

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Ângelo Felipe Sartori

**DETECÇÃO DE FALTAS ENTRE ESPIRAS EM GERADORES
SÍNCRONOS DE FASE DIVIDIDA: UMA ABORDAGEM BASEADA NA
MORFOLOGIA MATEMÁTICA**

Ângelo Felipe Sartori

**DETECÇÃO DE FALTAS ENTRE ESPIRAS EM GERADORES SÍNCRONOS DE FASE
DIVIDIDA: UMA ABORDAGEM BASEADA NA MORFOLOGIA MATEMÁTICA**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título **de Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Dr. Adriano Peres de Moraes

Ficha gerada com os dados fornecidos pelo autor

Sartori, Ângelo Felipe

Detecção de Falhas entre Espiras em Geradores de Fase Dividida: Uma Abordagem Baseada na Morfologia Matemática / Ângelo Felipe Sartori. 2021.

126p.30cm

Orientador: Adriano Peres de Moraes

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Santa Maria, RS, 2020.

1. Proteção de Geradores Síncronos, 2. Falhas entre espiras, 3. Morfologia Matemática. Sartori, Ângelo Felipe.



Este trabalho está licenciado pela Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0
This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0

Ângelo Felipe Sartori

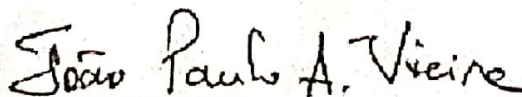
**DETECÇÃO DE FALTAS ENTRE ESPIRAS EM GERADORES SÍNCRONOS DE FASE
DIVIDIDA: UMA ABORDAGEM BASEADA NA MORFOLOGIA MATEMÁTICA**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 15 de janeiro de 2021:



Adriano Peres de Moraes, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



João Paulo Abreu Vieira (UFPA) - Videoconferência



Aécio de Lima Oliveira (UFSM) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

Aos meus familiares, em especial à minha esposa Priscila Scheffler Panazzolo Sartori por toda compreensão e ausência que tive neste momento de dedicação, pelo apoio, incentivo e encorajamento para os momentos difíceis desta etapa da vida. Aos meus pais Ivanir Jorge Sartori e Sueli Oldete Sartori que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade. Que iluminaram os caminhos obscuros com afeto e dedicação para que os trilhasse sem medo e cheio de esperanças. Doaram-se por inteiros e renunciaram aos seus sonhos, para que, muitas vezes, pudesse realizar os meus. Procuo arduamente uma forma verbal de exprimir uma emoção. Uma emoção que jamais seria traduzida por palavra. Amo vocês e dedico-lhes essa conquista em agradecimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem o dom da vida e saúde, jamais poderia realizar este trabalho e ter encontrado pessoas tão importantes que cruzaram e permanecem em minha vida.

Minha gratidão especial ao professor Adriano Peres de Moraes, orientador desta dissertação e, sobretudo, pela pessoa e profissional que é. Obrigado pela dedicação, que muitas vezes deixou de lado os momentos de descanso para me atender. E, principalmente, pela oportunidade e ter depositado sua confiança no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Ghendy Cardoso Junior, Gustavo Marchesan e Luiz Gutierrez pelas excelentes contribuições para o desenvolvimento e enriquecimento deste trabalho.

Aos professores Aécio de Lima Oliveira e João Paulo Abreu Vieira pelo aceite na composição da Banca, pelas correções e contribuições ao trabalho.

Ao Instituto Federal Farroupilha – *campus* Panambi pela oportunidade de qualificação, aos colegas que sempre incentivam à qualificação e sempre que necessário estavam disponíveis para ajudar ou trocar horários de aula durante esse período que necessitei.

Ao Programa Institucional de Incentivo à Qualificação Profissional dos servidores do IFFar (PIIQP) pelo suporte financeiro.

À Universidade Federal de Santa Maria por ter proporcionado um ensino de qualidade e gratuito.

À minha esposa Priscila, aos meus pais Ivanir e Sueli e aos meus irmãos (Júlio, Ricardo, Rodrigo e Guilherme) que sempre torceram por mim.

À Marcela Trindade e ao François Ainsley da OPAL-RT pelos suportes prestados e pelo profissionalismo nos atendimentos.

Não poderia esquecer um sincero agradecimento a todos os colegas, servidores e professores do PPGEE que contribuíram de modo tão substancial para a esta etapa, pelo tempo despendido e através da hospitalidade com que me acolheram durante este período. Foram dois anos de uma vivência em que participei, atuei, aprendi com pessoas que se mostraram disponíveis para partilhar comigo um pouco das suas experiências.

*“Se você não puder se destacar pelo talento,
vença pelo esforço.” Dave Weinbaum.*

RESUMO

DETECÇÃO DE FALTAS ENTRE ESPIRAS EM GERADORES DE FASE DIVIDIDA: UMA ABORDAGEM BASEADA EM MORFOLOGIA MATEMÁTICA

AUTOR: Ângelo Felipe Sartori
ORIENTADOR: Adriano Peres de Moraes

O estator do Gerador Síncrono é susceptível a diversos tipos de falhas, curtos-circuitos e condições anormais de operação. Entre os defeitos, podemos citar as faltas monofásicas, bifásicas, trifásicas e entre espiras. Esta última, em muitos casos é a origem de outras faltas mais graves. A proteção de Geradores Síncronos contra faltas entre espiras ainda é pouco explorada ao que tange os relés de proteções e a estudos científicos. A grande maioria das proteções encontradas é aplicada em Geradores com dois ou três enrolamentos paralelos por fase. À medida que a quantidade de enrolamentos por fase aumenta, se torna mais difícil a detecção deste tipo de defeito. Dessa forma, este trabalho irá apresentar uma metodologia inédita para detecção de faltas entres espiras para geradores síncronos de fase dividida de seis enrolamentos paralelos por fase, fundamentado em Morfologia Matemática. Está técnica permite trabalhar com os sinais no domínio do tempo, utilizando o sensoriamento já existente na máquina utilizado nas proteções atuais. De forma a verificar a confiabilidade do método desenvolvido foram realizados diversos testes em cenários de faltas entre espiras em geradores síncronos, sinais com ruídos, variação de carga e ângulo de incidência de falta, além de faltas externas ao gerador. Dois modelos de máquina foram usados, um com dois enrolamentos por fase de polos lisos e outro com seis enrolamentos por fase de polos salientes. Visando avaliar a possibilidade em aplicações reais, alguns testes foram simulados em tempo real utilizando o conceito software-in-the-loop. O simulador digital em tempo real utilizado foi o da empresa OPAL-RT. Para finalizar a etapa de teste, além de uma comparação com diversos esquemas tradicionalmente utilizados na proteção contra faltas entre espiras, o método foi submetido a uma oscilografia de uma falta entre espiras real. Além de uma oscilografia de um caso real e por fim, a utilização de diversas faltas externas que teve como finalidade verificar a capacidade de atuação frente a elas. Durante o trabalho, serão apresentadas as teorias que tangem as ferramentas matemáticas utilizadas, as características do modelo do GS, além das etapas realizadas para a construção do filtro morfológico a fim de permitir total identificação dos passos realizados. Por fim, se apresentará os resultados obtidos do método desenvolvido, além de uma comparação entre um método existente de uma proteção para geradores de dois enrolamentos por fase adaptado em um gerador de seis enrolamentos por fase. Assim, pode-se perceber que o algoritmo demonstrou bons resultados frente a diversas condições e cenários de faltas.

Palavras-chave: Proteção de Geradores Síncronos, Faltas entre espiras, Morfologia Matemática.

ABSTRACT

A MORPHOLOGICAL APPROACH FOR TURN-TO-TURN FAULT DETECTION IN SYNCHRONOUS SPLIT-PHASE GENERATORS

AUTHOR: Ângelo Felipe Sartori
ADVISOR: Adriano Peres de Moraes

The stator of Synchronous Generator is susceptible to different types of failures, short circuits and abnormal operating conditions. Among the defects, we can mention the single-phase, two-phase, three-phase faults and turn-to-turn. This last one, in many cases, is the reason of other more serious faults. Synchronous Generator Protection against turn-to-turn faults is not well explored. The majority of the protections methods found are applied to generators with two or three parallel windings per phase. As the number of windings per phase increases, it becomes more difficult to detect this type of defect. Thus, this work presents a cutting-edge methodology for detecting turn-to-turn fault split phase synchronous generators, based on Mathematical Morphology. This technique allows to work with the signals in the time domain, using the existing current and potential transformer on the machine. In order to verify the reliability of the developed method, several tests were carried out, including turn-to-turn faults in synchronous generators, signals with noise, load variation and different fault inception angle and external faults to the generator. Two used machine models, one cylindrical pole with two windings per phase and another salient pole with six windings per phase. To assess the possibility in real applications, some tests were simulated in real time using the concept software-in-the-loop. The real-time digital simulator used was MODELO DO SIMULAODOR from OPAL-RT. To finish the test stage, a comparative analysis, between several traditional schemes and the proposed one was made. Besides, the methodology was tested for a real case of turn-to-turn fault. While traditional protection schemes can detect faults between turns up to XX%, the developed method detects failures with small winding suppression, regardless of the machine model and loading. In addition, the proposed methodology uses known electrical quantities, that is, it requires only one current and potential transformer per phase.

Keywords: Protection of Synchronous Generators, Faults between turns, Mathematical Morphology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Enrolamentos do estator.	28
Figura 2.2 – Enrolamentos do estator com seis enrolamentos por fase.....	30
Figura 2.3 – Correntes do terminal para GS com seis enrolamentos por fase e falta entre espiras (a) com 50% de supressão (b) com 10% de supressão.....	31
Figura 2.4 – Correntes do Terminal do GS com dois enrolamentos por fase, 110MVA de carregamento e 50% de supressão.....	31
Figura 2.5 – Correntes dos enrolamentos do GS de seis enrolamentos por fase e carregamento de 110MVA(a) 50% de supressão (b) 10% de supressão.....	32
Figura 2.6 – Correntes dos enrolamentos do GS de seis enrolamentos por fase e carregamento de 110MVA e 10% de supressão.....	32
Figura 2.7 – Correntes dos enrolamentos (GS de 2E, C30 e S50%).....	33
Figura 2.8 – Corrente de neutro.....	34
Figura 2.9 – Proteção diferencial (ANSI 87).....	34
Figura 2.10 – Corrente iat e ian.....	35
Figura 2.11 – Tensão do terminal do GS de seis enrolamentos, carregamento de 110MVA (a) 50% de supressão (b) 80% de supressão.....	35
Figura 2.12 – Espectro da frequência.....	36
Figura 2.13 – Proteção diferencial.....	37
Figura 2.14 – Método de sobretensão de desequilíbrio de sequência zero (59N).....	38
Figura 2.15 – Elemento de proteção de falha entre espiras 60SF para geradores síncronos....	39
Figura 2.16 – Magnitude de I2 versus magnitude de IF.....	40
Figura 3.1 – Função f	43
Figura 3.2 – Função f dilatada.....	44
Figura 3.3 – Função f erodida.....	46
Figura 3.4 – Função f , dilatação (f) e erosão(f).....	46
Figura 3.5 – Função f , dilatação (f) e fechamento (f).....	47
Figura 3.6 – Função f , erosão (f) e abertura (f).....	48
Figura 4.1 – Sistema Desenvolvido.....	49
Figura 4.2 – Corrente e Tensão Normalizada.....	51
Figura 4.3 – Resultado do filtro $ACOF_k$ em cada fase.....	53
Figura 4.4 – Filtro $ACOF$	53
Figura 4.5 – Resultado do filtro CLO_k em cada fase.....	55
Figura 4.6 – Filtro CLO para uma falta entre espiras ao GS.....	55
Figura 4.7 – Detalhe da saída do Filtro CLO para falta trifásica externa ao GS. (a) CLO_A (b) CLO_B (c) CLO_C (d) CLO_{ABC}	56
Figura 4.8 – SE do filtro $ACOF_{F120}$	57
Figura 4.9 – Saída do filtro $ACOF_{120}$ e $ACOF_{ABC}$ (a)falta entre espiras (b)falta trifásica 100km de distância.....	58
Figura 4.10 – Determinação de TH_{ACOF}	59
Figura 4.11 – Determinação de TH_{CLO}	60
Figura 4.12 – Fluxograma do algoritmo.....	61
Figura 5.1 – Tela de trabalho do HYPERSIM.....	63
Figura 5.2 – Simulador Digital em Tempo Real utilizado, modelo OP5707.....	64
Figura 5.3 – Sistema Teste.....	67
Figura 5.4 – SyncMac.....	68
Figura 5.5 – GS com dois enrolamentos por fase.....	69
Figura 5.6 – GS com seis enrolamentos por fase.....	69

Figura 5.7 – Configuração das faltas externas.....	70
Figura 5.8 – Ângulo de disparo.	71
Figura 5.9 – Ruído de 50dB.	72
Figura 6.1– Resposta dos filtros para o Caso 3 (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC}	74
Figura 6.2 – Resposta dos filtros para o Caso 6(a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC}	75
Figura 6.3 – Representação do filtro MM do Caso 14 (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{ABC}$ e $ACOF_{120}$	77
Figura 6.4 – Representação do filtro MM do Caso 23 (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC}	78
Figura 6.5 – GS com carregamento de 110MVA, 10% de supressão do enrolamento e com de ruído 50dB (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{120}$	81
Figura 6.6 – GS com carregamento de 110MVA, 1% de supressão do enrolamento e com de ruído 50dB (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC}	81
Figura 6.7 – Resultados dos Casos 56 ao 63 (a) $ACOF_{ABC}$ (b) $ACOF_{ABC}$	84
Figura 6.8 – Resultados sem ruído 1% supressão	85
Figura 6.9 – Variação da carga	86
Figura 6.10 – Saída do filtro para uma variação de carga	86
Figura 6.11 – Faltas externas (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC}	88
Figura 6.12 – Falta externa obtida do osciloscópio(a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC}	89
Figura 6.13 – Caso 180(a) $ACOF_{ABC}$, (b) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{120}$ e $ACOF_{ABC}$	90
Figura 6.14 – Sinais de corrente e tensão do terminal (a) corrente do terminal e (b) tensão do terminal.....	91
Figura 6.15– Caso real(a) $ACOF_{ABC}$, (b) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{120}$ e $ACOF_{ABC}$	92
Figura 6.16 – Configurações da Simulação.....	93
Figura 6.17 – Resultado do Caso 177 para simulação em tempo real (a) saída do filtro $ACOF_{ABC}$ (b) saída do filtro CLO_{ABC} (c) $ACOF_{ABC}$ e $ACOF_{120}$	94
Figura 6.18 – Sinal do osciloscópio da corrente IAT sem falta e com falta.	94
Figura 6.19 – Sinal do osciloscópio para uma falta 50% de supressão com seis enrolamentos por fase (a) $ACOF_{ABC}$ (B) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{ABC}$ e $ACOF_{120}$	95
Figura 7.1 – Fluxograma do algoritmo teste.....	98
Figura 7.2 – Esquema 1.	99
Figura 7.3 – Correntes nos enrolamentos e terminal com 70% de supressão do enrolamento e 110MVA de carga.	102
Figura 7.4 – Correntes diferenciais do Caso 16.	102
Figura 7.5 – Esquema 2	103
Figura 7.6 – Correntes nos enrolamentos e terminal com 70% de supressão do enrolamento e 110MVA de carga.	104
Figura 7.7 – Correntes diferenciais do caso 10.	105
Figura 7.8 – Esquema 3	106
Figura 7.9 – Corrente terminal x Corrente IA(k) com 5% de supressão do enrolamento.	108
Figura 7.10 – Corrente diferencial IA(k) do caso 19.....	108
Figura 7.11 – Esquema 4	109
Figura 7.12 – Corrente terminal x Corrente IA(k) com 2% de supressão do enrolamento com 30% de carregamento.	110
Figura 7.13 – Corrente diferencial IA(k) caso 22.....	110
Figura 7.14 – Esquema 5	111
Figura 7.15 – Corrente diferencial IA(k) do caso 15.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Resumo Geral da revisão da literatura.	25
Tabela 2.1 – Geradores e suas condições de proteção contra falta entre espiras.	29
Tabela 5.1 - Equivalência de ângulo x tempo.	72
Tabela 6.1 - Resultados de condição sem falta.	73
Tabela 6.2 – Resultados do método desenvolvido para casos de faltas entre espiras do GS de 6 enrolamentos por fase.	75
Tabela 6.3 – Resultados do método desenvolvido para casos de faltas do GS de 2 enrolamentos por fase.	79
Tabela 6.4 – Comparativo das faltas entre espiras do GS de 6 enrolamentos por fase.	79
Tabela 6.5 – Comparativo das faltas entre espiras do GS de 2 enrolamentos por fase.	82
Tabela 6.6 – Resposta do método para casos de variação do ângulo de início da falta entre espiras.	83
Tabela 6.7 – Variação do ângulo de início da falta entre espiras.	84
Tabela 6.8 – Casos com variação da carga.	86
Tabela 6.9 – Resultados da falta externa.	87
Tabela 6.10 – Resultados da falta externa distante 100 km.	89
Tabela 6.11 – Resposta do método proposto para simulações em SIL.	93
Tabela 7.1 – Resultados do Esquema 1 para GS de 6 enrolamentos por fase.	99
Tabela 7.2 – Resultados do Esquema 1 para GS de 2 enrolamentos por fase.	100
Tabela 7.3 – Resultados do Esquema 2 para GS de 6 enrolamentos por fase.	103
Tabela 7.4 – Resultados do Esquema 3 para GS de 6 enrolamentos por fase.	106
Tabela 7.5 – Resultados do Esquema 4 para GS de 6 enrolamentos por fase.	109
Tabela 7.6 – Resultados do Esquema 5 para GS de 6 enrolamentos por fase.	111
Tabela 7.7 – Resultados do Esquema 5 para GS de 2 enrolamentos por fase.	112
Tabela 7.8 – Resultados do Esquema 5 para GS de 6 enrolamentos por fase.	115
Tabela 7.9 – Resultados do Esquema 5 para GS de 2 enrolamentos por fase.	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2E	Dois Enrolamentos
6E	Seis Enrolamentos
59G	Proteção de sobretensão de terra
59N	Proteção de sobretensão de neutro
60SF	Proteção de balanço de corrente Estator/Campo
87	Proteção Diferencial
87SF	Proteção Diferencial do Elemento Estator/Campo
A	Ampère
ACOF	Average Close Open Filter
AWGN	Additive White Gaussian Noise
C30	30% de carga
CN	Carga Nominal
CC	Corrente Contínua
dc	DirectCurrent
dq0	Eixo da Quadratura
FFT	Fast Fourier Transform
GS	Geradores Síncronos
I2	Componente de Sequência Negativa
IF	Magnitude da Corrente de Dupla Frequência do Campo
iat	Corrente instantânea do terminal da fase A
Ia1	Corrente instantânea do enrolamento A1
Ia2	Corrente instantânea do enrolamento A2
Ia3	Corrente instantânea do enrolamento A3
Ia4	Corrente instantânea do enrolamento A4
Ia5	Corrente instantânea do enrolamento A5
Ia6	Corrente instantânea do enrolamento A6
In	Corrente instantânea do neutro.
IAT	Corrente normalizada
VAT	Tensão normalizada
LDA	Linear discriminant analysis
MM	Morfologia Matemática
SE	Elemento Estruturante

SIL	Software-in-the-Loop
SMWF	Synchronous machine winding fault
SP	Split Phase
TC	Transformador de Corrente
TH	Thereshold
TP	Transformador de Potencial
UCM	UserCustomModels
V	Volt
Vd	Tensão de eixo direto
Vq	Tensão de eixo de quadratura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	17
1.2	OBJETIVO	18
1.2.1	Objetivos Gerais	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	MOTIVAÇÃO	18
1.4	REVISÃO DA LITERATURA	19
1.4.1	Proteção em Motores	20
1.4.2	Proteção em Geradores Síncronos	21
1.5	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	26
2	FALTAS ENTRE ESPIRAS	27
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	27
2.2	FALTAS INTERNAS NOS GERADORES SÍNCRONOS	27
2.3	CARACTERIZAÇÃO DAS FALTAS ENTRE ESPIRAS	29
2.3.1	Corrente nos terminais do GS durante a falta entre espiras	30
2.3.2	Corrente dos Enrolamentos	31
2.3.3	Corrente do Neutro	33
2.3.4	Corrente do Lado Neutro	34
2.3.5	Tensão nos Terminais	35
2.3.6	Harmônicas	36
2.4	MÉTODOS COMERCIAIS PARA DETECÇÃO	36
2.4.1	Método 1	36
2.4.2	Método 2	37
2.4.3	Método 3	38
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
3	MORFOLOGIA MATEMÁTICA	41
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	41
3.2	INTRODUÇÃO À MORFOLOGIA MATEMÁTICA	41
3.3	OPERAÇÕES MORFOLÓGICAS	41
3.3.1	Elemento Estruturante (SE)	42
3.3.2	Dilatação	42
3.3.3	Erosão	44
3.3.4	Fechamento	46
3.3.5	Abertura	47
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
4	METODOLOGIA PROPOSTA	49
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	49
4.2	VISÃO GERAL DA METODOLOGIA	49
4.3	AQUISIÇÃO E NORMALIZAÇÃO DOS SINAIS	50
4.4	PROCESSAMENTO DOS SINAIS ATRAVÉS DE FILTROS MORFOLÓGICOS	51
4.4.1	Filtro MM para corrente ($ACOF_{ABC}$)	51
4.4.2	Filtro MM para tensão (CLO_{ABC})	54
4.4.3	Filtro MM para corrente em 120 Hz ($ACOF_{120}$)	57
4.5	DETERMINAÇÃO DO <i>THRESHOLD</i> (<i>TH</i>)	58
4.5.1	<i>Threshold</i> para $ACOF_{ABC}$ (TH_{ACOF})	59

4.5.2	<i>Threshold</i> para CLO_{ABC} (TH_{CLO}).....	59
4.6	LÓGICA DE DISPARO.....	60
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DE ANÁLISE	62
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	62
5.2	HYPERSIM.....	62
5.3	VISÃO GERAL DO MODELO DE MÁQUINA SÍNCRONA	64
5.4	SISTEMA TESTE.....	67
5.4.1	GS com Dois Enrolamentos por Fase.....	68
5.4.2	GS com Seis Enrolamentos por Fase	69
5.5	FALTAS ENTRE ESPIRAS.....	69
5.6	FALTAS EXTERNAS NA SAÍDA DO GERADOR.....	70
5.7	FALTA EXTERNA DISTANTES 100KM	71
5.8	ÂNGULO DE INÍCIO DA FALTA ENTRE ESPIRAS.....	71
5.9	RUÍDO DE GAUSSIAN BRANCO ADITIVO.....	72
5.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	73
6.2	CONDIÇÃO SEM FALTA	73
6.3	FALTAS ENTRE ESPIRAS SEM RUÍDO	75
6.4	FALTAS ENTRE ESPIRAS COM RUÍDO	79
6.5	EFEITO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA FALTA	82
6.6	VARIAÇÃO DA CARGA	85
6.7	FALTAS EXTERNAS NA SAÍDA DO GERADOR	87
6.8	FALTAS EXTERNAS DISTANTES 100 KM	89
6.9	CASO REAL - OSCILOGRAFIA	90
6.10	SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL.....	92
6.11	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
7	ANÁLISE COMPARATIVA.....	97
7.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	97
7.2	MÉTODO DE FINNEY.....	97
7.2.1	Esquema 1	98
7.2.2	Esquema 2	102
7.2.3	Esquema 3	106
7.2.4	Esquema 4	108
7.2.5	Esquema 5	111
7.3	ANÁLISE COMPARATIVA COM O MÉTODO DESENVOLVIDO.....	113
7.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
8	CONCLUSÃO.....	118
8.1	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	119
9	REFERÊNCIAS	120
10	ANEXO A –DADOS DOS GSS	123

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A demanda de energia elétrica tem crescido significativamente nas últimas décadas. De acordo com o Anuário Estatístico da Empresa de Pesquisa Energética, de 1995 até 2019 houve um crescimento de 200% do consumo de energia elétrica no Brasil. No setor comercial foi onde teve o maior crescimento, 285%, seguindo pelo setor industrial 220%, enquanto no setor residencial teve um aumento de 150%. A região Sudeste é onde se concentra quase 50% de todo o consumo de energia elétrica em território Nacional. Diante desse cenário, a tendência para as próximas décadas é um aumento seguindo os períodos anteriores.

Produzir energia elétrica será um desafio para os próximos tempos. Há um aumento significativo na produção de energia fotovoltaica, contudo, por meios tradicionais (eólica, hidrelétrica, termoelétrica) ainda prevalecerá em nosso sistema elétrico. Dentro dos meios de produção de energia elétrica, o uso de geradores síncronos (GS) ainda é a forma mais utilizada, ou seja, é a máquina mais aplicada para produzir energia elétrica em usinas. Sua construção ainda é muito susceptível a desgastes e danos devido ao seu uso e as condições que são submetidos ao longo de sua vida útil.

De forma a proteger o GS contra curtos-circuitos e condições anormais de operação, há uma grande variedade de funções de proteção. Na proteção dos enrolamentos do estator, podemos citar: proteção diferencial (função ANSI 87), sobrecorrente de neutro (função 50N/51N) e fase (função 51/51), sobretensão de fase (função 59) e de neutro (função 59N), subtensão de terceiro harmônico (função 27T), proteção de sequência negativa (função 59Q), etc (REIMERT, 2006).

Entre os defeitos que podem ocorrer no estator do GS, que carecem de esquema de proteção mais eficientes, têm-se os curtos-circuitos, ou faltas, entre espiras. Este tipo de defeito é muito recorrente e origem de algumas faltas mais graves e danosas, como, por exemplo, curtos-circuitos monofásicos ou entre fases. A falta entre espiras pode ser compreendida como a supressão de uma determinada porcentagem do enrolamento do estator ou ramo de uma única fase (OPAL-RT, 2019a). Para esse tipo de defeito, os esquemas de proteção são limitados, pois esta falta não gera diferenças de corrente entre os transformadores de corrente (TC), normalmente instalados ao do lado do terminal e do “fechamento” da estrela

(lado neutro), além da corrente de neutro e tensão do terminal também permanecerem praticamente inalteradas.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivos Gerais

Abordar do tema proteção contra faltas entre espiras em GS é detectar faltas entre espiras em GS de fase dividida aplicando a Morfologia Matemática, sendo imune a atuações externas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Esta dissertação tem como objetivos específicos:

- Abordar os assuntos relacionados aos geradores síncronos, com ênfase na falta entre espiras, bem como, sobre as proteções empregadas;
- Prover informações a respeito das faltas entre espiras ao que tange as suas características, transitórios e comportamento frente à variação do carregamento da máquina, quantidade de ramos paralelos dos enrolamentos de cada fase e ângulo de incidência da falta;
- Reunir diversas técnicas de proteções contra as faltas entre espiras em único documento a fim de facilitar o seu entendimento;
- Desenvolver método de proteção contra faltas entre espiras em GS fundamentado em Morfologia Matemática;
- Avaliar qualitativamente e quantitativamente o método proposto e diversas técnicas de proteção contra faltas entre espiras para GS síncronos de fase dividida;
- Avaliar a performance do método proposto quando executado em simulação digital em tempo real.

1.3 MOTIVAÇÃO

Os GS são amplamente utilizados nos sistemas de geração de energia elétrica. A sua proteção é algo inevitável, seja por condições regulatórias ou de operação. Atualmente os relés de proteção de geradores são constituídos por diversas funções de proteção para às

falhas internas, seja no enrolamento do estator, do rotor, do circuito do campo, ou condições operacionais não ideais, como, desequilíbrio, motorização, etc.

Uma proteção pouco explorada é a contra faltas entre espiras. Há diversos estudos ao que tange a caracterização, no entanto, a maioria não possui condições de realizá-las na prática, seja pela metodologia proposta exigir uma condição invasiva à máquina ou pelas condições construtivas da máquina ou método não se aplicar facilmente.

Uma falha onde exija a interrupção do fornecimento de energia elétrica no Sistema Elétrico de Potência, além de gerar uma reorganização para o despacho de energia elétrica, gera prejuízos para usina, desde multas pela indisponibilidade de fornecimento, além dos custos de uma máquina parada e manutenção. Agilizar o tempo de conserto de uma máquina defeituosa é fundamental. Porém, mais importante que isso é proteger o gerador para os mais diferentes tipos de faltas é algo que deve ser levado em consideração, principalmente, aquelas que podem evoluir para defeitos potencialmente mais destrutivos, como é o caso da falta entre espiras.

A dificuldade de detecção de faltas entre espiras aumenta quando o número de enrolamentos paralelos (ramos) de cada fase aumenta. Dessa forma, propor medidas de detecção não invasivas de faltas entre espiras com potencial de implementação em relés de proteção de geradores, permitiria um avanço no rol de funções ANSI.

A fim de solucionar de uma forma simples e rápida a Morfologia Matemática (MM) tem grande potencial visto que é uma metodologia que atua no domínio do tempo e possui cálculos simples que não exigem grandes processamentos computacionais. Por ser uma proposta relativamente nova, a MM ainda é pouco explorada no contexto de proteção de sistemas elétricos e na aplicação para proteção contra faltas entre espiras em geradores síncronos sua aplicabilidade é inexistente. Dessa forma, permite-se ter uma abordagem inédita.

1.4 REVISÃO DA LITERATURA

Os trabalhos sobre os métodos de proteção contra faltas entre espiras foram divididos em duas subseções, sendo uma destinada a motores e outra destinada a geradores síncronos. As características da falta entre espiras são muito similares nos dois tipos de máquina, podendo as técnicas utilizadas em motores serem aplicadas em geradores e vice-versa. A apresentação da literatura é explanada de forma cronológica a fim de entender a evolução das técnicas.

1.4.1 Proteção em Motores

Curvas de *Lissajous*, também conhecida por *Lissajous figure* é uma metodologia que quando aplicada, apresenta um padrão nos sinais plotados. Essa técnica foi empregada por Eftekhari et al., (2014) para a modelagem de um motor de indução com falha entre espiras. A estratégia consiste em identificar um padrão elíptico da corrente trifásica no espaço 3D. O método permite detectar a fase defeituosa e sua gravidade em qualquer condição de torque de carga, além de não necessitar conhecer os parâmetros da máquina e de instalação de sensores adicionais.

Por outro lado, Cintron-rivera; Foste; Strangas, (2015) buscam amenizar os efeitos das falta entre espiras em motores. Na apresentação do método para aliviar os efeitos produzidos pela falta, a técnica consiste em um enfraquecimento do campo magnético em velocidades abaixo da nominal. Isso proporciona a detecção e estimação da falta em seus estágios iniciais, a fim de maximizar a vida útil do motor. A eficácia foi validada por meio de elementos finitos e através de resultados experimentais. Porém, nessa abordagem as condições de aplicação do motor necessitam ser readequadas, como modificação da velocidade e potência.

No trabalho de Yagami et al., (2015) são propostos dois métodos de diagnóstico para detectar a falta entre espiras que são baseados no *Support Vector Machine*. O primeiro deles utiliza a magnitude e fase das correntes de carga quando operando em velocidade fixa. O método demonstrou-se eficaz em ocorrências de pequenas falhas. Já o segundo método apenas a magnitude da corrente de carga é tratada para o diagnóstico. A escolha do método mais apropriado depende do objetivo que busca analisar. A proposta não analisa situações com variação de carga.

Haddad; Strangas, (2016) analisam a assinatura da corrente e tensão do motor por uma metodologia denominada *linear discriminant analysis (LDA)*. A proposta permite detectar o *status* da máquina seja ela saudável ou com falha, além de determinar o tipo e severidade da falha. A metodologia é baseada na análise bidimensional de elementos finitos que tem a finalidade de modelar e simular a máquina em condições de falhas e por meio das características dos harmônicos dos sinais de tensão e corrente para utilizar como recursos na LDA. A validação da proposta ocorreu em dois tipos de motores, 16 e 12 polos.

Uma abordagem mais prática, Mirzaeva; Saad, (2018) permitem o diagnóstico precoce de faltas entre espiras nos enrolamentos do estator. O sistema de monitoramento em tempo real possibilita detectar, localizar e quantificar as faltas com precisão e sensibilidade. Um

detalhe interessante é a possibilidade de identificação em um estágio incipiente. A metodologia da técnica baseia-se na medição da densidade de fluxo no entreferro do motor. Os autores desenvolveram e comissionaram um sistema de diagnóstico de falhas *on-line* baseado no sistema *Compact-RIO* (processamento em tempo real da *National Instrument*).

Por fim, Wang et al., (2019) utiliza as redes neurais para diagnosticar as faltas entre espiras. O sistema é baseado em duas propostas: *deep auto-encoder* e *soft-maxclassifier*. O sistema de diagnóstico proposto consegue mapear os sinais de corrente do motor trifásico pré-processados para um vetor bidimensional. O treinamento da rede neural ocorreu de forma sistemática e apresentou desempenho melhor em comparação com *auto-encoder* tradicionais. Uma desvantagem da metodologia e da rede neural é seu treinamento *off-line* do sinal de corrente pré-processado do motor em determinada velocidade e carga.

1.4.2 Proteção em Geradores Síncronos

A proteção contra faltas entre espiras é pouco explorada quando comparada com as demais proteções de GS. Este fato pode ser justificado pela dificuldade na modelagem do GS para simular este tipo de defeito, por ser de difícil detecção e por, na maioria das vezes, evoluírem para outros tipos de falta e assim sendo detectadas por outras funções de proteção. A literatura apresenta algumas recomendações e métodos para mitigar as faltas entre espiras que é baseado em atuações invasivas ao GS, outras menos. Além dos métodos tradicionais de proteção de faltas entre espiras, com a utilização de TCs atuando em análises diferenciais, também há estudos sobre a caracterização das harmônicas nas faltas entre espiras, até metodologias fundamentadas em inteligência artificial, *Fuzzy* e algoritmos computacionais mais elaborados que exigem um poder computacional muito elevado.

Wang Xiangheng, Wang Weijian, (2000) utilizou o método *Multi Loop* para calcular as faltas internas, dentre elas a entre espiras. O modelo matemático é reduzido a equações diferenciais com variante temporal. São apresentadas duas metodologias denominadas de proteção diferencial longitudinal e proteção diferencial transversal de elemento único que se mostrou ser mais atraente devido à sua alta sensibilidade e simplicidade. Seguindo a mesma proposta, Mingji et al., (2011) fundamentou seu trabalho na mesma metodologia *Multi Loop* da proposta anterior. O autor fez um comparativo entre as metodologias a fim de chegar a algumas conclusões: a proteção diferencial transversal demonstrou-se ser eficaz para qualquer tipo de falta interna além de uma alta sensibilidade. Porém, em ocorrência de um curto-

circuito em dois ramos da mesma falta a sensibilidade é reduzida drasticamente. Já a proteção longitudinal demonstrou não ser eficiente para faltas entre espiras.

Em IEEE, (2006) é apresentada a função 59N para detectar a falta entre espiras. Metodologias semelhantes são propostas por Karthik; Raju, (2012) e Redondo; Platero; Gyftakis, (2017) onde o critério é baseado no monitoramento das componentes de sequência negativa das tensões, pois na ocorrência de uma falta entre espiras causa um desequilíbrio nas tensões de fase do gerador.

Finney et al., (2008) propõe algumas configurações de utilização de TCs nos ramos dos enrolamentos da fase. A metodologia apresentada consiste na corrente diferencial entre as correntes dos enrolamentos, sendo em operação normal essa diferencial tender a zero. Em ocorrência da falta, surge uma corrente diferencial. O mesmo é realizado entre o enrolamento paralelo e pela corrente do terminal. A metodologia é apresentada para GS constituídos de dois enrolamentos por fase. À medida que a quantidade de ramos paralelos aumenta a detecção se torna ainda mais difícil, além da dificuldade de acomodar os TCs dentro do gerador.

Na proposta de Fang; Xia, (2009), a abordagem ocorre com a utilização da *Fuzzy Neural Network* para detectar falta entre espiras, além de permitir a classificação e identificação. A abordagem ocorre pela segunda harmônica da corrente de campo extraída pela técnica *Fast Fourier Transform (FFT)*, além das componentes de sequência negativa das correntes e tensões. A desvantagem dessa metodologia é a necessidade de treinamento *off-line* para diversos cenários de falta entre espiras.

Em Neti; Nandi, (2009) observaram que as harmônicas de campo podem caracterizar uma assinatura das faltas entre espiras. No trabalho, os autores puderam detectar que há um aumento uniforme em alguns harmônicos com maior incidência nos harmônicos pares. A metodologia permite detectar as faltas com pouca supressão dos enrolamentos. O estudo direcionou-se em investigar a origem de vários componentes harmônicos gerados no campo durante a falta.

O trabalho de Sinha; Vishwakarma; Srivastava, (2010) tem como objetivo um modelo de proteção para estimar as faltas internas no estator de grandes GS. O modelo é baseado em uma abordagem denominada de *modified winding function approach*, onde as indutâncias são calculadas a partir da distribuição dos enrolamentos na máquina, além dos harmônicos produzidos pela falta.

Outra metodologia muito abordada pela literatura pesquisada pode-se citar Nadarajan et al., (2015) que realiza uma modelagem híbrida do GS utilizando os componentes

combinados de $dq0e$ a abordagem com a função do enrolamento. A finalidade é obter precisão e reduzir a complexidade do modelo do gerador. Além da abordagem de *the winding function approach* que consiste em calcular a indutância considerando a distribuição real dos enrolamentos, esta metodologia permite determinar com precisão as harmônicas presentes nas tensões induzidas pela falta entre espiras. A utilização dos componentes $dq0$ tem sido uma abordagem muito recorrente na literatura.

De forma semelhante à anterior, o método proposto por Haddad et al., (2017), em ocorrência de falta, identificam a alteração das tensões dos eixos q e d que são afetadas pela distribuição da densidade de fluxo, que por consequência, aumenta e desloca a tensão de eixo direto (V_d) e quadratura (V_q). Os efeitos da variação na velocidade e temperatura de operação foram utilizados para validar o método de detecção sob diferentes condições de operação. Conforme o autor, a velocidade e temperatura mudam com frequência durante a operação. Em velocidades altas a V_q tende a diminuir devido a ondulação da tensão e a temperatura afeta as tensões da máquina, além da resistência do estator e do fluxo remanescente do campo.

