Valmir Ziolkowski

Estratégias Experimentais Para Ensaios de Faltas Fase-Terra com Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sendo parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

São Carlos

2007

"Porque *dele* e por meio *dele*, e para *ele*, são todas as coisas. Glória, pois, a *ele* eternamente. Amém."

Romanos 11,36

AGRADECIMENTOS

Ao Nosso Senhor Jesus Cristo pelas benções e intercessões junto a Deus Pai durante toda a minha vida.

A minha esposa Rosana, uma mulher maravilhosa, pela cumplicidade, apoio, compreensão e companheirismo.

Aos meus pais Valter e Lurdinha, essenciais na minha vida, pela doação, pelo incentivo, pela presença e carinho, sem os quais eu não seria nada.

Aos meus familiares e amigos, obrigado pelo incentivo.

Ao Prof. Ivan Nunes da Silva, orientador e grande amigo, meu muito obrigado pela paciência, dedicação e orientação.

Ao Prof. Rogério Andrade Flauzino pela colaboração, orientação e apoio.

Ao Prof. Góes, pelas trocas de informações, pelos materiais disponibilizados e pelas idéias sempre brilhantes.

Ao Prof. José Alfredo Colovan Ulson pelos conselhos e incentivos.

Aos colegas dos laboratórios, em especial ao Spatti e ao Wesley.

A ELEKTRO pelo apoio para a realização dos ensaios.

Ao Eng. Mauro Pereira pelo incentivo.

Aos amigos e colegas da ELEKTRO, em especial Julio Bellan, Edeílton Xavier, Akira Higa, Paulo Couto Gonçalves, Richard Algarve, Fabio Trivelato, Armando Benvenuti, Vinícius Benichio, Ricardo Grunewald, Laudemir Caritá. e Carlos Alberto Guilherme Camargo.

Ao Engenheiro Shiguematsu Nosaki, meu muito obrigado pelos ensinamentos.

Aos Engenheiros Paulo de Tarso e Carlos Henrique da ELEKTRO, obrigado.

Aos colegas Eng. Eliezer dos Santos e Eng. André Gustavo C. da Conceição.

RESUMO

ZIOLKOWSKI, V. (2007). Estratégias Experimentais Para Ensaios de Faltas Fase-Terra com Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

O conhecimento das características experimentais das faltas de alta impedância é de suma importância para o desenvolvimento de sistemas e equipamentos voltados a detecção eficiente das mesmas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Este trabalho apresenta um conjunto de estratégias experimentais que visam orientar passo a passo a realização de ensaios de faltas fase-terra com alta impedância, contemplando-se desde os dispositivos de proteção usados na viabilização dos experimentos até os equipamentos de oscilografias utilizados para registrar as grandezas elétricas advindas dessas situações de faltas. São ainda apresentados os resultados obtidos pelos ensaios realizados de queda de condutor energizado (lado fonte) em solo seco, queda de condutor energizado (lado fonte) em brita seca, queda de condutor energizado sobre a cruzeta e queda de condutor energizado (lado carga) em solo seco.

Palavras chave: Sistemas de distribuição, faltas de alta impedância, proteção de sistemas elétricos.

ABSTRACT

ZIOLKOWSKI, V. (2007). *Practical Strategies for Experiments Involving High-Impedance Faults in Electric Power Distribution Systems*. Dissertation (Masters Degree) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

The knowledge of experimental characteristics of high-impedance fault is of highest importance for developing both systems and equipments addressed to its efficient detection in electric power distribution systems. This work presents a set of practical strategies to guide step by step the accomplishment of experiments involving phase-ground faults with high impedance, being also contemplated from protection devices used in the experiments to oscillograph equipments dedicated to register the electric signals produced in those situations. It is still presented the results produced by fault experiments involving drop of energized cable (source side) in dry soil, drop of energized cable (source side) in dry broken stones, drop of energized cable on crossarm and drop of energized cable (load side) in dry soil.

Keywords: Electric power distribution systems distribution, high-impedance fault, system protection.

SUMÁRIO

A	GRAI	DECIMENTOS	v
R	ESUN	٨O	vii
A	BSTR	RACT	. ix
LI	STA	DE FIGURAS	xiii
LI	STA	DE TABELAS	xix
1	INTE	RODUÇÃO	1
	1.1	Motivação e Relevância do Trabalho	1
	1.2	Proposta e Justificativa da Dissertação	2
	1.3	Organização da Dissertação	6
2	ASP DIS	ECTOS TÉCNICOS RELACIONADOS AS FALTAS EM SISTEMAS DE TRIBUICÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	9
	2.1	Introdução	9
	2.2	Tipos de Faltas nos Sistemas Elétricos de Potência	12
	2.3	Classificação das Faltas no Sistema de Distribuição	14
	2.4	Ocorrências de Faltas Permanentes e Temporárias	15
	2.5	Aspectos Sobre as Operações de Religamento	16
	2.6	Aspectos Relacionados as Faltas de Alta Impedância	17
		a) Resistência de arco elétrico	18
		b) Resistência de contato da falta	19
		c) Resistência de aterramento	19
3	ASP	ECTOS DOS EQUIPAMENTOS DE OSCILOGRAFIAS E DE MEDIÇÃO	25
	3.1	Introdução	25
	3.2	Aspectos Relacionados aos Equipamentos de Oscilografias	25
	3.3	Estratégias de Ensaios de Resposta Freqüência de Transdutores de Medição	27
		3.3.1 Metodologia de Ensaio	27
		3.3.2 Resposta em Freqüência do Transformador de Potencial	30
		3.3.3 Resposta em Freqüência dos Transformadores de Corrente	32
4	EST	RATÉGIAS DE REALIZAÇÃO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS	37
	4.1	Introdução	37
	4.2	Falta Fase-Terra com Solo Seco	38

	4.3	Queda de Condutor Sobre Cruzeta de Madeira	. 49
	4.4	Rompimento e Queda de Condutor de Fase do Lado da Carga	. 50
5	RES	ULTADOS DE MEDIÇÕES DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	. 53
	5.1	Introdução	. 53
	5.2	Falta Fase-Terra com Solo Seco e Religamento Automático Bloqueado	. 53
	5.3	Falta Fase-Terra com Solo Seco e Religamento Automático em Serviço	. 57
		(A) Religamentos 1,5s - 2,5s - 2,5s (uma rápida e três lentas)	. 57
		(B) Religamento 0,5s – 20s (três lentas)	. 67
		(C) Religamento 5s – 10s (três lentas)	. 71
		(D) Religamento 0,5s – 30s (três lentas)	.74
	5.4	Formação de Arco Elétrico Entre Fase e Terra com Solo Seco	. 76
		(A) Religamento 1,5s - 2,5s - 2,5s (uma rápida e três lentas)	. 77
		(B) Religamento 0,5s – 20s (três lentas)	. 81
		(C) Religamento 5s – 20s (três lentas)	. 83
	5.5	Falta Fase–Terra com Brita Seca	. 87
		(A) Religamento Automático Bloqueado	. 87
		(B) Religamento 1,5s - 2,5S - 2,5s (uma rápida e três lentas)	. 88
	5.6	Falta Fase–Terra com Condutor Sobre a Cruzeta	. 92
		(A) Religamento Automático Bloqueado	. 92
		(B) Religamento 1,5s - 2,5s - 2,5s (uma rápida e três lentas)	. 93
	5.7	Falta Fase-Terra Lado Carga com Solo Seco	. 95
6	CO	NCLUSÕES	. 97
BIBLIOGRAFIA101			
ANEXO I – ASPECTOS RELACIONADOS AOS OSCILÓGRAFOS 105			105
ANEXO II – DETALHES DO ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO			119
Α	ANEXO III – EXECUÇÃO DAS ATIVIDADES DE PRÉ-ENSAIOS		
Α	ANEXO IV – AJUSTES DOS EQUIPAMENTOS DE PROTECÃO		

