,88	21,88	127,25	6,25
Caso 1060054	117,00	119,08	2,08	118,04	1,04	118,04	1,04
Caso 1060069	134,70	136,27	1,57	135,23	0,53	135,75	1,05
Caso 1060072	136,70	140,35	3,65	138,79	2,09	140,87	4,17
Caso 1070014	131,70	131,70	0,00	133,78	2,08	133,78	2,08
Caso 1070052	146,00	147,56	1,56	147,04	1,04	161,11	15,11
Caso 1070057	124,30	123,78	0,52	125,34	1,04	125,34	1,04
Caso 1070058	118,70	119,22	0,52	119,74	1,04	120,78	2,08
Caso 1080029	133,70	134,74	1,04	135,27	1,57	140,99	7,29
Caso 1080045	140,00	141,05	1,05	144,69	4,69	144,69	4,69
Caso 1100017	148,00	149,04	1,04	154,77	6,77	154,77	6,77
Caso 1100095	140,00	141,04	1,04	139,48	0,52	141,57	1,57
Caso 1100100	158,00	159,56	1,56	159,56	1,56	160,08	2,08
Caso 1100103	134,00	134,53	0,53	134,01	0,01	134,01	0,01
Caso 1110101	135,30	134,78	0,52	136,35	1,05	136,35	1,05
Caso 1110106	124,70	125,22	0,52	125,22	0,52	125,74	1,04
Caso 1120001	145,00	143,96	1,04	145,52	0,52	145,52	0,52
Caso 1120010	144,00	145,04	1,04	145,56	1,56	150,77	6,77
Caso 1120015	149,30	149,30	0,00	148,78	0,52	148,78	0,52
Caso 1120021	144,00	160,67	16,67	144,52	0,52	157,54	13,54
Caso 1120041	126,00	142,67	16,67	126,52	0,52	140,06	14,06
Caso 1120056	133,30	135,39	2,09	133,30	0,00	135,39	2,09
Caso 1130084	134,70	125,23	9,47	130,95	3,75	130,95	3,75
Caso 1130085	129,30	129,82	0,52	129,30	0,00	129,82	0,52

Observando o resumo dos resultados apresentados na Tabela 5.3, pode-se perceber que em termos de precisão para a definição do instante exato de transição, o AG não seria a melhor alternativa se associado ao método de diferença de janelas adjacentes. Esse fato decorre da susceptibilidade que o AG possui para qualquer variação ou distorção do sinal que o torne diferente da equação (3.8), isto é, diferente de um sinal que possui uma componente aperiódica associada a uma componente fundamental.

Tabela 5.3 - Resumo dos resultados			
Avaliação	Algoritmo Genético	Fourier de 1 ciclo	Fourier de 1/2 ciclo
Média do erro [ms]	3,83	2,17	3,49
Variância	35,59	14,05	14,90
Máx. erro [ms]	23,44	21,88	15,11
Mín. erro [ms]	0,00	0,00	0,00

A vantagem na utilização do AG está na determinação do instante de ocorrência da falta com uma menor janela de amostragem, como é apresentado no item 5.3 em que são realizados os testes com casos reais.

5.1.3 Avaliação da transformada de *Park*

Conforme apresentado no capítulo 3, pode-se empregar a transformada de *Park* para a determinação de instantes de transição. Na Figura 5.10 é apresentado um exemplo da oscilografia de um caso real onde se pode verificar a determinação do instante de transição a partir dos valores da diferença entre amostras consecutivas – $(c_{dif})^2$, conforme apresentado na equação (3.12).

A partir da Figura 5.10-a é possível verificar que os valores de pico da variável $(c_{dif})^2$ indicam os momentos de transição. Nessa figura é possível visualizar que há uma variação brusca de $(c_{dif})^2$ no início da falta, porém seu valor não se estabiliza, dada a distorção na forma de onda da corrente, ocasionada pelo curto-circuito. Além disso, há evolução no curto-circuito, o que pode tornar impreciso o processo de identificação dos instantes de transição.

Figura 5.10 - Transformada de *Park* - Exemplo com evolução de falta

Fonte: Próprio autor

Utilizando os mesmos critérios do item 5.1.2 na avaliação do AG e da TDF, é obtido para os mesmos 38 casos avaliados a seguinte tabela resumo:

Tabela 5.4 - Resumo da avaliação dos resultados

Avaliação	Algoritmo Genético	Fourier de 1 ciclo	Fourier de 1/2 ciclo	Transformada de Park
Média do erro [ms]	3,83	2,17	3,49	5,49
Variância	35,59	14,05	14,90	35,12
Máx. erro [ms]	23,44	21,88	15,11	23,44
Mín. erro [ms]	0,00	0,00	0,00	1,04

Observam-se de forma geral que os casos em que os sinais de oscilografia ocasionaram um maior erro em todos os algoritmos geralmente são os sinais que tiveram um aumento gradativo do valor do módulo do sinal após o instante de transição, isto é, após o instante de curto-circuito a corrente se eleva, mas não atinge o seu maior valor imediatamente.

5.2 RESULTADOS DOS CASOS SIMULADOS NO ATP

Foram elaborados três programas com o intuito de analisar os resultados da rotina computacional e validar cada um dos algoritmos analisados anteriormente. A diferença entre cada um deles se encontra na forma de extração dos atributos e/ou no algoritmo de determinação do instante de ocorrência da falta. Desta forma, em cada rotina computacional foi utilizada a seguinte metodologia:

- TDF de um ciclo e de meio ciclo para estimação do valor do fasor e determinação do instante de ocorrência da falta pela função de densidade de probabilidade;
- AG para estimação do valor do módulo do fasor e determinação do instante de ocorrência da falta pela função de densidade de probabilidade;
- Transformada de *Park* para monitoração da tensão de eixo direto para determinação do instante de ocorrência da falta.

Como dado de entrada, foram utilizados as simulações realizadas no ATP pela modelagem de duas redes reais de concessionária representadas no ATPCAD (Rede 0902 e GM03).

Cada um dos algoritmos gera um relatório para cada oscilografia analisada e armazena as informações de instante e classificação de cada falta. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5 - Resultados para casos do ATP, rede 0902

Amostra avaliada		Fourier		AG		Park	
Identificação e tipo de falta	Instante de transição [ms]	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas
ABC001	50	47,40	ABC	48,44	ABC	44,27	ABCN
ABC002	52	50,00	ABC	50,00	ABC	45,83	ABCN
ABC003	54	50,00	ABC	52,08	ABC	49,48	ABCN
ABC004	56	52,60	ABC	54,17	ABC	52,08	ABCN
ABC005	58	55,21	ABC	56,25	ABC	53,65	ABC
ABC006	50	46,88	ABC	53,65	ABC	44,27	ABC
ABC007	52	49,48	ABC	50,00	ABC	45,83	ABC
ABC008	54	49,48	ABC	52,08	ABC	49,48	ABC
ABCN009	56	52,60	ABCN	54,17	ABCN	56,77	ABCN
ABCN010	58	55,21	ABCN	56,25	ABCN	53,65	ABCN
ABCN011	50	46,88	ABC	53,65	ABC	45,31	ABC
ABCN012	52	49,48	ABC	51,04	ABC	45,83	ABCN
ABCN013	54	50,00	ABC	52,08	ABC	49,48	ABCN
ABCN014	56	52,60	ABC	54,17	ABC	52,08	ABC
ABCN015	58	55,21	ABC	61,98	ABC	53,65	ABC
ABCN016	50	47,40	ABC	47,92	ABC	44,27	ABCN
AN017	52	52,60	AN	52,60	AN	57,81	AN
AN018	54	52,60	AN	54,17	AN	58,33	AN
AN019	56	53,13	AN	54,69	AN	58,33	AN
AN020	58	58,85	AN	56,25	AN	54,17	AN
AN021	50	51,04	AN	50,00	AN	45,83	AN
AN022	52	52,60	AN	55,73	AN	57,81	AN
AN023	54	52,60	AN	53,65	AN	58,33	AN
AN024	56	52,60	AN	54,69	AN	54,17	AN
BC025	58	56,25	BC	57,81	BC	69,27	BC
BC026	50	47,92	BC	49,48	BC	60,94	BC
BC027	52	48,44	BC	50,00	BC	53,65	BC
BC028	54	54,17	BC	53,13	BC	57,81	BC
BC029	56	56,25	BC	55,73	BC	58,33	BC
BC030	58	56,25	BC	57,81	BC	69,27	BC
BC031	50	48,44	BC	49,48	BC	53,65	BC
BC032	52	48,44	BC	50,00	BC	53,65	BC
BCN033	54	49,48	BCN	51,56	BCN	57,81	BCN
BCN034	56	55,73	BCN	55,73	BCN	58,33	BCN
BCN035	58	55,73	BCN	56,77	BCN	53,13	BCN
BCN036	50	47,92	BCN	48,96	BCN	46,35	BCN
BCN037	52	49,48	BCN	54,17	BCN	54,69	BCN
BCN038	54	49,48	BCN	51,04	BCN	57,81	BCN
BCN039	56	55,73	BCN	56,25	BCN	58,33	BCN
BCN040	58	55,73	BCN	57,29	BCN	53,13	BCN