Kasztenny et al., (2016) utiliza um princípio diferenciado para caracterizar as faltas entre espiras baseadas no equilíbrio amperes-espiras entre a corrente de sequência negativa do estator e o componente de dupla frequência que surge na corrente de campo. A metodologia utiliza conceitos de proteção diferencial percentual através da relação associada ao desequilíbrio das correntes do rotor-estator durante uma falta entre espiras. A metodologia, que foi recentemente disponibilizada comercialmente pelo fabricante *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc*, demonstrou-se bastante efetiva. No entanto, a relação diferencial entre o estator e o campo possui valores diferentes para os diferentes tipos de GS, não sendo abordada a metodologia para determinação dessa relação.

Uma abordagem menos convencional é a proposta de Jiang et al., (2018) que propôs uma técnica para que o gerador tolere uma falta entre espiras sem trazer prejuízos à máquina. Na metodologia proposta, a falta é analisada pelos elementos finitos. De forma a controlar a injeção da corrente nos enrolamentos em ocorrência de falta. O método de injeção de corrente trifásica pode garantir ao gerador a tolerância a esta falta. Os testes foram realizados em velocidade relativamente baixa. Para os autores, os resultados do experimento foram inferiores às simulações realizadas devido ao calor produzido durante o funcionamento que aumentou a resistência dos condutores.

Através de uma avaliação analítica, Barros et al., (2019) estuda os efeitos da gravidade da falta entre espiras em diferentes porcentagens de supressão do enrolamento. A metodologia de análise está baseada nas harmônicas, acoplamento magnético e a força eletromotriz nos

enrolamentos. A proposta do artigo sintetiza-se na verificação do comportamento das variáveis anteriores buscando uma assinatura da corrente sob falta e em operação normal. Demonstrou-se bem peculiar a abordagem, contudo, necessita-se obter muitas informações intrínsecas de indutâncias, resistências e capacitâncias, tornando-se a metodologia inexecutável sobre o ponto de vista de aplicações reais.

Por fim, na abordagem de Bai et al., (2019), não possui a finalidade detectar a falta, entretanto, a metodologia consiste em proporcionar à máquina a capacidade de tolerar uma falta entre espiras. No conceito proposto, a modificação é empregada nos enrolamentos do gerador sendo enrolados na mesma direção. Essa técnica permite ao gerador operar em condições de falta, pois a corrente de curto-circuito é limitada pela alta indutância sem a necessidade de algoritmo de controle. Embora, demonstrou-se uma abordagem diferenciada, a implementação é semelhante ao proposto por Sinha; Vishwakarma; Srivastava, (2010) na modificação dos enrolamentos.

A Tabela 1.1 apresenta um resumo geral da revisão da literatura, trazendo o método empregado, sinais que foram utilizados no método, a metodologia proposta e o diagnóstico obtido.

Tabela 1.1 – Resumo Geral da revisão da literatura.

Autor(es)	Sinais Medidos	Metodologia	Diagnóstico
Eftekhari et al., (2014)	Correntes do terminal	Curvas de <i>Lissajous</i> .	Padrão Elíptico da corrente trifásica no espaço 3D.
Cintron-rivera; Foste; Strangas, (2015)	Campo magnético	Amenizar os efeitos da falta.	Enfraquecimento do campo magnético.
Yagami et al., (2015)	Corrente e tensão de carga	<i>Support Vector Machine</i> .	Baseado na magnitude da corrente de carga.
Haddad; Strangas, (2016)	Tensão e corrente.	<i>Linear discriminant analysis</i> (LDA).	Detectar o <i>status</i> da máquina seja ela saudável ou com falha, além de determinar o tipo e severidade da falha.
Mirzaeva; Saad, (2018)	Densidade de fluxo no entreferro.	Sensor de efeito Hall.	Variação na densidade de fluxo no entreferro.
Wang et al., (2019)	Correntes.	Redes Neurais deep auto-encoder e soft-max classifier.	Mapeamento dos sinais para um vetor bidimensional, correspondendo a certa área do plano de características para identificar diferentes tipos de falha.
Wang Xiangheng, Wang Weijian, (2000)	Correntes.	Multi Loop.	Corrente Diferencial.
Em IEEE, (2006)	Tensões.	Função 59N (monitoramento das componentes de sequência negativa das tensões).	Desequilíbrio nas tensões de fase do gerador.
Finney et al., (2008)	Correntes.	Função 87SP (corrente diferencial entre as correntes dos enrolamentos).	Ocorrência da falta surge uma corrente diferencial.
Fang; Xia, (2009),	Corrente e tensão.	FuzzyNeural Network.	Segunda harmônica da corrente de campo e componentes de sequência negativa das correntes e tensões.
Neti; Nandi, (2009)	Corrente de campo.	Verificação do surgimento de Harmônicos.	Harmônicas de campo.
Sinha; Vishwakarma; Srivastava, (2010)	Correntes e Tensões.	<i>modified winding function approach</i> .	Efeito das harmônicas no espaço.
Nadarajan et al., (2015)	Componentes de dq0.	<i>The winding function Approach</i> .	Determinar com precisão os harmônicos presentes.
Haddad et al., (2017)	Tensão.	Elementos Infinitos.	Alteração das tensões dos eixos q e d .
Kasztenny et al., (2016)	Corrente de sequência negativa e corrente de campo.	Proteção diferencial percentual.	Equilíbrio amperes-espiras.
Jiang et al., (2018)	Corrente	Controlar a injeção da corrente nos enrolamentos em ocorrência de falta.	Amenizar os efeitos da falta.
Barros et al., (2019)	Harmônicas, acoplamento magnético e a força eletromotriz.	Indefinido.	Verificação do comportamento das variáveis.
Bai et al., (2019)	Enrolamentos do gerador.	Capacidade de tolerar uma falta entre espiras.	Limitação da corrente pela alta indutância.

Fonte: Próprio Autor.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 apresenta a teoria geral do GS abordando algumas características que serão tratadas durante a dissertação. Ainda no mesmo capítulo serão contextualizadas as características da falta entre espiras. Por fim, foram apresentados três métodos amplamente utilizados na proteção de falta entre espiras por relés de proteção de geradores.

O Capítulo 3 aborda a teoria das ferramentas matemáticas aplicadas na proposta desenvolvida trazendo exemplos de cálculo da Morfologia Matemática, bem como, exemplos dos principais operadores morfológicos (dilatação, erosão, fechamento e abertura) e o Elemento Estruturante (SE) que são as peças-chave das operações.

No Capítulo 4 serão elucidados os procedimentos metodológicos de análise utilizados na dissertação. Sendo a ferramenta de simulação utilizada, a visão geral do modelo, as características da máquina teste, formas de realização da simulação das faltas entre espiras, faltas externas, etc.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia da proposta com todas as etapas de processamento dos sinais que vão desde a aquisição dos sinais, passando pelos filtros de corrente e tensão, determinação do *Threshold (TH)* até a lógica de disparo do relé de proteção.

O Capítulo 6 mostra os resultados alcançados e discussões onde serão apresentados todos os casos e condições que o gerador foi submetido, sendo apresentado um caso real e a simulação do *software-in-the-loop (SIL)* realizada.

No Capítulo 7 será apresentada uma análise comparativa entre o método proposto e alguns dos métodos utilizados atualmente. Por fim, o Capítulo 8 é apresentada as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FALTAS ENTRE ESPIRAS

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente capítulo trata das principais características das faltas entre espiras em GS. A partir dessa fundamentação, serão apresentados os sinais característicos da falta entre espiras, ratificando com o que é apresentado pela literatura. As validações dos conceitos estudados possuem a finalidade de demonstrar o comportamento que o GS possui frente a esta falta e permitirão observar o porquê as proteções tradicionais são limitadas para GS de fase dividida. Por fim, serão apresentadas três metodologias tradicionais já utilizadas para proteção contra faltas entre espiras em GS.

2.2 FALTAS INTERNAS NOS GERADORES SÍNCRONOS

O GS é constituído por três conjuntos de enrolamentos e são distribuídas em 120 graus elétricos, permitindo assim, gerar as três tensões equilibradas criando um sistema trifásico (KLEMPNER; KERSZENBAUM, 2018). Tem como função disponibilizar potência para a rede (CARVALHO, 2011) em corrente alternada que é gerada nos enrolamentos da armadura por meio de uma excitação em corrente contínua (CC) fornecida ao enrolamento de campo (KOSOW, 1982).

O núcleo do estator é construído por lâminas isoladas entre si e são projetadas para minimizar as correntes de *Foucault* (correntes parasitas) e as perdas por histerese. Já o estator é constituído por ranhuras onde ficam alocadas as bobinas que formam o enrolamento trifásico (KLEMPNER; KERSZENBAUM, 2018).

Curtos-circuitos associados aos enrolamentos do estator normalmente produzem correntes de magnitudes elevadas que podem causar danos na isolação. As forças magnéticas geradas por estas correntes podem deformar os enrolamentos e prejudicar o acoplamento mecânico da máquina.

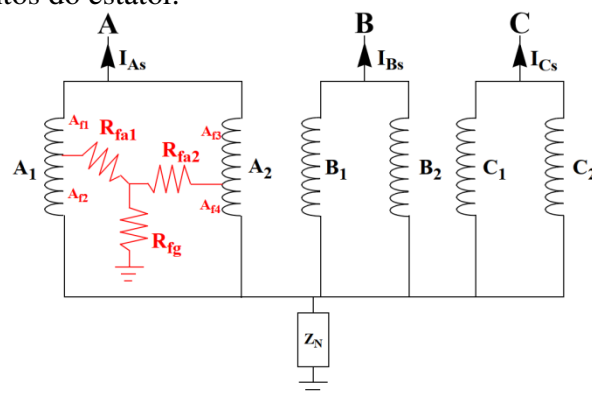
Os curtos-circuitos que podem ocorrer no estator são:

- Entre o enrolamento de uma fase e a terra;
- Entre dois enrolamentos de fases distintas sem envolvimento com a terra;
- Entre três enrolamentos de fases distintas sem envolvimento com a terra;

- Entre dois enrolamentos de fases distintas e a terra;
- Entre três enrolamentos de fases distintas e a terra;
- Entre espiras de um mesmo enrolamento.

Visando reduzir a magnitude das correntes nos enrolamentos do estator e consequentemente um excessivo aquecimento, máquinas de porte maior, normalmente, são projetadas com mais de um enrolamento por fase. Nestas máquinas, ainda existe a possibilidade de curto-circuitos entre enrolamentos de uma mesma fase, como ilustrado na Figura 2.1 para uma máquina de dois enrolamentos por fase. A Tabela 2.1 mostra alguns geradores do Sistema Interligado Nacional que possuem mais de um enrolamento por fase. Como este trabalho abordará a proteção contra curto-circuito entre espiras, somente este tipo de falta será elucidado.

Figura 2.1– Enrolamentos do estator.



Fonte: (OPAL-RT, 2019a)

Onde,

A, B e C são as fases da máquina;

I_{AS} , I_{Bs} , I_{Cs} são as correntes dos terminais;

A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 e C_2 são os ramos paralelos;

R_{fa1} , R_{fa2} , R_{fg} são as resistências criadas durante a falta;

A_{f1} , A_{f2} , A_{f3} e A_{f4} são os pontos envolvidos no curto circuito;

Z_N é a impedância de neutro.

Tabela 2.1 – Geradores e suas condições de proteção contra falta entre espiras.

Concessionária	Usina	Potência (MVA)	Nº de Enrolamentos	Proteção entre espiras	Tipo de proteção
CEEE-GT	Gov. Leonel de Moura Brizola	30	2	Não	
	Itaúba	125	3	Não	
	Dona Francisca	125	2	Não	
	Passo Real	81 e 76	2	Sim	Diferencial
Itaipu Binacional	Itaipu	700	6	Sim	87SP
Ceriluz	RS-155	2,8 e 0,27	-	Não	
	José Barasuol	4,3	-	Não	
	Nilo Bonfanti	0,680	-	Não	
	Igrejinha	4,85	-	Não	

Onde,

SP significa fase dividida (do inglês *split phase*).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS FALTAS ENTRE ESPIRAS

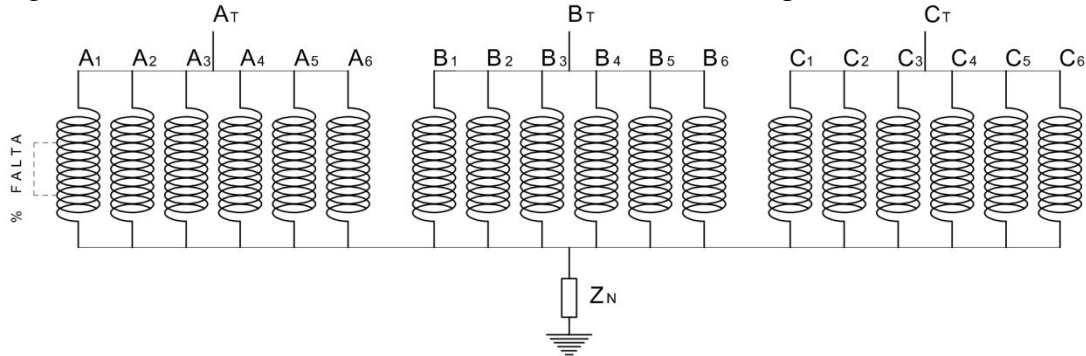
Segundo Barros et al., (2019), os curtos-circuitos entre espiras são de difícil detecção e levam a danos no isolamento da bobina e em casos mais dramáticos, interrupção da operação. Essas faltas são originadas de descargas parciais que aceleram os danos de isolamento por oxidação ou erosão e exposição ao envelhecimento. Por serem difíceis de detectar, as faltas entre espiras evoluem “silenciosamente” levando a destruição completa do isolamento e evoluindo para outras faltas como, por exemplo, curtos-circuitos entre o enrolamento e a terra e, conseqüentemente, com danos de maior gravidade.

Redondo; Platero; Gyftakis, (2017) apontam as faltas entre espiras sendo uma das falhas mais comuns em GS. Segundo os autores, as falhas ocorrem devido a eventual degradação e envelhecimento do isolamento, corroborando com argumentos de Barros et al., (2019). Uma consequência da falta é a indução de uma elevada corrente que circula no circuito em curto e pelo campo magnético girante irá produzir calor excessivo causando danos expressivos na máquina. Já Haddad et al., (2017) complementa com as alterações nos parâmetros e nos níveis de saturação da máquina.

Como este tipo de defeito em GS não é muito explorado na literatura, de forma a apresentar as suas principais características, serão simulados algumas faltas entre espiras em um GS com seis enrolamentos por fase, conforme, mostrado na Figura 2.2. As faltas foram

provocadas no enrolamento A_1 da Fase A com a supressão de uma determinada porcentagem do enrolamento. Também será explorada a configuração de gerador com dois enrolamentos por fase, isto é, fase A com os enrolamentos A_1 e A_2 , a fase B com enrolamentos B_1 e B_2 e fase C os enrolamentos C_1 e C_2 . Dessa forma, podemos mensurar os efeitos da falta entre espiras em cada tipo de configuração do GS.

Figura 2.2 – Enrolamentos do estator com seis enrolamentos por fase.



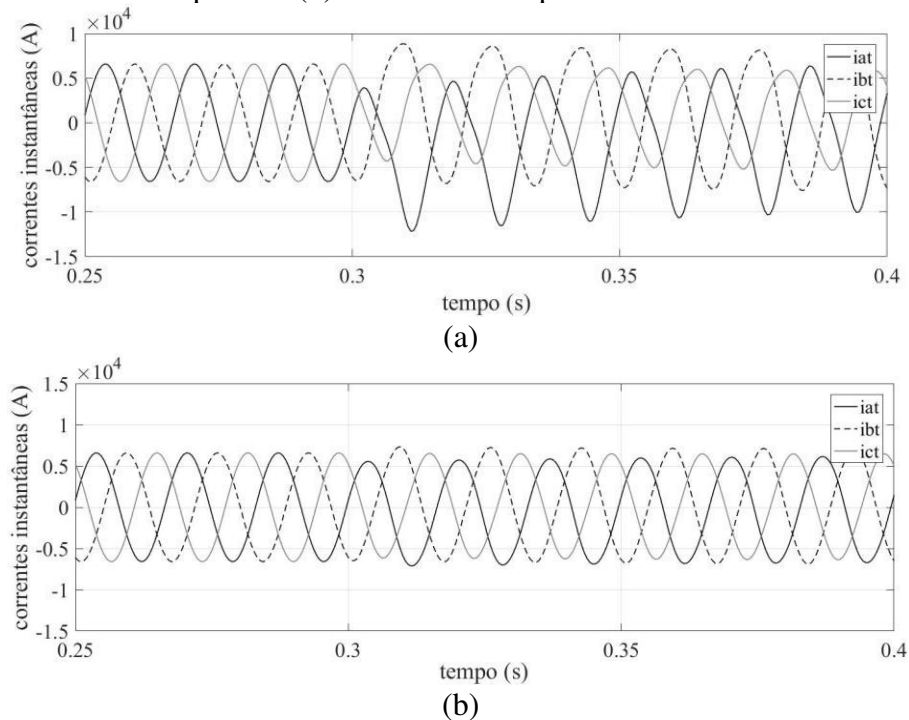
Fonte: Próprio Autor

2.3.1 Corrente nos terminais do GS durante a falta entre espiras

Um GS em condições normais de operação possui correntes equilibradas. A Figura 2.3(a) apresenta as correntes instantâneas do terminal (i_{at} , i_{bt} e i_{ct}) de um GS de seis enrolamentos sob falta entre espiras com 50% de supressão. Observa-se que até a pré-falta ($t < 0,3$ s) as correntes mantiveram-se equilibradas. Após a ocorrência da falta ($t > 0,3$ s) ocorre um leve desequilíbrio nas correntes do terminal com maior incidência na corrente do terminal A (i_{at}). Casos de faltas com porcentagens de supressão do enrolamento menores provocarão também menores alterações nas correntes, como ilustrado na Figura 2.3(b), para uma supressão de 10%. A posição da supressão no enrolamento não interfere no nível de magnitude da corrente de fase nos terminais do GS.

As simulações apresentadas neste capítulo foram realizadas inicialmente no software da HYPERSIM por meio do modelo *synchronous machine winding fault* (SMWF). O sistema utilizado no terminal do GS foi incluído um sistema complexo de um sistema de potência. Posteriormente, de posse dos sinais gerados pela falta, foram realizadas as simulações no software MATLAB onde ocorreu todo processamento do sinal e desenvolvimento do algoritmo proposto.

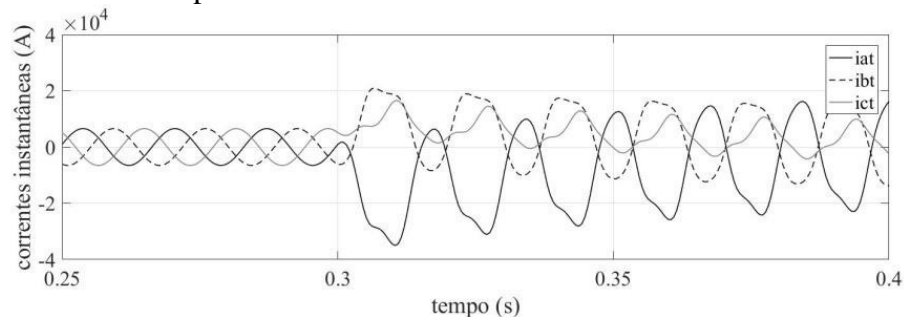
Figura 2.3 – Correntes do terminal para GS com seis enrolamentos por fase e falta entre espiras (a) com 50% de supressão (b) com 10% de supressão.



Fonte: Próprio Autor

Quando o GS possui uma menor quantidade de ramos em paralelo o desequilíbrio ocorre de forma mais acentuada. Na Figura 2.4 a supressão também é de 50%, porém para um GS de dois enrolamentos por fase. As correntes do terminal do GS de dois enrolamentos sofreram maiores efeitos em comparação ao gerador de seis enrolamentos.

Figura 2.4 – Correntes do Terminal do GS com dois enrolamentos por fase, 110MVA de carregamento e 50% de supressão.



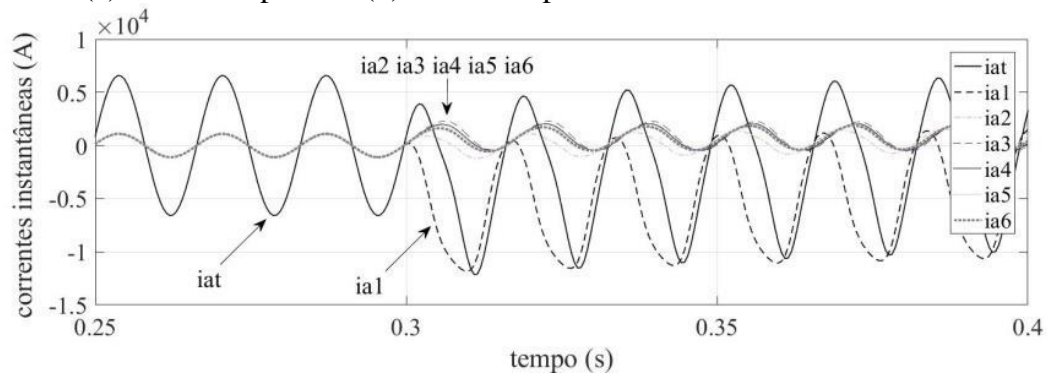
Fonte: Próprio Autor

2.3.2 Corrente dos Enrolamentos

Quando o GS possui mais de um enrolamento por fase, a falta entre espiras provoca desequilíbrio nas correntes dos enrolamentos (BAI et al., 2019). A Figura 2.5 apresenta as

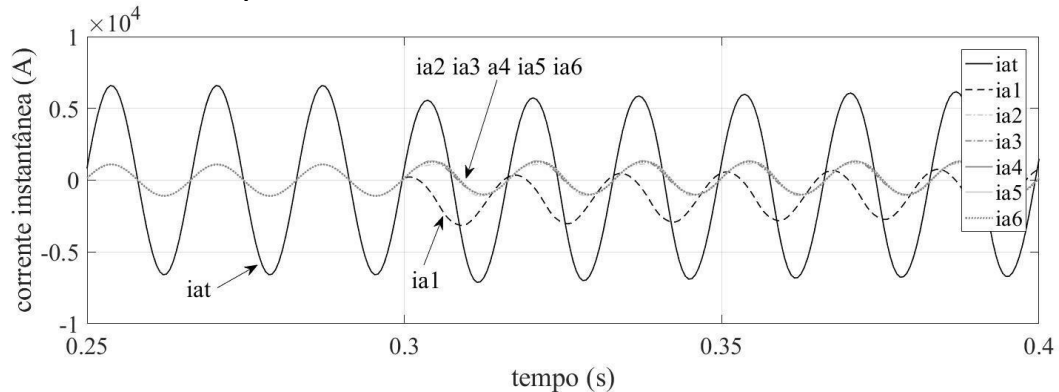
correntes dos ramos do GS de seis enrolamentos para a mesma falta apresentada na Figura 2.3(a), isto é, 50% de supressão. Observa-se os desequilíbrios ocorridos no ramo sob falta (ia1) e do terminal (iat) foram mais acentuados, enquanto a corrente nos demais ramos foram levemente alteradas. À medida que a porcentagem de supressão do enrolamento diminui, o desequilíbrio diminui também, com isto, as correntes dos ramos são menos afetadas pela falta. A Figura 2.6 mostra as correntes nos ramos para uma supressão de 10%.

Figura 2.5 – Correntes dos enrolamentos do GS de seis enrolamentos por fase e carregamento de 110MVA(a) 50% de supressão (b) 10% de supressão.



Fonte: Próprio Autor

Figura 2.6 – Correntes dos enrolamentos do GS de seis enrolamentos por fase e carregamento de 110MVA e 10% de supressão.

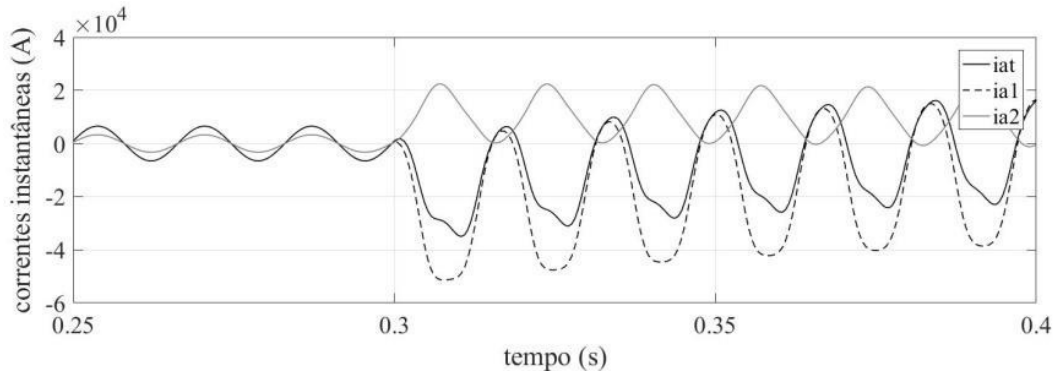


Fonte: Próprio Autor

O efeito no ramo sob falta e na corrente medida no terminal é ainda maior quando a máquina possui poucos enrolamentos por fase. A Figura 2.7 apresenta as correntes dos ramos ia1 (sob falta) e ia2, do GS de dois enrolamentos por fase, além da corrente do terminal (iat). Através da Figura 2.7 observa-se que a corrente ia2 sofre um leve desequilíbrio, enquanto as correntes ia1 e iat são drasticamente afetadas. O que se pode perceber que o comportamento

do enrolamento sob falta mantém suas características independentemente da quantidade de enrolamentos por fase.

Figura 2.7 – Correntes dos enrolamentos (GS de 2E, C30 e S50%).



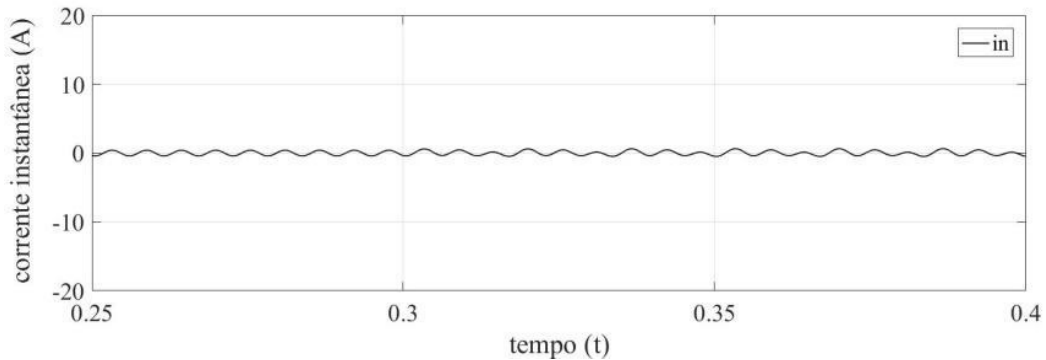
Fonte: Próprio Autor

Em Finney et al., (2008), o autor aproveita esse desequilíbrio das correntes dos ramos para detectar as faltas entre espiras. Sob operação normal, a diferença entre os enrolamentos é ínfima. Contudo, durante a falta, as correntes entre os ramos paralelos são diferentes. A proteção de fase dividida, como é conhecido este esquema, é ideal para operar nesses casos. Observe que o caso da Figura 2.5a diferença é muito mais difícil detectar, uma vez que possui mais enrolamentos em comparação ao caso da Figura 2.6. No entanto, em ambos os casos é necessário à instalação de TCs em todos os enrolamentos, o que muitas vezes não é possível em função de limitação de espaço para acomodar todos os TCs, sem falar do custo associado para implementação do esquema.

2.3.3 Corrente do Neutro

Uma característica peculiar da falta entre espiras é que mesmo com o desequilíbrio entre as correntes nas fases, gerado durante a falta, não há surgimento de corrente no neutro (i_n), pois não há caminho com a terra neste tipo de falta. No curto-circuito entre espiras ocorre o encurtamento do circuito de um enrolamento da fase. Assim, não há corrente circulando pelo neutro do GS. A Figura 2.8 mostra a corrente de neutro i_n do GS com dois enrolamentos por fase para o mesmo caso de falta mostrado na Figura 2.5. Assim, pode-se concluir que esquemas fundamentados em corrente ou tensão medidos no neutro não é uma boa alternativa para detectar este tipo de defeito.

Figura 2.8 – Corrente de neutro.

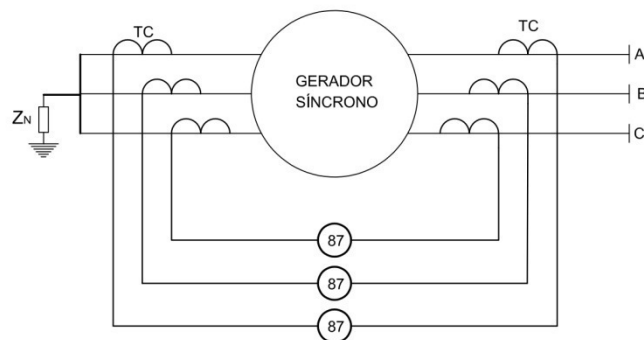


Fonte: Próprio Autor

2.3.4 Corrente do Lado Neutro

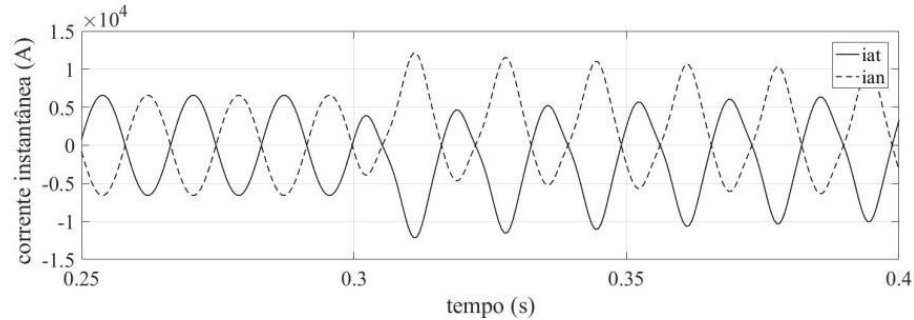
A principal proteção para defeitos entre fases no estator do GS é a função diferencial (ANSI 87). Esta função exige que o GS possua TCs instalados nos terminais e no fechamento da estrela (lado do neutro), conforme mostra a Figura 2.9. Durante a falta entres espiras, a corrente medida nos terminais (i_{at}) ou no lado do neutro (i_{an}) será a mesma. Logo, a função diferencial não consegue detectar este tipo de falta (KASZTENNY et al., (2016). A Figura 2.10 apresenta esta situação para uma falta com 50% de supressão e máquina de seis enrolamentos. Optou-se em deixar as correntes defasadas em 180 graus a fim de melhor visualização do cenário. Até o tempo de pré-falta (0,3 s) há um equilíbrio entre as duas correntes e após o início da falta as correntes de desequilibram na mesma proporção em sentidos opostos. Realizando a verificação diferencial pelo valor eficaz, os valores tendem a valores iguais, tornando a função 87 inoperante.

Figura 2.9 – Proteção diferencial (ANSI 87)



Fonte: Próprio Autor

Figura 2.10 – Corrente i_{at} e i_{an} .

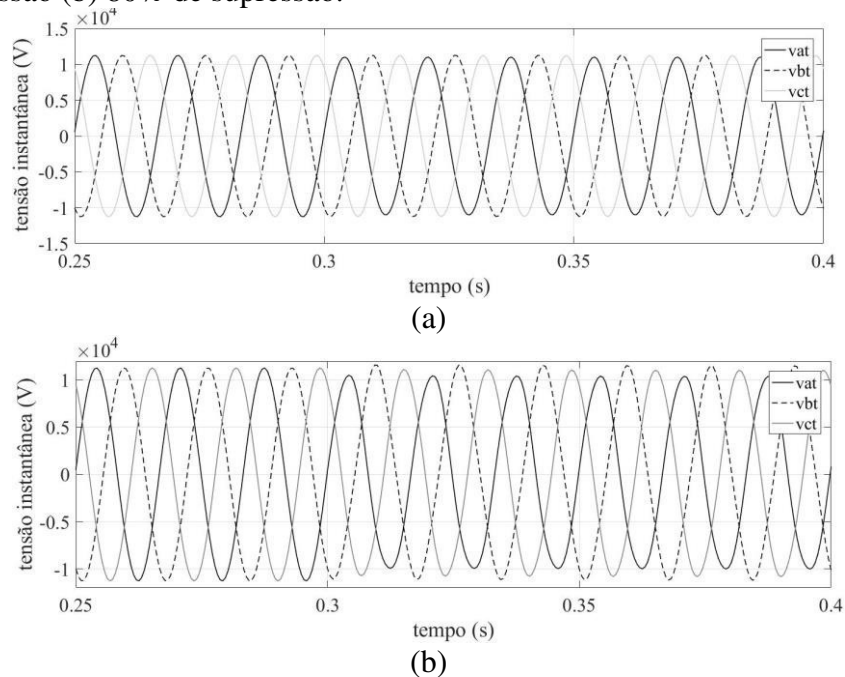


Fonte: Próprio Autor

2.3.5 Tensão nos Terminais

Alguns esquemas de proteção fazem uso das tensões medidas nos terminais da máquina. Assim, é interessante analisarmos o comportamento da tensão durante a falta entre espiras. A Figura 2.11 apresenta as tensões no terminal do GS de seis enrolamentos para uma falta de 50% (a) e 80% (b) de supressão. Pode-se verificar que não há um desequilíbrio significativo nas tensões, à medida que a quantidade de enrolamentos suprimidos por fase diminui, o desequilíbrio torna-se mais imperceptível quando se tem uma supressão muito alta.

Figura 2.11 – Tensão do terminal do GS de seis enrolamentos, carregamento de 110MVA (a) 50% de supressão (b) 80% de supressão.

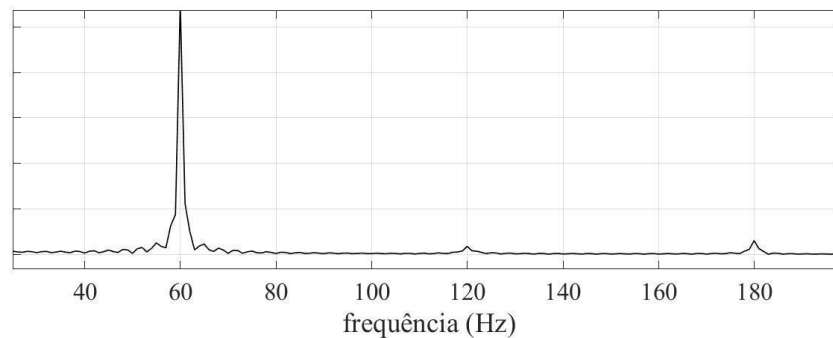


Fonte: Próprio Autor

2.3.6 Harmônicas

Outra característica da falta entre espiras é o surgimento de harmônicas de 2ª e 3ª ordem, isto é, 120 e 180 Hz. A Figura 2.12 apresenta o espectro da frequência de um gerador de seis enrolamentos por fase, funcionando em carga pela e que sofreu uma falta entre espiras com 90% de supressão.

Figura 2.12 – Espectro da frequência.



Fonte: Próprio Autor

2.4 MÉTODOS COMERCIAIS PARA DETECÇÃO

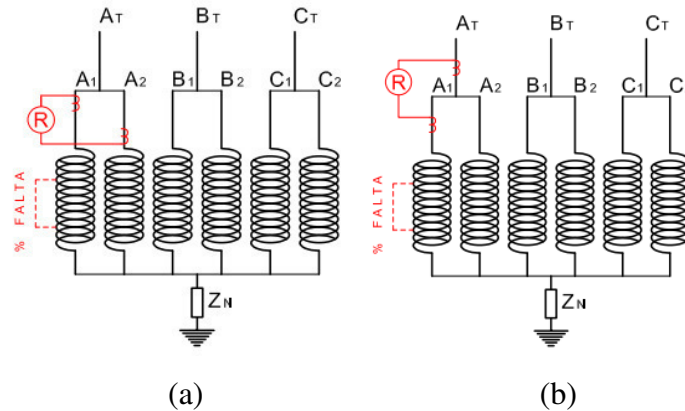
2.4.1 Método 1

Em Finney et al., (2008) é apresentada uma metodologia de proteção contra faltas entre espiras pela função diferencial entre os enrolamentos do GS. Em situação de operação normal as correntes dos enrolamentos são iguais e calculando a corrente diferencial do GS elas tende a zero e na ocorrência de uma falta entre espiras uma corrente diferencial surge. A metodologia é empregada quando os enrolamentos do gerador são de fase dividida. A Figura 2.13 apresenta duas variações da proposta do autor. Na Figura 2.13(a) a diferencial é realizada entre os ramos do enrolamento da fase. Em operação normal, as correntes que circulam em A_1 e A_2 são iguais. Em ocorrência de uma falta (A_1), haverá um aumento no ramo A_1 comparado com A_2 . Dessa forma, a proteção diferencial (87) irá identificar um desequilíbrio entre os enrolamentos e irá atuar frente à falta.

Na Figura 2.13(b) a diferencial ocorre entre o terminal da fase e um dos enrolamentos. Essa proposta pode ter duas variações: a diferencial entre o terminal A_T e o enrolamento A_1 ou entre o terminal A_T e o enrolamento A_2 . Em ambas as situações, a corrente que circula no enrolamento (A_1 ou A_2) possui a metade do valor da corrente que circula no terminal A_T . Essa metodologia é menos funcional, pois se ocorrer uma falta no ramo do enrolamento que

não está sendo monitorado, pode não ocorrer a detecção e atuação da falta. Para supressões baixas, essa proposta não é indicada, sendo a proposta da Figura 2.13(a) é mais indicada.