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. distribui	Diagrama unifilar simplificado de uma SE típica para serviços de ção de energia elétrica	10
Figura 2.2. 15 kV co	Esquema de proteção de alimentadores trifásicos aéreos na classe om neutro aterrado na origem	11
Figura 2.3. falta	Configurações dos tipos de faltas e respectivas impedâncias de	13
Figura 2.4. dos relé	Relação entre correntes de falta à terra de alta impedância_e ajustes s de proteção	18
Figura 2.5.	Rede elétrica trifásica protegida por chaves fusíveis	21
Figura 2.6.	Curva do elo fusível 25K	22
Figura 3.3. primário	Detalhes de conexão ao transformador de otencial: (a) Conexões ao ; (b) Conexões ao secundário	31
Figura 3.4. potencia	Sinais de entrada e saída aplicados nos transformadores de	31
Figura 3.5.	Resposta em freqüência dos transformadores de potencial	32
Figura 3.6. de corre	Bancada experimental para ensaios em freqüência do transformador	33
Figura 3.7. corrente	Sinais de entrada e saída aplicados nos transformadores de	33
Figura 3.8.	Resposta em freqüência dos transformadores de corrente	34
Figura 4.1. pela cint caminhâ	Corda isolante utilizada para soltar o condutor: (a) Corda passando ta na parte inferior do poste; (b) Ponta da corda amarrada ao áo antes do início do ensaio	39
Figura 4.2.	Buzina utilizada para acionar o instante de início dos ensaios	39
Figura 4.3. do mesr	Chave corta-circuito que deriva o ramal, no instante da energização no.	40
Figura 4.4. ensaios	Instalação dos TP's e TC's utilizados na medição durante os	41
Figura 4.5. aferição	Sistema de medição e aferição: (a) Conexões das chaves de ; (b) Conexões das chaves de aferição aos bornes do oscilógrafo	41
Figura 4.6. laptop	Instalação do religador automático e veículo da ELEKTRO com	42

Figura 4.7. Posição do profissional responsável pelas filmagens dos ensaios43
Figura 4.8. Vista interior do painel de proteção do alim. 30 da SE Rio Claro III 43
Figura 4.9. Detalhes das conexões do oscilógrafo no painel do alimentador 30 da SE RIC III: (a) Conexões das garras de corrente e circuito de potencial; (b) Conexões do oscilógrafo ao painel
Figura 4.10. Isolamento da área de trabalho durante os ensaios: (a) Bloqueio da estrada ao local dos ensaios; (b) Bloqueio do outro lado do local dos ensaios, onde se encontrava o caminhão da equipe da linha viva
Figura 4.11. Vista da rede aérea antes do lançamento do cabo ao solo
Figura 4.12. Condutor energizado em contato com o solo provocando curto circuito fase-terra
Figura 4.13. Detalhe do arco elétrico durante contato do condutor energizado com o solo
Figura 4.14. Aparência do solo após o curto circuito fase terra em solo seco (a) Buracos causados no solo devido a curto circuito (b) Pedaços de pedras queimadas no instante do curto circuito
Figura 4.15. Detalhe de furo na pedra devido a queda de condutor energizado 47
Figura 4.16. Posição da brita no solo onde o cabo energizado foi lançado 48
Figura 4.17. Posição dos eletricistas no momento que soltam a corda isolada que suportava o condutor energizado
Figura 4.18. Condutor sobre a cruzeta pronto para ser energizado
Figura 5.1. Gráfico das correntes e tensões durante o ensaio na sua primeira repetição oscilografada no local da falta54
Figura 5.2. Gráfico das correntes e tensões durante o ensaio na sua segunda repetição oscilografada na subestação55
Figura 5.3. Gráfico das correntes e tensões durante o ensaio na sua terceira repetição oscilografada no local da falta55
Figura 5.4. Distúrbio de tensão observado durante a terceira repetição do primeiro ensaio junto ao local de ensaio
Figura 5.5. Gráficos de corrente de linha e tensão de fase durante o ensaio na sua terceira repetição oscilografada na subestação
Figura 5.6. Gráficos de corrente de linha e tensões de fase durante o ensaio na sua primeira repetição oscilografada no local da falta
Figura 5.7. Gráfico de tensão após o primeiro religamento (primeira repetição) 58

Figura 5.8. Detalhe do distúrbio de tensão no instante do primeiro religamento da primeira repetição de ensaio5	59
Figura 5.9. Detalhe do distúrbio de tensão no instante de contato do condutor com o solo na primeira repetição de ensaio6	50
Figura 5.10. Distúrbio de tensão oscilografada no primeiro local de ensaio para a primeira repetição do ensaio: (a) segundo religamento; (b) terceiro religamento.	50
Figura 5.11. Gráficos de corrente de linha e tensão de fase durante o ensaio na sua primeira repetição oscilografada na subestação6	51
Figura 5.12. Detalhe do distúrbio de tensão na primeira repetição de ensaio oscilografado da subestação: (a) Primeiro religamento; (b) Terceiro religamento6	51
Figura 5.13. Distúrbios de tensão: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento; (c) Terceiro religamento	52
Figura 5.14. Gráficos de corrente de linha e tensão de fase durante o ensaio na sua segunda repetição no local da falta6	52
Figura 5.15. Gráfico das correntes de linha observadas na subestação no instante de queda do condutor ao solo6	53
Figura 5.16. Correntes de religamento: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento; (c) Terceiro religamento6	53
Figura 5.17. Forma de onda oscilografadas no local de ensaio para a terceira repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo6	34
Figura 5.18. Forma de onda oscilografadas na subestação para a terceira repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo6	35
Figura 5.19. Forma de onda oscilografadas no local de falta para a quarta repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo6	35
Figura 5.20. Forma de onda oscilografadas na subestação para a quarta repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo6	56
Figura 5.21. Forma de onda oscilografadas no local de falta para a quinta repetição: (a) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo; (b) Detalhe do transitório de corrente observado no segundo religamento.	66