Tabela 5.6 - Resultados para casos do ATP, rede GM03

Amostra avaliada		Fourier		AG		Park	
Identificação e tipo de falta	Instante de transição [ms]	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas
ABC001	50	47,40	ABC	47,92	ABC	47,40	ABC
ABC002	52	49,48	ABC	50,00	ABC	49,48	ABC
ABC003	54	50,00	ABC	52,08	ABC	50,00	ABC
ABC004	56	52,60	ABC	54,17	ABC	52,60	ABC
ABC005	58	55,21	ABC	56,25	ABC	55,21	ABC
ABC006	50	46,88	ABC	47,92	ABCN	46,88	ABC
ABC007	52	49,48	ABC	50,52	ABC	49,48	ABC
ABC008	54	52,08	ABC	53,65	ABC	52,08	ABC
ABCN009	56	52,08	ABC	53,65	ABC	52,08	ABC
ABCN010	58	54,69	ABC	56,25	ABC	54,69	ABC
ABCN011	50	47,40	ABC	48,44	ABC	47,40	ABC
ABCN012	52	50,00	ABC	50,00	ABC	50,00	ABC
ABCN013	54	50,00	ABC	52,08	ABC	50,00	ABC
ABCN014	56	52,60	ABC	54,17	ABC	52,60	ABC
ABCN015	58	55,21	ABC	55,73	ABC	55,21	ABC
ABCN016	50	46,88	ABC	47,92	ABC	46,88	ABC
AN017	52	52,60	AN	52,60	AN	52,60	AN
AN018	54	52,60	AN	54,17	AN	52,60	AN
AN019	56	53,13	AN	54,69	AN	53,13	AN
AN020	58	58,85	AN	56,25	AN	58,85	AN
AN021	50	51,04	AN	47,92	AN	51,04	AN
AN022	52	52,60	AN	52,60	AN	52,60	AN
AN023	54	52,60	AN	54,17	AN	52,60	AN
AN024	56	52,60	AN	54,69	AN	52,60	AN
BC025	58	56,25	BC	57,81	BC	56,25	BC
BC026	50	47,92	BC	48,96	BC	47,92	BC
BC027	52	47,92	BC	53,65	BC	47,92	BC
BC028	54	54,17	BC	53,13	BC	54,17	BC
BC029	56	55,73	BC	55,21	BC	55,73	BC
BC030	58	55,73	BC	57,29	BC	55,73	BC
BC031	50	48,44	BC	49,48	BC	48,44	BC
BC032	52	48,44	BC	50,00	BC	48,44	BC
BCN033	54	54,17	BCN	51,56	BC	54,17	BCN
BCN034	56	55,73	BC	55,73	BC	55,73	BC
BCN035	58	55,73	BC	56,77	BC	55,73	BC
BCN036	50	47,40	BCN	48,96	BCN	47,40	BCN
BCN037	52	48,96	BCN	50,00	BCN	48,96	BCN
BCN038	54	54,17	BCN	53,13	BCN	54,17	BCN
BCN039	56	55,73	BCN	55,73	BCN	55,73	BCN
BCN040	58	55,73	BCN	57,29	BCN	55,73	BCN

As Tabelas 5.5 e 5.6 representam somente uma fração dos resultados obtidos, já que foram realizadas 300 avaliações de oscilografia para cada rede.

Com os resultados apresentados, pode-se perceber a ocorrência de uma imprecisão para a determinação com uma diferença principalmente com relação à classificação obtida por meio do programa com o algoritmo da transformada de *Park*.

A classificação correta da falta em relação à circulação de corrente à terra pode ser influenciada por alguns fatores, como:

- Presença de distorções proveniente da reamostragem, componente exponencial amortecida e registro dos dados (casos reais que dependem de instrumentos de medição);
- Valores das resistências entre fases, que podem proporcionar a presença de terra, mas sem circulação de corrente pelo terra ou com valores abaixo do limiar estabelecido;
- Valor de ajuste limiar de I_n ou I_0 em relação à I_1 para se determinar a presença do terra.;
- Tipo de falta e posicionamento da janela, pois há casos em que a falta pode posteriormente evoluir com a circulação de corrente à terra.

Com a finalidade de resumir os resultados obtidos é representado na Tabela 5.7 a média, variância, valores máximos e mínimos considerando todos os casos testados.

Tabela 5.7 - Resumo dos resultados obtidos para oscilografias da rede 0902 e GM03

Avaliação	Fourier	Algoritmo Genético	Transformada de Park
Média do erro [ms]	2,20	1,57	3,16
Variância	1,76	0,83	4,31
Máx. erro [ms]	5,92	4,42	11,27
Mín. erro [ms]	0,00	0,00	0,00

Pode-se perceber um menor erro nos instantes de transição obtidos a partir do AG, além de uma menor variância e valor de erro máximo. Este resultado diverge do apresentado nos itens 5.1.2 e 5.1.3 em que o instante de transição foi determinado pelo método de diferença de janelas, enquanto que neste caso, foi utilizado o filtro com a função densidade de probabilidade. Por meio da análise nos itens citados, é possível observar que foram obtidos melhores resultados com a determinação do instante de transição, por meio do filtro digital.

Além disso, nos itens 5.1.2 e 5.1.3, os testes foram realizados com casos reais, ao contrário do que foi realizado neste capítulo em que foram utilizadas oscilografias provenientes de simulações no ATP. Para tanto, um melhor comparativo pode ser feito no item 5.3 apresentado posteriormente em que são testados os mesmos casos reais.

Já a rotina computacional com a transformada de *Park* se manteve com um maior erro se comparado com o programa que utiliza a TDF, pois não conseguiu determinar com precisão o instante de ocorrência de falta. É importante ressaltar que ao contrário dos outros dois métodos, a transformada de *Park* utiliza o sinal de tensão como dado de entrada, estando muito suscetível a pequenas variações no sinal de tensão, já que é utilizada a diferença de cada duas amostras na detecção.

5.2.1 Rede 0902 Caso ABC041

O registro de oscilografia apresentado é referente a uma falta trifásica, ABC, ocorrida no instante $t = 50$ [ms]. São apresentados na sequência os detalhes do evento registrado e os sinais de tensões e correntes obtidos pela rotina computacional com a abordagem pelo AG. É possível observar os valores de tensão e corrente registrados nas janelas de pré e pós falta na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - 0902/ABC041 – Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,000 a 0,048	A	$98 \angle -33^\circ$	$7856 \angle 179^\circ$
		B	$98 \angle -153^\circ$	$7856 \angle 59^\circ$
		C	$98 \angle 87^\circ$	$7856 \angle -61^\circ$
2	0,048 a 0,104	A	$585 \angle 8^\circ$	$7266 \angle -140^\circ$
		B	$584 \angle -112^\circ$	$7266 \angle 100^\circ$
		C	$584 \angle 128^\circ$	$7266 \angle -20^\circ$

Nessa tabela, nota-se que houve um aumento na corrente das três fases e uma diminuição na tensão. Além disso, o instante estimado para a transição está adiantado 2 [ms] em relação ao defeito original, como pode ser visto na Figura 5.11.

Fonte: Próprio autor

No gráfico da Figura 5.11 é possível visualizar o instante de transição determinado pela rotina computacional com AG e a transição real com o aumento repentino do valor de corrente e uma alteração na fase do sinal.

As janelas, que são consideradas para obtenção dos valores de pré e pós-falta utilizados na classificação do evento, estão também representadas na figura e pode-se perceber que neste caso foi posicionada a janela sempre na primeira metade do intervalo de pré e pós-falta. O módulo calculado pela TDF de um ciclo é representado para todo o sinal na Figura 5.11 para visualização de seu valor em função do tempo e seu comportamento no momento de transição.

Na Figura 5.12 é possível analisar o mesmo sinal obtido pela rotina computacional de detecção realizada com a TDF. Observe que neste caso o instante de transição estimado está aproximadamente 3 [ms] adiantado em relação à transição real.

Além disso, no começo da amostra há uma pequena distorção proveniente da reamostragem realizada no sinal, antes de iniciar a extração dos atributos e a segmentação pelo algoritmo. Para contornar este problema, o programa não considera quaisquer distorções no início da amostra como uma transição.

Figura 5.12 - 0902/ABC041 - Avaliação pelo programa com a TDF

Fonte: Próprio autor

Um dos motivos para a ocorrência de erro na determinação do instante de transição para a metodologia com a TDF é o período de transitório até que o sinal estabilize com a falta, que pode ser prejudicado pela componente exponencial aperiódica durante o evento, caso não tenha sido totalmente filtrada.

Ainda na Figura 5.12 é possível observar que o primeiro semi-ciclo após a transição possui período diferenciado decorrente da falta e da pré-filtragem realizada para a rotina com a TDF, esta distorção reflete nos valores obtidos pela TDF para o módulo e fase do sinal. Ao analisar o valor do módulo obtido pela TDF, é possível observar que é necessária uma janela completa para o módulo alcançar o seu valor final, além disso há sucessivas transições que podem influenciar na determinação do instante de transição.

Para esta mesma avaliação foi inserida na Figura 5.13 o gráfico com o sinal obtido pelo programa com a transformada de *Park*. Neste gráfico, é possível verificar que o instante de transição estimado ocorreu 6 [ms] adiantado em relação ao início real da falta.

Além disso, para avaliar o desempenho do algoritmo, as janelas de pré e pós-falta foram alocadas sempre na segunda metade do período.

Figura 5.13 - 0902/ABC041 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

Em todos os casos, os algoritmos conseguiram determinar corretamente os instantes de transição, salvo uma imprecisão de alguns milissegundos nos dois últimos casos, mas que não implicaram em erro no posicionamento das janelas de pré e pós-falta.

5.2.2 Rede GM03 Caso ABCN026

Este caso se trata de um registro de oscilografia referente a uma falta trifásica, ABCN, ocorrida no instante $t = 50$ [ms]. A Tabela 5.9 e a Figura 5.14 apresentam os detalhes do evento registrado e os sinais de tensões e correntes obtidos por meio da rotina computacional com a abordagem pelo AG.