Figura 2.13 – Proteção diferencial.



Fonte: Próprio Autor

Na prática, essa metodologia é funcional para geradores de fase dividida com poucos enrolamentos por fase. Com o aumento da quantidade de enrolamentos a garantia de proteção é reduzida consideravelmente, isto é, não possui uma proteção efetiva. Tal comprovação é realizada no Capítulo 7.

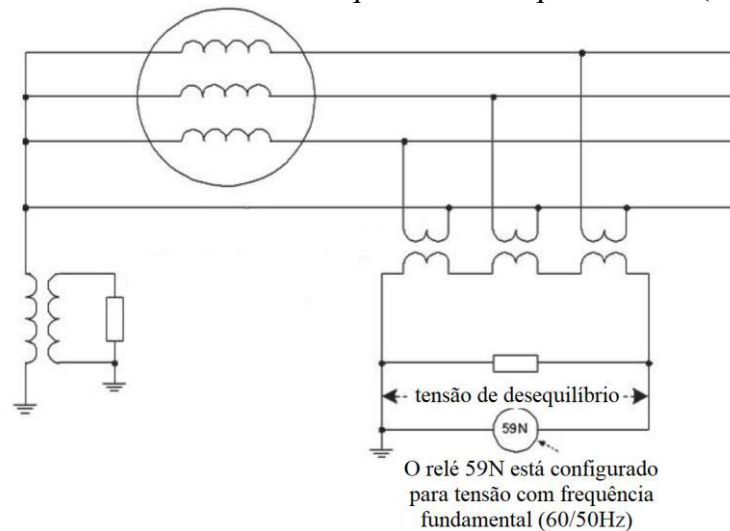
2.4.2 Método 2

A proposta apresentada em IEEE, (2006), é recomendada quando o GS não é de fase dividida, pois não há como utilizar o Método 2. A Figura 2.14 ilustra o esquema. São utilizados três TP, sendo os primários conectados em estrela aterrado e secundário do TP é conectado em “delta aberto”. O relé de sobretensão, conectado ao delta, monitora a medição da tensão de desequilíbrio. Dessa forma, em caso de falta entre espiras, há um desequilíbrio que pode ser detectado pela função 59N.

A proposta de IEEE, (2006) atua nesta abordagem, onde consiste na leitura das três tensões no terminal por meio de TP conectados em estrela e o aterramento dos TP ligada ao neutro do gerador. Segundo Karthik; Raju, (2012), a técnica dos componentes simétricos para detecção de faltas entre espiras está sendo preferida entre os métodos tradicionais no diagnóstico das faltas dos GS. O sistema resume-se a três redes denominadas sequência positiva, negativa e zero. Para Platero et al., (2020), em ocorrência de falta, a força eletromotriz induzida tende a diminuir devido à quantidade de enrolamento que foi suprimido.

Com isso, as tensões ficam desequilibradas e os somatórios das tensões ficam diferentes de zero.

Figura 2.14 – Método de sobretensão de desequilíbrio de sequência zero (59N).



Fonte: (IEEE, 2006)

Outra peculiaridade é o ajuste da função 59N para frequência fundamental, já que a terceira harmônica estará presente na entrada do TP em delta aberto. Algumas desvantagens podem ser citadas nessa proteção: A primeira está relacionada à proteção de falhas de aterramento do estator, a qual se torna insensível. A segunda, com maiores riscos, é o cabo que conecta o neutro do TP aos pontos neutros do gerador que se sofrer uma falha de aterramento, esse cabo irá aterrar solidamente o gerador, dessa forma, é indicado a verificação periódica do cabo a fim de evitar danos severos ao GS.

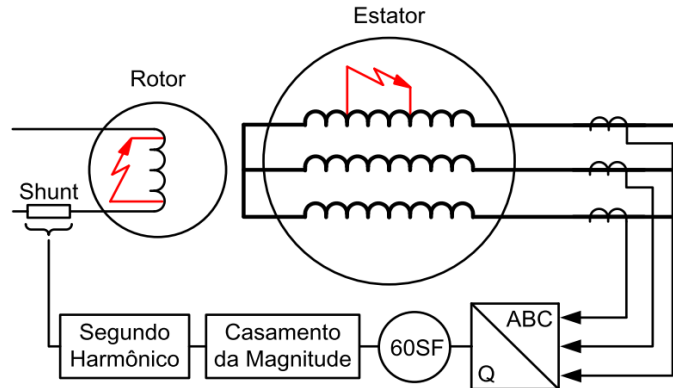
2.4.3 Método 3

A empresa *Schweitzer Engineering Laboratories Comercial Ltda* (SEL) é uma fabricante de diversos equipamentos entre eles os relés de proteção de GS. O seu modelo SEL-400G possui uma função de proteção muito sensível para faltas entre espiras no estator e faltas no rotor. Os testes com o algoritmo iniciaram em 2016 e lançado comercialmente em 2020. Em Kasztenny et al., (2016) é detalhado o processo de proteção utilizada pelo relé. Por fazer uso de funções já conhecidas, são utilizados os sensoriamentos já existentes no GS.

A base da proteção é pelo elemento de desbalanço das correntes do estator-rotor (60SF). A Figura 2.15 exemplifica a metodologia, onde o relé realizará a medição das correntes do estator a fim de obter a magnitude das componentes de sequência negativa (I_2) e

a magnitude da corrente de dupla frequência do campo (I_F). Já no relé de proteção, ocorre uma relação de transformação entre os valores medidos com o objetivo de casar as magnitudes e manter um equilíbrio entre elas quando o GS está em operação normal. Dessa forma, calculam-se valores de operação (2.1) e restrição (2.2) e em ocorrência de falta, um desequilíbrio surge.

Figura 2.15 – Elemento de proteção de falha entre espiras 60SF para geradores síncronos.



Fonte: (KASZTENNY et al., 2016)

$$I_{OP} = \left| |I_{2(60Hz)}| - NSF \cdot |I_{F(120Hz)}| \right| \quad (2.1)$$

$$I_{RT} = |I_{2(60Hz)}| + NSF \cdot |I_{F(120Hz)}| \quad (2.2)$$

Onde,

I_{OP} é a corrente de operação;

I_2 é a componente de sequência negativa;

I_F é a corrente de dupla frequência do campo;

I_{RT} é a corrente de restrição.

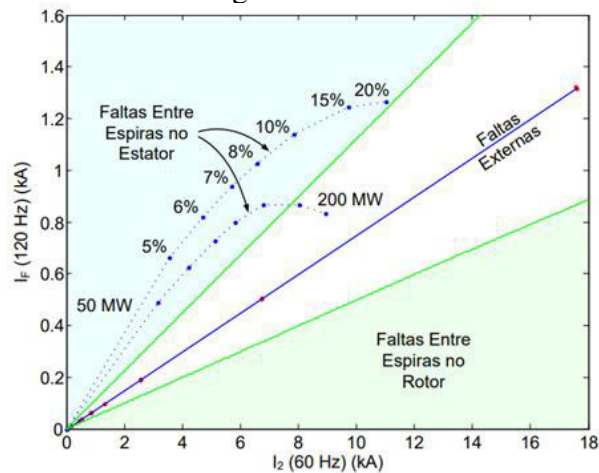
NSF é a relação $\frac{I_2}{I_F}$;

As vantagens desse método é a possibilidade de detectar faltas no rotor e no estator a partir de uma única proteção, além de ser imune às faltas externas. Uma desvantagem é a relação NSF que varia para todos os GS, dessa forma, é necessário realizar a obtenção desse valor quando se coloca em operação, porém, essa informação ainda estava em análise e não havia uma forma pré-determinada.

A Figura 2.16 mostra o gráfico com a relação entre I_2 e I_F . Quando o resultado tender para cima, significa que ocorreu uma falta entre espiras. Em operação normal ou em ocorrência de uma falta externa a relação permanece no centro do gráfico, enquanto em ocorrência de uma falta entre espiras no rotor a relação de I_2 e I_F tendem a deslocar-se para a baixo do gráfico. A magnitude de I_F está relacionada ao carregamento do GS, sendo inversamente, isto é, a relação é maior quando o GS está com carregamento leve.

As porcentagens presentes no gráfico indicam a porcentagens de supressão do enrolamento. Observa-se que há duas linhas pontilhadas que indicam os testes em um gerador de 50MVA e outro de 200MVA. A terceira linha contínua e azul indica uma falta externa.

Figura 2.16 – Magnitude de I_2 versus magnitude de I_F .



Fonte: (KASZTENNY et al., 2016)

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as principais características das faltas entre espiras em GS. As características da falta entre espiras que os autores mitigaram demonstram que poucas as distinguem de uma operação normal do GS. Esse pode ser o principal motivo que não há tantas soluções de proteções exclusivas para essas faltas. Os métodos tradicionais apresentados para detecção de faltas entre espiras são as únicas formas, e limitadas, para realização das proteções. Com isso, percebe-se uma grande lacuna neste assunto que carece de pesquisas que possam tornar-se implementáveis. As considerações e conclusões referentes ao que foi abordado neste capítulo servirão de base para as proposições que serão inquiridas nesta pesquisa ao que tange a caracterização da falta entre espiras, porém, aplicando a metodologia proposta com filtros morfológicos.

3 MORFOLOGIA MATEMÁTICA

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente capítulo apresenta os conceitos da Morfologia Matemática (MM), visto que, o algoritmo desenvolvido faz uso de filtros morfológicos para detectar faltas entre espiras. Ao longo do capítulo serão introduzidos os principais operadores morfológicos, suas diferenças e sugestões para aplicação da MM na detecção de transitórios em sinais elétricos.

3.2 INTRODUÇÃO À MORFOLOGIA MATEMÁTICA

O estudo da MM teve seu início por Georges Matheron e Jean Serra por volta de 1964. Eles introduziram o processamento de imagens binárias por meio de operações morfológicas básicas denominadas união, intercessão, complemento e diferença(WU; LU; JI, 2019). A ideia principal por trás da MM era a transformação de uma imagem em outra forma representativa melhorada com a finalidade de análise de reconhecimento de padrão (SHIH, 2009), com base em um pequeno modelo geométrico conhecido como elemento estruturante(LUC; DAN, 2005). Os resultados não apresentaram apenas aspectos teóricos, mas também muitos resultados práticos (NAJMAN; TALBOT, 2019).

Por ser uma ferramenta simples, possibilitou diversas abordagens para o processamento de informações visuais (LUC; DAN, 2005) e tem recebido, nas últimas décadas, grande atenção, porque fornece uma descrição quantitativa das formas geométricas (SHIH, 2009). Outra aplicação muito relevante da MM é no processamento de sinais, como é visto em Gautam; Brahma, (2010) que utilizam a MM como filtros e possui a finalidade de detecção de transitórios em sistemas elétricos de potência. No campo do processamento de sinais, a MM é utilizada em sinais no domínio do tempo, diferente das maiorias das metodologias de filtros que utilizam respostas no domínio da frequência(WU; LU; JI, 2019).

3.3 OPERAÇÕES MORFOLÓGICAS

As operações morfológicas são divididas em binárias (quando a imagem assume valores de preto e branco) e tons de cinza (quando a imagens é colorida). Na aplicação de processamento de sinais, a MM funciona exclusivamente em tons de cinza, no domínio do

tempo e é possível isolar ruídos ou transitórios presentes nos sinais. Dessa forma, aplicando os operadores morfológicos, os sinais podem tender a padrões específicos, com diferentes significados físicos, que determinam falhas no sistema elétrico de potência, permitindo detectar, classificar, mensurar diferentes tipos de faltas em geradores, linhas de transmissão, etc.

3.3.1 Elemento Estruturante (SE)

Toda operação realizada na MM é realizada pelo elemento estruturante, do inglês, *Structuring Element* (SE), que não mais é que uma função matemática com a finalidade de processar um determinado sinal (GAUTAM; BRAHMA, 2010). O SE pode assumir diversos pesos e tamanho, conforme a abordagem escolhida, podendo assumir uma função seno, cosseno, linear, não linear, entre outros. Na prática, segundo Najman; Talbot, (2019), o SE é previamente conhecido e pode ser adaptado à necessidade em termos de tamanho e peso, ou seja, SE possui uma forma projetada previamente.

Para Gautam; Brahma, (2009a), a escolha do SE depende da particularidade da aplicação e varia significativamente. Não possui diretrizes específicas para a escolha, ou seja, a determinação de um SE depende do sinal processado, frequência, ruído, etc. Porém, algumas recomendações são conhecidas: o tamanho do SE está muito ligado à frequência e a taxa de amostragem do sinal, já o peso está relacionado ao nível de ruído presente no sinal, ainda que não exista necessariamente uma linearidade. Assim, a determinação do SE está mais ligada à experiência e no método da tentativa e erro, a fim de obter melhores resultados, do que um equacionamento pré-determinado.

Os operadores morfológicos mais simples são a dilatação e a erosão. A partir destes dois operadores outros foram desenvolvidos.

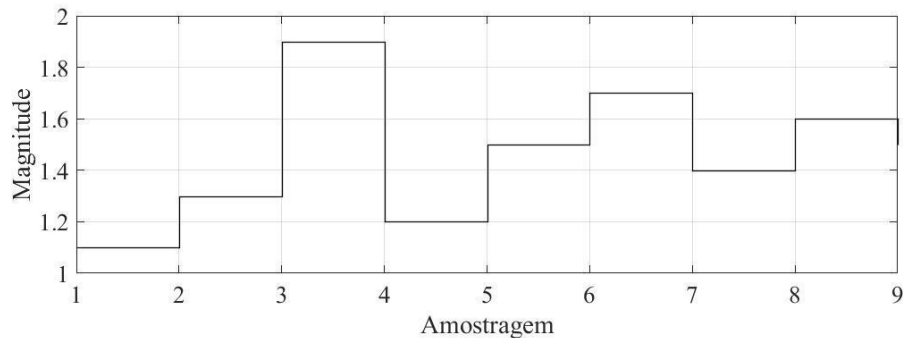
3.3.2 Dilatação

A dilatação em um sinal elétrico é compreendida pela expansão do valor amostrado, ou seja, ocorre uma adição algébrica vetorial entre o valor amostrado do sinal de entrada (f) e o SE representado por g . A simbologia da dilatação é dada por \oplus e é definida em (3.1), conforme Wu; Lu; Ji, (2019). Nesta abordagem é obtido o valor máximo da iteração entre f e g . Em Gautam; Brahma, (2009b) é encontrada uma demonstração da dilatação de um elemento estruturante por um conjunto de amostras a qual será detalhada a seguir.

$$y_{\text{dilatação}}(n) = (f \oplus g)(n) = \max \begin{cases} f(n-m) + g(m), \\ 0 \leq (n-m) \leq n, m \geq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Seja uma função f que possui 9 amostras, construída pelos seguintes valores: $f = [1, 1, 1, 3, 1, 9, 1, 2, 1, 5, 1, 7, 1, 4, 1, 6, 1, 5]$, isto é, $n = 7$, e um elemento estruturante $g = [1, 0, 1]$, isto é, $m = 3$. Gráficamente f é mostrado na Figura 3.1. Os valores foram selecionados puramente para fins explicativos não possuindo propósito de refletir alguma aplicação real. Utilizar SE linear em sinais unidimensionais tem sido usado na maioria das aplicações relatadas na área de sistemas de energia, conforme Gautam; Brahma, (2009b).

Figura 3.1 – Função f .



Fonte: Próprio Autor

A dilatação ($f \oplus g$) deste sinal é calculada para cada amostra, conforme segue:

Para a amostra $n=0$:

$$\begin{aligned} y_{\text{dilatação}}(0) &= (f \oplus g)(n) \\ &= \max\{f(0) + g(0), f(-1) + g(1), f(-2) + g(2)\} \\ &= \max(2, 1, -) = 2,1 \end{aligned}$$

Para a amostra $n=1$:

$$y_{\text{dilatação}}(1) = \max\{f(1) + g(0), f(0) + g(1), f(-1) + g(2)\} = \max(2, 3, 1, 1, -) = 2,3$$

Para a amostra $n=2$:

$$y_{\text{dilatação}}(2) = \max\{f(2) + g(0), f(1) + g(1), f(0) + g(2)\} = \max(2, 9, 1, 3, 2, 1) = 2,9$$

Para a amostra $n=3$:

$$y_{\text{dilatação}}(3) = \max\{f(3) + g(0), f(2) + g(1), f(1) + g(2)\} = \max(2, 1, 1, 9, 2, 3) = 2,3$$

Para a amostra $n=4$:

$$y_{\text{dilatação}}(4) = \max\{f(4) + g(0), f(3) + g(1), f(2) + g(2)\} = 2,9$$

Para a amostra $n=5$:

$$y_{dilatação}(5) = \max\{f(5) + g(0), f(4) + g(1), f(3) + g(2)\} = 2,7$$

Seguindo a mesma lógica, temos:

$$\text{Para a amostra } n=6: y_{dilatação}(6) = 2,5$$

$$\text{Para a amostra } n=7: y_{dilatação}(7) = 2,7$$

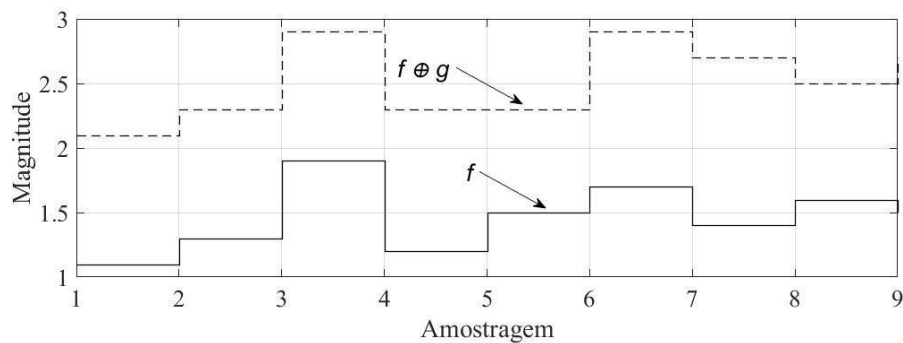
$$\text{Para a amostra } n=8: y_{dilatação}(8) = 2,5$$

Deste modo a operação de dilatação obteve resumidamente os seguintes resultados:

$$y_{dilatação} = (f \oplus g) = [2,1 \ 2,3 \ 2,9 \ 2,3 \ 2,9 \ 2,7 \ 2,5 \ 2,7 \ 2,5]$$

O resultado gráfico da dilatação da função f é apresentado pela Figura 3.2. Observa-se que o sinal dilatado foi expandido para valores positivos da magnitude, já que ocorreu uma soma vetorial. Essa característica gerada na Figura 3.2 deve-se ao SE, que assumindo valores diferentes, o resultado da dilatação do sinal f seria também diferente. Dessa forma, podemos afirmar que o resultado de uma dilatação está diretamente ligado ao valor do SE.

Figura 3.2 – Função f dilatada.



Fonte: Próprio Autor

3.3.3 Erosão

A erosão em um sinal é compreendida pela contração do valor amostrado, ou seja, ocorre uma subtração algébrica vetorial entre o valor amostrado do sinal (f) e o SE representado por g . A simbologia da dilatação é dada por \oplus e é definida em (3.2) conforme é apresentada por (WU; LU; JI, 2019). Nesta abordagem é obtido o valor mínimo da iteração entre f e g . Em Gautam; Brahma, (2009b) é encontrada uma demonstração da dilatação de um elemento estruturante por um conjunto de amostras a qual será detalhada a seguir.

$$y_{eros\tilde{a}o}(n) = (f \ominus g)(n) = \min \begin{cases} f(n+m) - g(m), \\ 0 \leq (n+m) \leq n, m \geq 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Seja a mesma função f com 9 amostras, construída pelos seguintes valores: $f = [1, 1, 1, 3, 1, 9, 1, 2, 1, 5, 1, 7, 1, 4, 1, 6, 1, 5]$ e o mesmo elemento estruturante com tamanho 3 sendo $g = [1, 0, 1]$. Graficamente f já foi apresentada na Figura 3.1. A dilatação desse sinal $(f \oplus g)$ é calculada para cada amostra, conforme segue:

Para a amostra $n=-2$:

$$\begin{aligned} y_{eros\tilde{a}o}(-2) &= (f \ominus g)(n) \\ &= \min\{f(-2) - g(0), f(-1) - g(1), f(0) - g(2)\} \\ &= \min(-, -, 0, 1) = 0, 1 \end{aligned}$$

Para a amostra $n=-1$:

$$y_{eros\tilde{a}o}(-1) = \min\{f(-1) - g(0), f(0) - g(1), f(1) - g(2)\} = \min(-, 0, 1, 1, 3) = 0, 1$$

Para a amostra $n=0$:

$$y_{eros\tilde{a}o}(0) = \min\{f(0) - g(0), f(1) - g(1), f(2) - g(2)\} = \min(0, 1, 1, 3, 0, 9) = 0, 1$$

Para a amostra $n=1$:

$$y_{eros\tilde{a}o}(1) = \min\{f(1) - g(0), f(2) - g(1), f(3) - g(2)\} = \min(0, 3, 1, 9, 0, 2) = 0, 2$$

Para a amostra $n=2$:

$$y_{eros\tilde{a}o}(2) = \min\{f(2) - g(0), f(3) - g(1), f(4) - g(2)\} = 0, 5$$

Para a amostra $n=3$:

$$y_{eros\tilde{a}o}(3) = \min\{f(3) - g(0), f(4) - g(1), f(5) - g(2)\} = 0, 2$$

Seguindo a mesma lógica, temos:

$$\text{Para a amostra } n=4: y_{eros\tilde{a}o}(4) = 0, 4$$

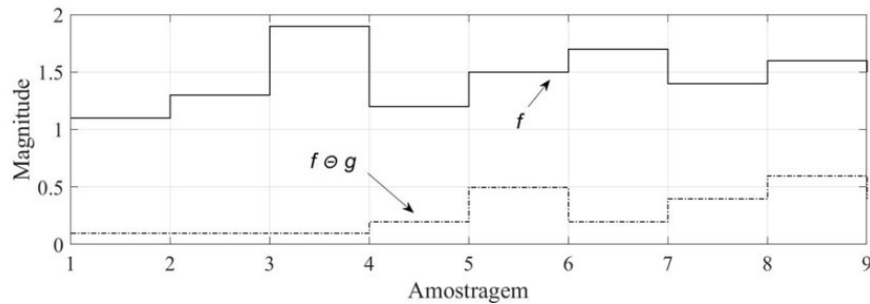
$$\text{Para a amostra } n=5: y_{eros\tilde{a}o}(5) = 0, 6$$

$$\text{Para a amostra } n=6: y_{eros\tilde{a}o}(6) = 0, 4$$

Deste modo a operação de erosão obteve resumidamente os seguintes resultados:

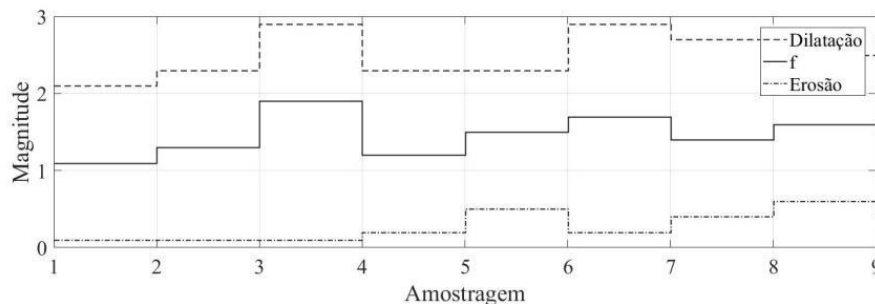
$$y_{eros\tilde{a}o} = (f \ominus g) = [0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 2, 0, 5, 0, 2, 0, 4, 0, 6, 0, 4]$$

O resultado gráfico da erosão da função f é apresentado na Figura 3.3. Observa-se que o sinal erodido deslocou-se ao oposto da dilatação, isto é, para sentido negativo. Essa característica que o sinal gerou está relacionado ao SE. Dessa forma, fica evidente que o resultado da erosão está diretamente ligado ao peso e tamanho do SE, assim como o caso da dilatação.

Figura 3.3 – Função f erodida.

Fonte: Próprio Autor

Através Figura 3.2 e Figura 3.3 pode-se observar que a erosão e a dilatação possuem efeitos opostos, isto é, a dilatação tende a valores maiores que o sinal f , enquanto que a erosão tende a valores menores que o sinal f , assim como verificado por Najman; Talbot, (2019) e Gautam; Brahma, (2009a). Os valores foram selecionados puramente para fins explicativos não possuindo propósito de refletir alguma aplicação real. Utilizar SE linear em sinais unidimensionais tem sido usado na maioria das aplicações relatadas na área de energia de sistemas, conforme Gautam; Brahma, (2009b).

Figura 3.4 – Função f , dilatação (f) e erosão(f).

Fonte: Próprio Autor

3.3.4 Fechamento

A operação morfológica denominada de fechamento é uma operação derivada de uma sequência aplicando a dilatação e posteriormente uma erosão sendo o mesmo elemento SE para ambas (GAUTAM; BRAHMA, 2010), ou uma dilatação seguida da soma algébrica do elemento estruturante. Nesta operação, o resultado tende a valores da superfície do valor do sinal. A equação que representa o fechamento é dada em (3.3). Utilizando os valores obtidos na dilatação e o mesmo elemento estruturante temos a seguinte solução:

$$y_{fechamento} = (y_{dilata\c{c}ao} \ominus g) \quad (3.3)$$

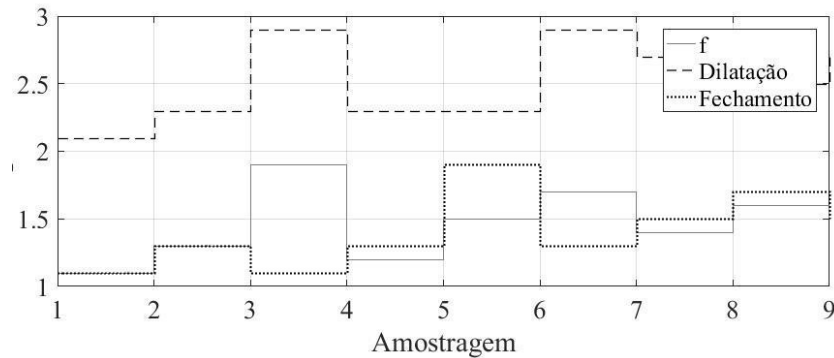
Sendo o valor da dilata\c{c}o\c{a}o apresentada anteriormente e aplicando a eros\c{a}o sobre esse valor, temos o fechamento da fun\c{c}o\c{a}o f .

$$y_{dilata\c{c}ao} = (f \oplus g) = [2,1 \ 2,3 \ 2,9 \ 2,3 \ 2,9 \ 2,7 \ 2,5 \ 2,7 \ 2,5]$$

$$y_{fechamento} = (y_{dilata\c{c}ao} \ominus g) = [1,1 \ 1,3 \ 1,1 \ 1,3 \ 1,9 \ 1,3 \ 1,5 \ 1,7 \ 1,5]$$

A Figura 3.5 apresenta o resultado do fechamento juntamente com a dilata\c{c}o\c{a}o e a fun\c{c}o\c{a}o f . Observa-se que a dilata\c{c}o\c{a}o resultou na expans\c{a}o do sinal e o fechamento, que \c{e} a sequ\c{e}ncia da dilata\c{c}o\c{a}o \rightarrow eros\c{a}o, levou o sinal para pr\c{o}ximo aos valores do sinal original. Cabe ressaltar que o comportamento se deve ao SE escolhido, sendo que o resultado poderia ser muito diferente caso optasse por um tamanho ou peso diferente.

Figura 3.5 – Fun\c{c}o\c{a}o f , dilata\c{c}o\c{a}o (f) e fechamento (f).



Fonte: Pr\c{o}prio Autor

3.3.5 Abertura

O operador de abertura, em contraste ao fechamento, atua deslocando o sinal de forma oposta ao verificado no filtro de fechamento. A opera\c{c}o\c{a}o deriva de uma sequ\c{e}ncia aplicando a eros\c{a}o e posteriormente a dilata\c{c}o\c{a}o sendo necess\c{a}rio o mesmo SE para ambas as opera\c{c}o\c{e}s. A equa\c{c}o\c{a}o que resulta na abertura \c{e} dada em (3.4). Utilizando os valores obtidos na eros\c{a}o e o mesmo elemento estruturante temos a seguinte solu\c{c}o\c{a}o:

$$y_{abertura} = (y_{eros\c{a}o} \oplus g) \quad (3.4)$$

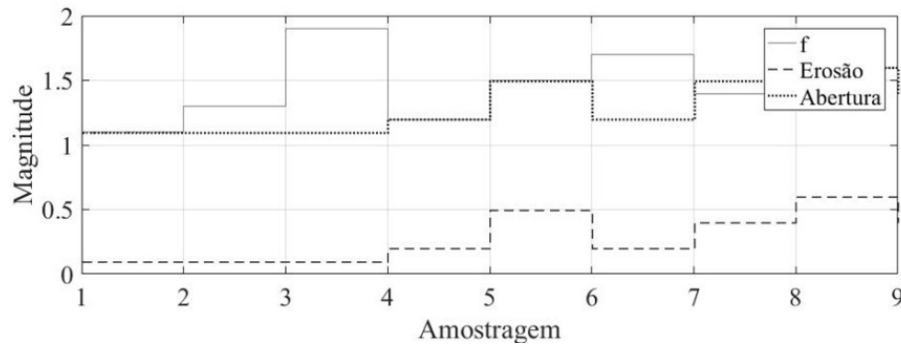
Sendo o valor da erosão apresentada anteriormente e aplicando a dilatação sobre esse valor, temos o fechamento da função f .

$$y_{erosão} = (f \ominus g) = [0,1 \ 0,1 \ 0,1 \ 0,2 \ 0,5 \ 0,2 \ 0,4 \ 0,6 \ 0,4]$$

$$y_{abertura} = (y_{erosão} \oplus g) = [1,1 \ 1,1 \ 1,1 \ 1,2 \ 1,5 \ 1,2 \ 1,5 \ 1,6 \ 1,4]$$

A Figura 3.6 apresenta o resultado da abertura juntamente com a erosão e a função f . Observa-se que a erosão levou o sinal a valores menores e o fechamento que é a sequência da erosão \rightarrow dilatação levou o sinal para próximo aos valores do sinal original.

Figura 3.6 – Função f , erosão (f) e abertura (f).



Fonte: Próprio Autor

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo abordou os conceitos básicos da MM destacando os dois principais operadores, isto é, dilatação e erosão. Além das operações derivadas denominadas fechamento e abertura. Exemplos de cálculos da função em escala de cinza aplicados a um sinal foram apresentados. Para o processamento dos sinais, a MM atua principalmente no domínio do tempo, indo de encontro com as demais técnicas de filtragem que atuam no domínio da frequência como a Transformada de *Fourier*.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

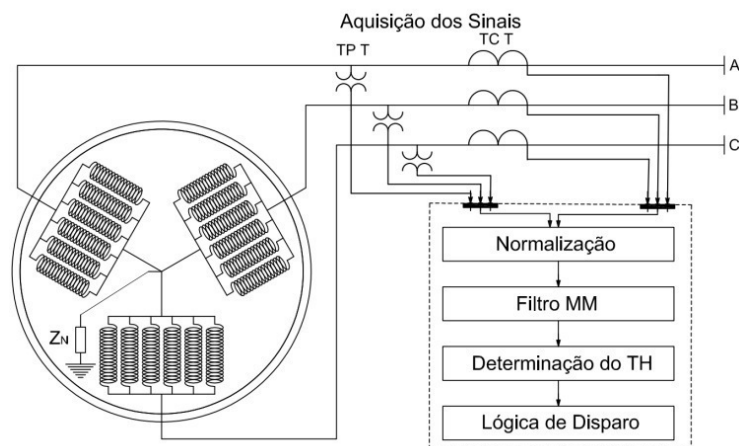
Neste capítulo será apresentado de forma detalhada a proposta de método de proteção contra faltas entre espiras em GS. Todo processo envolvido desde o momento da aquisição do sinal instantâneo pelo TC e TP, processamento do sinal, até o sinal de comando de atuação do relé de proteção serão elucidados. Por fim, será apresentada a lógica utilizada para determinação do *threshold* que tem a finalidade de criar os valores limites para atuação.

4.2 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA

A Figura 4.1 apresenta a visão geral da proposta com todas as etapas de detecção de faltas entre espiras. O sistema de detecção é constituído por cinco blocos de processamento principais, são eles:

- Aquisição do sinal;
- Normalização;
- Filtro Morfológico (Filtro MM);
- Determinação do *threshold* (*TH*);
- Lógica de disparo.

Figura 4.1 – Sistema Desenvolvido.



Fonte: Próprio Autor

A fim de permitir a total compreensão da metodologia proposta e possibilitar a reprodução total do método, todo o processo será detalhado a seguir.

4.3 AQUISIÇÃO E NORMALIZAÇÃO DOS SINAIS

A primeira fase do processo ocorre com a aquisição das correntes de fase e das tensões dos terminais do GS. A obtenção da corrente e tensão ocorrem por meio de TCs e TPs, respectivamente, ambos instalados nos terminais do gerador. Os sinais obtidos são instantâneos, ou seja, a cada amostra que é obtida, o sistema processa o dado. Nesta proposta é necessário um TC por fase independentemente da quantidade de enrolamentos por fase que o GS possua. A taxa de amostragem utilizada foi de 32 amostras/ciclos. Assim, após a aquisição do sinal instantâneo da corrente e tensão, ocorre à normalização em (4.1) e (4.2).

$$I_k = \frac{ik}{I_S} \quad (4.1)$$

$$V_k = \frac{vk}{V_S} \quad (4.2)$$

onde:

k é a fase podendo ser a fase A, B ou C;

I_k representa a corrente normalizada;

ik a corrente instantânea em (A);

V_k representa a tensão normalizada;

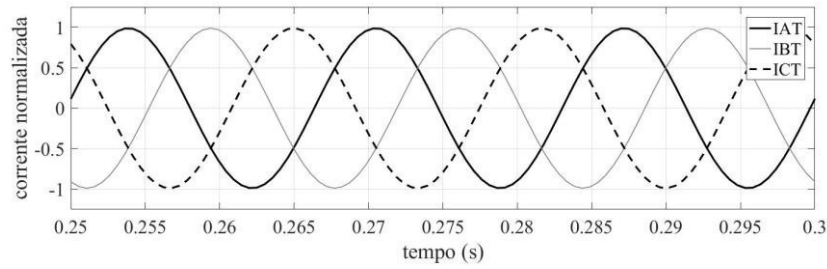
vk a tensão instantânea em (A);

I_S é a corrente do secundário do TC;

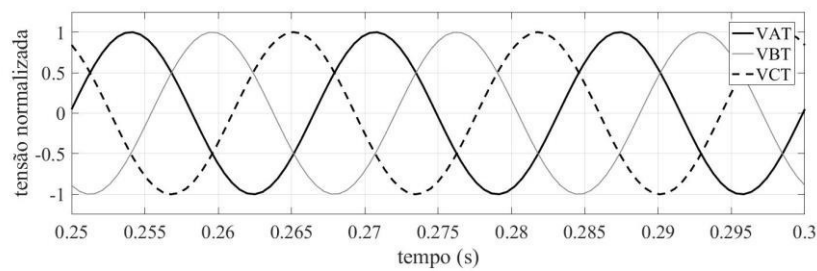
V_S é a tensão do secundário do TP.

As Figura 4.2 (a) e (b) mostram a corrente e a tensão normalizada, respectivamente. Após esse processo, os valores de corrente e tensão oscilam de -1 a +1, ou seja, quando o GS estiver operando com carga nominal os valores de pico se limitam em 1. Dessa forma, pode-se aplicar o método para qualquer potência e tensão de operação, pois os valores ficarão padronizados.

Figura 4.2 – Corrente e Tensão Normalizada.



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor

4.4 PROCESSAMENTO DOS SINAIS ATRAVÉS DE FILTROS MORFOLÓGICOS

4.4.1 Filtro MM para corrente (ACOF_{ABC})

A primeira etapa no desenvolvimento do filtro morfológico é a constituição do elemento estruturante (SE) do filtro morfológico da corrente, que será o elemento chave nas operações morfológicas. Ele foi criado com um formato de um vetor com o tamanho de um ciclo do sinal analisado mais uma amostra, ou seja, com 33 amostras e peso 1,0, conforme é apresentado em (4.3).

Conforme tratado por Gautam; Brahma, (2009a), para a determinação da SE não há uma forma definida, sendo sua estruturação realizada pelo empirismo, isto é, deve-se definir seu tamanho e peso de forma que retorne bons resultados e não possua perdas nas informações do sinal. Porém, para a assimetria gerada no instante da falta é necessário utilizar um SE com o tamanho de um ciclo mais uma amostra.

$$SE = [1_{(1)}1_{(2)}1_{(3)} \dots 1_{(33)}] \quad (4.3)$$

Nesta metodologia, o elemento estruturador (SE) foi construído com peso 1, devido a normalização resultar em sinais com essa magnitude. No entanto, poderia ser usado qualquer

valor, porque quando aplicar o Filtro MM na técnica utilizada os valores resultantes tendem a se opor a valores negativos e positivos. O que se deve levar em consideração é que o SE seja o mesmo para todas as operações utilizadas, caso contrário, os resultados não serão adequados para a detecção da falta entre espiras. Dessa forma, em funcionamento normal, sem falta, o sinal resultante do Filtro MM tenderá a zero.