Figura 5.22. Forma de onda oscilografadas na subestação para a quinta repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo......67 Figura 5.23. Corrente de linha oscilografadas no local da falta na primeira repetição; (a) Corrente total oscilografada; (b) Detalhe da corrente após o Figura 5.24. Corrente de linha oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente após o primeiro religamento; (b) Corrente após o Figura 5.25. Correntes oscilografadas na subestação para a primeira repetição; (a) Corrente após a queda do condutor no solo: (b) Corrente após o primeiro religamento; (c) Corrente após o segundo religamento......69 Figura 5.26. Correntes oscilografadas no local da falta para a segunda repetição; (a) Corrente após a queda do condutor no solo: (b) Corrente após Figura 5.27. Correntes oscilografadas na subestação para a segunda repetição: (a) Corrente após a queda do condutor no solo; (b) Corrente após o primeiro religamento; (c) Corrente após o segundo religamento......70 Figura 5.28. Correntes iniciais oscilografadas da subestação: (a) Primeira repetição; (b) Segunda repetição; (c) Terceira repetição; (d) Quarta repetição. ...71 Figura 5.29. Corrente de linha oscilografada no local da falta na primeira repetição; (a) Corrente total oscilografada; (b) Detalhe da corrente após o toque do cabo no solo......72 Figura 5.30. Tensão de fase oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Tensão total oscilografada; (b) Distúrbio de tensão_no instante do segundo religamento......72 Figura 5.31. Corrente de linha oscilografada na subestação na primeira repetição: (a) Corrente total oscilografada; (b) Detalhe da corrente_após o toque do cabo no solo......73 Figura 5.32. Correntes iniciais oscilografadas da subestação; (a) Primeira Figura 5.33. Corrente de linha oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total oscilografada; (b) Detalhe da corrente após o toque do cabo no solo......74 Figura 5.34. Correntes de linha oscilografadas no local da falta após os religamentos da chave religadora na primeira repetição: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento.75

xvi

Figura 5.35. Distúrbios de tensão observados no local da falta nos instantes de religamento da primeira repetição: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento
Figura 5.36. Distúrbios de tensão observados na subestação nos instantes de religamento da primeira repetição: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento
Figura 5.37. Correntes iniciais oscilografadas da subestação: (a) Primeira repetição; (b) Segunda repetição; (c) Terceira repetição
Figura 5.38. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente totaloscilografada; (b) Corrente de arco inicial
Figura 5.39. Correntes oscilografadas no local de falta para a primeira repetição: (a) Primeira repetição; (b) Segunda repetição; (c) Terceira repetição
Figura 5.40. Corrente total oscilografada na subestação para a segunda repetição
Figura 5.41. Corrente total oscilografada na subestação para a segunda repetição
Figura 5.42. Corrente eficaz de neutro para a terceira repetição: (a) Corrente no local da falta; (b) Corrente na subestação
Figura 5.43. Corrente eficaz de neutro para a primeira repetição: (a) Corrente no local da falta; (b) Corrente na subestação
Figura 5.44. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total oscilografada; (b) Corrente de arco inicial
Figura 5.45. Corrente eficaz de neutro para a terceira repetição: (a) Corrente no local da falta; (b) Corrente na subestação
Figura 5.46. Tensões eficazes de fase ao longo da terceira repetição 82
Figura 5.47. Oscilografia no local da falta na primeira repetição: (a) Correntes de linha; (b) Tensões de fase
Figura 5.48. Correntes eficazes no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente da fase faltosa; (b) Corrente de neutro
Figura 5.49. Tensão oscilografada no local da falta na segunda repetição 84
 Figura 5.50. Transitórios de tensão após os desligamentos da chave religadora: (a) Primeiro desligamento; (b) Segundo desligamento; (c) Terceiro desligamento; (d) Quarto desligamento.
Figura 5.51. Transitórios de tensão após os religamentos da chave religadora: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento; (c) Terceiro religamento 86

xviii

Figura 5.52. Valores eficazes na subestação na segunda repetição: (a) Correntes eficazes; (b) Tensões eficazes	86
Figura 5.53. Corrente oscilografada no local da falta: (a) Corrente total registrada; (b) Detalhe da corrente de falta	87
Figura 5.54. Corrente oscilografada na subestação: (a) Corrente instantânea registrada; (b) Corrente eficaz registrada	88
Figura 5.55. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Detalhe da corrente de falta	89
Figura 5.56. Corrente oscilografada no local da falta após os religamentos: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento	89
Figura 5.57. Correntes eficazes oscilografadas na subestação na primeira repetição	90
Figura 5.58. Correntes eficazes oscilografadas na segunda repetição: (a) Correntes eficazes no local da falta; (b) Correntes eficazes na subestação	90
Figura 5.59. Correntes eficazes oscilografadas na terceira repetição: (a) Correntes eficazes no local da falta; (b) Correntes eficazes na subestação	91
Figura 5.60. Correntes eficazes oscilografadas na quarta repetição: (a) Correntes eficazes no local da falta; (b) Correntes eficazes na subestação	91
Figura 5.61. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Detalhe da corrente de falta	93
Figura 5.62. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Corrente eficaz oscilografada	93
Figura 5.63. Corrente oscilografada no local da falta na segunda repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Corrente eficaz oscilografada	94
Figura 5.64. Corrente oscilografada na subestação para a segunda repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Corrente eficaz oscilografada	95
Figura 5.65. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Detalhe da corrente de falta	95
Figura 5.66. Correntes de linha oscilografadas no local da falta: (a) Primeira repetição; (b) Segunda repetição; (c) Terceira repetição	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Tipos e freqüências típicas de ocorrência de faltas elétricas emsistemas de distribuição trifásicos a 3 fios.	14
Tabela 2.2. Freqüências médias de ocorrência de curto-circuitos monofásicos à terra	15
Tabela 2.3. Percentual de sucessos de religamentos em um sistema de distribuição de energia elétrica.	17
Tabela 2.4. Resultados dos testes de falta à terra conduzidos pela Universidade do Texas (EUA).	21

1 Introdução

1.1 Motivação e Relevância do Trabalho

A configuração do sistema de distribuição de energia elétrica brasileira é normalmente feita por linhas aéreas em média tensão. Esta configuração é de custo reduzido para implantação, operação e manutenção, porém, apresenta como desvantagens diversos riscos inerentes, tais como rompimento de condutores energizados e situações de fogo sob linha, pois as mesmas percorrem cidades, sítios, fazendas e estradas. Uma linha de distribuição aérea convencional apresenta condutores não isolados fixados em postes instalados ao longo da mesma. Um rompimento ou falha no sistema de fixação de tais condutores ao poste colocará a população, localizada na vizinhança da região onde ocorrer a falha, exposta a uma condição de risco de acidentes com potencial de fatalidade elevada.

O requisito de proteção dos relés instalados nos cubículos alimentadores responsável pela detecção deste tipo de falta é fornecido pela função de proteção de neutro de alta impedância (51NHI), que quando ajustada corretamente é eficiente para a detecção da maioria da faltas fase-terra de alta impedância oriundas do contato de condutor energizado com o solo. Entretanto, dependendo do tipo de sistema e a característica do solo, o contato de um condutor energizado pode resultar em correntes muito baixas que podem não ser suficientes para sensibilizar esta função de proteção.

O desenvolvimento de ferramentas eficientes para a detecção deste tipo de falta é uma necessidade imediata do sistema de distribuição de energia. Porém, para este desenvolvimento, torna-se necessário conhecer e estudar as suas características experimentais de forma detalhada.

Assim, tais investigações experimentais são de suma importância ao desenvolvimento de novas técnicas que visam contribuir para garantir a integridade dos ativos das empresas concessionárias, proporcionar maior segurança a população e contribuir para o rápido restabelecimento do serviço quando da ocorrência de uma situação de falta.

1.2 Proposta e Justificativa da Dissertação

A proposta desta dissertação é apresentar um conjunto de estratégias experimentais e procedimentos práticos que visam viabilizar a realização de ensaios de faltas fase-terra de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica, assim como relatar os resultados obtidos por intermédio desses ensaios. Para tanto, detalhar-se-á desde os dispositivos de proteção usados na viabilização dos experimentos até os equipamentos de oscilografias utilizados para registrar as grandezas elétricas observadas nessas situações de faltas.