Tabela 5.9 - GM03/ABCN026 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,000 a 0,048	A	$96 \angle -33^\circ$	$7899 \angle 179^\circ$
		B	$96 \angle -153^\circ$	$7899 \angle 59^\circ$
		C	$96 \angle 87^\circ$	$7899 \angle -61^\circ$
2	0,048 a 0,104	A	$742 \angle 19^\circ$	$7516 \angle -140^\circ$
		B	$742 \angle -101^\circ$	$7516 \angle 100^\circ$
		C	$712 \angle 139^\circ$	$7515 \angle -20^\circ$

Este caso é idêntico ao anterior apresentado em 5.2.1 se tratando de uma falta trifásica, com a exceção de ter a presença do terra na falta. É possível observar os valores de tensão e corrente registrados nas janelas de pré e pós falta na Tabela 5.9, em que houve um aumento na corrente das três fases e uma diminuição na tensão.

Figura 5.14 - GM03/ABCN026 – Avaliação pelo programa com o AG

Fonte: Próprio autor

No gráfico da Figura 5.14 é possível visualizar o instante de transição determinado pela rotina computacional com AG, em $t = 47,92$ [ms]. E que a transição real ocorreu no instante $t = 50$ [ms] com o aumento repentino do valor de corrente e uma alteração na fase do sinal.

Na Figura 5.15 é possível analisar o mesmo sinal obtido pela rotina computacional de detecção realizada com a TDF.

Observe que neste caso o instante de transição estimado está aproximadamente 3 [ms] adiantado em relação à transição real.

Figura 5.15 - GM03/ABCN026 - Avaliação pelo programa com a TDF

Fonte: Próprio autor

A ocorrência deste tipo de erro para a metodologia com TDF pode ser justificada a pelo período de transitório até que o sinal estabilize com a falta, que pode ser agravada com presença de componente exponencial amortecida, caso não tenha sido totalmente filtrada.

Para esta mesma avaliação foi inserida na Figura 5.16 o gráfico com o sinal obtido pelo programa com a transformada de *Park*. Neste gráfico, é possível verificar que o instante de transição estimado ocorreu aproximadamente 5 [ms] adiantado em relação ao início real da falta.

Figura 5.16 - GM03/ABCN026 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

Em todos os casos os algoritmos conseguiram determinar corretamente os instantes de transição, mas com uma imprecisão de 2 a 5 [ms].

5.2.3 Rede 0902 Caso BC001

Este caso se trata de um registro de oscilografia referente a uma falta dupla-fase, BC, ocorrida no instante $t = 50$ [ms]. São apresentados na sequência os detalhes do evento registrado e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos por meio da rotina computacional com a abordagem pelo AG.

É possível observar na Tabela 5.10 os valores de tensão e corrente registrados nas janelas de pré e pós falta.

Tabela 5.10 - 0902/BC001 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,000 a 0,049	A	$98 \angle -10^\circ$	$7856 \angle -158^\circ$
		B	$98 \angle -130^\circ$	$7856 \angle 82^\circ$
		C	$98 \angle 110^\circ$	$7856 \angle -38^\circ$
2	0,049 a 0,104	A	$98 \angle 23^\circ$	$7856 \angle -125^\circ$
		B	$471 \angle -78^\circ$	$7639 \angle 111^\circ$
		C	$462 \angle 114^\circ$	$7236 \angle -5^\circ$

Pode ser verificado o aumento na corrente nas fases B e C e uma diminuição na tensão das fases B e C.

A diferença da subtensão apresentada em cada fase está diretamente ligada aos valores de resistência de falta utilizados em cada caso.

No gráfico da Figura 5.17 é possível visualizar o instante de transição determinado pela rotina computacional com AG, no instante $t = 49,48$ [ms], com o aumento repentino do valor de corrente e uma alteração na fase do sinal.

Figura 5.17 - 0902/BC001 – Avaliação pelo programa com o AG

Fonte: Próprio autor

Na Figura 5.18 é possível analisar o mesmo sinal obtido pela rotina computacional de detecção realizada com a TDF. Observe que neste caso o instante de transição estimado está aproximadamente 2 [ms] adiantado em relação à transição real.

Figura 5.18 - 0902/BC001 - Avaliação pelo programa com a TDF

Fonte: Próprio autor

Para esta mesma avaliação foi inserida na Figura 5.19 o gráfico com o sinal obtido pelo programa com a transformada de *Park*. Neste gráfico, é possível verificar que o instante de transição estimado ocorreu 11 [ms] atrasado em relação ao início real da falta.

Figura 5.19 - 0902/BC001 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

Este atraso na determinação do instante de transição pela metodologia com a transformada de *Park*, pode ser visualizado com o gráfico de tensão representado na Figura 5.20 em que há a mínima variação na tensão que influencia diretamente na componente de sequência direta da transformada de *Park*.

Figura 5.20 - 0902/BC001 – Sinal de tensão V_{bn}

Fonte: Próprio autor

Neste caso, a variação de tensão ocorrida 11 [ms] após o instante real da falta ocasionou um erro na solução com a transformada de *Park*, sobrepondo-se aos outros instantes de transição próximos.

5.2.4 Rede GM03 Caso BCN012

Este caso representa o registro de oscilografia referente a uma falta dupla-fase terra, BCN, ocorrida no instante $t = 52$ [ms]. São apresentados na sequência os detalhes do evento registrado e os sinais de tensões e correntes obtidos por meio da rotina computacional com a abordagem pelo AG. É possível observar os valores de tensão e corrente registrados nas janelas de pré e pós falta na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - GM03/BCN012 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,000 a 0,050	A	96 $\angle$ -10°	7899 $\angle$ -158°
		B	96 $\angle$ -130°	7899 $\angle$ 82°
		C	96 $\angle$ 110°	7899 $\angle$ -38°
2	0,050 a 0,104	A	84 $\angle$ 36°	7788 $\angle$ -113°
		B	829 $\angle$ -82°	7515 $\angle$ 122°
		C	979 $\angle$ 134°	7091 $\angle$ 5°

Neste registro, houve um aumento na corrente nas fases B e C e uma diminuição na tensão das fases B e C.

No gráfico da Figura 5.21 é possível visualizar o instante de transição com o aumento repentino do valor de corrente e uma alteração na fase do sinal no instante $t = 52$ [ms].

Fonte: Próprio autor

Na Figura 5.22 é possível analisar o mesmo sinal obtido pela rotina computacional de detecção realizada com a TDF. Observe que neste caso o instante de transição estimado está aproximadamente 2,5 [ms] adiantado em relação à transição real.

Figura 5.22 - GM03/BCN012 - Avaliação pelo programa com a TDF

Fonte: Próprio autor

Para esta mesma avaliação foi inserida na Figura 5.23 o gráfico com o sinal obtido pelo programa com a transformada de *Park*. Neste gráfico, é possível verificar que o instante de transição estimado ocorreu 2,5 [ms] atrasado em relação ao início real da falta.

Figura 5.23 - GM03/BCN012 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

De maneira geral, todos os algoritmos obtiveram bons resultados nestes casos, na identificação dos instantes de falta.

5.2.5 Rede 0902 Caso AN055

Este registro de oscilografia é referente a uma falta monofásica, AN, ocorrida no instante $t = 58$ [ms]. São apresentados na sequência os detalhes do evento registrado e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos por meio da rotina computacional com a abordagem pelo AG. Na Tabela 5.12, é possível observar os valores de tensão e corrente registrados nas janelas de pré e pós falta na tabela, em que houve na fase A um aumento na corrente e diminuição na tensão.

Tabela 5.12 - 0902/AN055 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,000 a 0,056	A	98 $\angle$ 57°	7856 $\angle$ -91°
		B	98 $\angle$ -63°	7856 $\angle$ 149°
		C	98 $\angle$ 177°	7856 $\angle$ 29°
2	0,056 a 0,104	A	612 $\angle$ 90°	7332 $\angle$ -48°
		B	92 $\angle$ -11°	7732 $\angle$ -165°
		C	93 $\angle$ -145°	7825 $\angle$ 73°

No gráfico da Figura 5.24 é possível visualizar o instante de transição com o aumento repentino do valor de corrente e uma alteração na fase do sinal no instante $t = 58$ [ms] e que foi determinada transição 2 [ms] adiantado em relação à transição real.

Figura 5.24 - 0902/AN055 – Avaliação pelo programa com o AG

Fonte: Próprio autor

Na Figura 5.25 é possível analisar o mesmo sinal obtido pela rotina computacional de detecção realizada com a TDF.

Figura 5.25 - 0902/AN055 - Avaliação pelo programa com a TDF

Fonte: Próprio autor

Para esta mesma avaliação foi inserida na Figura 5.26 o gráfico com o sinal obtido pelo programa com a transformada de *Park*. Neste gráfico, é possível verificar que o instante de transição estimado ocorreu 4 [ms] adiantado em relação ao início real da falta.

Figura 5.26 - 0902/AN055 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

De maneira geral, todos os algoritmos obtiveram bons resultados nestes casos, na identificação dos instantes de falta.

5.3 RESULTADO DOS CASOS REAIS

Para avaliar o desempenho destes programas foram utilizados 38 casos provenientes de uma concessionária existente. Os sinais foram submetidos à avaliação pelos programas desenvolvidos e gerado um relatório final de cada caso.

As oscilografias obtidas contemplam os mais diversos tipos de falta, inclusive algumas com evolução do defeito, faltas de curta duração e períodos de transitórios. Os registros foram armazenados em formato COMTRADE e serviram para avaliar cada uma das rotinas computacionais elaboradas, por meio de um comparativo entre os resultados.