Após a determinação de SE, esse valor permanecerá o mesmo para qualquer caso ou tipo de GS. Posteriormente são calculados os valores da média do fechamento e da abertura denominado de $ACOF_k$ (do inglês, *Average Closing Opening Filter*) de cada fase, onde K é a fase (A, B e C) e I a corrente. A equação que realiza essa operação é apresentada por (4.4). A Figura 4.3 apresenta o resultado da erosão, dilatação e $ACOF_k$ das três correntes de fase. Devido o valor de $ACOF_k$ ser o valor absoluto, quando a assimetria for negativa, o resultado do filtro será positivo. O GS utilizado na Figura 4.3 possui dois enrolamentos por fase, a falta teve 50% de supressão e com carregamento nominal.

$$ACOF_k = \left| \frac{(I_{K_{erosion}} \oplus g)(n) + (I_{K_{dilation}} \ominus g)(n)}{2} \right| \quad (4.4)$$

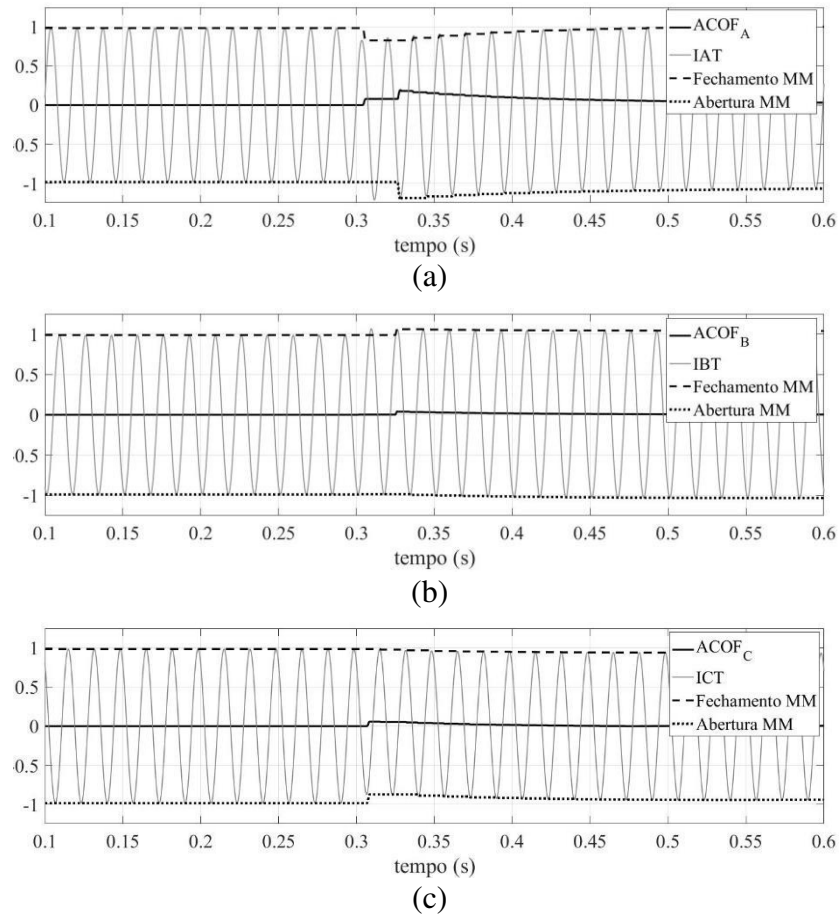
A Figura 4.3(a) mostra os resultados do filtro MM da fase A, (b) os resultados da fase B e (c) da fase C. Observa-se nas figuras que mesmo a falta ocorrendo na fase A, as fases B e C também são levemente afetadas pela falta entre espiras e geram uma pequena assimetria. Dessa forma, em ocorrência da falta entre espiras em uma das fases, surgirá um transitório nas outras duas fases.

Até a pré-falta ($t < 0,3$ s) o sinal do fechamento MM fica nos limites dos valores positivos de pico da corrente. O mesmo acontece com a abertura MM que fica nos limites dos valores negativos de pico da corrente. Observe que a média do filtro MM ($ACOF_k$) que é a média do fechamento e da abertura se opõe, ou seja, tendem a zero. Assim, em operação normal permanece em zero. Contudo, no instante da falta ($t = 0,3$ s) o sinal da corrente desloca-se para valores positivos, pois o fechamento e abertura tiveram modificações quando ocorreu a falta.

Posteriormente é realizada a média da saída $ACOF_k$ de cada fase, sendo denominado de $ACOF_{ABC}$ e calculado em (4.5). Realizando a obtenção $ACOF_{ABC}$ permite não ocorrer uma identificação da falta errada em outra fase. A Figura 4.4 apresenta os $ACOF_A$, $ACOF_B$, $ACOF_C$ das fases e o $ACOF_{ABC}$. Assim, essa é a primeira característica da falta entre espiras que será

utilizada para detecção da falta, isto é, a ocorrência de uma assimetria nas correntes do terminal.

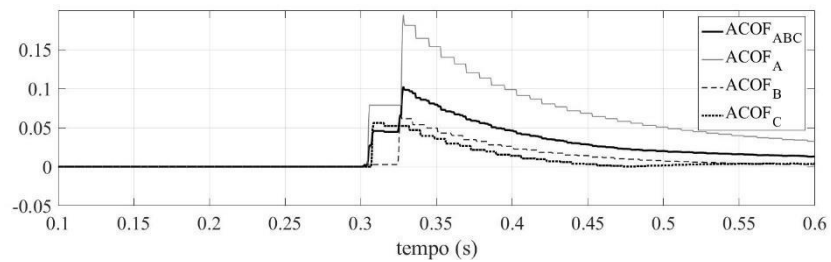
Figura 4.3 – Resultado do filtro $ACOF_k$ em cada fase.



Fonte: Próprio Autor

$$ACOF_{ABC} = \frac{ACOF_A + ACOF_B + ACOF_C}{3} \quad (4.5)$$

Figura 4.4 – Filtro ACOF.



Fonte: Próprio Autor

4.4.2 Filtro MM para tensão (CLO_{ABC})

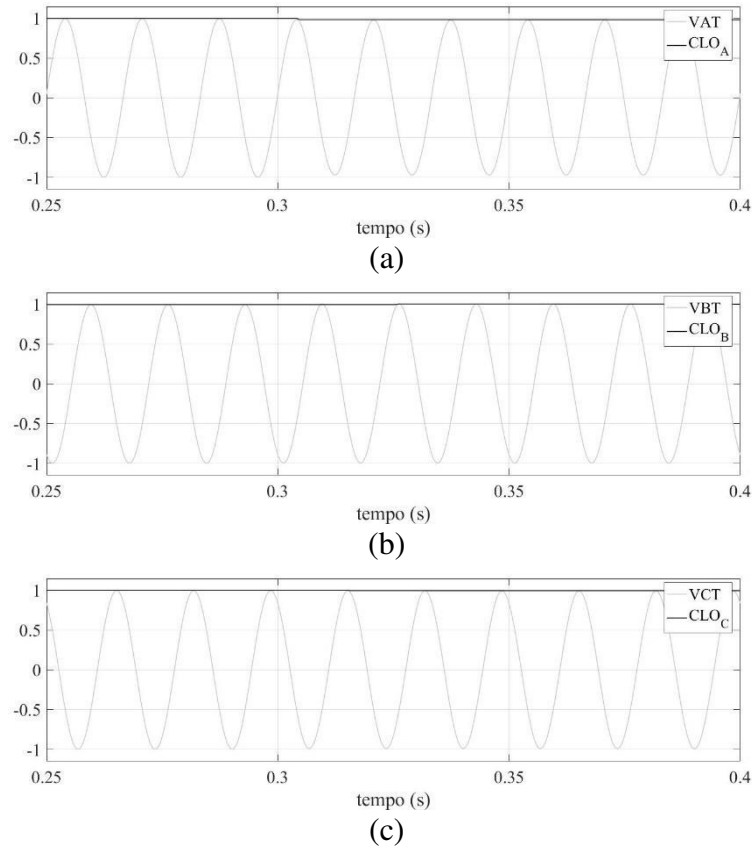
A utilização do filtro MM para tensão é uma etapa muito importante, pois é a partir dele que a falta entre espiras consegue ser distinguida das faltas externas. Em uma condição de operação normal ou de falta, o filtro CLO_{ABC} não irá modificar, isto é, permanecerá com seus valores iguais. Dessa forma, em uma ocorrência de uma falta externa os valores de CLO_{ABC} tenderão a valores menores que em operação normal.

Assim, a segunda etapa no desenvolvimento do filtro morfológico é a constituição do elemento estruturante (SE) do filtro da tensão. A função do elemento estruturante da tensão também foi criado com um formato de um vetor com o tamanho de um ciclo do sinal analisado mais uma amostra, ou seja, com 33 amostras, conforme é apresentado em (4.3), ou seja, possui o mesmo formato do filtro da corrente.

Nesta metodologia, o elemento estruturador (SE) tem valores iguais ao filtro da corrente. Dessa forma, em funcionamento normal, sem falta, o sinal resultante do Filtro MM tenderá a valor 1e em ocorrência da falta entre espiras, este valor ainda permanecerá em 1, isto é, o valor do filtro MM da tensão não pode sofrer alterações em caso de falta ou não.

Após a determinação de SE, esse valor permanecerá o mesmo para qualquer caso ou tipo de gerador. Posteriormente, são calculados o valor do fechamento denominado de CLO_K de cada fase, onde K é a fase (A, B e C) e V a tensão. A equação que realiza essa operação é apresentada por (4.6). A Figura 4.5 apresenta o resultado do fechamento CLO_K das três tensões do terminal. O GS utilizado é de seis enrolamentos por fase e falta entre espiras é a mesma apresentada na Figura 4.3, isto é, 50% de supressão com gerador com carga nominal.

Figura 4.5 – Resultado do filtro CLO_K em cada fase.



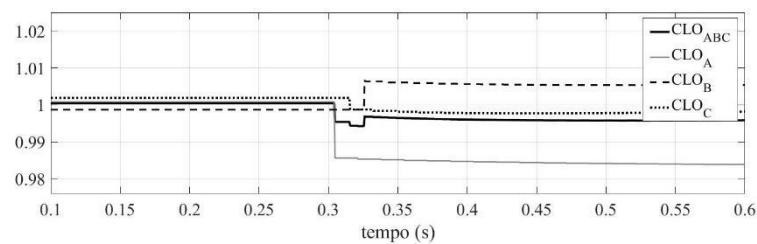
Fonte: Próprio Autor

$$CLO_K = (V_{Kerosion} \oplus g)(n) \quad (4.6)$$

Posteriormente é realizada a média dos CLO_K de cada fase, sendo denominado de CLO_{ABC} que é calculado por (4.7). A Figura 4.6 apresenta os CLO_K das fases e o CLO_{ABC} . Assim, essa é a segunda característica da falta entre espiras que será utilizada para detecção da falta, isto é, não pode ocorrer a variação desse filtro em ocorrência de falta.

$$CLO_{ABC} = \frac{CLO_A + CLO_B + CLO_C}{3} \quad (4.7)$$

Figura 4.6 – Filtro CLO para uma falta entre espiras ao GS

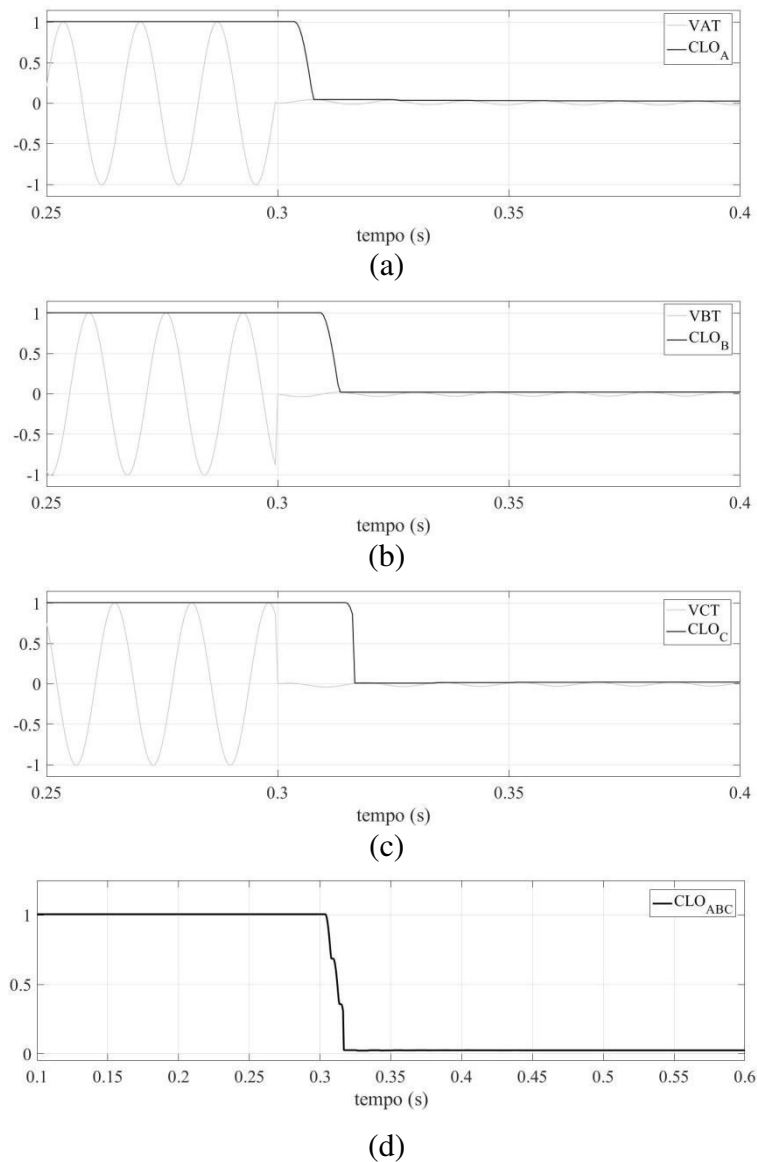


Fonte: Próprio Autor

Em caso de ocorrência de uma falta externa o filtro CLO_{ABC} irá ter uma alteração no seu valor conforme é apresentado pela Figura 4.7 que apresenta uma falta trifásica. A falta apresentada é uma falta externa trifásica ocorrida nas proximidades dos terminais do GS.

Por fim, o filtro MM utilizados na detecção das faltas entre espiras irá ser identificada por duas características, o aparecimento de uma assimetria pelas correntes do terminal e um sinal constante no filtro da tensão.

Figura 4.7 – Detalhe da saída do Filtro CLO para falta trifásica externa ao GS. (a) CLO_A (b) CLO_B (c) CLO_C (d) CLO_{ABC}

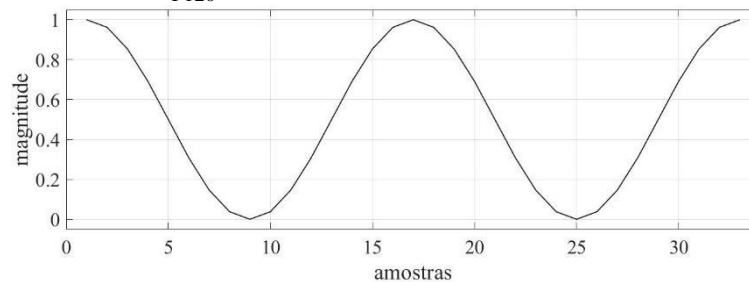


Fonte: Próprio Autor

4.4.3 Filtro MM para corrente em 120 Hz ($ACOF_{120}$)

A última etapa no desenvolvimento do filtro morfológico é a constituição do elemento estruturante (SE) do filtro morfológico da corrente para isolar o sinal em uma frequência de 120 Hz, que será o elemento chave nas operações morfológicas. Ele foi criado com um formato de um vetor com o tamanho de um ciclo do sinal analisado mais uma amostra, ou seja, com 33 amostras e peso variando de 0 a 1, conforme é apresentado pela Figura 4.8. Dessa forma, SE possui o formato de um cosseno de 120 Hz.

Figura 4.8 – SE do filtro $ACOF_{F120}$.

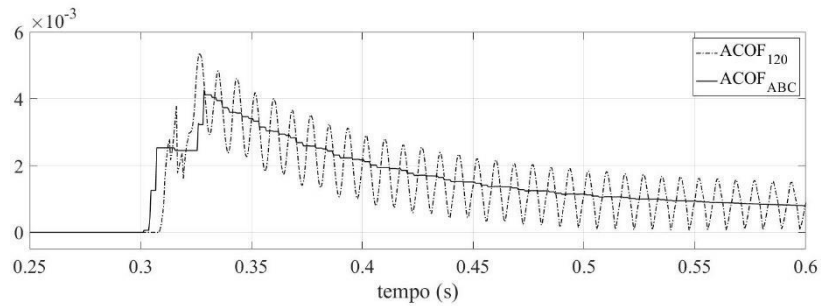


Fonte: Próprio Autor

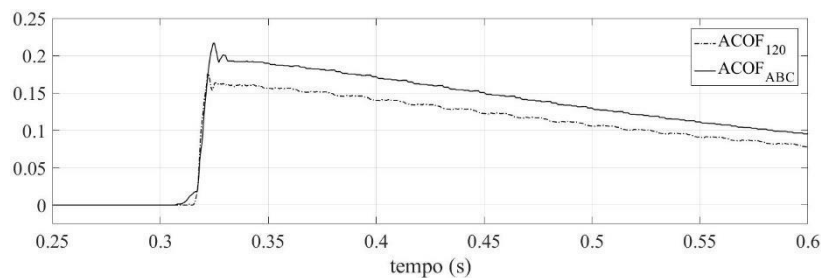
As demais operações seguem o mesmo padrão do filtro $ACOF_{ABC}$. O que os difere é somente o formato do SE. Além disso, esse filtro não necessitará de um *threshold* como nos filtros $ACOF_{ABC}$ e CLO_{ABC} . No processo de detecção da falta, é realizado um comparativo entre $ACOF_{120}$ e $ACOF_{ABC}$, sendo que a falta somente é detectada se $ACOF_{120}$ for maior que 1,2 o valor de $ACOF_{ABC}$. Caso contrário, a proteção não atua.

A Figura 4.9 apresenta os dois filtros para uma falta entre espiras e uma falta externa distante a 100 km do GS. Pode-se observar em (a) que a oscilação que ocorre fica oscilando acima e abaixo do valor de $ACOF_{ABC}$. Dessa forma, quando $ACOF_{120}$ for maior que $ACOF_{ABC}$ a proteção atua, enquanto em (b), em uma falta externa, o valor $ACOF_{ABC}$ é maior que $ACOF_{120}$.

Figura 4.9 –Saída do filtro $ACOF_{120}$ e $ACOF_{ABC}$ (a)falta entre espiras (b)falta trifásica 100km de distância.



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor

4.5 DETERMINAÇÃO DO $THRESHOLD$ (Th)

A determinação do *Threshold* (Th) é um processo vital para o correto funcionamento do algoritmo. Pois é a partir dele pode-se ter um método mais sensível, isto é, conseguir detectar pequenas porcentagens de supressão de enrolamento e sem atuações indevidas. Determinar a melhor forma de obter valor de Th foi uma etapa de testes e verificações. Dentre os testes realizados para se determinar a melhor forma de obter o valor de Th , buscou-se uma solução adaptativa onde conforme a ocorre a mudança de carga, a atualização de Th é realizada.

A configuração do limite Th é calculada por uma função de ajuste adaptável com base na potência aparente nominal GS. O valor limite é constantemente adaptado com base na magnitude do sinal de saída $ACOF_{ABC}$ e CLO_{ABC} . Dessa forma, a cada mudança de carga realizada pelo operador da usina o algoritmo recebe um sinal que ocorreu a mudança de carga e posteriormente realiza-se a determinação do novo Th . Enquanto ocorre a determinação do valor novo, o GS fica protegido pelo Th antigo, dessa forma, em caso de uma ocorrência de falta entre espiras no instante da determinação o algoritmo ainda irá detectar.

4.5.1 *Threshold* para $ACOF_{ABC}$ (TH_{ACOF})

A determinação de TH_{ACOF} é realizada pela por (4.8).

$$TH_{ACOF}(n) = 1,1 \cdot Max[ACOF_{ABC}(n), LW] \quad (4.8)$$

Onde:

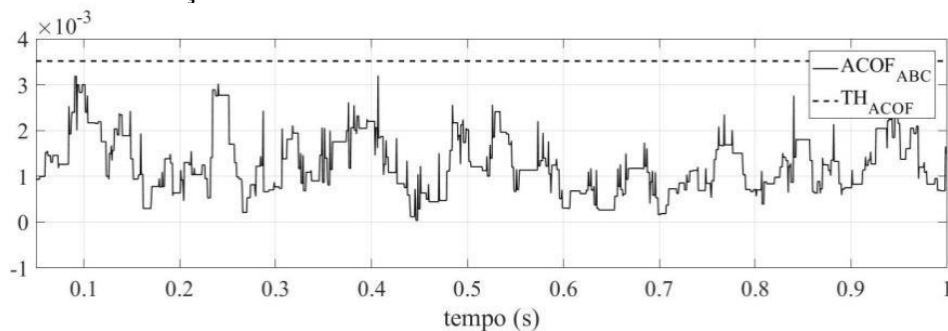
TH_{ACOF} é o valor do *threshold* do filtro da corrente;

Max é o valor máximo de ACOF em uma determinada janela de análise;

LW é o tamanho da janela.

Na Figura 4.10, observa-se que no período analisado houve diversos picos positivos bem como negativos. Isso ocorre devido ao ruído (50 dB) incluído no sinal. E dessa forma o maior valor positivo, é chamado de Máximo Valor (MV) e são acrescentados 10% neste valor para determinação do TH_{ACOF} . Este foi o maior valor encontrado durante a verificação do sinal. Dessa forma, entende-se que em uma condição de operação normal, o gerador irá gerar na saída do filtro valores que não ultrapassem o MV por um período. Sendo assim, a determinação do TH é definida para o GS sob análise.

Figura 4.10 – Determinação de TH_{ACOF} .



Fonte: Próprio Autor

4.5.2 *Threshold* para CLO_{ABC} (TH_{CLO})

De uma forma semelhante ao realizado com o Th da corrente, o TH_{CLO} é determinado por (4.9). Porém, é determinado pelo valor mínimo e utiliza-se 90% do valor obtido.

$$TH_{CLO}(n) = 0,9 \cdot Min[CLO_{ABC}(n), LW] \quad (4.9)$$

Onde:

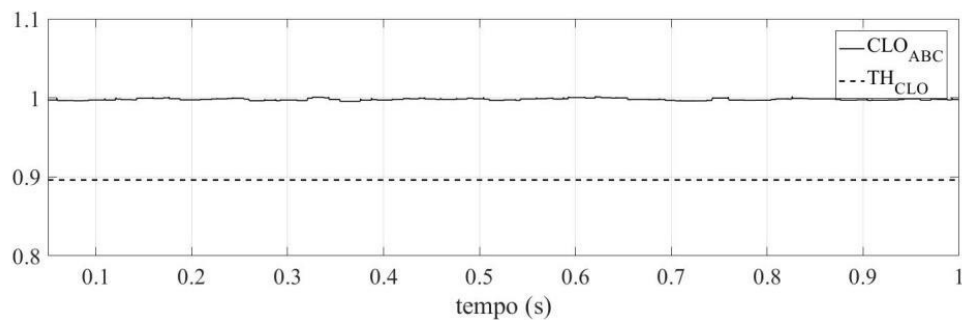
TH_{CLO} é o valor do *threshold* do filtro da tensão;

Min é o valor mínimo de CLO_{ABC} em uma determinada janela de análise;

LW é o tamanho da janela.

A Figura 4.11 apresenta a determinação do TH_{CLO} . Observa-se que para determinação é menos afetada pelo ruído inserido.

Figura 4.11 – Determinação de TH_{CLO} .

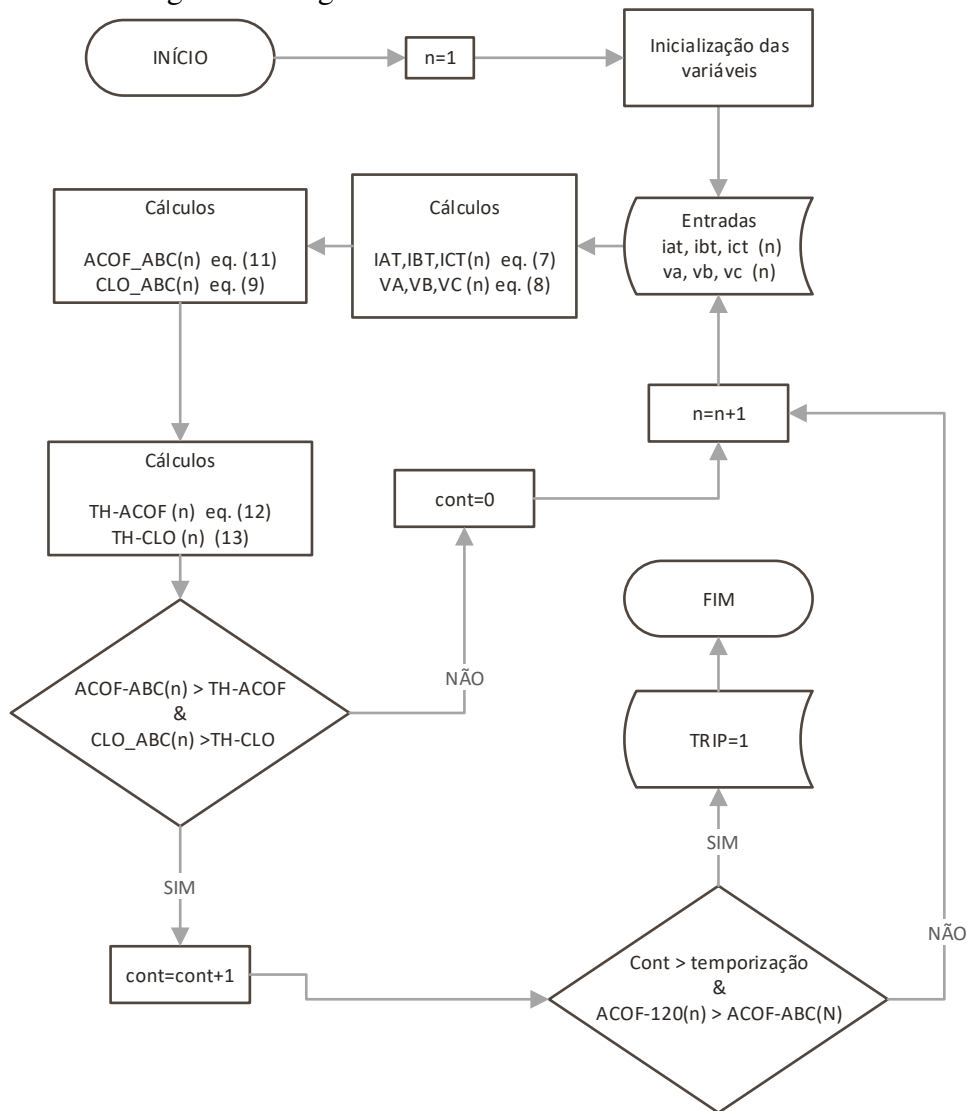


Fonte: Próprio Autor

4.6 LÓGICA DE DISPARO

A lógica de disparo, mostrada no fluxograma da Figura 4.12 utiliza o valor de $ACOF_{ABC}$ para verificar se ocorreu a falta entre espiras ou não. O filtro CLO_{ABC} , na ocorrência da falta entre espiras, não sofre variações significativas. Nenhuma configuração é necessária nesse processo, pois o algoritmo utiliza os valores de T_H obtidos anteriormente e a temporização específica de 2 ciclos. Dessa forma, após a verificação as condições das saídas de $ACOF_{ABC}$ e CLO_{ABC} , o tempo é incrementado pelo contador $cont = cont + 1$. Se o contador atingir o valor predefinido de tempo (2 ciclos ou 64 amostras) e $ACOF_{120} > ACOF_{ABC}$, a variável TRIP recebe valor lógico de 1, indicando que a falta entre espiras é detectada, caso contrário, retorna para a nova aquisição do sinal.

Figura 4.12 – Fluxograma do algoritmo.



Fonte: Próprio Autor

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento algoritmo. Foram apresentados o motivo e forma de aquisição dos sinais, normalização e a definição dos filtros MM denominados $ACOF_{ABC}$ e CLO_{ABC} bem como suas características frente uma falta entre espiras. Por fim, apresentaram-se as formas de obtenção de TH_{ACOF} e TH_{CLO} apresentando os sinais com aplicação de ruído. Por fim, a lógica de disparo do relé de proteção simplificado por um fluxograma.

5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DE ANÁLISE

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados de nas simulações e testes do algoritmo proposto. Os critérios de teste, tais como, amostragem da simulação, porcentagem de supressão das faltas entre espiras, nível de ruído nos sinais, carregamento do gerador e tipos de faltas externas serão elucidados. Será realizada uma breve descrição sobre o sobre o *software* utilizado, bem como, o modelo de máquina além da contextualização da simulação do tipo *software-in-the-loop (SIL)*, em tempo real utilizada na validação do algoritmo desenvolvido.

5.2 HYPERSIM

As simulações em tempo real e malha fechada vêm cada vez mais sendo utilizadas por empresas do setor elétrico. O software HYPERSIM pertencente ao pacote de soluções em simulações em tempo real da empresa Opal-RT Technologies. A ferramenta oferece modelos elétricos para simular uma variedade de eventos e estudos em sistemas de médio a grande porte. A Figura 5.1 mostra a tela de trabalho do HYPERSIM. Um destaque é a simulação em tempo real que é amplamente empregado no campo da eletrônica de potência e sistemas de potência. Os testes foram realizados no Laboratório Multiusuário de Simulação Computacional da UFSM e utilizou-se o equipamento OP5707 (Figura 5.2) que é um sistema de simulação completo. Em suas interações é possível realizar simulações em *software-in-the-loop (SIL)*, *hardware-in-the-loop (HIL)* e *power hardware-in-the-loop (PHIL)*. Essas ferramentas permitem realizar testes mais rápidos e realistas a fim de atender a rápida evolução que o setor de energia possui.

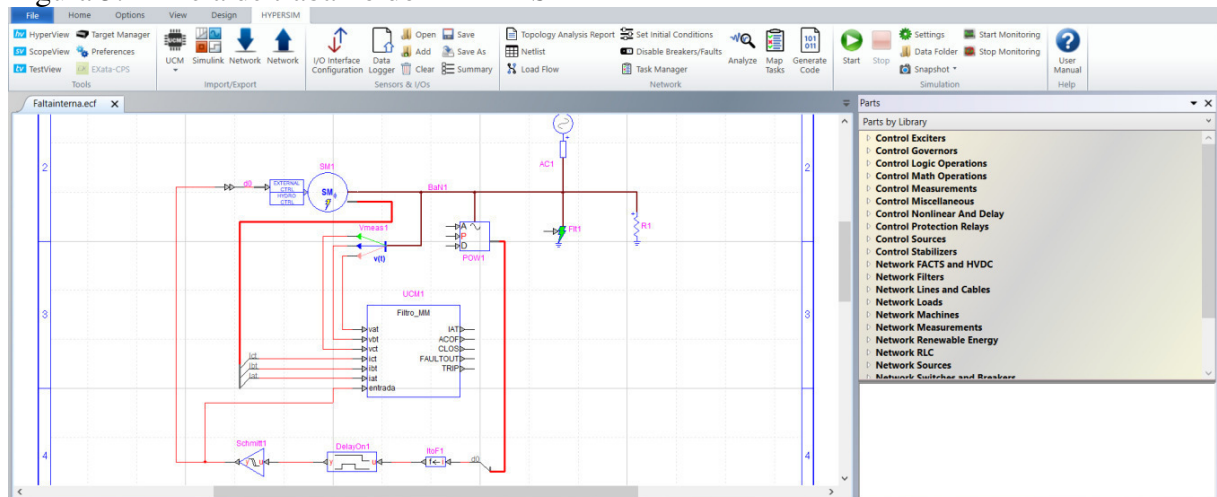
A simulação SIL, utilizada nos testes desta dissertação, representa a integração entre o código fonte em uma simulação do modelo matemático (que representa o sistema real). Isso se traduz em um ambiente de simulação prático para o desenvolvimento e testes. Dessa forma, é possível modificar diretamente e iterativamente o código fonte conectando diretamente ao modelo digital do sistema. Suas vantagens estão relacionadas à possibilidade de testar o *software* desenvolvido antes de inicializar o processo de prototipagem, que por consequência

permite aumentar significativamente, o tempo das fases de um projeto, pois é possível detectar prematuramente defeitos do código fonte, que por consequência os custos de solução de problemas em estágios mais avançados do projeto(OPAL-RT, 2019b).

Já o HIL, sendo considerada uma evolução do SIL, é o padrão para desenvolver e testar sistemas mais complexos de controle. Nessa plataforma, a planta física é substituída por um modelo de computador equivalente. Assim, utilizam-se entradas e saídas do simulador em tempo real que permite realizar controle e comunicação com outros equipamentos. Assim, o simulador HIL consegue representar com precisão a planta desejada e permitindo comunicação entre sensores e atuadores, sem a necessidade de realizar diretamente no equipamento físico da planta real. Suas vantagens são a redução de risco, custo e tempo necessário para testar sistemas complexos (OPAL-RT, 2019c).

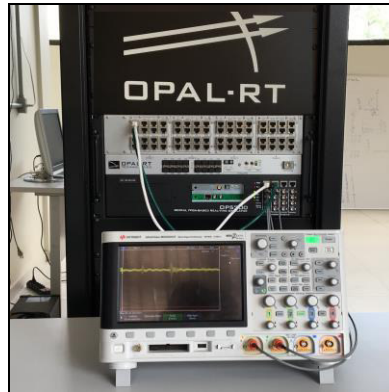
E por fim, o PHIL, que é uma extensão de HIL, seu diferencial está não apenas sinais de baixa tensão ou corrente, mas os valores de energia necessários pelo dispositivo sob teste. Possui amplificadores de potência que permite a simulação de fluxos de maior potência(OPAL-RT, 2019d).

Figura 5.1 – Tela de trabalho do HYPERSIM



Fonte: Próprio Autor

Figura 5.2 – Simulador Digital em Tempo Real utilizado, modelo OP5707



Fonte: Próprio Autor

5.3 VISÃO GERAL DO MODELO DE MÁQUINA SÍNCRONA

A maioria dos simuladores não possuem modelos de máquinas elétricas que permitem simular faltas internas. Assim, a maioria dos estudos envolvendo faltas internas em geradores faz uso de modelos extremamente simplificados ou fundamentados nos modelos tradicionais $dq0$. (TU et al., 2009). O modelo de gerador presente no HYPERSIM é baseado em componentes de fase, assim, permite superar as deficiências existentes na modelagem $dq0$. (LE-HUY, P., C. LAROSE, 2011). A utilização de um modelo no domínio de fase pode levar em consideração a realidade construtiva da máquina, dos enrolamentos paralelos por fase, a assimetria interna, entre outros.

O modelo *synchronous machine winding fault* (SMWF) do HYPERSIM pode representar máquinas de polos salientes ou cilíndricas operando como motores ou geradores sem aplicar a transformação de *Park*, pois é baseada na teoria das funções de enrolamento. Com isso, é possível simular diversas falhas internas no estator e seus impactos nos diversos enrolamentos paralelos por fase. Este modelo suporta oito tipos de falhas internas do estator. A localização da falha é especificada em porcentagens, onde 0% é o ponto neutro e 100% é o terminal da fase (OPAL-RT, 2019b)). O equacionamento do modelo trabalhado é apresentado pela matriz de reatância do estator (X_s) para um único enrolamento por fase é dada por:

Onde:

X_{ls} é a reatância de dispersão;

X_{Axx} e X_{Bxx} são as partes constantes e variantes do tempo de autreatância;

X_{Axy} e X_{Bxy} são as reatâncias mútuas e θ é o ângulo elétrico do rotor.

A matriz de reatância mútua (X'_{sr}) entre o estator e o rotor, referida ao estator para uma máquina de pólo saliente é:

$$X'_{sr} = \begin{bmatrix} X_{mq} \cdot \cos(\theta) & X_{md} \cdot \cos(\theta) & X_{md} \cdot \cos(\theta) \\ X_{mq} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & X_{md} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & X_{md} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ X_{mq} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & X_{md} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & X_{md} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde:

X_{md} e X_{mq} são as reatâncias de magnetização para o eixo direto e de quadratura, respectivamente. Por fim, a matriz de reatância do rotor (X'_{sr}), referente ao estator, assume a seguinte forma.

$$X'_{sr} = \begin{bmatrix} X_{lkq} + X_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & X_{lfq} + X_{md} & X_{md} \\ 0 & X_{md} & X_{lkd} + X_{md} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde:

X_{lkq} , X_{lfd} e X_{lkd} são as reatâncias de dispersão do eixo q , o enrolamento de campo e o amortecedor do eixo d .

Os seguintes parâmetros são necessários para simulação.

- X_{ls} : Reatância de dispersão da armadura (pu);
- X_{md} : Reatância de magnetização direta (pu);
- X_{mq} : Reatância de magnetização de quadratura (pu);
- X_{lkq1} : Reatância de dispersão do enrolamento amortecedor de quadratura 1 (lado do estator) (pu);
- X_{lkq2} : Reatância de dispersão do enrolamento amortecedor de quadratura 2 (lado do estator) (pu);
- X_{lfd} : Reatância de dispersão do enrolamento de campo (lado do estator) (pu);
- X_{lkd} : Reatância de dispersão do enrolamento amortecedor direto (lado do estator) (pu);
- R_s : Resistência da armadura (pu);
- R_{kq1} : Resistência do enrolamento amortecedor de quadratura 1 (lado do estator) (pu);
- R_{kq2} : Resistência do enrolamento amortecedor de quadratura 2 (lado do estator) (pu);
- R_{fd} : Resistência do enrolamento de campo (lado do estator) (pu);
- R_{kd} : Resistência do enrolamento amortecedor direto (lado do estator) (pu);

- X_g : Resistência neutra e reatância (pu);
- H : Constante de inércia (pu.s);
- F : Constante de atrito (pu);
- P : Número de polos;
- N_{slot} : Número de ranhuras do estator;
- N_{cs} : Número de condutores por ranhura;
- N : Número de enrolamentos paralelos por fase;
- Funções de enrolamento para fase completa e cada enrolamento individual.