Apesar da possibilidade de se obter tais resultados a partir de simulações de faltas fase-terra de alta impedância efetuadas por modelos computacionais, torna-se também necessário investigar se o modelo utilizado está aderente com a realidade.

Portanto, para este tipo de verificação, há a constante necessidade da efetivação de ensaios envolvendo faltas fase-terra de alta impedância, contribuindo assim com subsídios de caráter experimental que podem levar a eventuais aprimoramentos e ajustes de tais modelos.

Além disso, os resultados disponibilizados podem servir para atestar a aderência de sistemas de identificação e localização de faltas já existentes, ou ainda, contribuir para o desenvolvimento de outras ferramentas alternativas para tais propósitos. De fato, a detecção, classificação e localização de faltas fase terra de

alta impedância em sistemas de energia elétrica constituíram-se, ao longo dos anos, em metas almejadas por diversos setores do sistema elétrico de potência, tais como o setor de transmissão e o segmento de distribuição de energia elétrica. Assim, em função da declarada demanda por sistemas automáticos capazes de detectarem, classificarem e localizarem faltas em sistemas de energia elétrica, observa-se junto a literatura correlata proposições de trabalhos que fazem uso das mais distintas ferramentas, nas mais variadas conjunções, com o intuito de contribuírem a concretização das bases envolvidas com o trinômio detecção-classificaçãolocalização de faltas.

Chunju et al. (2005), propõem o emprego de algoritmos computacionais baseados na análise da hexa-decomposição dos fasores de tensão e de corrente do sistema elétrico sob falta com o objetivo de determinar sua localização, ou seja, determinar o quão distante da fonte a falta ocorreu. Essa metodologia inicialmente foi proposta para elaboração de algoritmos específicos a proteção de sistemas de energia elétrica conforme delineado em Yaozhong (1996). No entanto, conforme apresentado nas discussões de Chunju et al. (2005), a grande limitação da abordagem proposta é a necessidade de se efetuar medição em pelo menos dois pontos do sistema, ou seja, essa metodologia torna-se mais adequada à localização de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica do que em sistemas de distribuição.

Mahmood et al. (2004) se delineia uma proposição para a identificação de faltas empregando-se apenas um conjunto de medições. Assim, de posse desse conjunto e de suas correspondentes decomposições em componentes simétricas, a abordagem proposta estrutura a matriz de impedância do sistema e, por meio de sua dinâmica temporal, sugere-se que o trecho sob falta possa ser determinado. A fim de

validar a abordagem proposta, estudos de caso são conduzidos e os resultados providos pela metodologia são comparados com aqueles que de fato denotam a realidade das faltas simuladas. Porém, apesar da correta identificação das faltas em grande parte dos casos, os autores pontuam que a eficiência da técnica está condicionada a precisão das impedâncias da linha de distribuição. Dessa forma, as simples e constantes variações de carga e de temperatura ambiente, por exemplo, seriam capazes de comprometer a eficiência da abordagem desenvolvida.

Uma forma de contornar as limitações de técnicas determinísticas como aquela destacada em Mahmood et al. (2004) é incorporar ao sistema proposto redundâncias de informações. Tendo como base essa constatação, a qual é herdada de outros ramos do conhecimento, os autores do trabalho apresentado em Choi et al. (2004) procuraram não apenas valer-se de impedâncias calculadas a partir da topologia física da rede, mas também de seus valores obtidos por meio das medidas da tensão e da corrente constantemente oscilografados na subestação origem do alimentador sob monitoramento. No referido trabalho, resultados de simulações computacionais são destacados e a qualidade dos resultados são superiores aqueles obtidos por técnicas convencionais. Porém, limitações quanto a localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica com correntes desbalanceadas são pontuadas, podendo o erro de estimação ser de até 25%.

Contornando as limitações das técnicas convencionais, os sistemas inteligentes surgem como uma nova proposta a tratabilidade de problemas cujas soluções são intrinsecamente complexas. Esse é o caso da detecção, classificação e localização de faltas de sistemas de distribuição de energia elétrica onde, em virtude do número e da não-linearidade das variáveis envolvidas, a precisão, a robustez e a eficácia de um sistema dedicado a essas finalidades podem ser

4

profundamente afetadas quando constituído unicamente por ferramentas ditas convencionais.

Um exemplo dessa nova tendência é o trabalho apresentado em Luo et al. (2004), onde técnicas correlatas aos espaços esparsos e algoritmos genéticos são combinadas de maneira a constituir um sistema capaz de localizar faltas em sistemas de energia elétrica. Assim, o referido trabalho buscou contornar a problemática do mau condicionamento das matrizes de admitância do sistema por meio de técnicas convencionais, sendo que o problema da localização de faltas é realizado por meio dos algoritmos genéticos, os quais possuem eficiência comprovada quando da busca por soluções ótimas.

Outro exemplo de convergência de técnicas convencionais e de sistemas inteligentes é o trabalho destacado em Youssef (2004). O objetivo de seu desenvolvimento fora a classificação de faltas em sistemas de energia elétrica por meio de análise multinível fornecida pela decomposição *wavelet* das formas de onda da tensão e da corrente. Esse tipo de análise reconhecidamente fornece informações sobre distúrbios em sistemas elétricos de potência e possui ampla aplicabilidade no contexto da qualidade de energia inclusive. No entanto, a análise dos resultados oriundos dessa ferramenta para processamento de sinais não se procede de forma natural e é necessária grande experiência para que as conclusões alcançadas sejam factíveis aos fatos reais. Por outro lado, os sistemas de inferência *fuzzy* possuem a meta de emularem a forma aproximada do raciocínio humano.

Complementando o exposto acima, o mesmo autor apresenta em Youssef (2004b), como se pode implementar, por meio das ferramentas de processamento de sinais empregados e por meio dos sistemas *fuzzy*, um sistema para classificação de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica com habilidades para

distinguir faltas reais de manobras programadas no sistema, como por exemplo, a energização de transformadores. Além dos algoritmos genéticos e dos sistemas de inferência *fuzzy*, uma outra ferramenta advinda da inteligência computacional são as redes neurais artificiais.

Como exemplo da aplicação das redes neurais no contexto da localização de faltas em sistemas de distribuição, destaca-se o trabalho relatado em Martins et al. (2005), onde os autores conduzem sua pesquisa empregando decomposições vetoriais das formas de onda da tensão e da corrente e redes neurais artificiais para a determinação do local de ocorrência da falta no referido sistema.

No entanto, mesmo diante do emprego de sistemas inteligentes, os resultados comprobatórios podem não possuir todos os requisitos almejados, ou ainda, tais resultados são dignos de melhorias, principalmente se os mesmos estiverem sendo validados através de simulações computacionais (Tomsovic et al., 2005). Assim, os resultados disponibilizados nesta dissertação podem também contribuir para validar ainda mais tais abordagens, pois os mesmos são baseados em casos reais de faltas. Alternativamente, mesmo se a opção for por validação através de modelos computacionais de sistema de distribuição, os resultados disponibilizados podem auxiliar para verificar se os resultados produzidos por tais modelos estão condizentes com aqueles observados na prática.

1.3 Organização da Dissertação

O Capítulo 2 apresenta os aspectos relacionados as faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica. O Capítulo 3 descreve os aspectos relacionados aos equipamentos de oscilografias, assim como os detalhes envolvidos com os equipamentos de medição.