Na Tabela 5.13 é exibido um resumo para cada algoritmo com a informação dos tempos de instante de ocorrência da falta encontrados, bem como a classificação do tipo de falta.

Tabela 5.13 - Resultados obtidos para casos reais com evolução da falta.

Amostra avaliada			Fourier		AG		Park	
	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas
Identificação								
Caso 1030006	141,0 e 195,7	CA e ABC	142,10	CA	138,97 e 196,26	CA e ABCN	141,58 e 195,74	CA e ABCN
Caso 1030053	141,7 e 166,3	BN e BN	168,14	BN	162,93 e 169,7	BN	169,70	BN
Caso 1060054	117,0, 154,3 e 197,7	CN, BCN e ABCN	115,54, 156,16 e 198,35	CN, BCN e ABCN	116,06, 154,6 e 195,22	CN, BCN e ABCN	116,58, 157,72 e 195,22	CN, BCN e ABCN
Caso 1060072	136,7 e 141,3	BCN e BC	137,93	BC	136,37	BC	143,14	BC
Caso 1070014	131,7, 154,7 e 161	AB e ABN	130,64	AB	130,12	AB	135,33	AB
Caso 1070057	124,3 e 131,3	BCN e BC	128,04	BC	124,39	BC	123,84 e 128,56	BC
Caso 1100017	148,0 e 192,0	AB e ABN	150,43 e 167,62	AB	148,35 e 153,56	AB e ABN	148,87 e 155,12	AN e ABN

Foram separados os casos em que foram registrados evolução da falta, isto é, há uma ou mais transições adicionais que correspondem na alteração do tipo de falta. Um exemplo deste tipo de caso é na ocorrência de um curto fase-terra em um transformador de distribuição que pode se tornar uma falta dupla-fase terra com a deterioração da isolamento do equipamento.

É possível constatar que a presença do terra na falta não foi corretamente indicada em alguns dos casos apresentados. Isto ocorre devido a distorções do sinal, como presença de exponencial amortecida, e/ou ajustes dos limiares que determinam a presença de terra (valor limite de I_n ou I_0 em relação à I_1).

No geral, houve a correta determinação dos instantes de transição e das fases envolvidas, com exceção da identificação incorreta de circulação de corrente ao terra em alguns casos.

Na Tabela 5.14 são apresentados os casos de defeito temporário de curta duração em que há casos de ocorrência de faltas que duram menos que meio ciclo.

Tabela 5.14 - Resultados obtidos para casos reais com defeito temporário de curta duração

Amostra avaliada			Fourier		AG		Park	
Identificação	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas
Caso 1020068	120,3 e 138,0	AN	135,33	-	118,14 e 136,89	AN	120,22, 123,87 e 133,72	AN
Caso 1020093	138,7 e 149,3	CN	139,49 e 150,95	CN	138,97 e 147,83	CN	140,54 e 150,43	CN
Caso 1020111	129,3 e 141,7	AN	135,33	-	129,6 e 142,62	AN	130,12 e 140,54	AN
Caso 1030048	117,7 e 185,0	AN	119,7 e 184,81	AN	118,66 e 184,29	AN	117,1 e 181,16	AN
Caso 1040050	138,3 e 183,3	AN	135,85 e 175,95	AN	136,89 e 181,68	AN	141,06 e 184,29	AN
Caso 1060043	121,0 e 146,0	CAN	112,93, 135,35 e 146,79	CA	120,74 e 141,58	CA	123,87 e 142,62	CA
Caso 1070052	146,0 e 163,7	CN	147,31 e 165,01	CN	143,66 e 162,41	CN	144,7 e 160,33	CN
Caso 1120021	144,0 e 161,3	BN	149,39 e 161,89	BN	144,18, 148,87 e 156,16	BN	149,91 e 162,41	BN
Caso 1120041	126,0 e 142,7	BN	135,33	-	125,95, 132,2 e 141,06	BN	128,09 e 138,97	BN

Para defeitos de curta duração, a metodologia baseada na TDF, pode ficar comprometida caso a duração da falta seja inferior à janela de amostragem utilizada.

Isso pode ser observado nos casos 1020068, 1020111 e 1120041, em que o algoritmo baseado na TDF de meio ciclo não obteve sucesso ao determinar a duração do defeito, pois detectou apenas uma única transição. Com isso, foram posicionadas de forma errada as janelas de pré e pós-falta necessárias para a correta classificação da falta.

É possível perceber que a metodologia com AG, por possuir uma janela reduzida de 6,25 [ms] (3/8 de ciclo), foi capaz de determinar a duração destes eventos, alocando as janelas corretamente nos momentos de pré, durante e pós-falta.

É interessante notar que os eventos de curta duração são normalmente defeitos cuja extinção ocorre por meio da atuação de fusíveis, que possuem atuação mais rápida que circuitos protegidos por disjuntores ou religadores. Com relação aos resultados obtidos pela metodologia com a transformada de *Park*, pode-se perceber que também foi possível a detecção dos eventos de curta duração. Já que esta metodologia depende da variação da componente de eixo direto proveniente da transformada.

Já na Tabela 5.15 são apresentados os resultados obtidos pela análise automática de faltas permanentes no sistema. Foram obtidos resultados satisfatórios para a determinação do instante de transição, apenas divergindo em alguns casos no tipo de falta no que se refere à presença do terra no defeito.

Tabela 5.15 - Resultados obtidos para casos reais de defeito permanente no sistema

Amostra avaliada			Fourier		AG		Park	
Identificação	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas	Instante de transição [ms]	Tipo de falta e fases envolvidas
Caso 1020063	145,7	BN	147,83	BN	147,83	BN	144,7 e 150,43	BN
Caso 1030074	142	BC	143,66	BC	139,49	BC	145,74	BC
Caso 1030077	137,7	BC	139,49	BC	140,54 e 145,74	BC	141,58 e 145,74	BC
Caso 1030080	152,3	BC	153,56	BC	150,43	BC	154,60	BC
Caso 1040061	117,3	CN	119,18 e 135,33	CN	118,14 e 131,68	CN	124,39	CN
Caso 1040062	145	CAN	143,14	CAN	145,74 e 165,54	CAN	146,79	CAN
Caso 1060022	113,7	AB	116,58	AB	118,66	AB	118,66	AB
Caso 1060069	134,7	CN	136,37	CN	135,85 e 142,62	CN	136,89	CN
Caso 1070058	118,7	BC	121,26 e 135,33	BC	118,14 e 124,39	BC	118,14 e 122,31	BC
Caso 1080029	133,7	CN	135,33	CN	133,76	CN	133,24 e 137,41	CN
Caso 1080045	140	AN	142,10	AN	140,01 e 149,91	AN	140,54 e 147,31	AN
Caso 1100095	140	BC	141,06	BC	137,93	BC	143,14 e 146,79	BC
Caso 1100100	158	BN	158,76 e 178,04	BN	157,72	BN	160,33	BN
Caso 1100103	134	BN	135,33 e 145,74	BN	134,29 e 147,31	BN	136,89 e 146,26	BN
Caso 1110101	135,3	CN	123,87 e 133,76	CN	136,89	CN	134,81	CN
Caso 1110106	124,7	CN	126,99	CN	123,35	CN	124,91	CN
Caso 1120001	145	BCN	143,66 e 166,58	BC	144,70	BC	144,7 e 150,43	BC
Caso 1120010	144	BC	145,74 e 163,45	BC	144,18, 150,95 e 156,68	BC	148,35	BC
Caso 1120015	149,3	AN	147,83	AN	148,35	AN	149,39 e 154,6	AN
Caso 1120056	133,3	BCN	135,33	BC	133,76	BC	136,89	BC
Caso 1130084	134,7	ABN	136,37	AB	138,97 e 147,31	AB	137,41 e 144,7	AB
Caso 1130085	129,3	BN	133,76	BN	128,56	BN	130,12 e 135,33	BN

Para se comparar os resultados na determinação do instante de ocorrência da falta foram

analisadas visualmente todas as oscilografias para que fosse possível determinar todos os instantes reais de transição, tipos de falta e fases envolvidas. Essa informação foi inserida nas primeiras três colunas das Tabelas 5.13, 5.14 e 5.15 e utilizada para o comparativo presente na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Resumo da avaliação dos resultados para os 38 casos

Avaliação	Fourier	Algoritmo Genético	Transformada de Park
Média do erro [ms]	2,62	1,48	2,61
Variância	7,49	2,35	4,45
Máx. erro [ms]	11,43	6,76	9,70
Mín. erro [ms]	0,19	0,01	0,09

Nessa avaliação, a abordagem com o AG obteve os menores índices de erro, variância e erro máximo em comparação com as outras duas metodologias.

No item 5.1.2, a mesma análise foi realizada com o método de diferença de janelas e AG obteve erros maiores do que se comparado com a metodologia com TDF ou Park. Contudo, foi constatada uma melhora nos resultados do AG ao realizar a substituição do método de diferença de janelas pelo filtro da função de densidade de probabilidade.

Analisando-se os resultados do item 5.1.3, muitos dos instantes de transição obtidos pelo programa com a transformada de *Park* estavam atrasados em relação ao instante real. Pois os instantes de transição eram determinados pelo valor de pico do vetor $(c_{dif})^2$, entretanto foi observado que na realidade o distúrbio ocorria no início da formação do pico.

Assim, nesta nova análise dos casos reais essa premissa foi considerada, corrigindo então os instantes de transição.