Na aquisição, os seguintes sinais são disponibilizados pelos sensores:

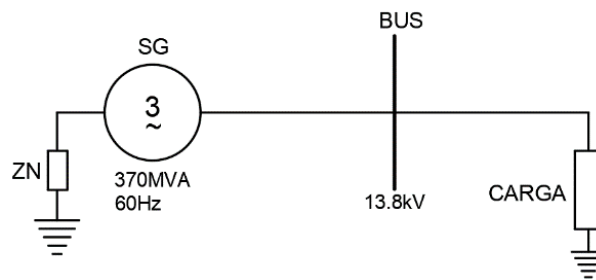
- I_{at} , I_{bt} , I_{ct} : Corrente de fase nos terminais da máquina (A);
- I_{an} , I_{bn} , I_{cn} : Corrente de fase no ponto neutro da máquina (A);
- I_{Ax} , I_{Bx} , I_{Cx} : enrolamento paralelo x corrente (pu);
- I_{Afx} , I_{Bfx} , I_{Cfx} : Corrente de enrolamento com falha (x ímpar: parte superior; x par: parte inferior) (pu);
- I_n : corrente neutra (A);
- I_{df} : Corrente de falha (A);
- I_{fd} , I_{kd} , I_{kq1} , I_{kq2} : Corrente dos enrolamentos do rotor (pu);
- w : Velocidade angular elétrica (pu);
- T_e : Torque elétrico (pu);
- P_e : Potência elétrica ativa (pu);
- θ : ângulo elétrico do rotor (rad).

Normalmente, os modelos de máquina assumem que a distribuição espacial dos enrolamentos em torno do estator é senoidal. Isso é muito prático, uma vez que os cálculos de indutância e o modelo geral são simplificados. Por outro lado, uma vez que esta hipótese negligencia os harmônicos espaciais e assimetrias nos enrolamentos, esses modelos não podem levar em conta diretamente fenômenos, como falhas internas, que introduzem assimetrias. Esse tipo de falha envolve apenas um enrolamento onde várias voltas estão suprimidas.

5.4 SISTEMA TESTE

O sistema utilizado nos testes é mostrado na Figura 5.3, sendo constituído por um gerador configurado em estrela com impedância de aterramento e a carga conectada. O modelo do GS utilizado foi a *synchronous Machine winding fault* (SMWF) de 370MVA/13,8kV/60Hz. Os GS utilizados são de polos salientes e cilíndricos e cada um possui suas configurações do enrolamento específico. O GS de polos salientes refere-se ao de seis enrolamentos por fase e de polos cilíndrico sendo o de dois enrolamentos por fase. O carregamento do gerador foi realizado à carga plena (370MVA) e com 30% da carga (110MVA). Para ambos os testes, foram realizadas simulações em condição sem falta, com falta entre espiras e faltas externas. Além disso, foram simulados casos com e sem ruído.

Figura 5.3 – Sistema Teste



Fonte: Próprio Autor

A Figura 5.4 apresenta uma tela do *synmac*, onde as configurações iniciais do GS são realizadas. O *synmac* é um aplicativo do HYPERSIM onde se seleciona o tipo de rotor (saliente ou cilindro), frequência, número de polos e valores da impedância de aterramento. Os parâmetros básicos e fundamentais são valores pré-determinados para a máquina. Em *winding functions* seleciona-se as configurações dos enrolamentos, onde constam as ranhuras que os condutores serão alocados. A configuração das ranhuras é carregada no *synmac* através de uma função *.m* implementada no *Matlab*. O método de detecção desenvolvido foi testado com dois modelos de GS. Um com dois enrolamentos por fase e outro com seis enrolamentos. Por fim, determina-se o tipo de falta interna que será aplicada no GS, podendo ser falta monofásica, bifásica, bifásica-terra, trifásica, trifásica-terra, entre espiras, entre outras.

Figura 5.4 – SyncMac

The screenshot shows the SyncMac software interface with the following sections and values:

- Description:**
 - Computation of synchronous alternator parameters
 - Type of rotor: Salient-Pole
 - f (Hz): 60.0
 - Number of poles: 48
 - Rg (pu): 1000.0
 - Xg (pu): 500.0
 - Comments: Data for three-phase hydraulic synchronous machine:
- Standard Parameters (pu):**
 - Rs: 0.002636
 - Xls: 0.015
 - Xd: 0.985
 - Xd': 991264913
 - Xd'': 958907964
 - Tdo': 388481209
 - Tdo'': 592056523
 - Xq: 0.609
 - Xq':
 - Xq'': 000000001
 - Tqo':
 - Tqo'': 0.14
- Fundamental Parameters (pu):**
 - Necessary to generate simulation parameters.
 - Rs: 0.002636
 - Xls: 0.015
 - Xmd: 0.97
 - Xmq: 0.594
 - Rfd': 801032E-4
 - Rkd': 499165691
 - Rkq1': 167575245
 - Rkq2':
 - Xfd': 785561936
 - Xkd': 162656472
 - Xkq1': 979228489
 - Xkq2':
- Winding Functions:**
 - Winding information to calculate phase domain parameters
 - Winding Orders and Functions File: [Empty field]
 - Parallel Windings: 0
 - Stator slots: 0
 - Conductor/slots: 0
- Internal Fault:**
 - Type of fault: 8
 - Fault Location (%): 10.0
 - Fault Location 2 (%): 50.0
 - Fault Location 3 (%):
- Synchronous Machine Data Report:** [Empty field]
- Hypersim Synchronous Machine:**
 - Synchronous Machine Type: [Dropdown]
 - Name: [Dropdown]

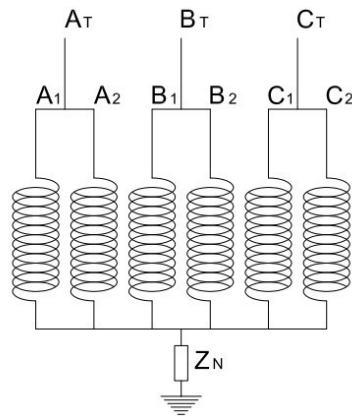
Buttons: Apply, Refresh

Fonte: HYPERSIM

5.4.1 GS com Dois Enrolamentos por Fase

O gerador de dois enrolamentos por fase, representado pela Figura 5.5, é constituído de 4 polos, rotor cilíndrico e 60 ranhuras. Os dados de alocação dos enrolamentos são apresentados no Anexo (A1), nos dados, cada valor apresentado indica em qual ranhura o enrolamento está inserido. Os parâmetros da máquina são apresentados no Anexo (A2). Neste tipo de configuração, o GS possui seus ramos dos enrolamentos identificados por A₁ e A₂ da fase A, B₁ e B₂ da fase B e C₁ e C₂ da fase C. Em todas as simulações, as faltas entre espiras foram geradas no enrolamento A₁.

Figura 5.5 – GS com dois enrolamentos por fase

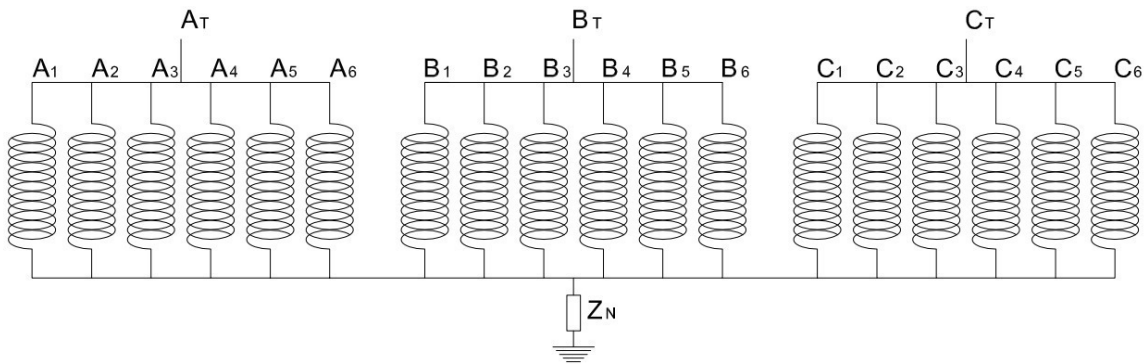


Fonte: Próprio Autor

5.4.2 GS com Seis Enrolamentos por Fase

O gerador de seis enrolamentos por fase, ilustrado na Figura 5.6, possui 48 polos, rotor de polos salientes e 540 ranhuras. Os dados de alocação dos enrolamentos são apresentados no Anexo (A3) e os parâmetros da máquina são apresentados no Anexo (A4). Neste tipo de configuração, o GS possui seus ramos dos enrolamentos identificados por A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 e A_6 da fase A, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 e B_6 da fase B e C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 e C_6 da fase C. Em todas as simulações, as faltas foram geradas no enrolamento A_1 .

Figura 5.6 – GS com seis enrolamentos por fase.



Fonte: Próprio Autor

5.5 FALTAS ENTRE ESPIRAS

As faltas entre espiras, principal objeto de estudo deste trabalho, foram realizadas em diversas porcentagens de supressão, sendo:

- 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%,9%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80% para o modelo de GS com seis enrolamentos por fase.
- Para o modelo de GS com dois enrolamentos e de 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%,9%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60%.

Optou-se em trabalhar com maior foco nas supressões menores, pois são elas que apresentam a maior dificuldade de detectar esse tipo de falta.

5.6 FALTAS EXTERNAS NA SAÍDA DO GERADOR

As faltas externas são realizadas pelo bloco *3-phase Fault-to-Ground* (Figura 5.7). Nele é possível realizar as faltas externas como: monofásicas, bifásicas, trifásicas com e sem a terra.

Figura 5.7 – Configuração das faltas externas.

The screenshot shows the configuration window for a 3-phase fault to ground in HYPERSIM. The 'General' tab is selected, and the 'Referenced operations' table is populated with the following data:

Enable	Time	Component	Time	Phase/Command	Phase operated
<input checked="" type="checkbox"/>	T1	0.3083333333333333		<input type="radio"/> P <input type="radio"/> C	A B C G
<input checked="" type="checkbox"/>	T2	1.0		<input type="radio"/> P <input type="radio"/> C	A B C G
<input checked="" type="checkbox"/>	T3			<input type="radio"/> P <input type="radio"/> C	A B C G
<input checked="" type="checkbox"/>	T4			<input type="radio"/> P <input type="radio"/> C	A B C G
<input checked="" type="checkbox"/>	T5			<input type="radio"/> P <input type="radio"/> C	A B C G
<input checked="" type="checkbox"/>	T6			<input type="radio"/> P <input type="radio"/> C	A B C G
<input checked="" type="checkbox"/>	T7			<input type="radio"/> P <input type="radio"/> C	A B C G
<input checked="" type="checkbox"/>	T8			<input type="radio"/> P <input type="radio"/> C	A B C G
<input checked="" type="checkbox"/>	T9			<input type="radio"/> P <input type="radio"/> C	A B C G

Legend for phases: A (red), B (blue), C (green), G (grey).

Fonte: HYPERSIM

Após a habilitação do bloco determinam-se os tempos de início e fim da falta e as fases que serão envolvidas no curto-circuito. As faltas externas foram realizadas a fim de verificar a robustez do algoritmo que em ocorrência da falta externa não ocorra a atuação

indevida da proteção. Durante as simulações foram realizadas as faltas externas na saída do gerador, não sendo considerado para distâncias maiores.

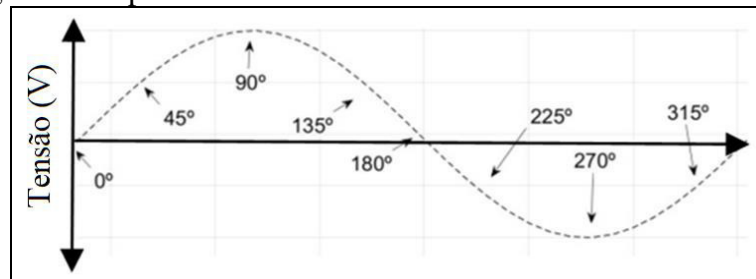
5.7 FALTA EXTERNA DISTANTES 100KM

As faltas externas distantes de 100 km e um transformador do GS. Foram realizadas faltas fase-terra, fase-fase e trifásica, sendo as duas últimas sem a terra. As características dessas faltas são muito semelhantes com uma falta entre espiras, sendo que sofrem um aumento nas correntes, as tensões permanecem equilibradas, diferente da falta externa na saída do gerador. Porém, uma característica as diferencia, sendo a harmônica de 2ª e 3ª ordem, sendo que a falta entre espiras possui e a falta externa não possui. O modelo utilizado para realização das faltas externas de longa distância foi o *HVAC_230kV_16Bus* do simulador da HYPERSIM. As características do GS são: potência de 1000MVA, carga de 30MW e - 25MVAR, tensão de linha de 13.8kV.

5.8 ÂNGULO DE INÍCIO DA FALTA ENTRE ESPIRAS

O nível de transitório, ou assimetria, gerado durante a falta entre espiras é influenciado pelo ângulo da tensão durante a incidência da falta. Assim, realizou-se o início da falta entre espiras em oito diferentes ângulos conforme é apresentado pela Figura 5.8. Essa verificação é necessária, porque no instante da falta o filtro identifica a assimetria gerada no sinal de corrente. Dessa, estes testes foram realizados somente com o pior caso de falta entre espiras, isto é, com 1% de supressão. A Tabela 5.1 apresenta o ângulo e o tempo no instante da falta que foram utilizados para o disparo no simulador.

Figura 5.8 – Ângulo de disparo.



Fonte: Próprio Autor

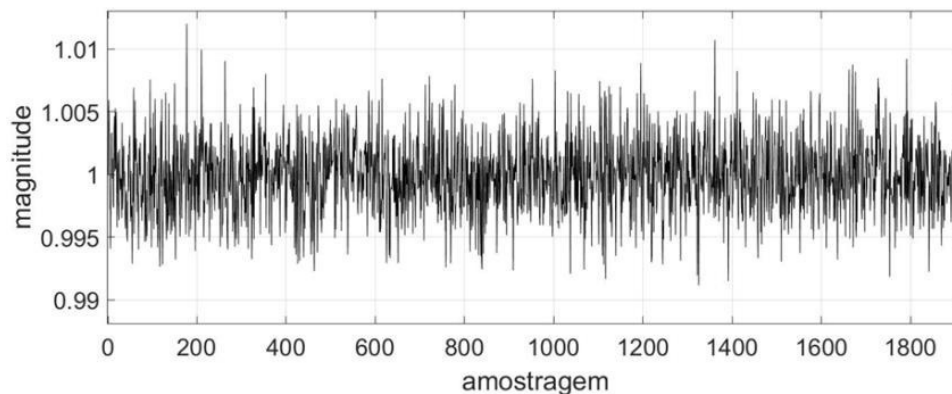
Tabela 5.1 - Equivalência de ângulo x tempo.

Ângulo (°)	Tempo (s)
0	0,3
45	0,3020833333333333
90	0,3041666666666667
135	0,30625
180	0,3083333333333333
225	0,3104166666666667
270	0,3125
315	0,3145833333333333

5.9 RUÍDO DE GAUSSIAN BRANCO ADITIVO

A fim de representar as interferências que o sistema elétrico pode gerar, nas simulações foi realizada a inclusão de um ruído Gaussiano Branco (AWGN). Segundo Durić; Durišić, (2005) os ruídos, no Sistema Elétrico de Potência, costumam variar de 50 a 70 dB. Assim, a fim de estimar a robustez do algoritmo, um ruído de 50dB foi inserido nos sinais de corrente e tensão em alguns testes realizados.

Figura 5.9 – Ruído de 50dB.



Fonte: Próprio Autor

5.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento das simulações e validação do algoritmo. Pode-se verificar que o software HYPERSIM é bastante completo e possui uma infinidade de ferramentas que auxiliam o desenvolvimento do projeto. O SIL também é uma ferramenta muito poderosa que permite validar o código fonte desenvolvida por meio dos equipamentos disponíveis.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados nos testes com algoritmo desenvolvido frente aos diversos cenários de faltas internas e externas simulados computacionalmente e que foram elucidados no Capítulo 4. Além das simulações computacionais de modo *offline*, o método proposto foi validado com um caso real de faltas entre espiras. Por fim, foram realizados alguns testes com simulações em tempo real através da metodologia SIL, onde foi possível comprovar a robustez do algoritmo e possibilidade de implementação em hardware. Todos os casos simulados foram divididos em Casos, dessa forma, quando o número se repetir indica que se trata do mesmo GS.

6.2 CONDIÇÃO SEM FALTA

Quando o GS opera em condições normais, sem falta, as correntes e tensões estão equilibradas. Nessa condição, o algoritmo desenvolvido precisa ter a operação correta, isto é, não pode atuar indevidamente mesmo quando os sinais de corrente apresentem ruídos inerentes ao processo de medição. A Tabela 6.1 apresenta os casos realizados em uma condição sem falta. Foram realizados os testes sem e com 50 dB de ruído, além da variação da carga. Também foram testados os dois modelos de GS, ou seja, dois e seis enrolamentos por fase.

Tabela 6.1 - Resultados de condição sem falta

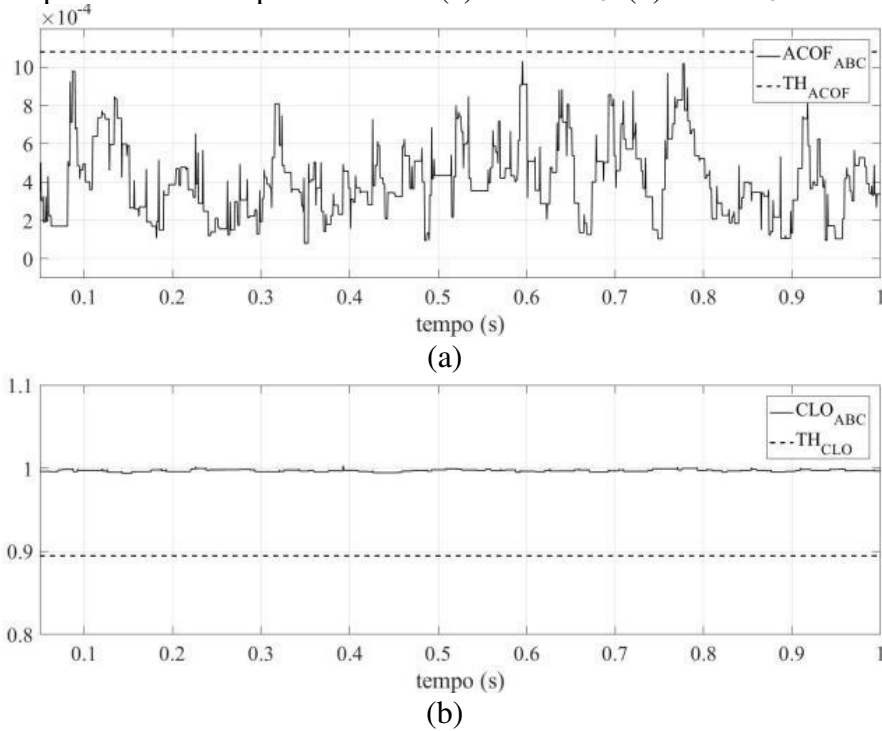
Caso	Número de enrolamentos por fase do gerador	Carregamento (MVA)	Ruído (dB)	Instante de <i>trip</i> (s)	Operação correta
1	2	110	50	x	Sim
2	6	110	50	x	Sim
3	6	370	50	x	Sim
4	2	110	Não	x	Sim
5	6	110	Não	x	Sim
6	6	370	Não	x	Sim

x não atuou

Para essas situações, a saída do filtro $ACOF_{ABC}$ permanece abaixo do valor de TH_{ACOF} , conforme o Caso 3 que é mostrado na Figura 6.1. A saída do filtro CLO_{ABC} permanece em

valores próximos a 1 e TH_{CLO} com valores de 90% do valor do filtro, como mostra a Figura 6.1(b). Quando o GS está operando com ruído algumas oscilações mais visíveis na saída dos filtros são esperadas. A oscilação vista foi provocada pelo ruído AWGN de 50dB.

Figura 6.1– Resposta dos filtros para o Caso 3 (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} .



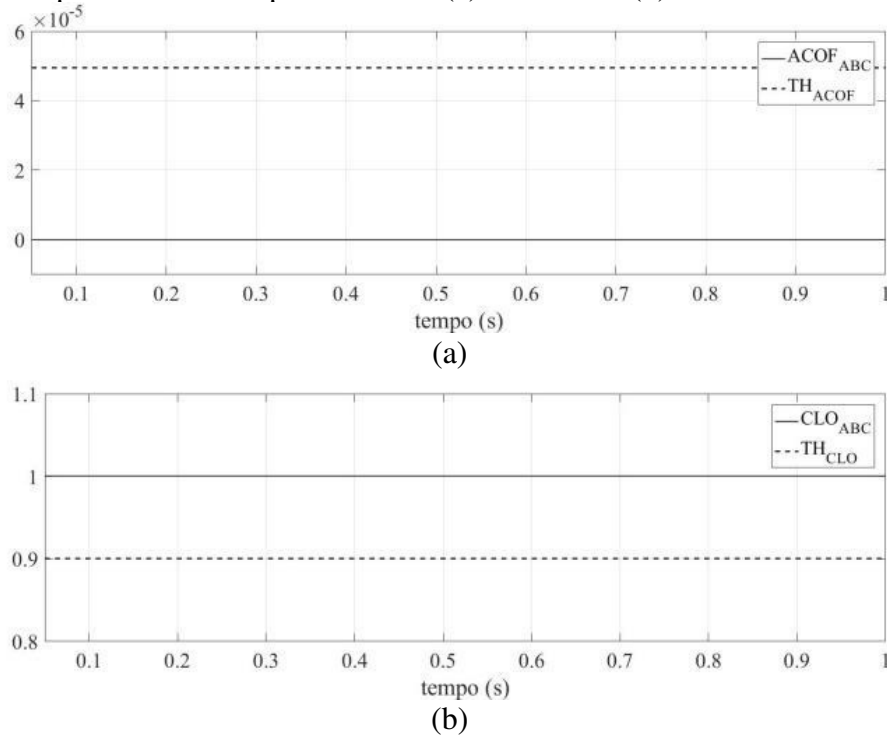
Fonte: Próprio Autor

A Figura 6.2 apresenta a saída do filtro para o Caso 6, uma condição sem falta e sem ruído. Pode-se observar que o valor de $ACOF_{ABC}$ permaneceu em zero. Quando isso ocorre o valor de TH_{ACOF} assume valor de 0.5×10^{-4} que é um valor mínimo pré-determinado, a fim do TH_{ACOF} não permanecer com valor zero.

Pode-se observar que a Figura 6.1e a Figura 6.2 os valores de $ACOF_{ABC}$ permaneceram abaixo do TH_{ACOF} , isso indica que não houve ocorrência de falta. Já os valores de CLO_{ABC} são analisados somente quando ocorrer o aparecimento da assimetria no sinal em $ACOF_{ABC}$. Em uma situação de operação normal, seus valores permanecem em 1, podendo sofrer algumas oscilações devido o ruído inserido. Pode-se observar, ainda, na Figura 6.1 e a Figura 6.2 que o filtro CLO_{ABC} , nas condições de ruídos, é pouco afetado em comparação ao filtro $ACOF_{ABC}$ que possui uma influência significativa em função da quantidade de ruído presente.

O algoritmo demonstrou-se estável em ambas as condições submetidas (com e sem ruído), além das condições construtivas da máquina (dois e seis enrolamentos) e carga (110MVA e 370MVA) apresentaram estabilidade no funcionamento.

Figura 6.2 – Resposta dos filtros para o Caso 6(a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} .



Fonte: Próprio Autor

6.3 FALTAS ENTRE ESPIRAS SEM RUÍDO

A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos testes de faltas entre espiras. Os casos testados variaram o carregamento e percentual de enrolamento suprimido. Em todos os casos apresentados nesta tabela, a falta foi aplicada no instante $t = 300$ ms o que equivale ao ângulo de incidência de falta de 0° . Além disso, nestes casos, foi utilizado o gerador de seis enrolamentos por fase.

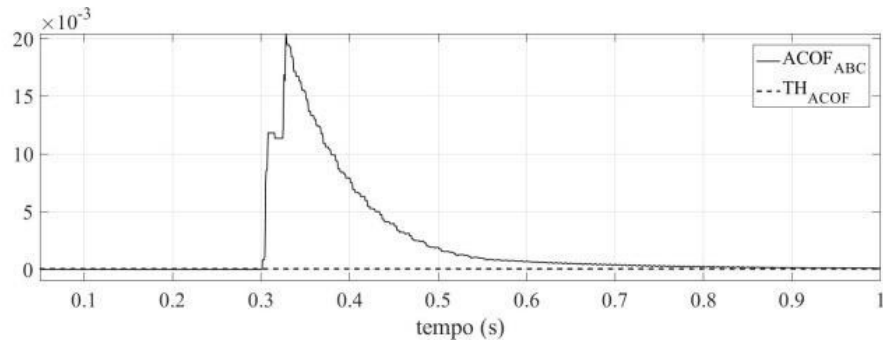
Tabela 6.2 – Resultados do método desenvolvido para casos de faltas entre espiras do GS de 6 enrolamentos por fase.

Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Instante da falta (ms)	Instante de <i>trip</i> (ms)	Tempo para operação (ms)	Operação correta
7	110	80	300	336,98	36,98	Sim
8	110	70	300	336,46	36,46	Sim

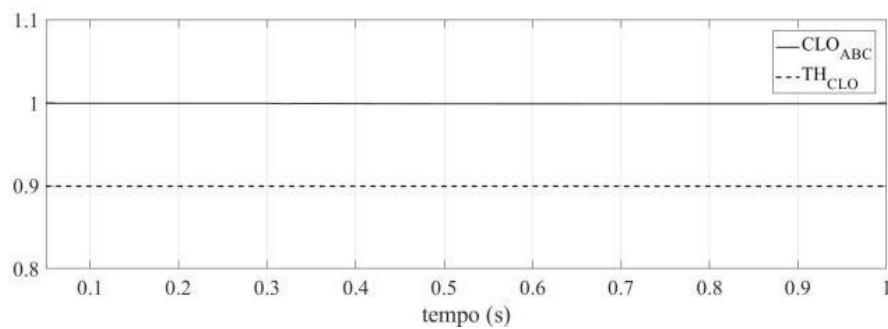
9	110	60	300	335,94	35,94	Sim
10	110	50	300	335,94	35,94	Sim
11	110	40	300	336,46	36,46	Sim
12	110	30	300	336,46	36,46	Sim
13	110	20	300	336,46	36,46	Sim
14	110	10	300	335,42	35,42	Sim
15	110	9	300	335,42	35,42	Sim
16	110	8	300	335,42	35,42	Sim
17	110	7	300	334,90	34,90	Sim
18	110	6	300	334,90	34,90	Sim
19	110	5	300	343,23	43,23	Sim
20	110	4	300	342,71	42,71	Sim
21	110	3	300	342,71	42,71	Sim
22	110	2	300	341,15	41,15	Sim
23	110	1	300	341,15	41,15	Sim
24	370	80	300	344,27	44,27	Sim
25	370	70	300	344,27	44,27	Sim
26	370	60	300	336,46	36,46	Sim
27	370	50	300	344,27	44,27	Sim
28	370	40	300	335,94	35,94	Sim
29	370	30	300	335,42	35,42	Sim
30	370	20	300	335,42	35,42	Sim
31	370	10	300	337,50	37,50	Sim
32	370	9	300	336,98	36,98	Sim
33	370	8	300	336,98	36,98	Sim
34	370	7	300	335,42	35,42	Sim
35	370	6	300	376,04	76,04	Sim
36	370	5	300	378,65	78,65	Sim
37	370	4	300	342,71	42,71	Sim
38	370	3	300	359,38	59,38	Sim
39	370	2	300	350,52	50,52	Sim
40	370	1	300	350,52	50,52	Sim

A Figura 6.3 apresenta a resposta do método para o Caso 14. Pode-se observar que o valor de $ACOF_{ABC}$ ultrapassou o valor de TH_{ACOF} , detectando a assimetria causada pela falta, podendo ser uma falta entre espiras, uma falta interna ou uma falta externa. A partir disso, o filtro CLO_{ABC} verifica se as tensões do terminal não sofreram alguma redução em seus valores, caso o filtro CLO_{ABC} permaneça em 1 indica que ocorreu a falta entre espiras. Por fim, verificou-se o surgimento de uma assimetria de 120 Hz identificada como $ACOF_{120}$.

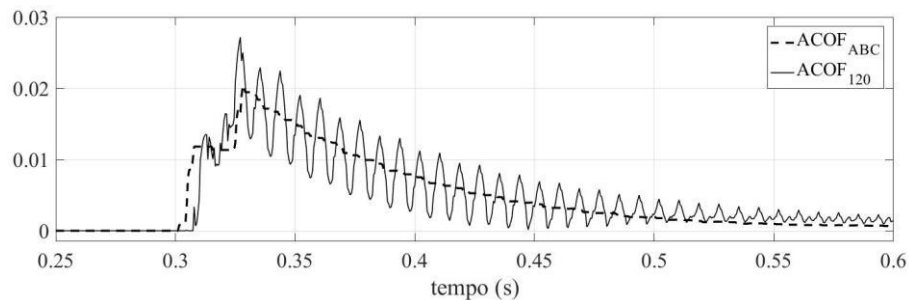
Figura 6.3 – Representação do filtro MM do Caso 14 (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{ABC}$ e $ACOF_{120}$.



(a)



(b)



(c)

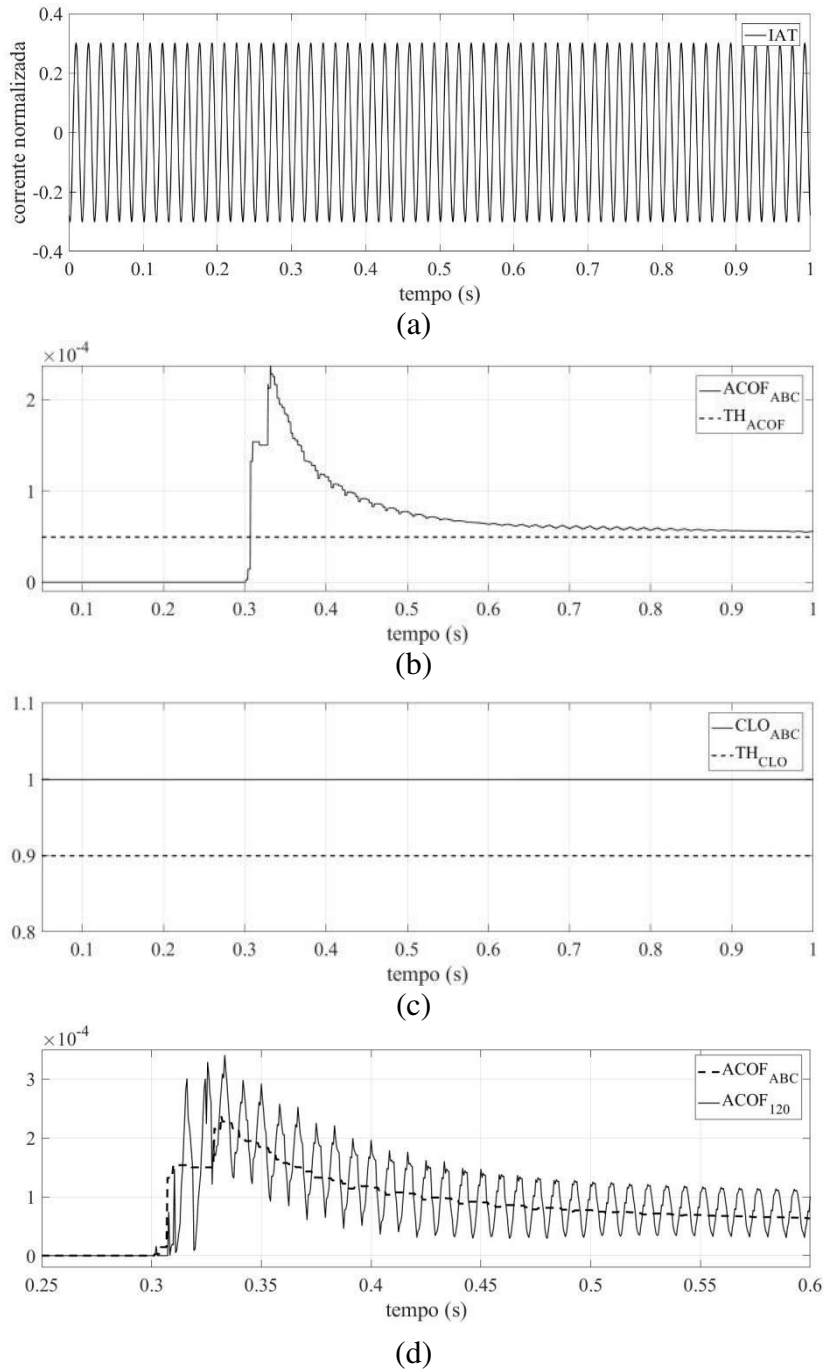
Fonte: Próprio Autor

Vale ressaltar que, mesmo os defeitos com pequena supressão no enrolamento, o método foi capaz de detectar. A Figura 6.4 (a) mostra o sinal de corrente da fase A para o Caso 23, que possui 1% de supressão no enrolamento. Observa-se que não é possível identificar a falta visualmente, porém, este caso foi detectado em 41,15ms após o início da falta. As saídas dos filtros $ACOF_{ABC}$, CLO_{ABC} e $ACOF_{120}$ para o Caso 23, são mostradas nas Figuras 6.4 (b),(c) e (d), respectivamente.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados das faltas entre espiras para o GS de dois enrolamentos por fase. Os casos foram simulados com carregamento de 110MVA e sem ruído.

Pode-se observar que proteção atuou em todos os casos testados e com tempos próximos aos encontrados com o GS de seis enrolamentos.

Figura 6.4 – Representação do filtro MM do Caso 23 (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} .



Fonte: Próprio Autor

Tabela 6.3 – Resultados do método desenvolvido para casos de faltas do GS de 2 enrolamentos por fase.

Caso	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Instante da falta (ms)	Instante de <i>trip</i> (ms)	Tempo para operação (ms)	Operação correta
41	60	300	336,98	36,98	Sim
42	50	300	336,98	36,98	Sim
43	40	300	336,46	36,46	Sim
44	30	300	335,94	35,94	Sim
45	20	300	335,42	35,42	Sim
46	10	300	335,42	35,42	Sim
47	9	300	335,42	35,42	Sim
48	8	300	339,58	39,58	Sim
49	7	300	338,54	38,54	Sim
50	6	300	338,54	38,54	Sim
51	5	300	338,54	38,54	Sim
52	4	300	338,54	38,54	Sim
53	3	300	341,15	41,15	Sim
54	2	300	341,15	41,15	Sim
55	1	300	336,98	36,98	Sim

6.4 FALTAS ENTRE ESPIRAS COM RUÍDO

Na Tabela 6.4 são apresentadas as os resultados do método inserindo o ruído de 50 dB nos sinais de corrente e tensão. Nestes casos o ângulo de incidência de falta considerado foi de 0°. A Figura 6.5(a) mostra o Caso 63 onde se pode observar que o filtro $ACOF_{ABC}$ ultrapassou o limiar de TH_{ACOF} , detectando a assimetria do sinal gerado pela falta. Da mesma forma, a saída do filtro CLO_{ABC} ficou acima de TH_{CLO} , indicando que ocorreu uma falta entre espiras. Por fim, verifica-se o surgimento de um sinal em 120 Hz ($ACOF_{120}$) que foi maior que $ACOF_{ABC}$.

Tabela 6.4 – Comparativo das faltas entre espiras do GS de 6 enrolamentos por fase.

Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Instante da falta (ms)	Instante de <i>trip</i> (ms)	Tempo para operação (ms)	Operação correta
56	110	80	300	336,98	36,98	Sim
57	110	70	300	336,46	36,46	Sim
58	110	60	300	335,94	35,94	Sim
59	110	50	300	338,02	38,02	Sim
60	110	40	300	337,50	37,50	Sim
61	110	30	300	336,46	36,46	Sim
62	110	20	300	338,02	38,02	Sim

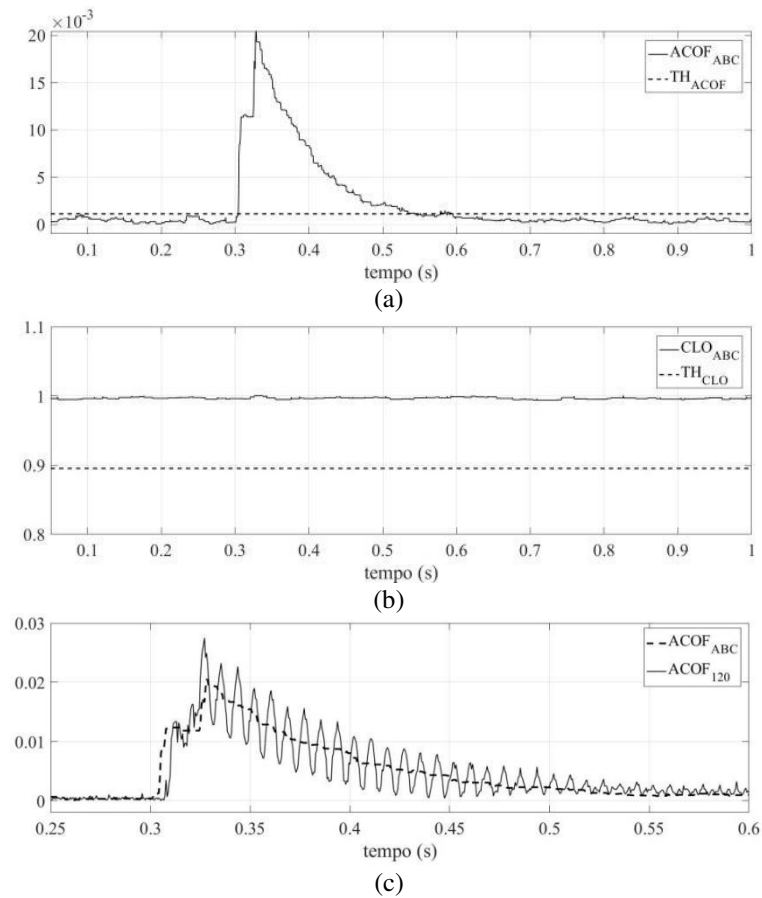
63	110	10	300	335,42	35,42	Sim
64	110	9	300	342,71	42,71	Sim
65	110	8	300	342,71	42,71	Sim
66	110	7	300	342,71	42,71	Sim
67	110	6	300	342,19	42,19	Sim
68	110	5	300	342,19	42,19	Sim
69	110	4	300	342,71	42,71	Sim
70	110	3	300	342,71	42,71	Sim
71	110	2	300	x	x	Não
72	110	1	300	x	x	Não
73	370	80	300	344,27	44,27	Sim
74	370	70	300	344,27	44,27	Sim
75	370	60	300	344,27	44,27	Sim
76	370	50	300	344,27	44,27	Sim
77	370	40	300	343,75	43,75	Sim
78	370	30	300	343,75	43,75	Sim
79	370	20	300	344,27	44,27	Sim
80	370	10	300	345,31	45,31	Sim
81	370	9	300	338,02	38,02	Sim
82	370	8	300	343,75	43,75	Sim
83	370	7	300	351,56	51,56	Sim
84	370	6	300	377,08	77,08	Sim
85	370	5	300	357,81	57,81	Sim
86	370	4	300	359,38	59,38	Sim
87	370	3	300	x	x	Não
88	370	2	300	x	x	Não
89	370	1	300	x	x	Não

x não atuou

A Figura 6.6 mostra as respostas dos filtros para uma falta com 1% de supressão (Caso 72). Neste caso, e em outros com pequena porcentagem de supressão (Caso 71, Caso 72, Caso 87, Caso 88 e Caso 89) o algoritmo não conseguiu detectar a falta devido o ruído inserido. Os efeitos nos sinais de corrente que uma supressão muito baixa faz são ínfimos a ponto se misturar com o ruído e não permitir a sua detecção.