O Capítulo 4 relata as estratégias para a realização dos ensaios experimentais de faltas de alta impedância, detalhando passa a passo os procedimentos utilizados em tais tarefas.

O Capítulo 5 foca os diversos resultados obtidos a partir da efetivação dos ensaios experimentais realizados em um alimentador de distribuição de energia elétrica, especialmente construído para tal finalidade.

Finalmente, no Capítulo 6, tece-se as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido, enfatizando ainda temas de projetos futuros passíveis de serem investigados.

2 Aspectos Técnicos Relacionados as Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

2.1 Introdução

No Brasil, a maioria dos alimentadores urbanos de distribuição de energia elétrica são aéreos, topologia radial, ramificados, trifásicos a três fios, e empregam tensões nominais enquadrados nas classes de tensão de 15 kV, de 25 kV ou de 36 kV e apresentam Nível Básico de Impulso (NBI) de 95 kV, de 125 kV e de 150 kV, respectivamente. Em áreas rurais, onde a demanda é relativamente pequena, podese tornar vantajosa a utilização de alimentadores monofásicos a dois fios, ou ainda, alimentadores monofilares com retorno pela terra. Atualmente, os alimentadores são compostos de cabos de alumínio com almas de aço (CAA) suportados por estruturas de concreto e isoladores de porcelana ou vidro e, mais recentemente, de materiais poliméricos. Em sistemas monofilares com retorno pela terra se pode empregar, em alguns casos, condutor de aço cobreado, conhecido como "copperweld".

Por serem radiais, esses alimentadores têm origem em uma única subestação (SE) dotada de um ou mais transformadores de potência trifásicos, ou então, bancos de transformadores monofásicos compondo um sistema trifásico. Normalmente, os enrolamentos secundários são ligados em estrela com neutro acessível. Quando o neutro não está acessível ou os enrolamentos secundários são ligados em delta, pode-se utilizar um transformador de aterramento de forma a propiciar um neutro. Em muitos casos, os transformadores de potência possuem comutadores automáticos de "taps", objetivando então manter o nível de tensão do barramento

dentro de padrões especificados pelos órgãos regulamentadores. Entretanto, poderse-á também empregar reguladores de tensão externos logo após o transformador da SE ou ainda ao longo do alimentador.

O neutro pode estar diretamente aterrado, ou então, aterrado através de um resistor ou reator de aterramento. Há ainda a possibilidade de neutro sem ligação a terra (neutro suspenso), conforme a norma ANSI/IEEE C62.92.4/1991. No Brasil, não são encontrados sistemas de distribuição com neutro suspenso, fato comum em diversos países da Europa.

A Figura 2.1 apresenta o esquema unifilar simplificado de uma SE típica, com barra simples na alta e na média tensão, utilizada pela maioria das concessionárias de distribuição de energia elétrica.



Figura 2.1. Diagrama unifilar simplificado de uma SE típica para serviços de distribuição de energia elétrica.

Observa-se que a mesma é composta por diversos elementos, tais como transformadores de potência, equipamentos para ajuste da tensão de serviço, dispositivos interruptores e seccionadores, bem como dispositivos de proteção, controle e medição.

De acordo com a NBR 8769/1985, entende-se por sistema de proteção um sistema no qual estão associados todos os equipamentos necessários para detectar, localizar, iniciar e completar a eliminação de uma falta ou condição anormal de operação de um sistema elétrico. Assim, cada alimentador radial apresenta um sistema de proteção contra sobrecorrente de fase (função ASA 50/51) e neutro (função ASA 50/51N) imediatamente após o barramento de despacho, detalhado na Figura 2.2. De forma a se obter uma maior sensibilidade na detecção de faltas a terra, um segundo relé de proteção pode ser instalado (função 50/51GS) permitindo correntes de partida da ordem de poucos ampéres.



Figura 2.2. Esquema de proteção de alimentadores trifásicos aéreos na classe 15 kV com neutro aterrado na origem.

Ao longo do alimentador, e quando exigido, podem ser instalados dispositivos de proteção contra sobrecorrentes de maneira a isolar o trecho sob falta e permitir um restabelecimento mais rápido do fornecimento sem danos a equipamentos. Entre os dispositivos de proteção, comumente empregados, estão os elos fusíveis, religadores automáticos e os seccionalizadores.

A proteção contra sobretensões temporárias, de chaveamento e de origem atmosférica, é confiada aos dispositivos pára-raios estrategicamente dispostos ao longo do alimentador. Os pára-raios atuais não apresentam "gaps" e são constituídos de pastilhas de óxido de zinco encapsuladas em invólucros de material polimérico.

2.2 Tipos de Faltas nos Sistemas Elétricos de Potência

As faltas elétricas ocorrem nos sistemas elétricos de forma imprevisível e aleatória. De acordo com a NBR 5456/1987, uma falta elétrica é caracterizada pelo contato ou arco acidental entre as partes sob potenciais diferentes dentro de um sistema ou componente elétrico energizado, ou ainda, quando uma ou mais partes destes sistemas entram em contato com a terra.

Nesse contexto, faltas elétricas originam correntes de falta ou curtos-circuitos, que podem assumir valores abaixo ou acima da corrente de trabalho do alimentador, dependendo da potência de curto-circuito, da impedância envolvida no processo de falta, do tipo de falta ocorrida e da maneira pela qual o neutro do transformador da subestação está conectado a terra.

A maioria das faltas que ocorrem nos sistemas trifásicos é assimétrica (Mason, 1956; Stevenson, 1988). As faltas assimétricas podem ser entre duas fases,

duas fases e terra, trifásicas e uma fase e terra. As faltas entre fases ou entre fase e terra pode ou não conter impedância de falta (Goes, 2001).

A Figura 2.3 ilustra os tipos de faltas contendo uma impedância de falta, sendo que a Figura 2.3 (a) representa um curto-circuito simétrico desde que $ZF_1 = ZF_2 = ZF_3$.



Figura 2.3. Configurações dos tipos de faltas e respectivas impedâncias de falta.

Ao se projetar um sistema elétrico é necessário especificar os equipamentos, não só pela corrente nominal, mas também pela corrente de curto-circuito do sistema que os mesmos eventualmente deverão suportar, embora mesmo que por rápidos espaços de tempo (Giguer, 1988; Kindermann, 1999). Dentre as faltas mais comuns se destaca o curto-circuito, sendo que as possíveis origens desta falha podem ser listadas conforme segue:

- Elétrica: fadiga do meio isolante entre partes energizadas.
- Mecânica: quebra de um condutor ou isolante.
- Atmosférica: descargas atmosféricas ou ventos fortes que aproximam condutores.

• Manobras erradas: abertura de uma seccionadora em carga.

As principais conseqüências são:

- Esforços térmicos e dinâmicos.
- Queda e desequilíbrio das tensões.
- Transitórios de curta e longa duração.

Conhecer os valores das correntes de curto-circuito é fundamental, pois atende a diversos objetivos, dos quais podem-se relacionar os seguintes:

- Dimensionar a linha de transmissão ou distribuição em relação ao seu limite suportável de elevação de temperatura devido ao curto-circuito.
- Dimensionar a capacidade disruptiva do disjuntor.
- Dimensionar a capacidade dos transformadores de corrente quanto ao nível de saturação.
- Coordenação da proteção.