Entretanto, uma desvantagem do AG neste processo é o seu alto custo computacional, com aproximadamente duas horas de processamento para cada caso. Embora cada solução provida pelo AG tenha uma duração de poucos segundos, o algoritmo necessita encontrar a solução para cada janela amostrada e, neste processo, é utilizado diversas vezes pelo filtro de

densidade de probabilidade.

Enquanto que para o algoritmo com a TDF ou com a transformada de *Park*, menos de 30 minutos foram necessários para a análise dos 38 casos.

O mesmo processo de análise foi realizado manualmente averiguando cada uma das oscilografias, para compor os valores reais dos instantes de transição apresentados. E para o registro de todos os tempos de transição e levantamento dos tipos de falta foram necessárias aproximadamente 4 horas de análise.

Nos próximos itens são apresentados alguns dos casos de maior relevância que expõem as vantagens e desvantagens de cada uma das rotinas computacionais elaboradas.

5.3.1 Caso 1020111

Este registro de oscilografia é referente a uma falta fase-terra, AN, no instante $t = 129,3$ [ms] até $t = 141,7$ [ms]. São apresentados na sequência os detalhes do evento ocorrido e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos pela rotina computacional com a abordagem pelo AG.

Pode-se perceber pela Tabela 5.17 o aumento expressivo da corrente na fase A indicado no intervalo 2, assim como a diminuição na tensão de mesma fase. E que após esse período de aproximadamente 13 [ms] indicado pelo programa, a corrente e tensão retornam aos seus valores nominais.

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,104 a 0,130	A	117 $\angle$ -40°	7703 $\angle$ -22°
		B	124 $\angle$ -153°	7698 $\angle$ -136°
		C	124 $\angle$ 92°	7700 $\angle$ 110°
2	0,130 a 0,143	A	1095 $\angle$ -2°	7282 $\angle$ 61°
		B	169 $\angle$ -52°	7853 $\angle$ -33°
		C	158 $\angle$ -166°	7565 $\angle$ -174°
3	0,143 a 0,208	A	120 $\angle$ -148°	7690 $\angle$ -128°
		B	123 $\angle$ 101°	7677 $\angle$ 118°
		C	123 $\angle$ -13°	7731 $\angle$ 4°

Pode-se verificar no gráfico da Figura 5.27 que o evento é de curta duração, mas que a rotina computacional com o AG foi capaz de determinar o início e fim da falta. A título de comparação, consta no mesmo gráfico o valor calculado do módulo pela TDF de um ciclo, pode-se observar que seu módulo está consideravelmente menor do que o valor de pico obtido na falta.

Mesmo com a TDF com uma janela de meio ciclo, o resultado obtido ainda ficou comprometido devido a curta duração da falta. Nesse caso em particular, pode-se observar na Figura 5.28 que há o agravante da distorção do sinal que pode ser observada durante a ocorrência da falta em que há uma oscilação de um pico de aproximadamente de 3800A para outro de -3000A em menos de 3,5 [ms]. O que compromete a TDF que está com a frequência fundamental ajustada para o sistema em 60[Hz].

Figura 5.27 - Caso 1020111 - Avaliação pelo programa com o AG

Fonte: Próprio autor

O reflexo desta distorção na forma de onda para a TFD de meio ciclo e de um ciclo pode ser observado no gráfico da Figura 5.28, em que o módulo obtido é significativamente menor do que o valor real do sinal. Pode-se observar também que este valor é ainda menor para a transformada com a janela de um ciclo.

Figura 5.28 - Caso 1020111 - Avaliação pelo programa com a TDF

Fonte: Próprio autor

Devido o evento ser de curta duração pode-se visualizar que não foi possível ao *software* com a TDF determinar o tempo de início e término da falta. Com isso, foram alocadas erroneamente as janelas para classificação do evento nos momentos em que já não existia mais o defeito, o que impossibilitou a correta classificação do defeito.

Já na Figura 5.29 foi possível detectar os instantes de transição corretamente pelo programa com a transformada de *Park*, já que não há a mesma restrição do tamanho da janela exemplificado para o programa baseado na TDF

Fonte: Próprio autor

De maneira geral, apenas o programa baseado exclusivamente na TDF para extração de atributos não conseguiu identificar corretamente o defeito. Contudo, foram obtidos resultados satisfatórios para as rotinas computacionais com AG e com a transformada de *Park*.

5.3.2 Caso 1030048

Este registro de oscilografia é referente a uma falta fase-terra, AN, com duração de 67,3 [ms]. São apresentados na sequência os detalhes do evento ocorrido e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos pela rotina computacional com a abordagem pelo AG.

Pode-se perceber pela Tabela 5.18 o aumento expressivo da corrente na fase A indicado no intervalo 2, assim como a diminuição na tensão de mesma fase. E que após esse período de aproximadamente 65 [ms] indicado pelo programa, a corrente e tensão retornam aos seus valores nominais.

Tabela 5.18 - Caso 1030048 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,104 a 0,119	A	217 $\angle$ -164°	7841 $\angle$ -138°
		B	212 $\angle$ 85°	7839 $\angle$ 106°
		C	227 $\angle$ -35°	7789 $\angle$ -8°
2	0,119 a 0,184	A	1706 $\angle$ -42°	6008 $\angle$ 18°
		B	248 $\angle$ -118°	7772 $\angle$ -91°
		C	248 $\angle$ 127°	7716 $\angle$ 155°
3	0,184 a 0,208	A	330 $\angle$ 130°	7605 $\angle$ 172°
		B	228 $\angle$ 32°	7819 $\angle$ 57°
		C	238 $\angle$ -85°	7757 $\angle$ -57°

Este caso é bastante semelhante ao apresentado no item 5.3.1, entretanto com uma maior duração do defeito.

Pode-se verificar no gráfico da Figura 5.30 que a rotina computacional com o AG foi capaz de determinar o início e final da falta.

Pode-se visualizar na Figura 5.31 que, neste caso, o método com a TDF conseguiu determinar os instantes de transição já que o defeito teve uma maior duração.

Na Figura 5.32 foi possível detectar os instantes de transição corretamente pelo programa com a transformada de *Park*, embora tenham sido determinados instantes de transições adicionais no início do defeito.

Figura 5.32 - Caso 1030048 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

Foram obtidos resultados satisfatórios para as rotinas computacionais analisadas.

5.3.3 Caso 1040050

Este registro de oscilografia é referente a uma falta fase-terra, AN, com duração de 45 [ms]. São apresentados na Tabela 5.19 os detalhes do evento ocorrido e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos pela rotina computacional com a abordagem pelo AG.

Tabela 5.19 - Caso 1040050 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,104 a 0,137	A	$178\angle 57^\circ$	$7643\angle 79^\circ$
		B	$180\angle -55^\circ$	$7712\angle -35^\circ$
		C	$183\angle -166^\circ$	$7700\angle -150^\circ$
2	0,137 a 0,182	A	$2313\angle -69^\circ$	$5604\angle -52^\circ$
		B	$186\angle -157^\circ$	$7375\angle -144^\circ$
		C	$199\angle 80^\circ$	$7521\angle 101^\circ$
3	0,182 a 0,208	A	$208\angle 147^\circ$	$7282\angle 173^\circ$
		B	$178\angle 40^\circ$	$7344\angle 61^\circ$
		C	$194\angle -72^\circ$	$7563\angle -54^\circ$

O evento apresentado na Tabela 5.19 possui um aumento expressivo da corrente na fase A indicado no intervalo 2, assim como a diminuição na tensão de mesma fase.

O defeito é apresentado na Figura 5.33 e apesar de temporário, possui uma duração de quase três ciclos. Provavelmente o curto-circuito foi apenas temporário, pode-se perceber que a corrente de carga permanece praticamente inalterada após a extinção do defeito.

Fonte: Próprio autor

Com uma duração maior, a janela de um ciclo da TDF foi suficiente para que o programa determinasse com sucesso o término do defeito, embora possa ser constatado na Figura 5.34 que o instante indicado está 3 [ms] adiantado. Entretanto, este atraso não prejudicou a correta classificação da falta.

Fonte: Próprio autor

Assim como os outros métodos, os resultados obtidos pelo programa com a transformada de *Park* também foram satisfatórios e estão representados na Figura 5.35.

Figura 5.35 - Caso 1040050 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

Como o defeito temporário possui uma duração acima de um ciclo, os programas obtiveram êxito na determinação dos instantes de transição, apenas apresentando um atraso no instante de extinção do defeito.

5.3.4 Caso 1080029

Este registro de oscilografia é referente a uma falta fase-terra, CN, no instante $t = 133,7$ [ms]. São apresentados na Tabela 5.20 os detalhes do evento ocorrido e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos pela rotina computacional com a abordagem pelo AG.

Tabela 5.20 - Caso 1080029 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,104 a 0,134	A	154 $\angle$ 28°	7697 $\angle$ 46°
		B	129 $\angle$ -83°	7622 $\angle$ -68°
		C	80 $\angle$ 169°	7745 $\angle$ 178°
2	0,134 a 0,208	A	176 $\angle$ -166°	7672 $\angle$ -150°
		B	143 $\angle$ 69°	7411 $\angle$ 96°
		C	3186 $\angle$ -87°	3357 $\angle$ -36°

É possível observar os valores de tensão e corrente registrados nas janelas de pré e pós falta na Tabela 5.20, em que houve um aumento na corrente na fase A e diminuição na tensão.

Ao contrário dos eventos apresentados anteriormente, esse evento é referente a um defeito permanente no sistema, sem a extinção do defeito até o final da amostra analisada.

É possível verificar a ocorrência do defeito pelo gráfico da Figura 5.36 em que há um aumento repentino no valor da corrente aproximadamente no instante $t = 133,7[\text{ms}]$.