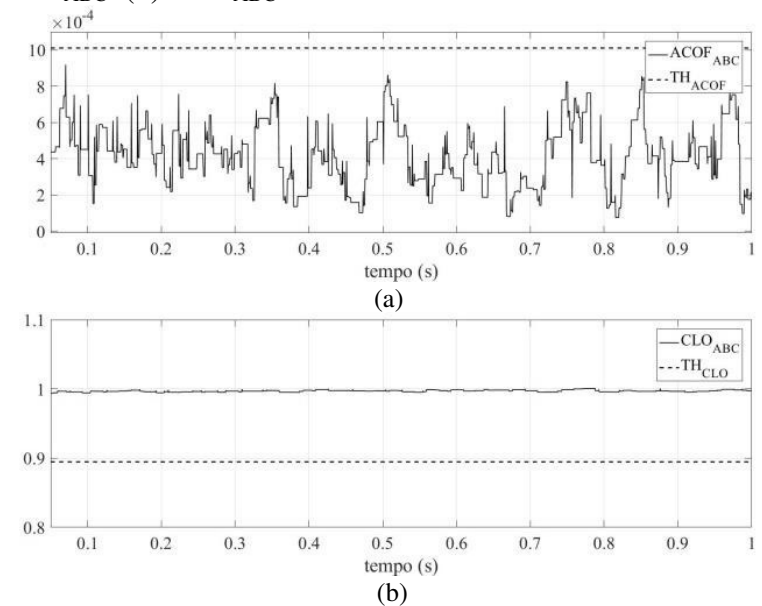
Com a inclusão de ruído branco Gaussiano nos sinais de corrente e tensão do GS, as condições de operação do filtro apresentaram resultados diferentes. Os casos utilizando ruído tiveram os tempos muito próximos aos casos sem ruído. Além disso, o algoritmo conseguiu detectar todos os defeitos com supressão acima de 4%.

Figura 6.5 – GS com carregamento de 110MVA, 10% de supressão do enrolamento e com de ruído 50dB (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{120}$.



Fonte: Próprio Autor

Figura 6.6 – GS com carregamento de 110MVA, 1% de supressão do enrolamento e com de ruído 50dB (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} .



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 6.5 apresenta os resultados do tempo de atuação do GS de dois enrolamentos por fase. Para esta quantidade de enrolamento realizou-se as simulações até 60% de supressão com o gerador operando em 110MVA de carga e com ruído de 50 dB. Com os mesmos valores de supressão, a magnitude da corrente durante a falta é maior no GS de dois enrolamentos quando comparada com o GS de seis enrolamentos. Isso ocorre devido à corrente que circula em cada enrolamento ser maior nos geradores de dois enrolamentos, quando ambos os GS possuem a mesma potência de operação. Tal característica facilita a detecção da falta, fazendo o método atuar para defeitos com até 1% de supressão, mesmo com ruído presente nos sinais. Além disso, por baixa influência do ruído, os tempos de atuação foram bem próximos aos casos sem ruídos.

Tabela 6.5 – Comparativo das faltas entre espiras do GS de 2 enrolamentos por fase.

Caso	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Instante da falta (ms)	Instante de <i>trip</i> (ms)	Tempo para operação (ms)	Operação correta
90	60	300	336,98	36,98	Sim
91	50	300	337,50	37,50	sim
92	40	300	336,46	36,46	sim
93	30	300	335,94	35,94	sim
94	20	300	335,42	35,42	sim
95	10	300	335,42	35,42	sim
96	9	300	335,42	35,42	sim
97	8	300	338,54	38,54	sim
98	7	300	339,58	39,58	sim
99	6	300	338,54	38,54	sim
100	5	300	338,54	38,54	sim
101	4	300	339,58	39,58	sim
102	3	300	341,15	41,15	sim
103	2	300	341,15	41,15	sim
104	1	300	336,98	36,98	sim

6.5 EFEITO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA FALTA

Estes testes visam identificar a influência do ângulo de início da falta entre espiras ocasiona no método desenvolvido. A Tabela 6.6 apresenta os resultados de tempo para um GS com 40% de supressão dos enrolamentos, seis enrolamentos por fase e carregamento de 110MVA. Os testes foram realizados na condição sem ruído e com ruído.

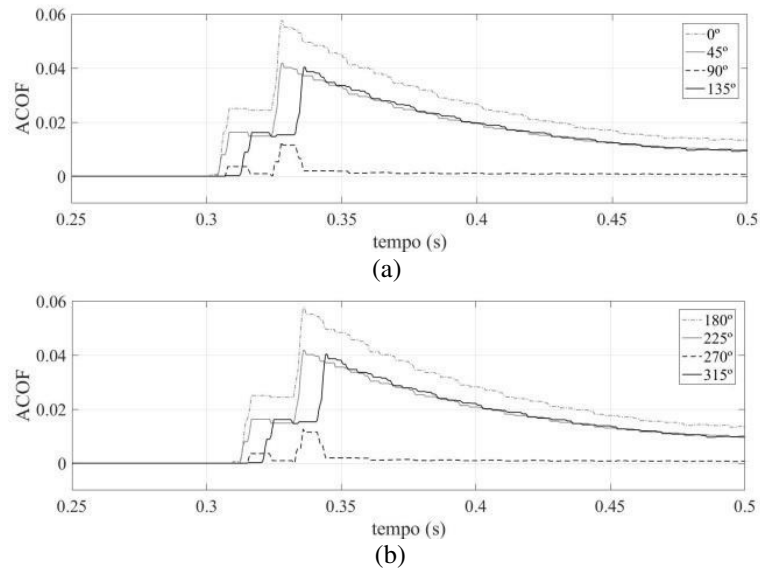
Tabela 6.6 – Resposta do método para casos de variação do ângulo de início da falta entre espiras

Caso	Ruído (dB)	Ângulo (°)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Instante da falta (ms)	Instante de trip (ms)	Tempo para operação (ms)	Operação correta
105	-	0	40	300,00	335,94	35,94	Sim
106	-	45	40	302,08	337,50	35,42	Sim
107	-	90	40	304,16	344,27	40,10	Sim
108	-	135	40	306,25	344,27	38,02	Sim
109	-	180	40	308,33	344,27	35,94	Sim
110	-	225	40	310,41	345,83	35,42	Sim
111	-	270	40	312,50	352,60	40,10	Sim
112	-	315	40	314,58	352,60	38,02	Sim
113	50	45	40	302,08	337,50	37,50	Sim
114	50	90	40	304,16	336,98	34,90	Sim
115	50	135	40	306,25	344,27	40,10	Sim
116	50	180	40	308,33	345,83	39,58	Sim
117	50	225	40	310,41	346,35	38,02	Sim
118	50	270	40	312,50	346,35	35,94	Sim
119	50	315	40	314,58	369,27	56,77	Sim

A Figura 6.7 apresenta a resposta do filtro ACOF da falta entre espiras com 40% de supressão em diversos ângulos de disparo. Na Figura 6.7 (a) são apresentadas as saídas do filtro para os ângulos de 0°, 45°, 90° e 135°, que corresponde aos Casos 105 a 108. Na Figura 6.7 (b) são apresentados com os ângulos de 180°, 225°, 270° e 315°, que corresponde aos Casos 109 a 112.

Analisando a Figura 6.7 pode-se concluir que os piores casos, isto é, os que resultaram uma assimetria de menor magnitude e tempo de caimento da exponencial foram quando os ângulos de 90° e 270° foram utilizados, como pode ser visto no tempo para operação foram os que necessitaram mais tempo para atuar, necessitando mais de 20 ms quando submetidos a um ruído de 50 dB, Casos 107 e 111, por exemplo. Os casos de 0° e 180° (Casos 105 e 109) foram os que apresentaram maiores amplitude e tempos de caimento do sinal, enquanto os de 45°, 135°, 225° e 315° apresentaram valores intermediários (Casos 106, 108, 110 e 112). Outra característica que pode ser observada é que os valores e comportamentos são muito similares quando foram aplicadas faltas com ângulos de 0° e 180°, 45° e 225°, 90° e 270°, 135° e 315°.

Figura 6.7 – Resultados dos Casos 56 ao 63 (a) $ACOF_{ABC}$ (b) $ACOF_{ABC}$.



Fonte: Próprio Autor

Após a identificação dos piores casos sendo 90° e 270° (Casos 107 e 111), realizaram-se as faltas entre espiras com o ângulo de início da falta com 90° com supressões do enrolamento variando de 1% até 10%. Com isso, permite-se verificar a capacidade do algoritmo em identificar a falta entre espiras nas piores condições. A Tabela 6.7 apresenta os resultados para condição com ângulo de incidência de falta igual de 90° .

A partir dos resultados obtidos pode-se verificar que o algoritmo respondeu com êxito quando o ruído não estava presente nos sinais de corrente e tensão, contudo levando um tempo maior para detecção. A Figura 6.8 mostra a saída do filtro $ACOF_{ABC}$ para uma falta de 1% de supressão e ângulos de disparo de 0° (melhor caso) e 90° (pior caso) sem a utilização do ruído. Pode-se observar que as amplitudes nos dois casos são próximas e a diferença no tempo de duração da exponencial também é pequena. Dessa forma, foi possível detectar de forma satisfatória em todos os níveis de supressão quando operando sem ruído.

Tabela 6.7 – Variação do ângulo de início da falta entre espiras

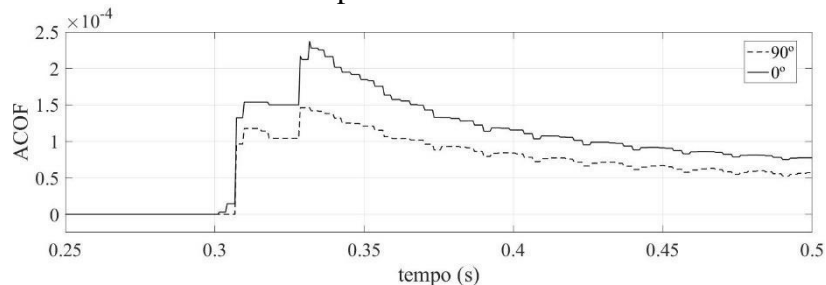
Caso	Ruído (dB)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Instante da falta (ms)	Instante de trip (ms)	Tempo para operação (ms)	Operação correta
120	-	10	304,16	343,75	39,58	Sim
121	-	9	304,16	351,041	46,87	Sim
122	-	8	304,16	351,041	46,87	Sim
123	-	7	304,16	343,229	39,062	Sim
124	-	6	304,16	342,187	38,02	Sim

125	-	5	304,16	342,187	38,02	Sim
126	-	4	304,16	351,041	46,875	Sim
127	-	3	304,16	341,666	37,5	Sim
128	-	2	304,16	340,625	36,458	Sim
129	-	1	304,16	340,625	36,458	Sim
130	50	10	304,16	343,229	39,062	Sim
131	50	9	304,16	x	x	Não
132	50	8	304,16	x	x	Não
133	50	7	304,16	x	x	Não
134	50	6	304,16	x	x	Não
135	50	5	304,16	x	x	Não
136	50	4	304,16	x	x	Não
137	50	3	304,16	x	x	Não
138	50	2	304,16	x	x	Não
139	50	1	304,16	x	x	Não

x significa que o método não atuou

Com a inclusão do ruído o algoritmo não conseguiu detectar nessas condições. A partir de 10% de supressão iniciaram as detecções.

Figura 6.8 – Resultados sem ruído 1% supressão



Fonte: Próprio Autor

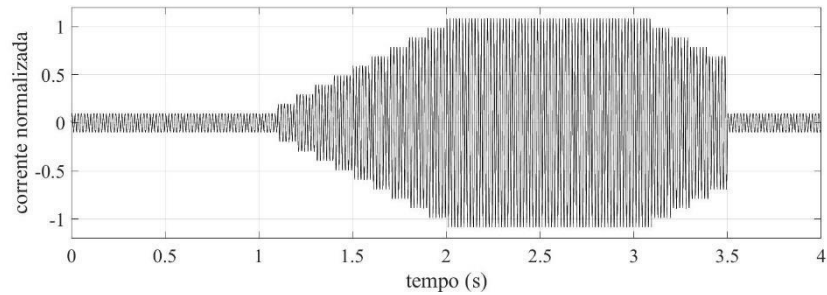
6.6 VARIACÃO DA CARGA

Visando analisar o desempenho do método durante variações de carga, realizou-se simulações de aumento e redução de carga. O aumento de carga foi realizado através de uma função de rampa de carga com variação de 37 MW com 1,0 s de duração. Posteriormente funcionou por mais 1,0 s com 110% do carregamento e ocorreu uma redução até 70% de carga por 0,5 s até ter uma redução abrupta de 222MVA. A Figura 6.9 apresenta a corrente normalizada da fase A durante o teste realizado. O aumento do carregamento não foi considerado o que a legislação regulamente. O objetivo destas representações é somente verificar as condições de resposta do filtro, que na condição simulada é desfavorável em comparação às condições regulatórias.

Tabela 6.8 – Casos com variação da carga

Caso	Carregamento do GS (%)	Descrição
140	10% até 110%	Rampa de incremento
141	110% até 70%	Rampa de decremento
142	70% para 10%	Redução abrupta

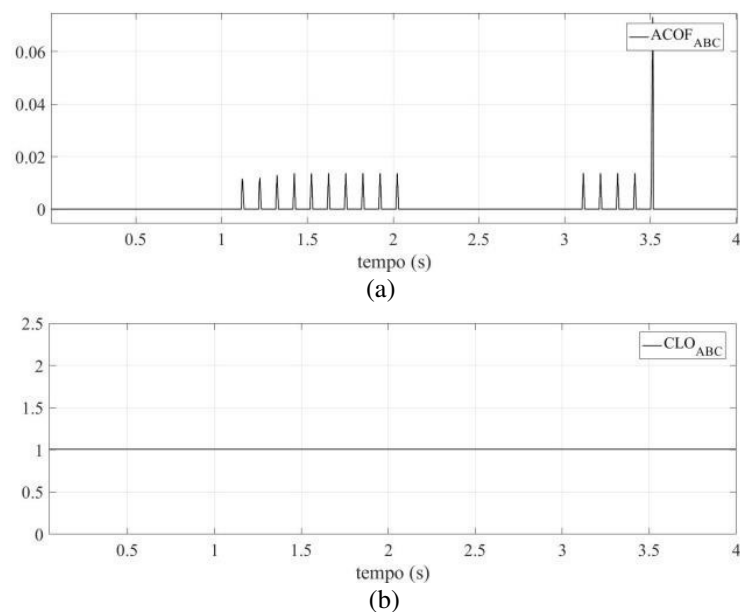
Figura 6.9 – Variação da carga



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 6.10 são apresentadas as respostas dos filtros para o Caso 140,141 e 142. Observa-se que no filtro $ACOF_{ABC}$ surgiram alguns picos quando ocorreu o aumento ou redução de carga da carga, porém, o tempo em que permaneceram é menor que a temporização, com isso, não houve interferência e não ocorreu a atuação da proteção com as mudanças de cargas.

Figura 6.10 – Saída do filtro para uma variação de carga



Fonte: Próprio Autor

6.7 FALTAS EXTERNAS NA SAÍDA DO GERADOR

As faltas externas foram realizadas a fim de testar a segurança do algoritmo frente a eventos que a proteção contra falta entre espiras não deve atuar. Foram realizados curtos-circuitos nos próximos aos terminais do GS do tipo monofásico, bifásicos-terra e trifásico. A

Tabela 6.9 apresenta o desempenho do algoritmo para estes casos. Foi utilizado o modelo de GS de seis enrolamentos por fase, carregamento de 110 MVA, sem condição de ruído e com a variação do ângulo de início da falta.

Tabela 6.9 – Resultados da falta externa

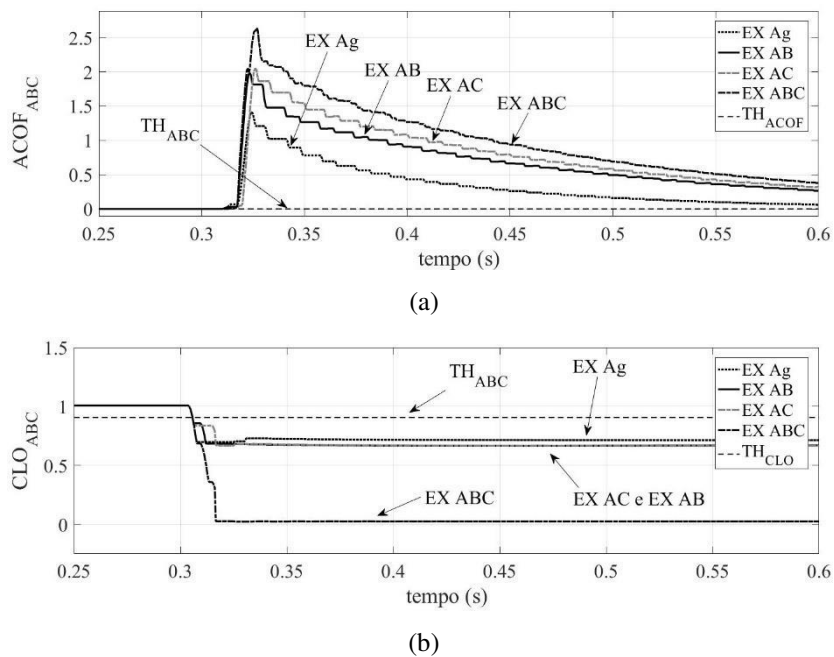
Caso	Ângulo (°)	Tipo de falta externa	Instante da falta (ms)	Inst.de trip (ms)	Operação correta
143	0	A-g	300,00	x	Sim
144	0	A-B	300,00	x	sim
145	0	A-C	300,00	x	sim
146	0	A-B-C	300,00	x	sim
147	45	A-g	300,208	x	sim
150	90	A-g	304,16	x	sim
151	135	A-g	306,25	x	sim
152	180	A-g	308,33	x	sim
153	225	A-g	310,41	x	sim
154	270	A-g	312,50	x	sim
155	315	A-g	314,58	x	sim
156	45	A-B	302,08	x	sim
157	90	A-B	304,16	x	sim
158	135	A-B	306,25	x	sim
159	180	A-B	308,33	x	sim
160	225	A-B	310,41	x	sim
161	270	A-B	312,50	x	sim
162	315	A-B	314,58	x	sim
163	45	A-C	302,08	x	sim
164	90	A-C	304,16	x	sim
165	135	A-C	306,25	x	sim
166	180	A-C	308,33	x	sim
167	225	A-C	310,41	x	sim
168	270	A-C	312,50	x	sim
169	315	A-C	314,58	x	sim
170	45	A-B-C	302,08	x	sim
171	90	A-B-C	304,16	x	sim
172	135	A-B-C	306,25	x	sim
173	180	A-B-C	308,33	x	sim
174	225	A-B-C	310,41	x	sim
175	270	A-B-C	312,50	x	sim
176	315	A-B-C	314,58	x	sim

x significa que o método não atuou,

As faltas externas caracterizam-se por gerar na saída do filtro $ACOF_{ABC}$ semelhante aos valores das entre espiras, conforme ilustrado na Figura 6.11(a). No entanto, o filtro CLO_{ABC} tende a valores abaixo de TH_{ACOF} . Ainda analisando a Figura 6.11, pode-se observar que na falta externa do tipo trifásica (EX_ABC), é a que resulta na maior magnitude e duração do transitório.

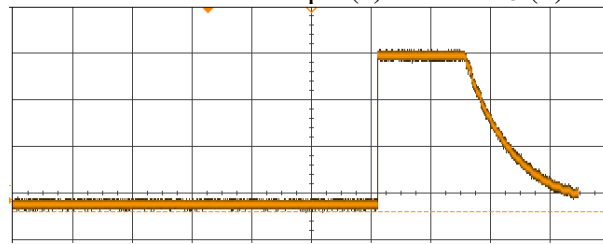
Já a Figura 6.12 mostra os sinais do filtro em uma simulação em tempo real de uma falta externa trifásica obtida no osciloscópio. Neste sinal foi introduzida uma falta externa sem tempo pré-definido, isto é, utilizou-se um acionamento manual. Dessa forma, não há um ângulo de disparo pré-definido. Os resultados obtidos foram muito semelhantes aos valores simulados de forma *offline*.

Figura 6.11 – Faltas externas (a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} .

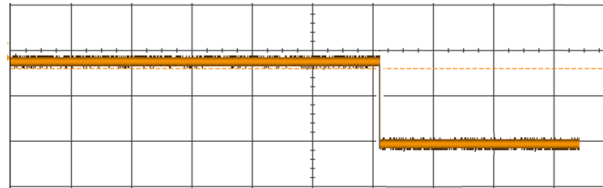


Fonte: Próprio Autor

Figura 6.12 – Falta externa obtida do osciloscópio(a) $ACOF_{ABC}$ (b) CLO_{ABC} .



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor

6.8 FALTAS EXTERNAS DISTANTES 100 KM

As faltas externas distantes 100 km do GS possuem características muito semelhantes às faltas entre espiras, pois aparece a assimetria no sinal de $ACOF_{ABC}$, CLO_{ABC} não possui uma redução em seu valor. Dessa forma, neste tipo de falta, para evitar uma atuação indevida do algoritmo, um terceiro filtro é aplicado sendo denominado de $ACOF_{120}$ o qual identifica uma componente de 120 Hz nas faltas entre espiras, enquanto na falta externa distante, essa componente não aparece. Os resultados foram satisfatórios para não atuação indevida.

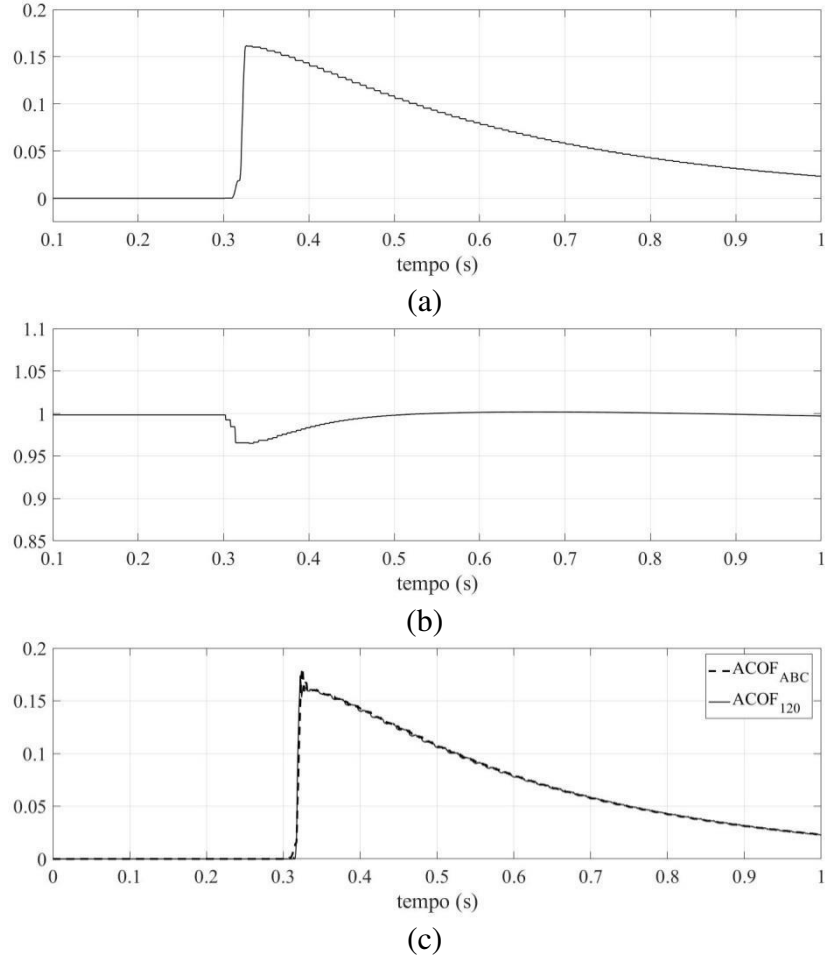
Tabela 6.10 – Resultados da falta externa distante 100 km.

Caso	Ângulo (°)	Tipo de falta externa	Instante da falta (ms)	Inst.de trip (ms)	Operação correta
177	0	A-g	300,00	x	Sim
178	0	A-B	300,00	x	Sim
179	0	A-C	300,00	x	Sim
180	0	A-B-C	300,00	x	Sim

A Figura 6.13(Caso 180) apresenta os sinais do filtro. Observa-se que os valores de $ACOF_{120}$ e $ACOF_{ABC}$ em (c) não tiveram diferença, isto é, são iguais. Isso indica que não surgiu uma componente de 120 Hz no sinal de $ACOF_{120}$, dessa forma, o algoritmo identifica que ocorreu uma falta externa de longa distância, não permitindo a atuação indevida. Os

demais sinais $ACOF_{ABC}$ (a) e CLO_{ABC} (b) apresentam comportamento igual a uma falta entre espiras.

Figura 6.13 – Caso 180(a) $ACOF_{ABC}$, (b) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{120}$ e $ACOF_{ABC}$.



Fonte: Próprio Autor

6.9 CASO REAL - OSCILOGRAFIA

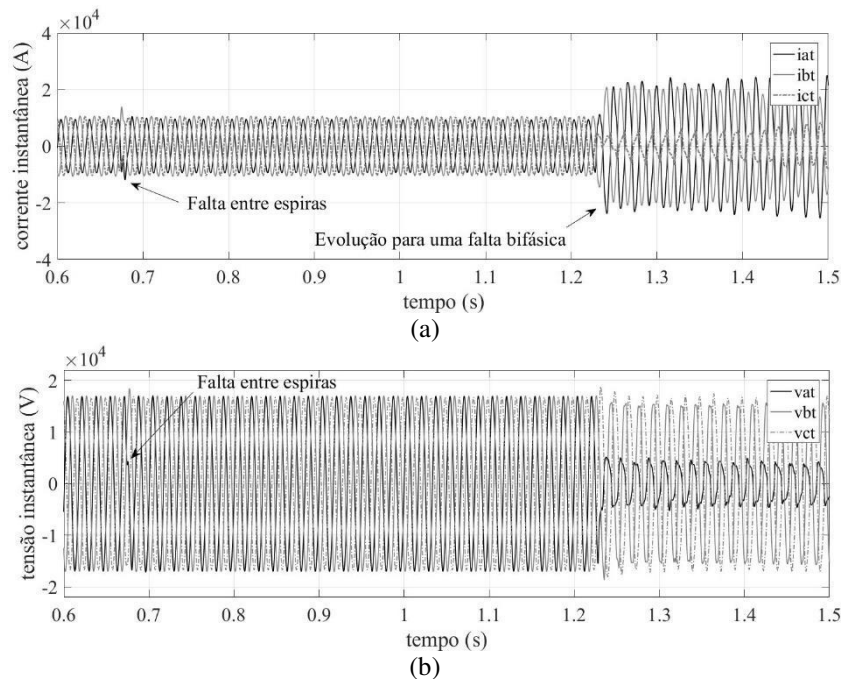
Este caso visa analisar o desempenho do método proposto para uma condição real de falta entre espiras. O caso ocorreu em uma máquina síncrona de polos lisos de 412 MVA e constituído de 3 enrolamentos por fase. A Figura 6.14 mostra as correntes (a) e tensões (b) de fase durante o evento. Observa-se que o comportamento da falta entre espiras reais é muito semelhante com os sinais simulados no software HYPERSIM, pois surgiu uma assimetria em $ACOF_{ABC}$ além da linearidade em CLO_{ABC} . A taxa de amostragem é de 32 amostras/ciclo, o tempo de falta, no sinal obtido foi em 0.674 s que evoluiu para uma falta bifásica.

A porcentagem de supressão do enrolamento ainda é desconhecida, visto que logo após o evento recebeu-se os sinais. Um evento muito interessante foi que após a falta entre

espiras ocorrer, a corrente normalizou aos seus valores nominais (semelhante aos casos de início de falta de 90° e 270°), analisando graficamente, pode-se perceber no sinal esse início. Outra observação é a oscilação que a corrente gerou, sendo valores muito baixos o que se leva a acreditar que foi uma supressão muito baixa. A proteção do GS não identificou a falta entre espiras e necessitou de 1,0 s para atuar a proteção depois que evoluiu para uma falta mais grave.

Neste evento, o algoritmo proposto conseguiu detectar o defeito em 33,812ms após o início da falta entre espiras. Pode-se observar que no filtro $ACOF_{ABC}$ surgiu uma assimetria ultrapassando TH_{ACOF} e no filtro CLO_{ABC} permaneceu em 1, não caindo para valores menores que TH_{CLO} . Dessa forma, pode-se confirmar o desempenho do filtro proposto e que o mesmo conseguiu detectar e atuar frente à falta real.

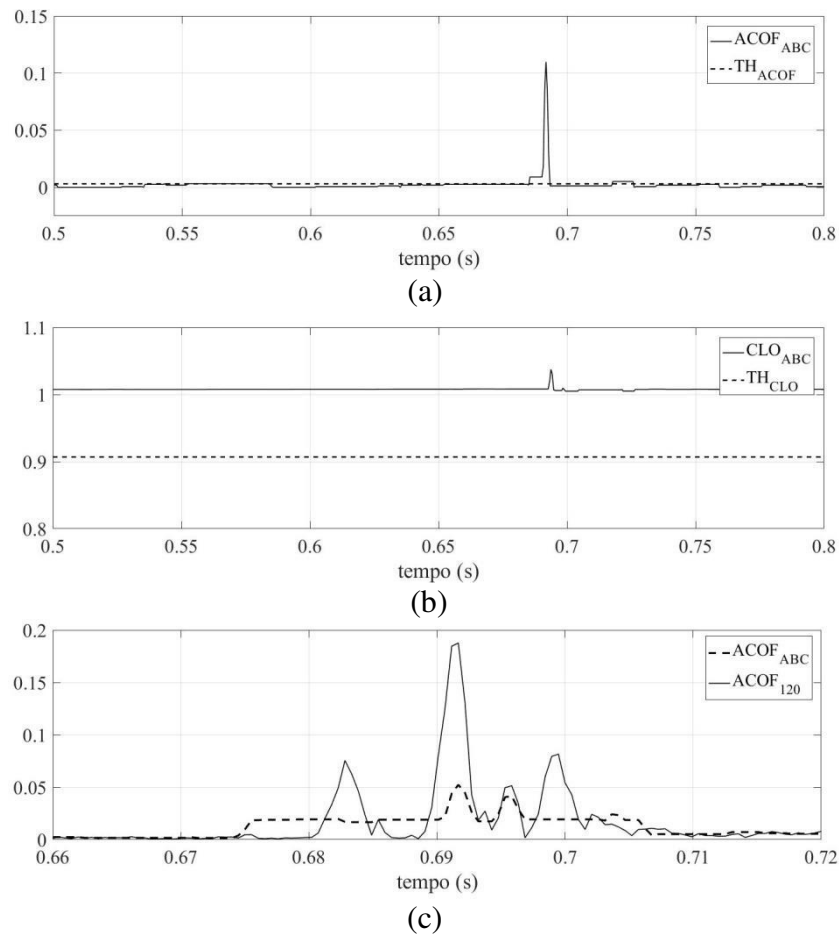
Figura 6.14 – Sinais de corrente e tensão do terminal (a) corrente do terminal e (b) tensão do terminal



Fonte: Próprio Autor

Os ajustes do algoritmo, bem como o tamanho do SE, e do Filtro MM não foram ajustados, ou modificados. Além disso, os valores de TH_{ACOF} e TH_{CLO} foram determinados de forma adaptativa aos valores desse sinal, sem a necessidade de intervenção, isto é, o algoritmo utilizado para a verificação dos casos apresentados anteriormente foi o mesmo utilizado no caso real. No instante da verificação, não se sabia o que havia pela frente e o algoritmo atuou antes da evolução da falta mais grave.

Figura 6.15– Caso real(a) $ACOF_{ABC}$, (b) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{120}$ e $ACOF_{ABC}$.

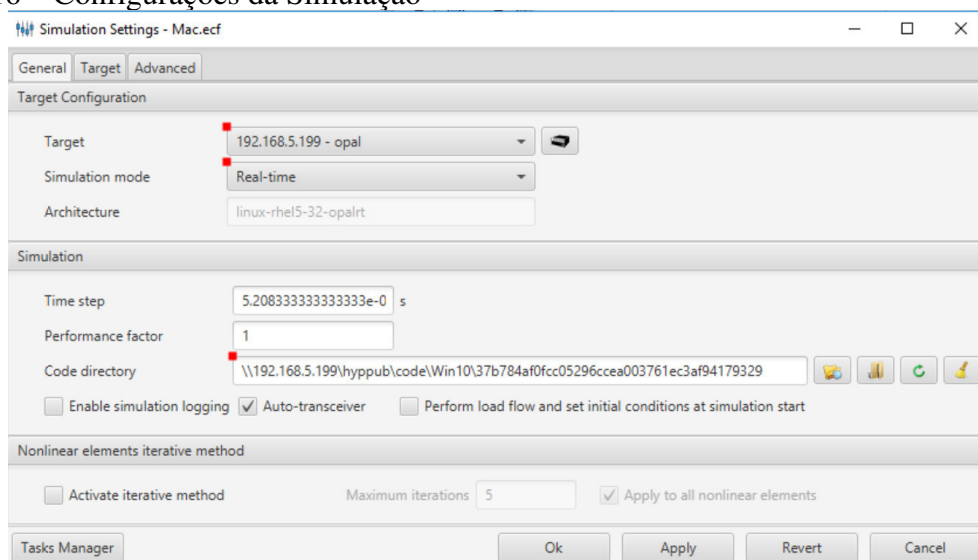


Fonte: Próprio Autor

6.10 SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL

A fim de verificar o desempenho o algoritmo quando simulado em tempo real, realizou-se a sua programação na interface *User Custom Models*(UCM) do *software* HYPERSIM. O bloco UCM permite o usuário criar funções específicas de um determinado modelo ou algoritmo por meio um código em linguagem C. Deste modo foi possível analisar o comportamento do método desenvolvido em simulações do tipo SIL. O *time step* foi configurado para 32 amostras por ciclo, ou seja, 520,833 us. O algoritmo apresentou uma velocidade máxima em tempo real de 9,35us. Isso indica que dentro do tempo de simulação usou menos de 2% do *time step* para executar todas as instruções necessárias. Isso indica que o filtro desenvolvido consegue executar dentro do tempo necessário para aguardar a próxima amostra, ou seja, está adequado para uma implementação real em um *hardware* dedicado. Os valores de configuração são demonstrados na Figura 6.16, que mostra uma janela de configuração inicial do *software* HYPERSIM.

Figura 6.16 – Configurações da Simulação



Fonte: HYPERSIM

A Tabela 6.10 apresenta os resultados obtidos na simulação em tempo real do tipo SIL para os dois modelos de GS. Nestes casos foi utilizado ângulo de incidência de falta de 0° . O carregamento do GS foi de 110MVA.