2.3 Classificação das Faltas no Sistema de Distribuição

As faltas elétricas em sistemas trifásicos são classificadas de acordo com o número de fases envolvidas e a participação do plano de terra. Os sistemas de distribuição estão sujeitos a diversos tipos de faltas com freqüências de ocorrência distintas, como apresentado na Tabela 2.1.

Tipo de falta	Freqüência de ocorrência
Trifásico	06 %
Bifásico	15%
Bifásico e a terra	15%
Monofásico a terra	64%

Tabela 2.1. Tipos e freqüências típicas de ocorrência de faltas elétricas em sistemas de distribuição trifásicos a 3 fios.

Fonte: Kindermann (2003).

Por intermédio desta tabela, verifica-se que as faltas à terra são as que apresentam a maior incidência nos sistemas de distribuição.

2.4 Ocorrências de Faltas Permanentes e Temporárias

Os curtos-circuitos permanentes são do tipo irreversível espontaneamente, necessitando-se reparar a rede para restabelecer o sistema, enquanto os curtocircuitos temporários são aqueles que ocorrem sem haver defeito na rede. A análise de faltas em redes aéreas de distribuição indica que mais de 90% das faltas são temporárias e monofásicas a terra, segundo Elmore (2003). A Tabela 2.2 indica valores ainda mais elevados, conforme relatado em Kindermann (2003).

Tabela 2.2. Freqüências médias de ocorrência decurto-circuitos monofásicos à terra.

Falta monofásica à terra	Freqüência de ocorrência
Permanente	4,0%
Temporários	96,0%

Diversas são as causas das faltas permanentes, sendo as mais comuns:

- Danos permanentes em isoladores.
- Danos na isolação de equipamentos como, por exemplo, transformadores e chaves seccionadoras.
- Deterioração de pára-raios.
- Rompimento e queda de cabos.
- Abalroamento de postes.
- Contato acidental permanente.

Conforme mencionado anteriormente, os curtos-circuitos temporários são aqueles que ocorrem sem haver defeito permanente na rede, ou seja, as faltas são auto-extinguíveis. Portanto, após a atuação da proteção e/ou a ocorrência da autoextinção da falta, o sistema pode ser restabelecido sem problemas. As causas mais comuns dos defeitos temporários são:

- Arco elétrico (flash over) em isoladores.
- Contaminação de isoladores pela poeira e poluição.
- Correntes subseqüentes em pára-raios.
- Umidade e salinidade.
- Chuva.
- Pontas de galhos de árvores.
- Pássaros.
- Vento.
- Contato acidental não permanente.

2.5 Aspectos Sobre as Operações de Religamento

Como nos sistemas de distribuição a ocorrência de faltas temporárias é elevada, sua eliminação em alimentadores radiais é realizada, em muitos casos, por meio da técnica de religamentos sucessivos, ou seja, na ocorrência de uma falta, o circuito é interrompido temporariamente e automaticamente religado. A interrupção momentânea efetua a deionização do ar, eliminando os arcos elétricos que não reaparecem quando ocorre a reenergização do alimentador. Outro exemplo seria as pontas de galhos de árvores que tocam a rede. Nesse caso, a falta pode ser removida por um período de interrupção maior, durante o qual a ponta do galho é queimada devido a corrente elétrica de falta. A Tabela 2.3 apresenta o comportamento da técnica de religamento em sistema de distribuição.
Operação de Religamento	%
Imediato	83,25
Segundo (14 a 45 s)	10,05
Terceiro (120 s)	1,42
Total de sucessos	94,72
Bloqueios	5,28

Tabela 2.3. Percentual de sucessos de religamentos emum sistema de distribuição de energia elétrica.

As principais vantagens da técnica de religamento são:

- Redução a níveis mínimos do tempo de interrupção junto ao consumidor.
- Redução do número de faltas permanentes, uma vez que faltas temporárias podem evoluir para faltas permanentes.
- Redução de custos de manutenção.
- Auxiliam na manutenção dos quesitos de qualidade de fornecimento impostos pelos órgãos regulamentadores.

Os comandos para a operação de religamento são desempenhados por um relé de religamento (função ASA 79) que permite a escolha da estratégia de religamento mais adequada para um dado alimentador. Como medida preventiva de segurança, quando serviços são realizados em redes e equipamentos de distribuição energizados (serviços em "linha viva"), ou ainda, sob a rede de distribuição por equipe especializada, o relé de religamento é bloqueado de forma a evitar descargas sucessivas quando de um eventual acidente (Fillippin et al., 2003).

2.6 Aspectos Relacionados as Faltas de Alta Impedância

Apesar do sistema de proteção apresentado na Figura 2.2 detectar todos os tipos de falta (Tabela 2.1), existe uma situação em que o sistema de proteção, mais

especificamente, o relé de proteção contra sobrecorrente de falta à terra (ASA 51N) não atuará. Essa situação ocorre quando a corrente de falta a terra é menor que a corrente de partida do respectivo relé de proteção (Li & Redfern, 2001), como ilustrado na Figura 2.4. Uma corrente de falta dessa amplitude gera a falta conhecida como falta a terra de alta impedância.



Figura 2.4. Relação entre correntes de falta a terra de alta impedância e ajustes dos relés de proteção.

As faltas a terra de alta impedância advêm dos elevados valores da impedância no circuito de terra, as quais impõem correntes de falta inferiores a corrente de partida ajustada nos relés de falta a terra (ASA 50/51N). A elevada impedância no circuito defeituoso advém de fatores imprevisíveis e de difícil quantificação, cujos principais serão relacionados a seguir:

a) Resistência de arco elétrico

Na maioria das ocorrências, o arco elétrico está presente no local de um curto-circuito. A corrente de curto-circuito propicia a ionização local do ar

possibilitando o aparecimento de arco elétrico. Mesmo que as partes se afastem, o arco elétrico mantém a continuidade da corrente de falta devido ao ar ionizado.

O arco elétrico apresenta temperaturas elevadas, queimando, fundindo e carbonizando os materiais alcançados pelo arco, podendo propiciar incêndio. O efeito do arco elétrico não é mais dramático porque – devido a formação de bolhas de material fundente, ao ar ionizado e a ação das forças eletromagnéticas – o arco tem a tendência a se mover, dissipando e distribuindo o seu efeito. A resistência de arco pode ser estimada pela fórmula de Warrington (Elmore, 2003), ou seja:

$$R_{ARCO} = \frac{28707 \cdot L}{l^{1,4}}$$
(2.1)

onde *L* é o comprimento do arco elétrico em metros e, *I* é a corrente elétrica de curto-circuito em Ampére.

b) Resistência de contato da falta

A resistência de contato sofre influência da pressão, da temperatura, da rugosidade relativa dos materiais e da condutividade elétrica dos materiais das partes em contato. Dessa forma, torna-se impossível a caracterização dessa grandeza em situações não controladas, como por exemplo, o contato estabelecido entre um condutor e o solo decorrente de um rompimento do condutor.

c) Resistência de aterramento

A resistência de aterramento depende fundamentalmente da resistividade do solo e das características construtivas do eletrodo de aterramento. A resistividade do solo sofre influência da composição química do solo, da compactação, da umidade e da temperatura. Além desses fatores, a resistência de aterramento pode ser

dependente da duração da corrente de falta a terra em virtude do deslocamento iônico do solo decorrente do campo elétrico estabelecido no próprio solo (resistência dinâmica).