Figura 5.36 - Caso 1080029 - Avaliação pelo programa com o AG

Fonte: Próprio autor

Da mesma forma, o programa baseado na TDF conseguiu determinar a transição, embora tenha sido 1,5 [ms] atrasado, conforme pode ser observado na Figura 5.37.

Figura 5.37 - Caso 1080029 - Avaliação pelo programa com a TDF

Fonte: Próprio autor

O programa baseado na transformada de *Park* também obteve êxito na determinação do instante de ocorrência da falta e seu resultado é apresentado na Figura 5.38. Embora duas transições tenham sido registradas, a transição adicional não interferiu no resultado final.

Figura 5.38 - Caso 1080029 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

De forma geral, os resultados não diferem muito em relação aos casos semelhantes analisados para oscilografias obtidas por meio de simulações no ATP.

5.3.5 Caso 1020063

Este registro de oscilografia é referente a uma falta fase-terra, BN, no instante $t = 145,7$ [ms]. São apresentados na Tabela 5.21 os detalhes do evento ocorrido e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos por meio da rotina computacional com a abordagem pelo AG.

Tabela 5.21 - Caso 1020063 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,104 a 0,147	A	$308 \angle 152^\circ$	$7806 \angle 170^\circ$
		B	$350 \angle 33^\circ$	$7542 \angle 57^\circ$
		C	$284 \angle -74^\circ$	$7796 \angle -58^\circ$
2	0,147 a 0,208	A	$370 \angle 8^\circ$	$7410 \angle 40^\circ$
		B	$2671 \angle -139^\circ$	$4516 \angle -84^\circ$
		C	$389 \angle 156^\circ$	$7768 \angle 170^\circ$

Na tabela é possível observar o acréscimo da corrente na fase B, juntamente com a subtensão na mesma fase.

Pode-se concluir através da Figura 5.39 que nesse caso foi determinado com êxito o instante de transição para a falta BN com aproximadamente 2 [ms] de atraso.

Figura 5.39 - Caso 1020063 - Avaliação pelo programa com o AG

Fonte: Próprio autor

Da mesma forma, na Figura 5.40 é possível visualizar que o instante de transição foi determinado pela metodologia com a TDF também com aproximadamente 2 [ms] de atraso.

Figura 5.40 - Caso 1020063 - Avaliação pelo programa com a TDF

Fonte: Próprio autor

O resultado determinado pela metodologia com a transformada de Park é representado na Figura 5.41.

Figura 5.41 - Caso 1020063 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

O programa com a transformada de *Park* obteve como resultado uma transição adicional, mas que não influenciou no resultado final.

5.3.6 Caso 1020068

Este registro de oscilografia é referente a uma falta fase-terra, AN, com duração de 17,7 [ms]. São apresentados na Tabela 5.22 os detalhes do evento ocorrido e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos por meio da rotina computacional com a abordagem pelo AG

Tabela 5.22 - Caso 1020068 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,104 a 0,118	A	168 $\angle$ -107°	7737 $\angle$ -93°
		B	139 $\angle$ 141°	7687 $\angle$ 152°
		C	157 $\angle$ 20°	7741 $\angle$ 38°
2	0,118 a 0,137	A	2132 $\angle$ 84°	5755 $\angle$ 119°
		B	187 $\angle$ 8°	7809 $\angle$ 17°
		C	177 $\angle$ -116°	7655 $\angle$ -96°
3	0,137 a 0,208	A	142 $\angle$ -148°	7771 $\angle$ -131°
		B	153 $\angle$ 97°	7698 $\angle$ 114°
		C	152 $\angle$ -16°	7750 $\angle$ 0°

A Tabela 5.22 apresenta mais um caso de defeito temporário no sistema, ocorrido no instante $t = 118$ [ms]. É possível visualizar a sobrecorrente no intervalo 2 da tabela, bem como a subtensão neste mesmo momento.

No gráfico da Figura 5.42 consta o resultado obtido pelo programa baseado no AG com a correta determinação dos instantes de início e término da falta apenas com um pequeno erro de 2 [ms]. Pode-se observar também o posicionamento correto da janela para obtenção dos valores de pré e pós-falta.

O mesmo sinal avaliado pelo programa baseado na TDF se encontra representado na Figura 5.43. Pode-se perceber que o programa não foi capaz de determinar corretamente os instantes de início e final do defeito, o que comprometeu o resultado obtido.

O algoritmo baseado na transformada de *Park* também obteve bons resultados, embora tenha

sido definida uma transição adicional, devido à distorção do sinal. Na Figura 5.44 é possível perceber esta transição, mas que não afeta o posicionamento das janelas.

Figura 5.44 - Caso 1020068 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

É importante lembrar que metodologia que utiliza a transformada de *Park* analisa a componente de eixo direto do sinal de tensão para a determinação dos instantes de transição. Ao contrário das outras metodologias abordadas que fazem a análise com cada um dos sinais de corrente.

5.3.7 Caso 1030006

Registro de oscilografia referente a uma falta dupla-fase, CA evoluindo para ABC, com início em $t = 141$ [ms]. São apresentados na Tabela 5.23 os detalhes do evento ocorrido e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos pela rotina computacional com a abordagem pelo AG.

Tabela 5.23 - Caso 1030006 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,104 a 0,139	A	205 $\angle$ -69°	7921 $\angle$ -42°
		B	221 $\angle$ -178°	7923 $\angle$ -157°
		C	211 $\angle$ 62°	7839 $\angle$ 89°
2	0,139 a 0,196	A	2008 $\angle$ 26°	5294 $\angle$ 129°
		B	271 $\angle$ -17°	7785 $\angle$ 4°
		C	2198 $\angle$ -149°	5898 $\angle$ -127°
3	0,196 a 0,208	A	1867 $\angle$ 128°	4836 $\angle$ -179°
		B	2608 $\angle$ 31°	4749 $\angle$ 66°
		C	2926 $\angle$ -105°	4646 $\angle$ -46°

Na Tabela 5.23 são apresentados três intervalos decorrentes de dois instantes de transição definidos pelo programa. O primeiro no instante $t = 139$ [ms] e o outro no instante $t = 196$ [ms]

Na primeira transição há o aumento da corrente nas fases A e C, representando um curto CA. Pode-se observar também uma subtensão nas fases envolvidas.

Na segunda transição há a evolução dessa falta com participação da fase B, ocorrendo uma subtensão nas três fases do sistema.

A análise deste sinal pode ser feita pela Figura 5.45 obtida pelo programa com a abordagem pelo AG.

Figura 5.45 - Caso 1030006 - Avaliação pelo programa com o AG

Fonte: Próprio autor

Na Figura 5.46 e 5.47 é possível observar que os mesmos instantes de transição foram determinados pelo programa baseado na TDF e transformada de *Park*, respectivamente.

Figura 5.46 - Caso 1030006 - Avaliação pelo programa com a TDF

Fonte: Próprio autor

Figura 5.47 - Caso 1030006 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

As três rotinas computacionais elaboradas obtiveram com sucesso a determinação dos instantes de transição, possibilitando o correto posicionamento da janela para a extração do atributo. Contudo no método com a transformada de *Park*, foi registrado uma transição adicional, ocasionada pela distorção do sinal resultante da pré-filtragem da componente aperiódica do sinal.

5.3.8 Caso 1060054

Registro de oscilografia referente à evolução de uma falta inicial monofásica CN, para dupla-fase terra BCN e por último trifásica à terra ABCN com início em $t = 117$ [ms]. São apresentados na Tabela 5.24 os detalhes do evento ocorrido e os sinais de tensões, correntes, potência ativas e reativas, obtidos por meio da rotina computacional com a abordagem pelo AG.

Tabela 5.24 - Caso 1060054 - Medições efetuadas nos intervalos entre transição

Intervalo entre transições	Tempo [s]	Fase	Corrente de linha [A]	Tensão de fase [V]
1	0,104 a 0,116	A	327 $\angle$ 147°	7819 $\angle$ 164°
		B	305 $\angle$ 34°	7814 $\angle$ 49°
		C	303 $\angle$ -85°	7702 $\angle$ -64°
2	0,116 a 0,155	A	445 $\angle$ 91°	7765 $\angle$ 99°
		B	323 $\angle$ -50°	7381 $\angle$ -17°
		C	4939 $\angle$ 157°	1231 $\angle$ -163°
3	0,155 a 0,195	A	353 $\angle$ -124°	7533 $\angle$ -100°
		B	5093 $\angle$ 75°	1443 $\angle$ 75°
		C	4822 $\angle$ -48°	941 $\angle$ 43°
4	0,195 a 0,208	A	7092 $\angle$ -74°	977 $\angle$ -63°
		B	5639 $\angle$ 150°	412 $\angle$ -86°
		C	5506 $\angle$ 51°	647 $\angle$ 63°

É possível verificar na Tabela 5.24 a evolução da falta em cada intervalo apresentado. Segundo o programa, o evento iniciou no instante $t = 116$ [ms] com um curto-circuito na fase C, evoluiu para uma falta dupla-fase terra BCN no instante $t = 155$ [ms] e passou então para uma falta trifásica à terra no instante $t = 195$ [ms].

Nos gráficos a seguir representados nas Figuras 5.48, 5.49 e 5.50 são apresentados respectivamente as fases A, B e C do sinal. Nestes gráficos é possível visualizar a evolução do defeito com a participação de uma nova fase a cada instante de transição encontrado.

Também é possível observar o posicionamento das janelas em cada um dos intervalos o que é crucial para a correta classificação da falta.