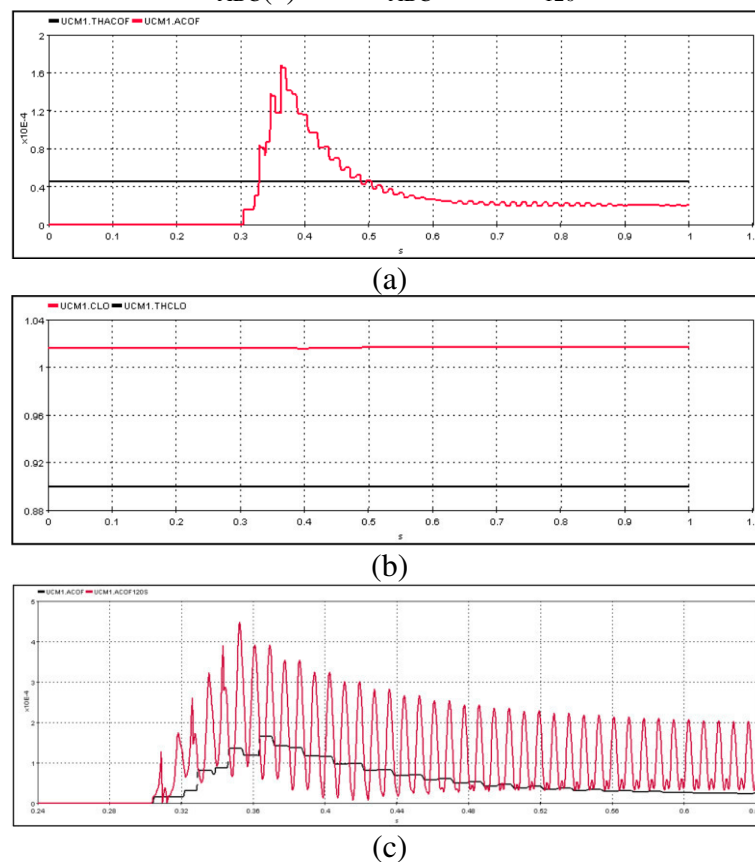
Tabela 6.11 – Resposta do método proposto para simulações em SIL

Caso	Nº de enrolamentos por fase	Per. de enrolamento suprimido (%)	Inst. da falta (ms)	Inst.de trip (ms)	Tempo para operação (ms)	Operação correta
181	2	40	300	336,604	36,604	Sim
182	2	30	300	336,604	36,604	sim
183	2	20	300	336,604	36,604	sim
184	2	10	300	336,604	36,604	sim
185	2	9	300	336,604	36,604	sim
186	2	8	300	336,604	36,604	sim
187	2	7	300	336,604	36,604	sim
188	2	6	300	336,604	36,604	sim
189	2	5	300	336,604	36,604	sim
190	2	4	300	336,604	36,604	sim
191	2	3	300	336,604	36,604	sim
192	2	2	300	336,604	36,604	sim
193	2	1	300	336,604	36,604	sim
194	6	40	300	336,604	36,604	sim
195	6	30	300	336,604	36,604	sim
196	6	20	300	336,604	36,604	sim
197	6	10	300	336,604	36,604	sim
198	6	9	300	336,604	36,604	sim
199	6	8	300	336,604	36,604	sim

200	6	7	300	336,604	36,604	sim
201	6	6	300	336,604	36,604	sim
202	6	5	300	336,604	36,604	sim
203	6	4	300	336,604	36,604	sim
204	6	3	300	336,604	36,604	sim
205	6	2	300	361,804	61,804	sim
206	6	1	300	361,804	61,804	sim

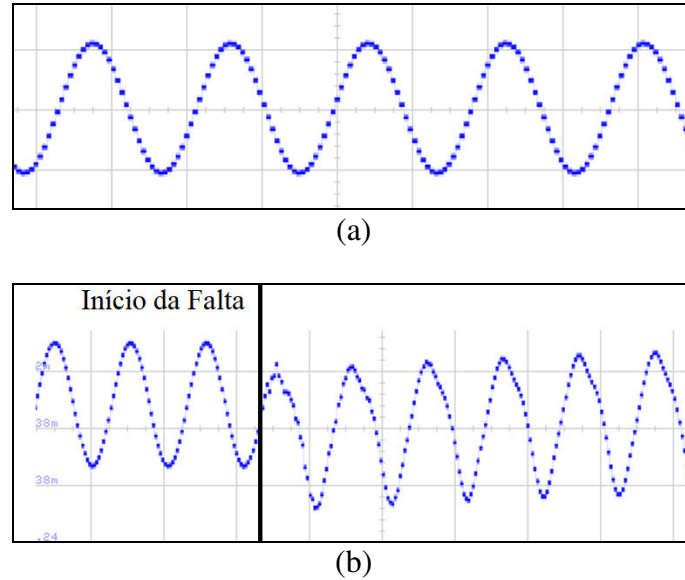
A Figura 6.17 mostra os resultados obtidos para o Caso 181. Os gráficos mostrados nas Figura 6.17(a) e (b), referentes às saídas dos filtros ACOF e CLO, respectivamente, foram obtidos no próprio aplicativo de análise dos sinais do HYPERSIM, denominado de *ScopeView*. Quando a simulação é realizada no próprio simulador, além da possibilidade de analisar os sinais no *ScopeView*, pode-se utilizar um osciloscópio para visualizar as grandezas de entrada e saída. A Figura 6.17 mostra a corrente da fase A quando o Caso 181 foi simulado, sendo em (a) em uma condição antes da falta e em (b) após a falta. Na Figura 6.19 é apresentado o sinal do osciloscópio dos filtros do Caso 10.

Figura 6.17 – Resultado do Caso 177 para simulação em tempo real (a) saída do filtro ACOF_{ABC} (b) saída do filtro CLO_{ABC}(c) ACOF_{ABC} e ACOF₁₂₀.



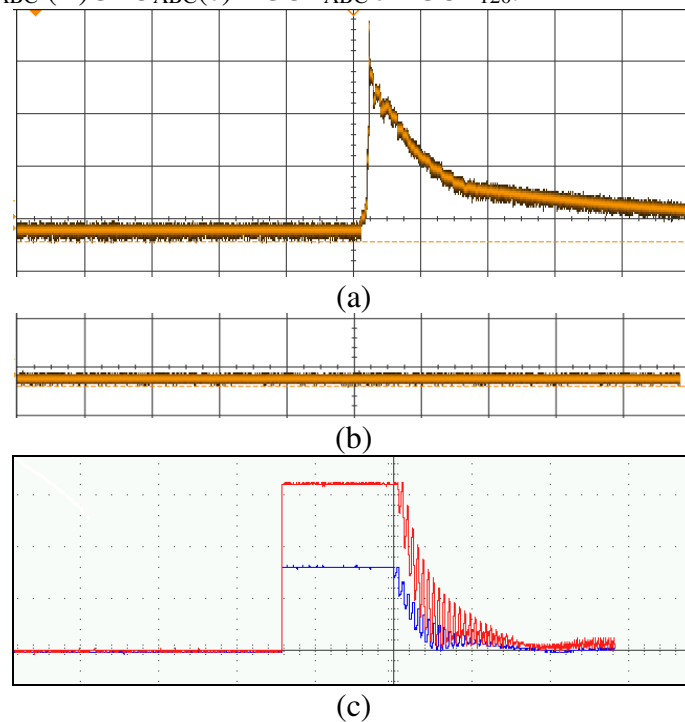
Fonte: Próprio Autor

Figura 6.18 – Sinal do osciloscópio da corrente IAT sem falta e com falta.



Fonte: Próprio Autor

Figura 6.19 – Sinal do osciloscópio para uma falta 50% de supressão com seis enrolamentos por fase (a) $ACOF_{ABC}$ (B) CLO_{ABC} (c) $ACOF_{ABC}$ e $ACOF_{120}$.



Fonte: Próprio Autor

6.11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados todos os resultados dos testes realizados e as conclusões obtidas. Diversos cenários de condições de faltas foram realizados a fim de verificar o desempenho do algoritmo desenvolvido. Nas condições sem ruído os resultados foram satisfatórios visto que foi possível detectar em todos os casos e condições simulados.

Com a inclusão do ruído de 50dB o algoritmo apresentou bons resultados deixando de detectar somente algumas supressões quando o GS era de seis enrolamentos e o ângulo de início da falta em 90°. No caso de dois enrolamentos atuou em todos os casos. Além das faltas externas que o algoritmo não atuou indevidamente. Por fim, os resultados mais relevantes foram os testes no caso real onde pode-se ter a dimensão da capacidade de detectar a falta e a simulação SIL onde permitiu verificar a capacidade de processamento do algoritmo que demonstrou-se ser muito rápido utilizando o filtro MM.

A identificação da fase defeituosa e a detecção em condições de supressões de 1 e 2% no GS com seis enrolamentos por fase submetido a um ruído de 50dB foram limitações que o método apresentou. Contudo, podemos confirmar que o algoritmo desenvolvido teve bons resultados frente aos diversos cenários e tem bastante potencial para aplicação em sistemas reais para proteção de GS.

7 ANÁLISE COMPARATIVA

7.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes com esquemas tradicionalmente utilizados para a proteção contra faltas entre espiras em GS. O estudo analisou somente a confiabilidade dos métodos frente a casos de faltas entre espiras. Todas as simulações foram realizadas sem adição de ruído nos sinais. Os casos de faltas entre espiras simulados são os mesmos do Capítulo 6, logo, foi mantida a mesma numeração. Em primeiro momento será mostrado o desempenho individual de cada esquema, e por fim, será realizada uma análise comparativa com o método desenvolvido.

7.2 MÉTODO DE FINNEY

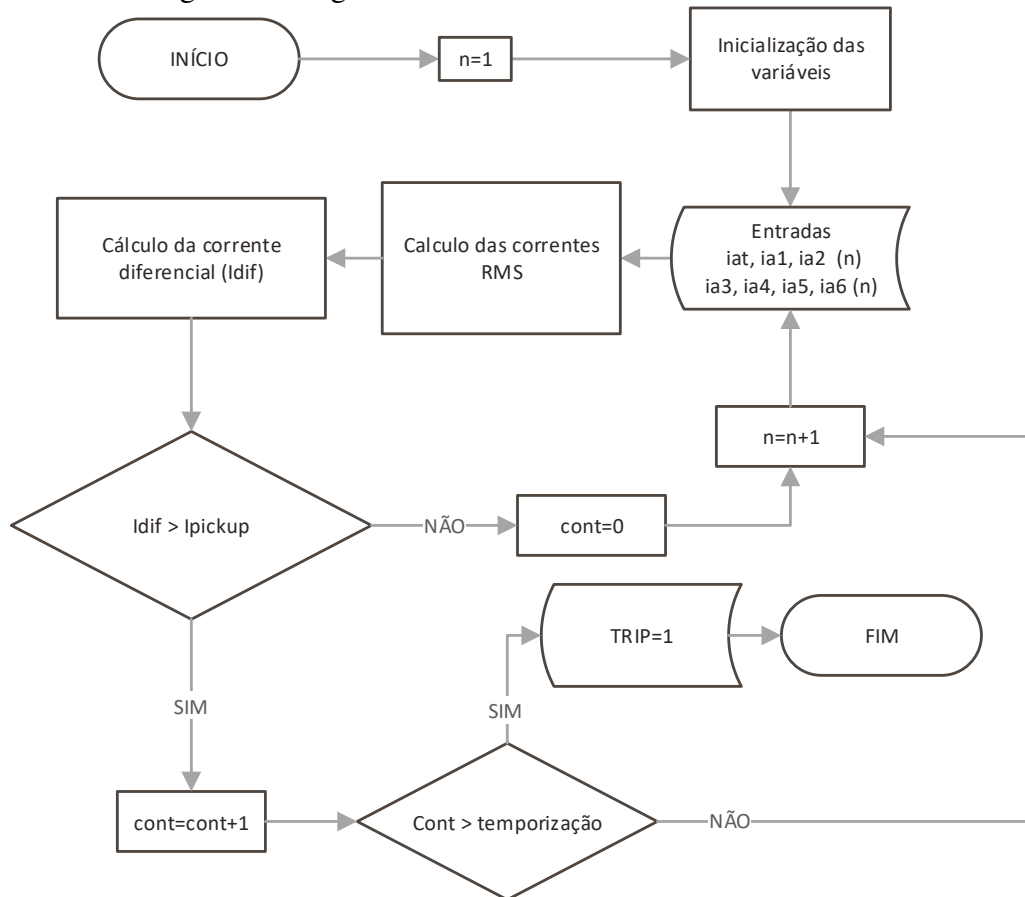
A metodologia de testes empregada no desenvolvimento dos algoritmos é representada pelo fluxograma da Figura 7.1. Os sinais foram amostrados em 1920 Hz, isto é, 32 amostras por ciclo em 60 Hz. Todos os métodos foram ajustados com uma corrente de *pick-up* (*Ipickup*) de 0,5 % da corrente nominal do secundário do TC e temporização de 30 ciclos (FINNEY et al., 2008).

Após a aquisição dos sinais, foram calculadas as correntes eficazes utilizando a transformada de *Fourier* de ciclo completo. Posteriormente, a corrente diferencial (*Idif*) é obtida para cada ramo como a diferença entre a corrente do(s) ramo(s) pela corrente do terminal. Assim é realizada a comparação entre *Idif* e *Ipickup*. Se *Idif* for maior que *Ipickup* o contador de falta é incrementado ($cont=cont+1$). Se a falta persistir por 30 ciclos, isto é, o contador atingir 960 amostras a variável *TRIP* assume o valor 1, indicando que a proteção detectou a falta. Caso contrário, retorna para a leitura da próxima amostra.

No Capítulo 2 foi abordada a metodologia apresentada por Finney et al., (2008), para detecção de faltas entre espiras. Na metodologia apresentada pelo autor os esquemas de proteção são exemplificados em uma máquina com dois enrolamentos por fase. Dessa forma, realizou-se a mesma proposta para um GS de dois enrolamentos por fase e também uma adaptação da proposta para que a mesma possa ser aplicada em GS com seis enrolamentos por fase.

O objetivo deste tópico é demonstrar se há ou não um bom desempenho do método para máquinas com um número maior de enrolamentos. Foram realizadas diversas combinações na alocação dos TCs nos enrolamentos do gerador. Dessa forma, pode-se ter uma dimensão técnica da viabilidade ou não de aplicar-se uma proposta para dois enrolamentos por fase em uma condição de seis enrolamentos por fase.

Figura 7.1 – Fluxograma do algoritmo teste.



Fonte: Próprio Autor

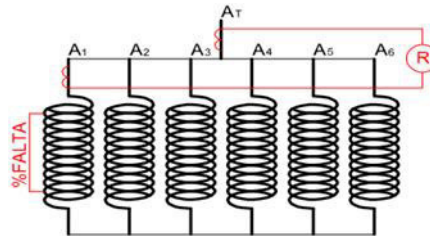
7.2.1 Esquema 1

No Esquema 1, ilustrado na Figura 7.2 utilizou-se dois TCs por fase, um no enrolamento e outro no terminal. Foi realizado o monitoramento da corrente em um ramo do enrolamento por vez e estimadas as demais, ou seja, foi utilizado o TC em A1, após em A2 e substituindo o enrolamento até A6.

O cálculo fundamenta-se no valor absoluto da diferença entre a corrente do ramo (IA(k)) e a corrente do terminal (IAT). A divisão por 6 possui a finalidade de trazer o valor da

corrente do terminal aos mesmos valores das correntes dos ramos, como é apresentado em (7.1).

Figura 7.2 – Esquema 1.



Fonte: Próprio Autor

$$I_{dif} = |IA(k) - (IAT/6)| \quad (7.1)$$

Onde:

I_{dif} é a corrente diferencial;

$IA(k)$ é a corrente do enrolamento k ;

k é o número do enrolamento com TC;

A Tabela 7.1 apresenta os resultados do esquema 1 com uma variação de 1% até 80% de supressão do enrolamento e variando a alocação dos TCs. O carregamento do GS foi de 110MVA e 370MVA par todos os casos de seis enrolamentos por fase. Os resultados apresentados são os tempos que o algoritmo levou para disparar o *TRIP*.

Conforme a Tabela 7.1, a proteção conseguiu detectar em diversas supressões e com a alocação do TC em diversos ramos. Pode-se observar que onde ocorreram todas as detecções foi quando o TC estava alocado no enrolamento sob falta, no caso A1. Nos demais enrolamentos tiveram em algumas porcentagens atuações e em outras não.

Tabela 7.1 – Resultados do Esquema 1 para GS de 6 enrolamentos por fase.

Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Tempo para operação (s)					
			A1	A2	A3	A4	A5	A6
7	110	80	0,501	0,502	0,502	0,502	0,502	x
8	110	70	0,502	0,510	0,502	0,502	0,558	x
9	110	60	0,502	0,511	0,502	0,502	0,557	x

10	110	50	0,502	0,512	0,502	x	x	0,514
11	110	40	0,507	0,513	0,503	x	x	x
12	110	30	0,502	0,513	0,503	0,503	0,692	x
13	110	20	0,502	x	x	x	x	x
14	110	10	0,502	0,504	0,503	0,503	0,503	0,503
15	110	9	0,503	x	x	0,504	0,504	0,504
16	110	8	0,503	x	x	0,504	0,504	0,504
17	110	7	0,502	0,503	0,503	0,503	0,503	0,503
18	110	6	0,509	0,503	0,504	0,504	0,504	0,503
19	110	5	0,512	x	x	x	x	x
20	110	4	0,502	0,502	0,592	x	0,504	0,503
21	110	3	0,509	0,504	0,559	x	0,506	0,505
22	110	2	0,512	x	0,515	0,515	0,515	x
23	110	1	0,512	x	0,515	0,515	0,515	x
24	370	80	0,501	0,502	0,502	0,576	x	0,502
25	370	70	0,502	0,512	0,594	x	0,502	0,502
26	370	60	0,502	0,503	0,627	x	x	0,502
27	370	50	0,502	0,512	0,514	0,514	0,503	0,513
28	370	40	0,502	0,513	0,515	0,514	0,514	0,514
29	370	30	0,502	x	x	x	x	x
30	370	20	0,503	x	0,618	x	x	x
31	370	10	0,504	0,513	0,513	0,513	0,513	0,513
32	370	9	0,503	0,513	0,515	0,514	0,514	0,513
33	370	8	0,503	0,513	0,515	0,514	0,514	0,513
34	370	7	0,503	x	x	x	x	x
35	370	6	0,502	0,503	0,505	x	0,504	0,503
36	370	5	0,512	0,513	0,512	0,512	0,512	0,513
37	370	4	0,512	0,642	x	x	0,576	0,527
38	370	3	0,514	x	x	x	x	x
39	370	2	0,511	0,514	0,512	0,512	0,512	0,512
40	370	1	0,511	0,514	0,512	0,512	0,512	0,512

x não atuou

Já na Tabela 7.2 são apresentados os resultados do GS com dois enrolamentos por fase, a fim de verificar, também, o desempenho deste esquema nas condições que Finney et al., (2008) originalmente apresenta. Dessa forma, como o GS de dois enrolamentos possui os terminais AT, A1 e A2, os testes realizados representam menos casos. Os testes nessa quantidade de enrolamentos foram realizados com carregamento de 110 MVA, somente.

Tabela 7.2 – Resultados do Esquema 1 para GS de 2 enrolamentos por fase.

Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Tempo para operação (s)	
			A1	A2
41	110	60	0,502	x

42	110	50	0,502	0,515
43	110	40	0,502	×
44	110	30	0,502	0,502
45	110	20	0,502	0,502
46	110	10	0,502	0,502
47	110	9	0,502	0,502
48	110	8	0,502	0,502
49	110	7	0,502	0,502
50	110	6	0,502	0,502
51	110	5	0,502	0,502
52	110	4	0,502	0,502
53	110	3	0,504	0,504
54	110	2	0,504	0,504
55	110	1	0,502	×

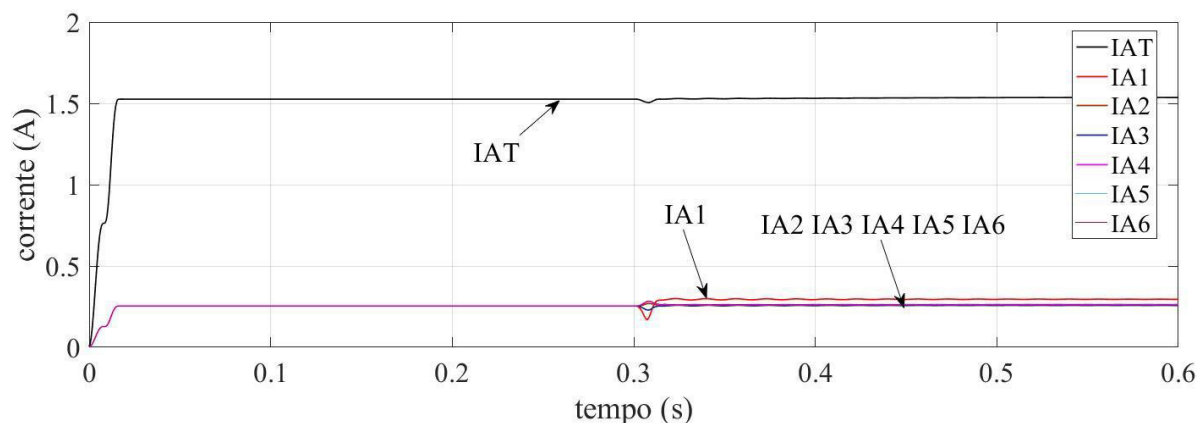
× não atuou

Os resultados do GS com dois enrolamentos por fase apresentaram resultados melhores em comparação ao GS de seis enrolamentos. Com menos enrolamentos por fase, em uma mesma potência, as correntes são mais afetadas. O algoritmo conseguiu detectar praticamente todos os defeitos com supressões no enrolamento quando o monitoramento estava ocorrendo no enrolamento sob falta (A1). Quando o monitoramento ocorria no outro enrolamento (A2) pode-se verificar que dois casos não detectaram, sendo em 60%, 40% e 1%. Essa não atuação em supressões altas de falta justifica-se à temporização de 30 ciclos. Como é uma característica das faltas entre espiras, ocorre um transitório muito curto na ocorrência da falta. Dessa forma, uma temporização alta tende a não detectar alguns casos, mesmo tendo um transitório alto. Esse comportamento mostrou-se igual nos geradores de 2 e 6 enrolamentos.

A Figura 7.3 mostra o comportamento das correntes nos enrolamentos e no terminal para o Caso 16. A representação dos casos pela Figura 7.3 mostra as correntes dos enrolamentos e do terminal da fase A para uma falta de 8% de supressão do enrolamento com o GS operando com 110 MVA de carga e de 6 enrolamentos por fase. Nessa situação, somente os TCs posicionados no enrolamento A1 (enrolamento sob falta) e do terminal (IAT) foram os mais afetados. A corrente da fase no terminal (IAT) sofre um desequilíbrio no instante da falta e a corrente do enrolamento A1 foi afetada de forma mais significativa.

A Figura 7.4 apresenta o resultado das correntes diferenciais para o caso mostrado na Figura 7.3 com 8% de supressão. Sendo IDIF-1 o TC alocado em AT-A1, IDIF-2 o TC alocado em AT-A2, IDIF-3 o TC alocado em AT-A3, IDIF-4 o TC alocado em AT-A4, IDIF-5 o TC alocado em AT-A5 e IDIF-6 o TC alocado em AT-A6.

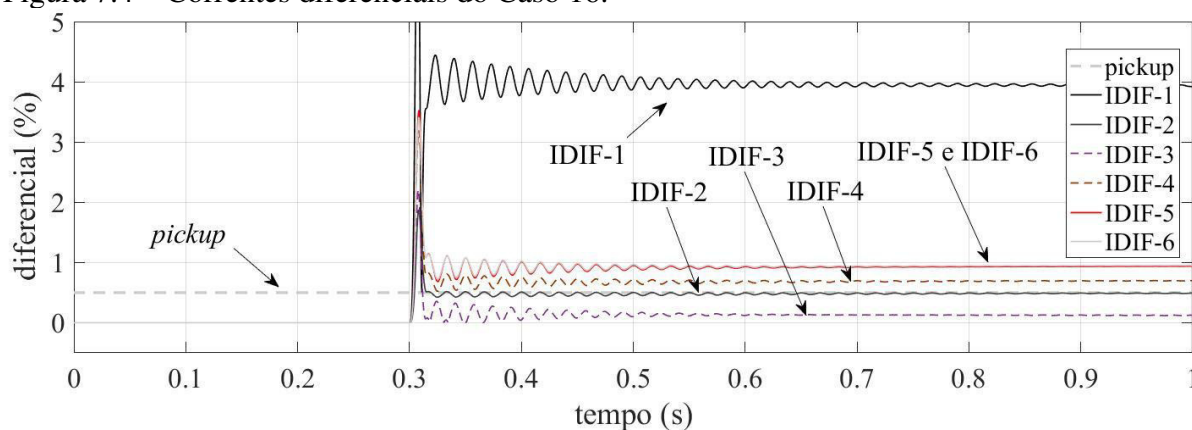
Figura 7.3 – Correntes nos enrolamentos e terminal com 70% de supressão do enrolamento e 110MVA de carga.



Fonte: Próprio Autor

Nessa representação (Figura 7.4) observa-se que houve a detecção de quatro casos (IDIF-1, IDIF-4, IDIF-4 e IDIF-6), pois ultrapassaram o valor de *pickup*. Os casos IDIF-2 e IDIF-3 não atuaram permanecendo abaixo de 0,5% de diferencial. Observa-se que com o TC alocado em A2, o resultado de IDIF-2 sofreu um transitório inicial e permaneceu ligeiramente abaixo do *pickup*, não chegando a atuar.

Figura 7.4 – Correntes diferenciais do Caso 16.



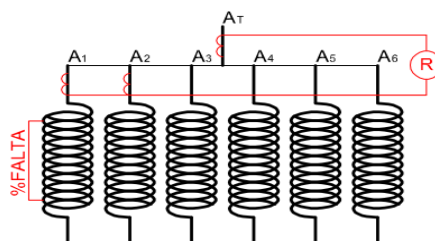
Fonte: Próprio Autor

7.2.2 Esquema 2

Neste esquema, os TCs são posicionados em dois enrolamentos e nos terminais das fases, conforme ilustra a Figura 7.5. As demais correntes são estimadas. Dessa forma, realizou-se a inclusão do TC em: AT-A1+A2, AT-A3+A4 e AT-A5+A6. As correntes diferenciais são obtidas através de (7.2) que realiza a divisão da corrente do terminal (IAT)

por 3 a fim de estimar as demais correntes dos enrolamentos que não estão sob monitoramento.

Figura 7.5 – Esquema 2



Fonte: Próprio Autor

$$I_{dif} = \left| \left(\sum_{k=1}^2 IA_{(k)} \right) - (I_{AT}/3) \right| \quad (7.2)$$

Os resultados do esquema 2 são apresentados na Tabela 7.3 para o GS de seis enrolamentos por fase, onde está dividido pelas alocações dos TCs com suas respectivas somas das correntes dos TCs.

Seguindo o mesmo comportamento que no Esquema 1 que se estende também para os demais esquemas, a detecção ocorreu em todos os casos somente quando o enrolamento sob falta estava sendo monitorado pelo TC. Nos demais casos tiveram atuações esporádicas.

Tabela 7.3 – Resultados do Esquema 2 para GS de 6 enrolamentos por fase.

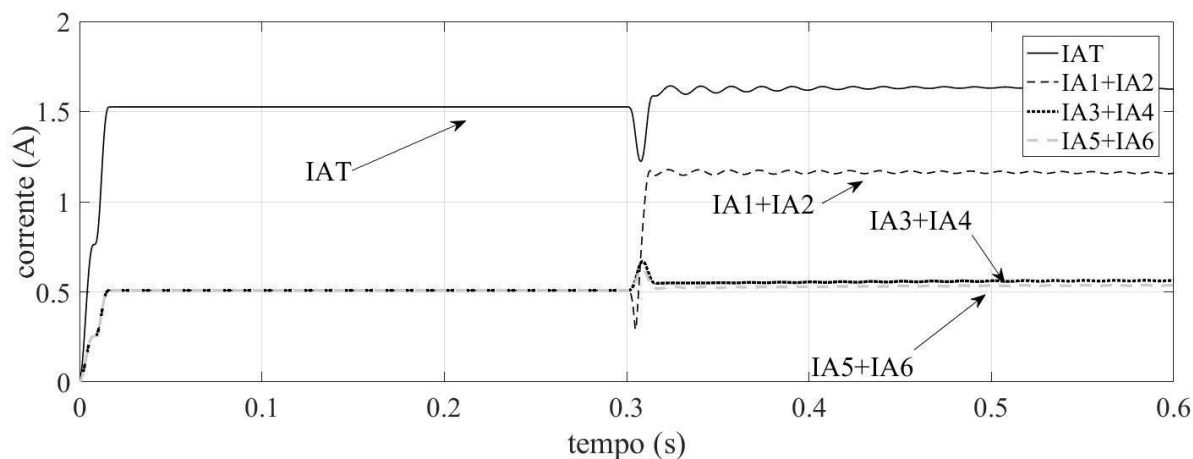
Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Tempo para operação (s)		
			A1+A2	A3+A4	A5+A6
7	110	80	0,501	0,502	0,629
8	110	70	0,502	0,502	0,696
9	110	60	0,502	0,502	0,677
10	110	50	0,502	0,559	x
11	110	40	0,502	0,576	x
12	110	30	0,502	0,502	0,676
13	110	20	0,502	x	x
14	110	10	0,509	0,503	0,503
15	110	9	0,503	0,506	0,503
16	110	8	0,503	0,506	0,503
17	110	7	0,508	0,503	0,503
18	110	6	0,503	0,503	0,503
19	110	5	0,512	x	x
20	110	4	0,507	x	0,503

21	110	3	0,507	×	0,504
22	110	2	0,512	×	0,513
23	110	1	0,512	×	0,513
24	370	80	0,501	0,502	×
25	370	70	0,502	×	0,502
26	370	60	0,502	×	0,502
27	370	50	0,502	0,502	0,513
28	370	40	0,502	0,514	0,514
29	370	30	0,511	×	×
30	370	20	0,503	0,515	×
31	370	10	0,504	0,513	0,513
32	370	9	0,503	0,513	0,513
33	370	8	0,503	0,513	0,513
34	370	7	0,512	×	×
35	370	6	0,503	0,505	0,503
36	370	5	0,512	×	0,512
37	370	4	0,634	×	0,503
38	370	3	0,513	×	×
39	370	2	0,511	×	0,511
40	370	1	0,511	×	0,511

× não atuou

A Figura 7.6 apresenta as correntes de uma falta com 50% de supressão do enrolamento (Caso 10). Observa-se que as correntes dos enrolamentos IA1+IA2 sofreram aumento enquanto as demais (IA3+IA4) e (IA5+IA6) apresentam um transitório de menor escala.

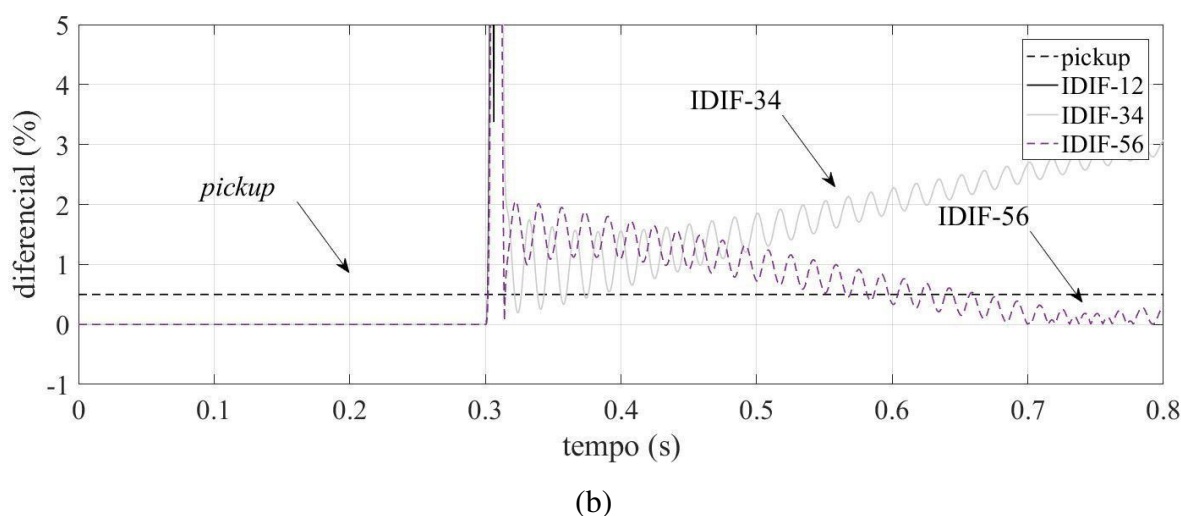
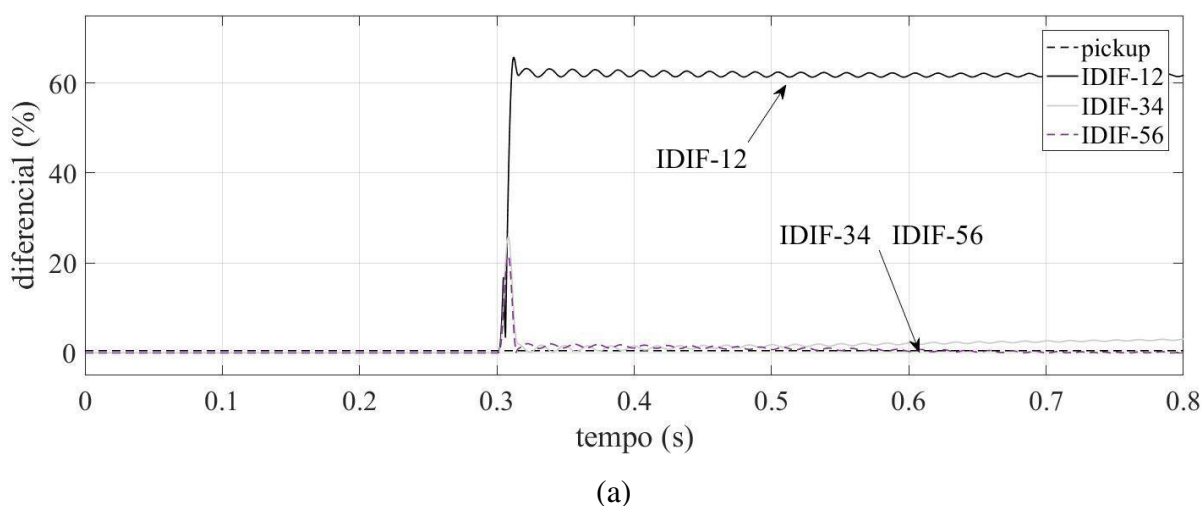
Figura 7.6 – Correntes nos enrolamentos e terminal com 70% de supressão do enrolamento e 110MVA de carga.



Fonte: Próprio Autor

A Figura 7.7 apresenta os resultados das correntes diferenciais dos enrolamentos para o Caso 10. Nessa representação, observa-se que somente quando os TCs estão posicionados nos ramos A1 e A2 (IDIF-12) e A3 e A4 (IDIF-34) foram possíveis a detecção da falta, visto que em A1 foi o ramo que sofreu a falta. Na Figura 7.7 (a) pode-se observar que houve um aumento significativo da corrente diferencial em IDIF-12. A Figura 7.7 (b) é o mesmo sinal de (a), porém com um *zoom* mais próximo ao valor de *pickup*. Quando os TCs estão nos enrolamentos A5 e A6 (IDIF-56) não ocorreu atuação. Pode-se observar na Figura 7.7 (b) IDIF-56 permaneceu por um curto período de tempo acima do valor de *pickup*, porém devido a temporização seu valor não atingiu os 30 ciclos, o que por consequência a falta não foi detectada. A isso, justifica-se a não atuação em situações de muita supressão.

Figura 7.7 – Correntes diferenciais do caso 10.

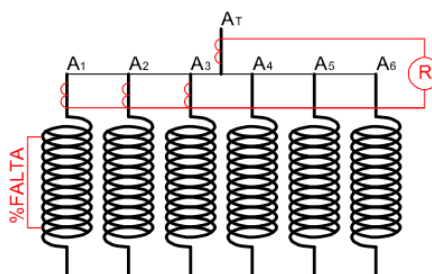


Fonte: Próprio Autor

7.2.3 Esquema 3

No Esquema 3 os TCs são instalados em três enrolamentos e no terminal da fase, demais correntes dos enrolamentos são estimadas, conforme é apresentado na Figura 7.8 e em (7.3). A divisão que ocorre de I_{AT} por 2 tem a finalidade de estimar as demais correntes que não estão sendo monitoradas.

Figura 7.8 – Esquema 3



Fonte: Próprio Autor

$$I_{dif} = \left| \left(\sum_{k=1}^3 IA_{(k)} \right) - (I_{AT}/2) \right| \quad (7.3)$$

Os resultados de tempos de atuação da proteção são disponibilizados na Tabela 7.4 onde apresenta o mesmo GS dos casos anteriores, isto é, de seis enrolamentos por fase. Para esta situação a proteção conseguiu detectar as faltas entre espiras com todas as supressões de enrolamento quando o TC monitorava A1. Quando A1 não estava sendo monitorado percebe-se que houve algumas supressões que não foram detectadas, mesmo em supressões altas. A isso, conforme mostrado no esquema 2, a temporização prejudicou a efetividade do método.

Tabela 7.4 – Resultados do Esquema 3 para GS de 6 enrolamentos por fase.