Pode-se determinar a resistência de aterramento de um eletrodo de aterramento pela seguinte expressão:

$$R_{AT} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot L}{d}\right)$$
(2.2)

onde R_{AT} é a resistividade aparente do solo em Ω .m, *L* é o comprimento da haste em metros e, *d* é o diâmetro da haste em metros.

Deve ser observado ainda que existe uma condição de falta cujos fatores acima descritos pouco afetam a corrente de falta a terra. Essa condição ocorre quando um condutor entra em contato com o plano de terra pelo lado da carga. Nessa condição, a impedância da carga é preponderante sobre as demais de forma que a corrente de falta gerada é dependente da carga demandada no ponto de defeito.

Nesse contexto, experimentos realizados na Universidade do Texas (Aucoin & Russel, 1989), com o propósito de melhor entender o comportamento das faltas à terra de alta impedância em sistemas de distribuição na classe 15kV, geraram valores de correntes de falta a terra, as quais são apresentadas na Tabela 2.4. Nesse ensaio foi observado que as correntes de faltas típicas estavam entre 5 e 40A e que menos de 10% das faltas, num total de 200, foram eliminadas pelo relé de sobrecorrente de neutro.

Superfície	Corrente de falta à terra (A)	
Asfalto seco	0	
Concreto	0	
Areia seca	0	
Areia úmida	15	
Tijolo seco	20	
Grama seca	25	
Tijolo úmido	40	
Grama molhada	50	
Concreto Armado	75	
Fantas Assain & Ducad (1000)		

 Tabela 2.4.
 Resultados dos testes de falta à terra conduzidos pela Universidade do Texas (EUA).

Fonte: Aucoin & Russel (1989).

Para ser mais específico, pode-se citar como exemplo o desempenho dos equipamentos de proteção convencionais, tais como elos fusíveis, relés de sobrecorrentes e religadores para a atuação e desligamento do sistema elétrico em casos de faltas fase-terra com alta impedância, pois conforme apresentado na Tabela 2.4 as correntes de falta possuem baixa amplitude.

Os elos fusíveis são dimensionados levando-se em consideração os aspectos de seletividade, a corrente de carga e as curvas de suportabilidade dos equipamentos e da rede protegida pelo mesmo.

No exemplo da Figura 2.5, tem-se um conjunto de chaves fusíveis dotadas de elos fusíveis protegendo uma rede aérea trifásica de distribuição com cabo de alumínio com alma de aço bitola 02 AWG com uma corrente de carga de 18A.



Figura 2.5. Rede elétrica trifásica protegida por chaves fusíveis.

Para este exemplo, o elo fusível adequado é o 25K, pois permite a circulação da corrente de carga e protege o condutor.

No coordenograma da Figura 2.6, observa-se que o elo fusível adotado protege a rede de distribuição e permite a livre circulação da corrente de carga.



Figura 2.6. Curva do elo fusível 25K.

Ainda na Figura 2.6, as correntes referentes a Tabela 2.4 foram também plotadas. Observando-se o gráfico e as correntes se conclui que o elo fusível não é eficaz para todos os tipos de defeitos de queda de cabo ao solo.

A função de proteção nos alimentadores e religadores com possibilidades de ajustes mais sensíveis e ,conseqüentemente, com maior probabilidade de detecção de faltas a terra com alta impedância é a de sobrecorrentes de neutro de alta impedância. Esta proteção possui, normalmente, ajuste de tempo definido em torno de 3 segundos e um ajuste de corrente de *pick-up* que deverá ser 50% acima da corrente máxima de neutro da rede a ser protegida, evitando-se assim, atuações intempestivas da proteção.

Para um alimentador com curva de carga de neutro de 13A, por exemplo, deve-se ajustar a proteção de neutro de alta impedância em 20A. Porém, de acordo com a Tabela 2.4 existem situações onde, dependendo do tipo de solo, as correntes decorrentes da queda de condutor energizado ao solo, serão inferiores aos 20A do ajuste proposto para este exemplo. Assim, pode-se concluir que a proteção de neutro de alta impedância não é eficaz para todos os tipos de defeitos envolvendo a queda de cabo ao solo.

Portanto, a detecção de faltas a terra de alta impedância é um problema que persiste nos sistemas de distribuição de energia elétrica, uma vez que podem não ser detectadas por sistemas convencionais de proteção contra sobrecorrentes e devem ser eliminadas, quando detectadas, utilizando o desligamento manual do alimentador (Aucoin & Russel, 1996). Grandes investimentos em pesquisas vêm sendo feitos com o objetivo de desenvolver técnicas e dispositivos capazes de caracterizar, detectar, localizar e eliminar esse tipo de falta. Apesar de consideráveis avanços nos últimos anos, há ainda necessidade de investigações que levem ao desenvolvimento de técnicas que possam oferecer um desempenho confiável e seguro (Wester, 1998).

Assim, quanto mais informações e dados reais sobre ocorrências e situações de faltas à terra de alta impedância forem disponibilizados, então maior será a tendência de tais técnicas serem mais confiáveis e seguras.

3 Aspectos dos Equipamentos de Oscilografias e de Medição

3.1 Introdução

Objetivando a realização plena e integral das atividades relacionadas aos ensaios experimentais, houve a necessidade de definir os diversos equipamentos que fariam parte dos processos envolvidos com a transdução e aquisição dos sinais de tensão e corrente produzidos em decorrência da realização dos diversos tipos de faltas efetuados na linha de distribuição piloto da concessionária.

Para tanto os dois tipos principais de equipamentos que seriam utilizados nos ensaios experimentais foram divididos em equipamentos de medição (oscilógrafos) e equipamentos de transdução (TCs e TPs). Assim sendo, houve a necessidade de efetuar diversas análises e procedimentos que permitissem averiguar e investigar as características dos equipamentos que seriam utilizados para tais propósitos.

As seções seguintes abordam os detalhes e aspectos envolvendo estes equipamentos, tendo como principal objetivo destacar as suas características, bem como descrever suas funcionalidades, permitindo documentar o funcionamento dos mesmos para outras eventuais aplicações que podem usufruir da utilização deles.

3.2 Aspectos Relacionados aos Equipamentos de Oscilografias

Em referência aos equipamentos que foram utilizados para a medição de grandezas elétricas, diversas atividades de prospecção tiveram que ser realizadas com o intuito de investigar as suas características no que se refere ao processamento dos dados que seriam aquisitados pelos mesmos. Nesta examinação, diversos itens foram detalhadamente checados com a intenção de verificar a coerência e a integridade dos dados que seriam disponibilizados por tais equipamentos. Ressalta-se que esta avaliação foi de suma importância para garantir que as oscilografias obtidas nos ensaios de faltas fase-terra de alta impedância fossem úteis para investigação das características deste tipo de falta.

Alguns aspectos importantes que foram investigados durante esta etapa de prospecção são os seguintes:

- Análise de características técnicas que assegurariam a medição eficiente das grandezas elétricas envolvidas com as faltas em sistemas de distribuição.
- Avaliação de recursos das unidades de processamento, tais como a memória, a classe de exatidão, o tempo de varredura, as interfaces de entrada e saída, os triggers internos e externos, o sincronismo de relógios, etc.
- Verificação das taxas de amostragem visando o atendimento dos propósitos da pesquisa.
- Resolução gráfica e disponibilidade de recursos de processamento de sinais.
- Tipos e formatos de arquivos de dados gerados pelos equipamentos.
- Integridade entre as taxas de amostragem de dados real e as taxas de armazenamentos.