Figura 5.48 - Caso 1060054 – Fase A - Avaliação pelo programa com o AG

Fonte: Próprio autor

Figura 5.49 - Caso 1060054 – Fase B - Avaliação pelo programa com o AG

Fonte: Próprio autor

Como a duração de cada intervalo foi superior a dois ciclos, não houve problemas para o programa baseado na TDF determinar os instantes de transição envolvidos, conforme pode ser visualizado na Figura 5.51. Embora haja um instante de transição adicional de corrente de uma distorção do sinal na fase Ic onde ainda foi possível observar a componente exponencial no sinal.

No caso da transformada de *Park*, não foi constatado maiores problemas para a determinação do instante de transição, conforme pode ser visualizado na Figura 5.52.

Figura 5.52 - Caso 1060054 - Avaliação pelo programa com a Transformada de Park

Fonte: Próprio autor

Foram apresentados neste capítulo os principais resultados obtidos através dos testes parciais e completos de cada rotina computacional. E no próximo capítulo, são apresentados um resumo dos pareceres dos resultados obtidos, bem como a conclusão final do trabalho.

6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou o comparativo entre algoritmos para a análise automática de faltas em sistemas elétricos de potência, com a abordagem de diferentes tipos de metodologia, algumas mais convencionais como o método de diferença de janelas com a extração dos atributos pela TDF, outras menos convencionais, com a utilização do AG ou com a análise da componente direta da transformada de *Park*.

Para a realização da análise de cada uma dessas metodologias, foram realizadas simulações no ATP/EMTP de duas redes de distribuição reais de uma concessionária a fim de validar a aplicabilidade deste software, o que permitiu a comparação dos resultados obtidos dos simulados.

Para complementar os resultados, foram avaliadas também oscilografias de casos reais de concessionárias brasileiras.

Foram realizados vários testes parciais dos algoritmos para se comparar a TDF e a aproximação realizada pelo AG e foi demonstrada a sua vantagem à resposta de sinais com componente exponencial amortecida. Avaliou-se também a forma de aproximação realizada pelo AG para a determinação da janela a ser utilizada no processo, com essa análise, foram obtidos resultados satisfatórios com janelas de no mínimo $3/8$ de ciclo, o que é um valor reduzido se comparado à TDF.

Também foi avaliado o programa com a transformada de *Park*, que monitora a diferença entre elementos sucessivos da componente de eixo direto obtido pela transformada. E após a realização dos testes, conclui-se que esta abordagem oferece resultados satisfatórios para a determinação dos instantes de transição.

Desta forma, foram analisadas três rotinas computacionais distintas: a primeira baseada na TDF, a segunda no AG e a última na transformada de *Park*.

Pode-se concluir que o método utilizando a TDF, por utilizar uma janela de dados maior, resulta em erros para a identificação e classificação de defeitos de curta duração menor que um ciclo. Esse problema pode ser resolvido com a substituição da TDF pelo AG que possui uma janela reduzida, mas com a desvantagem deste último possuir um alto custo computacional.

O mesmo problema dos defeitos de curta duração foi solucionado com a abordagem que faz uso da transformada de *Park* que apenas utiliza a diferença de duas amostras da componente de eixo direto para a determinação do instante de transição. Entretanto, essa solução foi a que apresentou um maior erro e variância em relação às outras abordagens. Esse erro, no entanto, não comprometeu os resultados obtidos para a classificação da falta. Com os resultados das avaliações, é possível apresentar as vantagens e desvantagens de cada método, na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Vantagens e desvantagens

Abordagem utilizada	Algoritmo Genético	Transformada de Fourier	Transformada de Park
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza janela com apenas 3/8 de ciclo do sinal; - Reconhece e remove a componente exponencial amortecida para determinação do instante de transição; 	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo de processamento reduzido; 	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo de processamento reduzido; - Utiliza apenas a variação de 2 amostras, obtida da componente de eixo direto do sinal; - Não necessita analisar os 3 sinais de corrente, para determinação dos instantes de transição
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo de processamento elevado; - Suscetível a ruídos no sinal; - Necessita reamostragem do sinal para garantir o número mínimo de amostras na janela 	<ul style="list-style-type: none"> - Perda de transições sucessivas (menor que um ciclo do sinal), como em faltas de curta duração; - Suscetível à componente exponencial amortecida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor precisão na determinação dos instantes de falta; - Em alguns casos, houve perda de transições no caso de evolução da falta devido a distorção no sinal de tensão.

Desta forma, é possível concluir que a aplicação do AG, embora tenha obtido os menores índices de erro e variância, possui um alto custo computacional que pode inviabilizar o seu uso dependendo da quantidade de oscilografias a serem analisadas e número total de amostras, mesmo considerando a aplicação para uma análise posterior do sinal, ou seja, não realizada em tempo real.

Enquanto que a transformada de *Park* se apresentou como uma metodologia viável a ser utilizada, com uma perda na exatidão na determinação dos instantes de transição, mas que é aceitável para o propósito do programa.

REFERÊNCIAS

- ABIYEV, A.N. A new digital signal processing based approach for evaluation of reactive power and energy in power distribution systems, innovations in information technology. In: IIT '07. 4th International **Conference** ..., p.426-430, 18-20 Nov. 2007
- ALSAFASFEH, Q.; ABDEL-QADER, I.; HARB, A. Symmetrical Pattern and PCA Based Framework for Fault Detection and Classification in Power Systems, Electro/Information Technology (EIT). In: IEEE International **Conference** ... , p.1-5, 20-22 May 2010
- BAKAR, N.A.; MOHAMED, A.; ISMAIL, M. A case study of voltage sag analysis in a utility distribution system. In: Power Engineering Conference, 2003. PECon 2003. **Proceedings National**, p. 333- 336, 15-16 Dec. 2003
- BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y. H.; AXELBERG, P. G. V.; STYVAKTAKIS, E. Classification of underlying causes of power quality disturbances: deterministic versus statistical methods, EURASIP. **Journal on Advances in Signal Processing**, Article ID 79747, p. 1-17, 2007
- DAS, B. Fuzzy logic-based fault-type identification in unbalanced radial power distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n.1, Jan. 2006
- DWIVEDI, U. D.; SHAKYA, D.; SINGH, S. N. Power quality monitoring and analysis: an overview and key issues. **International Journal of System Signal Control and Engineering Application**, p.74-88, 2008
- FAN, W.; LIAO, Y.; Automated analysis of voltage and current waveforms during faults. In: **44th IEEE Southeastern symposium on system theory**, March 11-13, 2012
- GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989
- HUNG, H. L.; YANG, M. S. A homomorphic techniques for power systems and transient signal processing, In: **Proceedings of the IEEE International Symposium** , v.3, p.1278-1283 v.3, 1999
- IEC 61000-2-5 ed2.0, **Electromagnetic compatibility (EMC)** – Part 2-5: Environment – Description and classification of electromagnetic environments, 2011
- IEC 61000-4-15 ed2.0, **Electromagnetic compatibility (EMC)** – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and designs specifications, 2010
- IEEE Std 1159-2009, **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**, 2009

IEEE Std C37.111-1999, **IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE)** for Power Systems, 1999

IURINIC, L. U. **Diagnóstico de faltas em sistemas de subtransmissão: uma formulação baseada na transformada Wavelet contínua**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2012

JUAREZ, E. E.; HERNANDEZ A. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems, **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.21, n.3, p.1493-1500, July 2006

KANG, S.; ZHANG, H.; KANG, Y. Application of signal processing and neural network for transient waveform recognition in power system, In: **Control and Decision Conference ...**, p.2481-2484, 26-28 May 2010

KEZUNOVIC, M.; FROMEN, C. W. An Expert System for Transmission Substation Event Analysis, **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n.4, p. 1942-1949 Oct. 1993

KEZUNOVIC, M.; LIU, C.; MCDONALD, J. R.; SMITH, L. **IEEE Tutorial on Automated Fault Analysis**, Jul. 2001

KIESSLING, G.; SCHWABE, S. Software solution for fault record analysis in power transmission and distribution, **Developments in Power System Protection**, In: **IEEE International Conference ...**, v.1, p. 192- 195, 2004

LOPES, F. V.; SANTOS, W. C.; FERNANDES JR.; D.; NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A. An Adaptative Fault Location Method for Smart Distribution and Transmission Grids, 2011. **IEEE** 978-1-4577-1801-4/11

MANASSERO JR.; G.; SENGHER, E. C.; NAKAGOMI, R. M.; PELLINI, E. L.; RODRIGUES, E. C. N. Fault-Location System for Multiterminal Transmission Lines, 2010. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n.03, 2010.

MANASSERO JR.; G.; PELLINI, E. L.; SENGHER, E. C. Proposal of a new sensitive ground overcurrent protection for high impedance faults, 2012

MANASSERO JR.; YOSHIDA, E. S.; SENGHER, E. C., PELLINI, E. L.; KOEHLER, M. Automated digital fault recording analysis system, 2013. In: 22nd International **Conference** on Electricity Distribution (CIRED), 0931, June 2013

MANMEK, T.; MUDANNAYAKE, C.P. Real-time power signal processing system for distorted and unbalanced conditions, Part 1: Theoretical feasibility, **Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**, In: **International Conference ...** p.1113-1117, 2010

MANMEK, THIP; MUDANNAYAKE, CHATHURA P. Real-time power signal processing system for distorted and unbalanced conditions, Part 2: Simulation Results, Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), In: International **Conference** ..., p.1118-1122, 2010

NAKAGOMI R. M. **Proposição de um sistema para simulação de faltas de alta impedância em redes de distribuição**, 2006. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 2006.