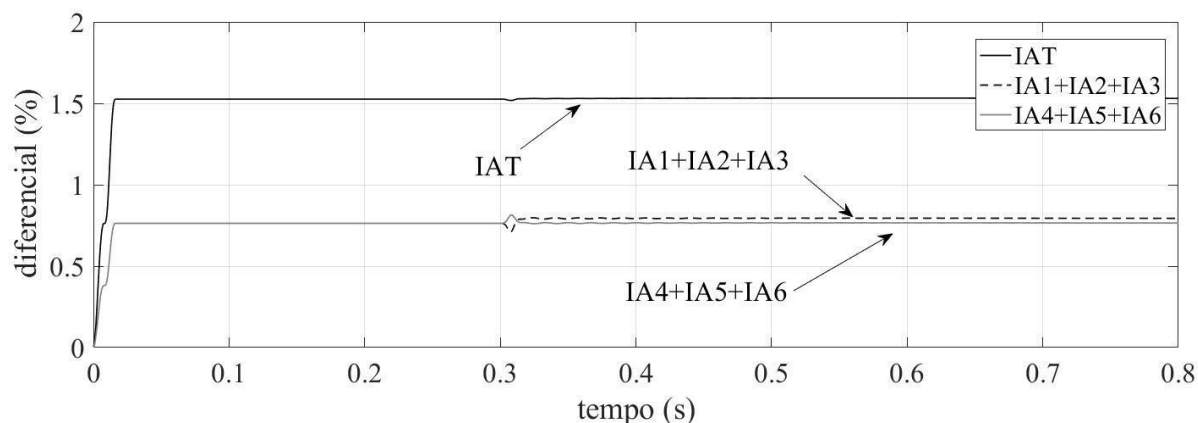
Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Tempo para operação (s)	
			A1+A2+A3	A4+ A5+A6
7	110	80	0,502	0,539
8	110	70	0,502	0,592
9	110	60	0,502	0,574
10	110	50	0,502	x
11	110	40	0,502	x
12	110	30	0,507	0,502
13	110	20	0,503	x

14	110	10	0,502	0,502
15	110	9	0,503	0,503
16	110	8	0,503	0,503
17	110	7	0,502	0,502
18	110	6	0,503	0,503
19	110	5	0,512	×
20	110	4	0,503	0,503
21	110	3	0,504	0,504
22	110	2	0,512	0,512
23	110	1	0,512	0,512
24	370	80	0,502	×
25	370	70	0,502	0,502
26	370	60	0,502	0,502
27	370	50	0,502	0,502
28	370	40	0,509	0,514
29	370	30	0,502	×
30	370	20	0,503	0,516
31	370	10	0,512	0,513
32	370	9	0,512	0,513
33	370	8	0,512	0,513
34	370	7	0,512	0,584
35	370	6	0,503	0,503
36	370	5	0,512	0,512
37	370	4	0,512	0,503
38	370	3	0,514	0,602
39	370	2	0,511	0,511
40	370	1	0,511	0,511

× não atuou

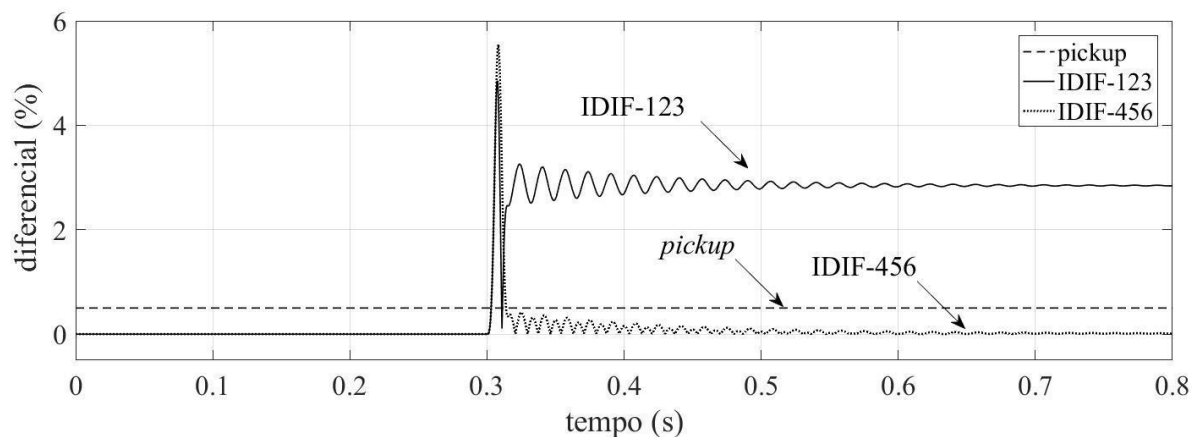
A Figura 7.9 mostra a diferença entre as correntes de cada TC. Observa-se que quando A1 está sendo monitorado, o somatório das correntes é maior ($A1+A2+A3$), visto que é o enrolamento sob falta com comparação, enquanto o somatório $A4+A5+A6$ teve somente um breve transitório no instante da falta e permaneceu próximo ao seu valor nominal. Na Figura 7.10 é apresentada a corrente diferencial para o Caso 19, com duas configurações. Em IDIF-123 (A1, A2 e A3) a detecção ocorreu, enquanto em IDIF-456 (A4, A5 e A6) o *pickup* não foi ultrapassado.

Figura 7.9 – Corrente terminal x Corrente IA(k) com 5% de supressão do enrolamento.



Fonte: Próprio Autor

Figura 7.10 – Corrente diferencial IA(k) do caso 19.



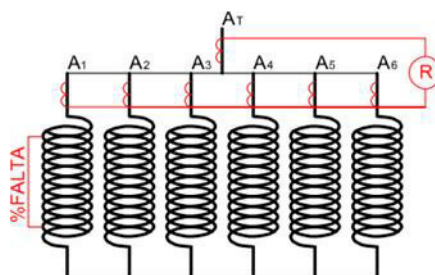
Fonte: Próprio Autor

7.2.4 Esquema 4

Neste esquema foi analisado o desempenho do Esquema com TCs instalados em todos os enrolamentos, como mostra a Figura 7.11. Vale ressaltar, que este esquema requer um grande número de TCs. No GS em estudo são necessários 7TCs por fase, ou seja, 21 TCs no total. O cálculo da corrente diferencial é dado em (7.4). A Tabela 7.5 apresenta os resultados deste esquema.

Nesse esquema houve atuações para defeitos com supressões de enrolamento acima de 40% com carga de 110 MVA e 50% a plena carga, mantendo o comportamento dos Esquemas 1 e 2.

Figura 7.11 – Esquema 4



Fonte: Próprio Autor

$$I_{dif} = \left| \left(\sum_{k=1}^6 I_{A(k)} \right) - (I_{AT}) \right| \quad (7.4)$$

A Figura 7.12 apresenta a relação entre a corrente terminal e a corrente do somatório dos TCs dos enrolamentos para uma falta com supressão de 2% do enrolamento (Caso 22). Observa-se que há uma diferença entre as correntes, com influência principal nas correntes do somatório dos ramos, seguindo o mesmo comportamento dos casos anteriores.

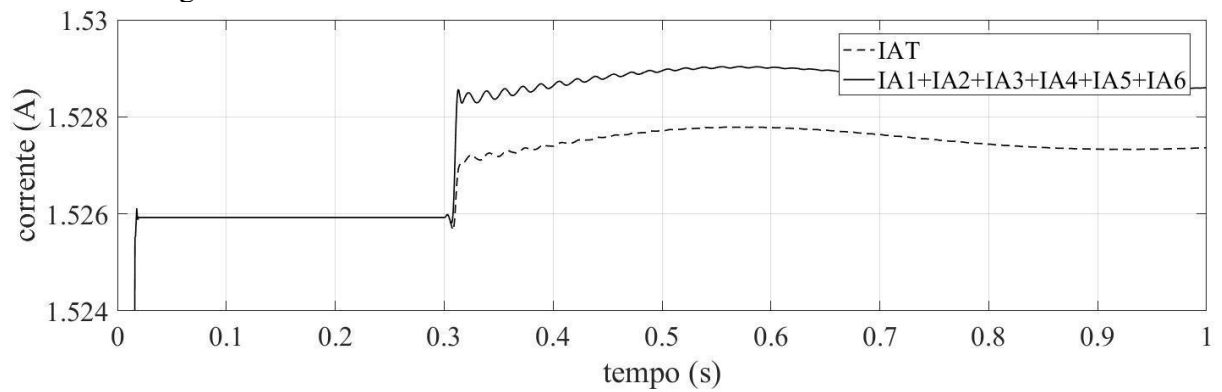
A Figura 7.13 mostra a corrente diferencial (IDIF). Nesses casos não ocorreu a atuação quando.

Tabela 7.5 – Resultados do Esquema 4 para GS de 6 enrolamentos por fase.

Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Tempo para operação (s)
			A1+A2+A3+ A4+ A5+A6
7	110	80	0,502
8	110	70	0,502
9	110	60	0,502
10	110	50	0,503
11	110	40	0,504
12	110	30	0,506
13	110	20	0,506
14	110	10	0,506
15	110	9	0,507
16	110	8	0,507
17	110	7	0,506
18	110	6	0,506
19	110	5	0,508
20	110	4	0,506
21	110	3	0,506
22	110	2	x
23	110	1	x
24	370	80	0,502

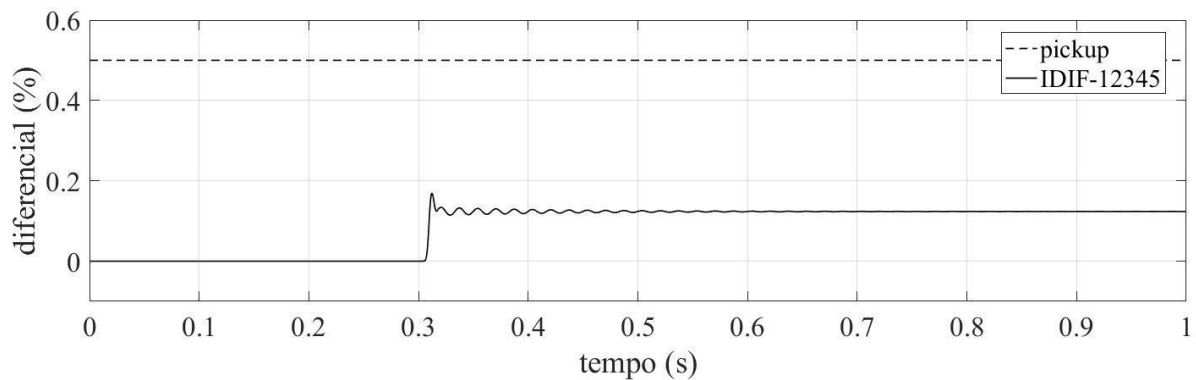
25	370	70	0,503
26	370	60	0,503
27	370	50	0,506
28	370	40	0,506
29	370	30	0,507
30	370	20	0,507
31	370	10	0,509
32	370	9	0,508
33	370	8	0,508
34	370	7	0,508
35	370	6	0,507
36	370	5	0,509
37	370	4	0,508
38	370	3	0,509
39	370	2	x
40	370	1	x

Figura 7.12 – Corrente terminal x Corrente IA(k) com 2% de supressão do enrolamento com 30% de carregamento.



Fonte: Próprio Autor

Figura 7.13 – Corrente diferencial IA(k) caso 22.

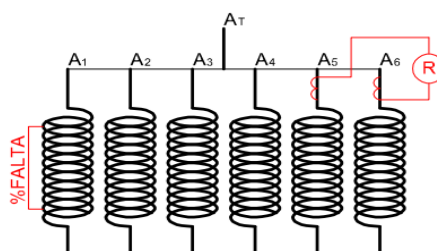


Fonte: Próprio Autor

7.2.5 Esquema 5

Neste esquema é realizado o cálculo da corrente diferencial entre as medições das correntes nos enrolamentos, conforme ilustra a Figura 7.14. São alocados os TCs em dois enrolamentos, sem a instalação de TC no terminal da fase. Os testes foram realizados nos geradores de 6 enrolamentos e 2 enrolamentos por fase. Neste esquema, apenas é calculada a diferença entre os enrolamentos que possuem TC, não sendo estimadas as demais correntes.

Figura 7.14 – Esquema 5



Fonte: Próprio Autor

Os resultados são apresentados na Tabela 7.6. O comportamento deste esquema não foi diferente dos demais esquemas que usavam TC no terminal, isto é, a atuação ocorreu somente ocorreu em sua totalidade quando o enrolamento sob falta A1 possui TC. Os demais tiveram atuações com piores resultados quando os TCs estavam monitorando A5 e A6. Já na Tabela 7.7 pode-se perceber que a proteção atuou em todos os casos.

Tabela 7.6 – Resultados do Esquema 5 para GS de 6 enrolamentos por fase.

Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Tempo para operação (s)		
			A2A1	A4A3	A6A5
7	110	80	0,501	0,502	0,503
8	110	70	0,502	0,503	0,503
9	110	60	0,502	0,504	0,504
10	110	50	0,502	0,504	0,504
11	110	40	0,502	0,506	0,505
12	110	30	0,502	0,504	x
13	110	20	0,502	x	x
14	110	10	0,502	x	x
15	110	9	0,503	x	x
16	110	8	0,503	x	x
17	110	7	0,502	0,506	0,506
18	110	6	0,502	0,506	0,506
19	110	5	0,513	x	x

20	110	4	0,542	0,559	0,504
21	110	3	0,504	0,505	0,505
22	110	2	0,512	0,513	x
23	110	1	0,512	0,513	x
24	370	80	0,501	0,503	0,503
25	370	70	0,502	0,504	0,504
26	370	60	0,502	0,504	0,504
27	370	50	0,502	0,504	x
28	370	40	0,502	x	x
29	370	30	0,502	x	x
30	370	20	0,512	x	x
31	370	10	0,504	x	x
32	370	9	0,503	x	x
33	370	8	0,503	x	x
34	370	7	0,503	x	x
35	370	6	0,502	0,504	0,504
36	370	5	0,512	0,512	x
37	370	4	0,512	0,542	x
38	370	3	0,514	x	x
39	370	2	0,511	0,511	x
40	370	1	0,511	0,511	x

x não atuou

Tabela 7.7 – Resultados do Esquema 5 para GS de 2 enrolamentos por fase.

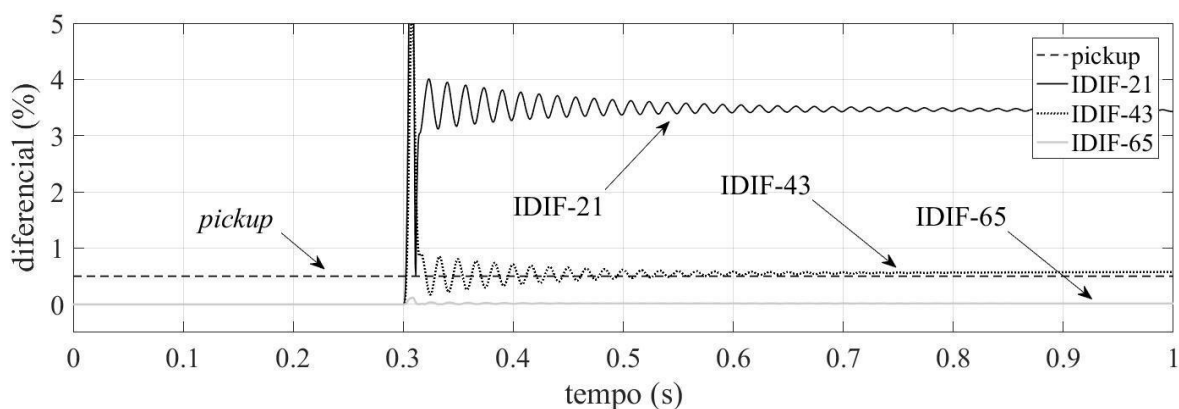
Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Tempo para operação (s)
			A2A1
41	110	60	0,501
42	110	50	0,502
43	110	40	0,502
44	110	30	0,501
45	110	20	0,501
46	110	10	0,501
47	110	9	0,501
48	110	8	0,502
49	110	7	0,502
50	110	6	0,502
51	110	5	0,502
52	110	4	0,502
53	110	3	0,504
54	110	2	0,504
55	110	1	0,501

x não atuou

Durante as simulações considerou-se a inserção de TCs nos enrolamentos A1 e A2; A4 e A3; e também A6 e A5 ambos com 6 enrolamentos e A1 e A2 para 2 enrolamentos. Pode-se verificar que essa configuração (Esquema 5) é recomendada quando há somente dois enrolamentos por fase. Para uma maior quantidade de enrolamentos por fase a tendência é redução da efetividade do método.

A Figura 7.15 apresenta as correntes diferenciais para o Esquema 5. A corrente diferencial (IDIF-21) foi a única que detectou a falta, pois os TCs monitorados estava em A1 e A2. IDIF-43 (A3/A4) ficou no limiar do *pickup* não chegando a atuar e IDIF-65 (A5/A6) quase não teve alteração em seu sinal, permanecendo próximos a zero.

Figura 7.15 – Corrente diferencial IA(k) do caso 15



Fonte: Próprio Autor

7.3 ANÁLISE COMPARATIVA COM O MÉTODO DESENVOLVIDO

O desempenho do método desenvolvido foi comparado com cinco esquemas tradicionais de proteção entre espiras para o GS de seis enrolamentos. Para o GS de dois enrolamentos foram comparados os Esquemas 1 e 5. Todas as falhas foram aplicadas no enrolamento A1, considerando o SG operando em carga de 110 MVA e 370 MVA para seis enrolamentos e 110 MVA para dois enrolamentos, além de ser executado sem interferência de ruído. O método desenvolvido utiliza sinais instantâneos para detectar o transitório gerado pela falta entre espiras. Logo, é inerentemente mais rápido que as técnicas apresentadas por Finney et al., (2008) que são fundamentados em grandezas fasoriais. Deste modo, está análise comparativa verifica somente se o método é capaz ou não de detectar a falta.

Os esquemas clássicos são altamente dependentes de onde os TCs estão posicionados. Quando ocorre uma falha no enrolamento onde o TC está instalado, o esquema detecta a

falha. Já o método proposto consegue detectar os defeitos entre espiras, mesmo quando pequenas porcentagens de supressão de enrolamento são consideradas.

A Tabela 7.8 apresenta o comparativo completo entre o método proposto baseado em MM e os esquemas apresentados por Finney et al., (2008) para o modelo de máquina de seis enrolamentos. Observa-se que o método proposto conseguiu detectar as faltas em todas as porcentagens de supressão do enrolamento. Outra diferença muito relevante, é que o estudo pelo filtro MM, isto é, pelo método proposto, utiliza somente TCs e TPs dos terminais da máquina, não sendo necessário sensoriamento adicional nos enrolamentos da máquina, como realizado nos outros esquemas.

Na Tabela 7.9 são apresentados todos os resultados realizados no gerador de dois enrolamentos por fase. Para este tipo de máquinas, com menos enrolamentos, a quantidade de atuações dos tradicionais foram maiores, visto a quantidade de enrolamentos que necessitam de monitoramento ser menor. Os esquemas clássicos foram capazes de detectar os defeitos principalmente quando o TC da falta estava sendo monitorado, enquanto nos demais houve atuações esporádicas. O algoritmo proposto utilizando filtro MM manteve o excelente desempenho, conseguindo detectar todas as faltas entre espiras.

Dessa forma, pode-se concluir que o algoritmo desenvolvido demonstrou ter desempenho superior que os esquemas apresentados, tanto para o GS de dois enrolamentos, quanto para a máquina de seis enrolamentos.

32	370	9	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
33	370	8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
34	370	7	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	
35	370	6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
36	370	5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
37	370	4	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
38	370	3	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
39	370	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
40	370	1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗

✗ não atuou; ✓ atuou.

Tabela 7.9 – Resultados do Esquema 5 para GS de 2 enrolamentos por fase.

Caso	Carregamento (MVA)	Percentual de enrolamento suprimido (%)	Método Proposto Filtro MM	Esquema 1		Esquema 5
				A1	A2	A2A1
41	110	60	✓	✓	✗	✓
42	110	50	✓	✓	✓	✓
43	110	40	✓	✓	✗	✓
44	110	30	✓	✓	✓	✓
45	110	20	✓	✓	✓	✓
46	110	10	✓	✓	✓	✓
47	110	9	✓	✓	✓	✓
48	110	8	✓	✓	✓	✓
49	110	7	✓	✓	✓	✓
50	110	6	✓	✓	✓	✓
51	110	5	✓	✓	✓	✓
52	110	4	✓	✓	✓	✓
53	110	3	✓	✓	✓	✓
54	110	2	✓	✓	✓	✓
55	110	1	✓	✓	✗	✓

7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dificuldade de detecção das faltas entre espiras ocorre principalmente quando as porcentagens suprimidas entre as espiras são baixas. O desempenho dos tradicionais esquemas está diretamente relacionado ao número TCs utilizados. Quando o defeito ocorre no enrolamento com TC os esquemas apresentam desempenho satisfatório. No entanto, a proteção diferencial de fase dividida pode não ser uma boa escolha para máquinas com vários enrolamentos por fase. Além do custo na aquisição de diversos TCs, em muitas máquinas não existe espaço suficiente para todos os TCs.

Por consequência, quanto maior a quantidade de enrolamentos, maior a complexidade de detecção, mesmo aplicando TCs em todos os enrolamentos, pois para porcentagens baixas de supressão do enrolamento há uma variação muito pequena nas correntes a ponto de serem detectadas. A finalidade de realização desse capítulo, para proteger geradores de seis enrolamentos é demonstrar que esse tipo de metodologia não é totalmente eficaz. Por fim, realizou-se um comparativo entre o método proposto nesta dissertação com filtro MM a fim de compará-los com relação à capacidade de atuação.

8 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou o assunto de faltas entre espiras em geradores síncronos de fase dividida e apresentou uma nova metodologia de detecção deste tipo de defeito.

Se comparado com outros tipos de falta em geradores síncronos, a falta entre espiras é muito pouco explorada, especialmente em máquina de fase dividida. Na grande maioria, as metodologias de proteção propostas são muito invasivas, com altas taxas de amostragem ou exigem treinamentos *offlines* que torna difícil a sua aplicação.

As metodologias empregadas atualmente para proteção de GS contra faltas entre espiras são desenvolvidas para monitorar GS com até dois enrolamentos por fase. À medida que a quantidade de enrolamentos paralelos aumenta, pode-se identificar que normalmente os GS ficam desprotegidos desta falta e somente conseguem atuar quando a falta entre espiras evolui para outras faltas mais graves, como, por exemplo, monofásicos, bifásicos ou trifásicos.

Tendo em vista os diversos problemas que podem ser evitados com a detecção de faltas entre espiras por uma medida eficaz e que permita ser amplamente aplicada este trabalho foi concebido. Dessa forma, buscou-se identificar as características presentes nas faltas entre espiras e seus comportamentos frente a diversas condições de operação. Posteriormente, realizou-se o estudo dos Filtros Morfológicos que ainda é pouco explorado na proteção de Sistema Elétricos de Potência.

Dessa forma, desenvolveu-se um algoritmo que detecta a assimetria gerada pelas faltas entre espiras fundamentado em MM. A metodologia é capaz de detectar defeitos entre espiras, mesmo aqueles com pequenas supressões, além de ter bom desempenho em sinais com ruído e seguro para faltas externas ao gerador. O método utiliza somente transformadores de corrente e potencial já existentes nas proteções tradicionais. Por fim, a proposta desenvolvida demonstrou-se superior comparado com os esquemas tradicionais. O fato de ter como base filtros morfológicos, que possuem operações matemáticas simples, faz com ele possa ser executado em tempo real com processamento muito rápido. Assim, a metodologia proposta nesta dissertação pode ser considerada promissora para aplicabilidade real.

8.1 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Como sugestões de desenvolvimento futuro deste trabalho, propõem-se as seguintes abordagens:

- Verificar o algoritmo em mais casos reais;
- Complementar o algoritmo para detecção das demais faltas internas: monofásicas, bifásicas e trifásicas.
- Implementar em *hardware* a metodologia proposta e realizar testes *emhardware-in-the-loop*.
- Implementar a metodologia proposta pela SEL e realizar testes comparativos.
- Verificar o comportamento do filtro MM com uma maior taxa de amostragem.

9 REFERÊNCIAS

BAI, Y. et al. A Novel concept of permanent magnet synchronous generators with automatic turn-To-Turn short-circuit fault-Tolerance capability. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 34, n. 1, p. 98–108, 2019.

BARROS, C. M. V. et al. **Analysis of Turn-to-Ground and Turn-to-Turn Stator Faults in Permanent Magnet Synchronous Machine**. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America). **Anais...** Gramado, Brazil: 2019.

CARVALHO, G. **Máquinas Elétricas: Teoria e Ensaios**. 4^a ed. São Paulo: Érica, 2011.

CINTRON-RIVERA, J. G.; FOSTE, S. N.; STRANGAS, E. G. Mitigation of turn-to-turn faults in fault tolerant permanent magnet synchronous motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 30, n. 2, p. 465–475, 2015.

DURIĆ, M. B.; DURIŠIĆ, Ž. R. Frequency measurement in power networks in the presence of harmonics using fourier and zero crossing technique. **2005 IEEE Russia Power Tech, PowerTech**, v. 1, n. 2, p. 1–6, 2005.

EFTEKHARI, M. et al. Online detection of induction motor's stator winding short-circuit faults. **IEEE Systems Journal**, v. 8, n. 4, p. 1272–1282, 2014.

FANG, H.; XIA, C. A fuzzy neural network based fault detection scheme for synchronous generator with internal fault. **6th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2009**, v. 4, n. 50825701, p. 433–437, 2009.

FINNEY, D. et al. **Self-adaptive generator protection methods**. 2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008). **Anais...** Glasgow, UK: 2008

GAUTAM, S.; BRAHMA, S. Properties of mathematical morphology based filter for online filtering of power system signals. **41st North American Power Symposium, NAPS 2009**, p. 1–5, 2009a.

GAUTAM, S.; BRAHMA, S. M. Overview of mathematical morphology in power systems - A tutorial approach. **2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09**, n. m, p. 1–7, 2009b.

GAUTAM, S.; BRAHMA, S. M. Application of mathematical morphology based filters to detect a power swing. **IEEE PES General Meeting, PES 2010**, n. Mm, p. 1–6, 2010.

HADDAD, R. Z. et al. A Voltage-Based Approach for Fault Detection and Separation in Permanent Magnet Synchronous Machines. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 6, p. 5305–5314, 2017.

HADDAD, R. Z.; STRANGAS, E. G. On the Accuracy of Fault Detection and Separation in

Permanent Magnet Synchronous Machines Using MCSA/MVSA and LDA. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 31, n. 3, p. 924–934, 2016.

IEEE. **IEEE Guide for AC Generator Protection**. Std C37.10 ed. New York: [s.n.].

JIANG, Y. et al. Three-phase current injection method for mitigating turn-to-turn short-circuit fault in concentrated-winding permanent magnet aircraft starter generator. **IET Electric Power Applications**, v. 12, n. 4, p. 566–574, 2018.

KARTHIK, T.; RAJU, G. . **New Criterion for Stator Inter Turn Fault Detection of Synchronous Generator**. 17th National Power Systems Conference. **Anais...IIT Varanasi (BHU)**: 2012

KASZTENNY, B. et al. **Um Novo Método para Detecção de Falhas Entre Espiras no Rotor e Estator de Geradores Um Novo Método para Detecção de Falhas Entre Espiras**. 13th International Conference on Developments in Power System Protection. **Anais...Edimburgo, Reino Unido**: 2016

KLEMPNER, G.; KERSZENBAUM, I. Principles of Operation of Synchronous Machines. In: **Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance**. 3^a ed. [s.l.] Wiley-IEEE Press, 2018. p. 1–52.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4^o ed. Porto Alegre: Globo, 1982.

LE-HUY, P., C. LAROSE, F. G. **Flexible Phase-Domain Synchronous-Machine Model with Internal Fault for Protection Relay Testing and related Real-Time Implementation Issues**. International Conference on Power Systems Transients. **Anais...Netherlands**: 2011

LUC, M.; DAN, S. Mathematical morphology and its applications to image and signal processing. **IEEE Circuits and Devices Magazine**, v. 17, n. 4, p. 41–41, 2005.

MINGJI, L. et al. Analysis and detection of turbo-generator stator turn-to-turn fault with multi-loop method. **2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2011**, n. 4, 2011.

MIRZAEVA, G.; SAAD, K. I. Advanced Diagnosis of Stator Turn-to-Turn Faults and Static Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, n. 4, p. 3961–3970, 2018.

NADARAJAN, S. et al. Hybrid model for wound-rotor synchronous generator to detect and diagnose turn-to-turn short-circuit fault in stator windings. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 3, p. 1888–1900, 2015.

NAJMAN, L.; TALBOT, H. (EDS.). **Mathematical Morphology: From Theory to Applications**. [s.l.] ISTE Ltd, 2019.

NETI, P.; NANDI, S. Stator interturn fault detection of synchronous machines using field current and rotor search-coil voltage signature analysis. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 45, n. 3, p. 911–920, 2009.

OPAL-RT. Chapter 5: Phase-Domain Synchronous Machine. In: [s.l.: s.n.]. p. 199–212.

OPAL-RT. **SIL Process**. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/software-in-the-loop/>>. Acesso em: 20 dez. 2020b.

OPAL-RT. **Faster Testing, Great Results**. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/>>. Acesso em: 20 dez. 2020c.

OPAL-RT. **A Revolution in the Industry**. Disponível em: <<https://www.opal-rt.com/power-hardware-in-the-loop/>>. Acesso em: 20 dez. 2020d.

PLATERO, C. A. et al. Scheme for synchronous machine stator turn-to-turn protection. **IET Electric Power Applications**, v. 14, n. 4, p. 716–722, 2020.

REDONDO, M.; PLATERO, C. A.; GYFTAKIS, K. N. Turn-to-turn fault protection technique for synchronous machines without additional voltage transformers. **Proceedings of the 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2017**, v. 2017- Janua, p. 117–121, 2017.

REIMERT, D. **Protective relaying for power generation systems**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LCC, 2006.

SHIH, F. Y. **Image Processing and Mathematical Morphology: Fundamentals and Applications**. New York: CRC Press, 2009.

SINHA, A.; VISHWAKARMA, D. N.; SRIVASTAVA, R. K. Modeling and Simulation of Internal Faults in Salient-pole Synchronous Generators with Wave Windings. **Electric Power Components and Systems**, v. 38, n. 1, p. 100–114, 2010.

TU, X. et al. Modeling and real-time simulation of internal faults in turbogenerators. **Electric Power Components and Systems**, v. 37, n. 9, p. 957–969, 2009.

WANG, B. et al. Turn-to-turn short circuit of motor stator fault diagnosis in continuous state based on deep auto-encoder. **IET Electric Power Applications**, v. 13, n. 10, p. 1598–1606, 2019.

WANG XIANGHENG, WANG WEIJIAN, W. S. Research on internal faults of generators and their protection schemes in Three Gorges Hydro Power Station. **IEEE**, p. 1883–1887, 2000.

WU, Q. H.; LU, Z.; JI, T. Y. **Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology**. New York: Springer, 2019. v. 53

YAGAMI, Y. et al. Turn-to-turn insulation failure diagnosis of stator winding of low voltage induction motor with the aid of support vector machine. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 22, n. 6, p. 3099–3106, 2015.

10 ANEXO A – DADOS DOS GSs

A1. RANHURAS DA POSIÇÃO DOS ENROLAMENTOS DO GS DE DOIS ENROLAMENTOS POR FASE.

WO_A1 = [8 20 09 21 10 22 11 23 12 24 38 50 39 51 40 52 41 53 42 54];

WO_A2 = [9 57 08 56 07 55 06 54 05 53 39 27 38 26 37 25 36 24 35 23];

WO_B1 = [18 30 19 31 20 32 21 33 22 34 48 60 49 01 50 02 51 03 52 04];

WO_B2 = [49 37 48 36 47 35 46 34 45 33 19 07 18 06 17 05 16 04 15 03];

WO_C1 = [58 10 59 11 60 12 01 13 02 14 28 40 29 41 30 42 31 43 32 44];

WO_C2 = [59 47 58 46 57 45 56 44 55 43 29 17 28 16 27 15 26 14 25 13];

A2. PARÂMETROS DO GS DE DOIS ENROLAMENTOS

Descrição	Valor
Potência (MVA)	370
Tipo de Rotor	Cilíndrico
Frequência (Hz)	60
Número de polos	4
Resistência da Armadura R_s (pu)	0,002636
Reatância de Dispersão da Armadura X_{ls} (pu)	0,015
Reatância Síncrona de Eixo direto X_d (pu)	0,985
Reatância Síncrona de Quadratura X_q (pu)	0,609
Reatância Transitória de Eixo Direto X_d' (pu)	0,340
Reatância Transotória do Eixo da Qaudratura X_q' (pu)	0,60
Reatância sub-transiente do Eixo Direto X_d'' (pu)	0,249
Reatância sub-transiente do Eixo da Quadratura X_q'' (pu)	0,272
Constante de tempo transitória do eixo Direto T_{do}' (s)	7,348
Constante de tempo transitória do eixo da Quadratura T_{qo}' (s)	7,0
Constante de tempo sub-transitória do eixo Direto T_{do}'' (s)	0,075
Constante de tempo sub-transitória do eixo da Quadratura T_{qo}'' (s)	0,14

A3. RANHURAS DA POSIÇÃO DOS ENROLAMENTOS DO GS DE SEIS ENROLAMENTOS POR FASE.

WO_A1 = [289 279 288 278 287 277 286 276 265 275 266 276 267 277 266 256 265 255 264 254 263 253 242 252 243 253 244 254 245 255 244 234 243 233 242 232 241 231 220 230 221 231 222 232 221 211 220 210 219 209 218 208 197 207 198 208 199 209 200 210];

WO_A2 = [379 369 378 368 377 367 376 366 355 365 356 366 357 367 356 346 355 345 354 344 353 343 332 342 333 343 334 344 335 345 334 324 333 323 332 322 331 321 310 320 311 321 312 322 311 301 310 300 309 299 308 298 287 297 288 298 289 299 290 300];

WO_A3 = [469 459 468 458 467 457 466 456 445 455 446 456 447 457 446 436 445 435 444 434 443 433 422 432 423 433 424 434 425 435 424 414 423 413 422 412 421 411 400 410 401 411 402 412 401 391 400 390 399 389 398 388 377 387 378 388 379 389 380 390];

WO_A4 = [19 9 18 8 17 7 16 6 535 5 536 6 537 7 536 526 535 525 534 524 533 523 512 522 513 523 514 524 515 525 514 504 513 503 512 502 511 501 490 500 491 501 492 502 491 481 490 480 489 479 488 478 467 477 468 478 469 479 470 480];

WO_A5 = [109 99 108 98 107 97 106 96 85 95 86 96 87 97 86 76 85 75 84 74 83 73 62 72 63 73 64 74 65 75 64 54 63 53 62 52 61 51 40 50 41 51 42 52 41 31 40 30 39 29 38 28 17 27 18 28 19 29 20 30];

WO_A6 = [199 189 198 188 197 187 196 186 175 185 176 186 177 187 176 166 175 165 174 164 173 163 152 162 153 163 154 164 155 165 154 144 153 143 152 142 151 141 130 140 131 141 132 142 131 121 130 120 129 119 128 118 107 117 108 118 109 119 110 120];

WO_B1 = [296 286 295 285 294 284 293 283 272 282 273 283 274 284 275 285 274 264 273 263 272 262 271 261 250 260 251 261 252 262 251 241 250 240 249 239 248 238 227 237 228 238 229 239 230 240 229 219 228 218 227 217 226 216 205 215 206 216 207 217];

WO_B2 = [386 376 385 375 384 374 383 373 362 372 363 373 364 374 365 375 364 354 363 353 362 352 361 351 340 350 341 351 342 352 341 331 340 330 339 329 338 328 317 327 318 328 319 329 320 330 319 309 318 308 317 307 316 306 295 305 296 306 297 307];

WO_B3 = [476 466 475 465 474 464 473 463 452 462 453 463 454 464 455 465 454
444 453 443 452 442 451 441 430 440 431 441 432 442 431 421 430 420 429 419 428 418
407 417 408 418 409 419 410 420 409 399 408 398 407 397 406 396 385 395 386 396 387
397];

WO_B4 = [26 16 25 15 24 14 23 13 2 12 3 13 4 14 5 15 4 534 3 533 2
532 1 531 520 530 521 531 522 532 521 511 520 510 519 509 518 508 497 507 498 508 499
509 500 510 499 489 498 488 497 487 496 486 475 485 476 486 477 487];

WO_B5 = [116 106 115 105 114 104 113 10392 10293 103 94 104 95 105 94 84 93
83 92 82 91 81 70 80 71 81 72 82 71 61 70 60 69 59 68 58 47 57 48 58 49 59
50 60 49 39 48 38 47 37 46 36 25 35 26 36 27 37];

WO_B6 = [206 196 205 195 204 194 203 193 182 192 183 193 184 194 185 195 184
174 183 173 182 172 181 171 160 170 161 171 162 172 161 151 160 150 159 149 158 148
137 147 138 148 139 149 140 150 139 129 138 128 137 127 136 126 115 125 116 126 117
127];

WO_C1 = [304 294 303 293 302 292 301 291 280 290 281 291 282 292 281 271 280
270 279 269 278 268 257 267 258 268 259 269 260 270 259 249 258 248 257 247 256 246
235 245 236 246 237 247 236 226 235 225 234 224 233 223 212 222 213 223 214 224 215
225];

WO_C2 = [394 384 393 383 392 382 391 381 370 380 371 381 372 382 371 361 370
360 369 359 368 358 347 357 348 358 349 359 350 360 349 339 348 338 347 337 346 336
325 335 326 336 327 337 326 316 325 315 324 314 323 313 302 312 303 313 304 314 305
315];

WO_C3 = [484 474 483 473 482 472 481 471 460 470 461 471 462 472 461 451 460
450 459 449 458 448 437 447 438 448 439 449 440 450 439 429 438 428 437 427 436 426
415 425 416 426 417 427 416 406 415 405 414 404 413 403 392 402 393 403 394 404 395
405];

WO_C4 = [34 24 33 23 32 22 31 21 10 20 11 21 12 22 11 1 10 540 9 539
8 538 527 537 528 538 529 539 530 540 529 519 528 518 527 517 526 516 505 515 506 516
507 517 506 496 505 495 504 494 503 493 482 492 483 493 484 494 485 495];

WO_C5 = [124 114 123 113 122 112 121 111 100 110 101 111 102 112 10191 10090
99 89 98 88 77 87 78 88 79 89 80 90 79 69 78 68 77 67 76 66 55 65 56 66 57
67 56 46 55 45 54 44 53 43 32 42 33 43 34 44 35 45];

WO_C6 = [214 204 213 203 212 202 211 201 190 200 191 201 192 202 191 181 190
180 189 179 188 178 167 177 168 178 169 179 170 180 169 159 168 158 167 157 166 156

145 155 146 156 147 157 146 136 145 135 144 134 143 133 122 132 123 133 124 134 125
135];

A4. PARÂMETROS DO GS DE SEIS ENROLAMENTOS

Descrição	Valor
Tipo de rotor	Polos salientes
S (MVA)	370
V (kV)	13.8
f (Hz)	60
Número de polos	48
Número de enrolamentos por polos	6
RS (p.u)	0,002636 p.u
Xls	0,015 p.u
Xd	0,985 p.u
Xq	0,609p.u
Xd'	0,340 p.u
Xq'	0,60 p.u
Xd''	0,249 p.u
Xq''	0.272 p.u
Tdo' (s)	7.348 s
Tdo''	0,075 s
Tqo''	0,14
ZN (p.u)	1000 + j 500 p.u