NORTHCOTE-GREEN, J.; WILSON, R. **Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems**, Boca Raton, FL, Taylor & Francis Group, 2007.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Submódulo 2.8** - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes, 2010.

PEREIRA, C. E. M. **Localizadores digitais de falta em linha de transmissão**, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999

RODRIGUES, M. A. M.; ZIMATH, S. L.; ARRUDA, G. A. G; SALLES, N. J.; RODRIGUES, E. C. N.; RAMOS, M. A. F.; GABINO, M. L. C.; SALVATORE, M. F.; GIOVANINI, R. Novas tendências para análise automática de faltas e distúrbios em sistemas de potência. In: X SPTC **Seminário técnico** de proteção e controle, Recife-PE, out. 2010.

SARKAR, A.; SENGUPTA, S. A Novel Digital Signal Processing Algorithm for On-line Assessment of Power System Frequency, Power Electronics, Drives and Energy Systems. PEDES '06. In: International **Conference** ..., p.1-6, 12-15, 2006

SAXENA, D.; VERMA, K. S.; SINGH, S. N. Power Quality event classification: an overview and key issues, **International Journal of Engineering, Science and technology** v. 2, n. 3, p. 186-199, 2010

SENGER, E. C.; SANTANA, N. N. Pré-filtragem da componente aperiódica exponencial para os algoritmos utilizados em relés de distância, In: VI **Seminário** técnico de Proteção e controle – VI SPTC, 1998.

SENGER, E. C. et al. Algoritmo para classificação do tipo de falta e seleção de fases. Relatório EPUSP/SEG, 2011

SILVA, R. P. M. **Algoritmos genéticos aplicados à estimação fasorial em sistemas elétricos de potência**, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, 2012

VEGA, V.; KAGAN, N.; ORDOÑEZ, G. ; DUARTE, C. Automatic power quality disturbance classification using wavelet, support vector machine and artificial neural network, In: 20th CIRED International **Conference** on Electricity Distribution Paper 1020, Praga, 8-11 June, 2009

YANG, J. Z.; LIU, C. L. A new algorithm for power system signal processing, In: **Power Engineering Society General Meeting**. IEEE , p. 358- 361 v.1, 6-10 2004

ANEXO

ARQUIVO DE ENTRADA DO ATP

ARQUIVO ABC002.ATP DA REDE 0902

BEGIN NEW DATA CASE

C -----

C ARQUIVO DE SIMULACAO GERADO POR ATPWT.EXE - VERSAO 1.5 (01/11/2004)

C CRIADO EM: MON AUG 08 12:50:26 2011

C PROGRAMACAO: GIOVANNI MANASSERO JR GIOMANJR@PEA.USP.BR

C RENATO M. NAKAGOMI RMIKIO@PEA.USP.BR

C EDUARDO C. SENDER SENDER@PEA.USP.BR

C EDUARDO L. PELLINI EPELLINI@PEA.USP.BR

C -----

C UNIVERSIDADE DE SAO PAULO - EPUSP

C WWW.PEA.USP.BR

C -----

\$PREFIX, C:\ATPDRAW\ATP\LIB

\$SUFFIX, .LIB

\$DUMMY, XYZ000

C -----

C MISCELLANEOUS DATA CARD

C 1 2 3 4 5 6 7 8

C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C DELT >< TMAX >< XOPT >< COPT >< EPSILN >< TOLMAT >< TSTART >

1.302E-51.660E-160.00000 1.00E-12

C IOUT >< IPLOT >< IDOUBL >< KSSOUT >< MAXOUT >< IPUN >< MEMSAV >< ICAT

>< NERERG >< IPRSUP >

10 10 0 1 0 0 0 1 0

C -----

C ESCRITA DA MODELS PARA O TIPO DE FALTA

C -----

/BRANCH

C -----

C < N 1 >< N 2 > < R >< X >< C >< LENG >

C THEVENIN EQUIVALENTE NA BARRA

51DJA X0010A 5.7E-1

52DJB X0010B 4.0E-11.5242

53DJC X0010C

C -----

C DADOS DOS TRECHOS DO ALIMENTADOR

C < N 1>< N 2>	< R >< X >< C >< LENG>
51X0010AX0015A	2.0E-7 2.0000E-7
52X0010BX0015B	2.0E-7 2.0000E-7
53X0010CX0015C	
C	
51X0015AX0020A	5.0E-2 4.8796E-2
52X0015BX0020B	5.0E-2 4.8796E-2
53X0015CX0020C	
C	
51X0020AX0025A	1.4E-7 1.4142E-7
52X0020BX0025B	1.4E-7 1.4142E-7
53X0020CX0025C	
C	
51X0025AX0030A	1.3E-3 6.7247E-3
52X0025BX0030B	7.2E-4 1.4516E-3
53X0025CX0030C	
C	
51X0030AX0035A	2.2E-2 1.1377E-1
52X0030BX0035B	1.2E-2 2.4560E-2
53X0030CX0035C	
C	
51X0035AX0040A	6.5E-2 3.2733E-1
52X0035BX0040B	3.5E-2 7.0658E-2
53X0035CX0040C	
C	
51X0040AX0045A	9.3E-2 4.7001E-1
52X0040BX0045B	5.1E-2 1.0146E-1
53X0040CX0045C	
C	
51X0040AX0050A	1.2E-2 1.3959E-2
52X0040BX0050B	1.1E-2 3.4316E-3
53X0040CX0050C	
C	
51X0045AX0055A	2.5E-2 1.2685E-1
52X0045BX0055B	1.4E-2 2.7383E-2
53X0045CX0055C	
C	
51X0055AX0060A	2.2E-2 1.1004E-1

(...) CONTINUAÇÃO DO ARQUIVO A PARTIR DA LINHA 4605

C -----

C DADOS DAS CARGAS DO ALIMENTADOR

C < N 1>< N 2> < R >< X >< C ><LENG>

C TRANSFORMADOR: PA-4217/0112 -> POTENCIA: 12386 (TRIFASICO)

X0050AX0050B 3.92E42.43E4

X0050BX0050C 3.92E42.43E4

X0050CX0050A 3.92E42.43E4

C

C TRANSFORMADOR: DP-2697/0045 -> POTENCIA: 4976 (TRIFASICO)

X0080AX0080B 9.76E46.05E4

X0080BX0080C 9.76E46.05E4

X0080CX0080A 9.76E46.05E4

C

C TRANSFORMADOR: DP-0123/0045 -> POTENCIA: 4976 (TRIFASICO)

X5725AX5725B 9.76E46.05E4

X5725BX5725C 9.76E46.05E4

X5725CX5725A 9.76E46.05E4

C

C TRANSFORMADOR: DP-1075/0112 -> POTENCIA: 12386 (TRIFASICO)

X5740AX5740B 3.92E42.43E4

X5740BX5740C 3.92E42.43E4

X5740CX5740A 3.92E42.43E4

C

C TRANSFORMADOR: DP-0298/0075 -> POTENCIA: 8294 (TRIFASICO)

X5760AX5760B 5.85E43.63E4

X5760BX5760C 5.85E43.63E4

X5760CX5760A 5.85E43.63E4

C

C TRANSFORMADOR: DP-4784/0075 -> POTENCIA: 8294 (TRIFASICO)

X0145AX0145B 5.85E43.63E4

X0145BX0145C 5.85E43.63E4

X0145CX0145A 5.85E43.63E4

C

C TRANSFORMADOR: DP-0716/0075 -> POTENCIA: 8294 (TRIFASICO)

X0130AX0130B 5.85E43.63E4

X0130BX0130C 5.85E43.63E4

X0130CX0130A 5.85E43.63E4

(...) CONTINUAÇÃO DO ARQUIVO A PARTIR DA LINHA 6963

C -----

C FALTA BRANCH

C -----

```

C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C < N 1>< N 2><REF1><REF2>< R >      <LENG>
CCSWCAFSWA      5.0E-1      1
CCSWCBFSWB      5.0E-1      1
CCSWCCFSWC      5.0E-1      1
RFN      5.0E-5      1
C -----
/SWITCH
C CHAVE DE MEDICAO NA SAIDA DA BARRA DA SE
C < N 1>< N 2>< TCLOSE >< TOPEN >
DJA FTA      -1.      10.      1
DJB FTB      -1.      10.      1
DJC FTC      -1.      10.      1
C SWITCHES DE FALTAS (NORMAIS OU HZ)
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C < N 1>< N 2>< TCLOSE >< TOPEN >
X2765ACCSWCA      -1.000  10.000      0
CCSWCANOCCA      -1.000  10.000      0
FSWA FSWN      5.2E-2  10.000      0
X2765BCCSWCB      -1.000  10.000      0
CCSWCBNOCCB      -1.000  10.000      0
FSWB FSWN      5.2E-2  10.000      0
X2765CCCSWCC      -1.000  10.000      0
CCSWCCNOCCC      -1.000  10.000      0
FSWC FSWN      5.2E-2  10.000      0
FSWN RFN      10.000  -1.000      0
C -----
C PROBES DE MEDICAO DE CORRENTE
C -----
/SOURCE
C TENSÃO NA BARRA DA SUBESTACAO
C < N 1><>< AMPL. >< FREQ. ><PHASE/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FTA  1.12677E4      60.  0.00E0      -1.      10.
14FTB  1.12677E4      60.  -1.2E2      -1.      10.
14FTC  1.12677E4      60.  1.20E2      -1.      10.
C -----
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
X0010AX0010BX0010C

```

CCSWCACCSWCBCCSWCC

BLANK OUTPUT

BLANK PLOT

BEGIN NEW DATA CASE

BLANK