Como um resultado desse trabalho de prospecção, definiram-se como equipamentos de medição mais adequados para os propósitos definidos os oscilógrafos de marca Yokogawa, linha DL 708 E, modelo 7018020-1-D- HF/M2/C8/G2/F2, composto de módulos com código 701852 e sensores de código 96033. Sendo este o principal equipamento que foi utilizado durante os ensaios experimentais, destacam-se no ANEXO I alguns aspectos relacionados as suas principais funções, bem como uma breve descrição dos procedimentos envolvidos com os seus ajustes e configurações.

3.3 Estratégias de Ensaios de Resposta em Freqüência dos Transdutores de Medição

Para verificar a maneira pela qual os transdutores de tensão e de corrente se comportam frente a faixa de freqüências a ser oscilografada durante os ensaios experimentais, os transformadores de potencial e os transformadores de corrente foram ensaiados de maneira a se construir sua reposta em freqüência.

O conhecimento da resposta em freqüência dos transdutores de tensão e de corrente é de extrema importância visto que esse tipo de informação será muito útil na identificação e refinamento dos resultados a serem obtidos por meio da oscilografia das faltas nos ensaios experimentais, garantindo que os resultados decorrentes sejam representativos do sistema real.

Dessa maneira, nessa seção serão descritos os principais aspectos relacionados a metodologia de ensaios de resposta em freqüência, bem como será apresentada uma súmula dos resultados obtidos nos referidos ensaios.

3.3.1 Metodologia de Ensaio

A resposta em freqüência de um determinado sistema pode ser obtida de inúmeras maneiras, dentre as quais destaca-se principalmente o ensaio ao impulso unitário. Independente da excitação empregada no ensaio de resposta de freqüência a descrição da metodologia de ensaio segue um único formato a qual pode ser melhor compreendida observando-se o diagrama esquemático da Figura 3.1.





Como pode ser verificado por meio da Figura 3.1, o ensaio de resposta em freqüência constitui basicamente da aplicação de uma excitação r(t) a entrada do sistema de maneira a se mensurar a resposta c(t). Como o objetivo é obter uma função H(t) que descreva o comportamento do sistema frente ao espectro de freqüências de operação, o sinal de entrada r(t) e o sinal de saída c(t) devem ser transformados para o domínio da freqüência, ou seja:

$$H(\omega) = \frac{C(\omega)}{R(\omega)}$$
(3.1)

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) e^{-j\omega} d\omega$$
(3.2)

$$C(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} c(t) e^{-j\omega} d\omega$$
(3.3)

No entanto, como nos sistemas reais o processo de medição é digital, os sinais r(t) e c(t) não são contínuos e sim discretos, amostrados periodicamente a uma determinada taxa de amostragem *SR*. Dessa maneira, torna-se necessário o emprego da Transformada Discreta de Fourier para a representação dos sinais r(t) e c(t) no domínio da freqüência, ou seja:

$$R(k) = \sum_{n=1}^{N} r(n) e^{-j \frac{2\pi(k-1)(n-1)}{N}}; \quad 1 \le k \le N/2$$
(3.4)

$$C(k) = \sum_{n=1}^{N} c(n) e^{-j \frac{2\pi(k-1)(n-1)}{N}}; \ 1 \le k \le N/2$$
(3.5)

onde $\omega = \frac{2\pi k}{N} \frac{1}{ST}$ e *ST* representa o tempo de amostragem do sinal. Assim, a resposta em fregüência *H*(*k*) do sistema será dada por:

$$H(k) = \frac{C(k)}{R(k)}$$
(3.6)

Como pode ser observada por meio do breve equacionamento apresentado, a função de excitação *r*(*t*) do sistema pode ser qualquer função real. No entanto, tornase interessante que essa função possua um amplo espectro de freqüência de maneira a se realizar um estudo completo. Em função desse requisito e das limitações experimentais a função de excitação adotada nos ensaios foi a função rampa.

Procedendo dessa forma, as respostas em freqüência tanto do transformador de potencial quanto do transformador de corrente foram obtidas, sendo então apresentadas nas seções que seguem.

3.3.2 Resposta em Freqüência do Transformador de Potencial

Ilustrando a montagem experimental realizada para se identificar a resposta em freqüência do transformador de potencial, apresenta-se na Figura 3.2 a bancada de teste adotada nos referidos ensaios.



Figura 3.2. Bancada experimental para ensaios em freqüência do transformador de potencial.

Como pode ser observado por meio da Figura 3.2, a geração da excitação a ser aplicada no primário do transformador de potencial foi realizada com auxílio de gerador de funções digital de alta precisão e baixa distorção harmônica, sendo que a medida da entrada e da saída ficou por conta de um osciloscópio digital com máxima taxa de amostragem de 1,25 GHz e largura de banda de 100 Mhz.

Os detalhes da conexão do osciloscópio a entrada e saída do transformador são apresentados por meio da Figura 3.3.



Figura 3.3. Detalhes de conexão ao transformador de potencial: (a) Conexões ao primário; (b) Conexões ao secundário.

Conforme mencionado anteriormente, aplicou-se ao primário do transformador de potencial uma forma de onda quadrada. Para garantir uma maior precisão de resultados, diferentes freqüências para a forma de onda quadrada foram utilizadas e seus respectivos resultados registrados. Ilustrando algumas das excitações utilizadas, apresentam-se na Figura 3.4 os gráficos de três sinais de entradas e suas respectivas saídas para os ensaios realizados.



Figura 3.4. Sinais de entrada e saída aplicados nos transformadores de potencial.

Valendo-se da metodologia e da formulação matemática apresentada na subseção anterior, a resposta em freqüência do transformador de potencial foi calculada conforme apresentada graficamente por meio da Figura 3.5.



Figura 3.5. Resposta em freqüência dos transformadores de potencial.

3.3.3 Resposta em Freqüência dos Transformadores de Corrente

O procedimento experimental adotado ao longo do ensaio de resposta em freqüência para o transformador de corrente foi semelhante ao utilizado na avaliação da resposta em freqüência para o transformador de potencial. Assim, na Figura 3.6 apresenta-se uma visão geral da bancada de ensaios montada para o referido ensaio.



Figura 3.6. Bancada experimental para ensaios em freqüência do transformador de corrente.

Os gráficos dos sinais de entrada e saída registrados para diferentes

freqüências dos sinais de excitação são apresentados por meio da Figura 3.7.



Figura 3.7. Sinais de entrada e saída aplicados nos transformadores de corrente.

Assim, por meio dos sinais registrados ao longo dos ensaios e utilizando a metodologia fundamentada na Seção 3.3.1 processou-se a resposta em freqüência do transformador de corrente a qual é apresentada graficamente por meio da Figura 3.8.



Figura 3.8. Resposta em freqüência dos transformadores de corrente

Os referidos ensaios foram de suma importância para analisar o comportamento dos TCs e TPs em relação as diversas variações de freqüência.

Portanto, constata-se que ambos os instrumentos a serem utilizados nos ensaios experimentais conseguem fornecer respostas em freqüência que contemplam os níveis de precisão requeridos para a aquisição de transitórios envolvidos com as faltas fase-terra de alta impedância.

Em suma, um dos objetivos em realizar tais ensaios consistiu tão somente de verificar se os próprios TCs e TPs utilizados no dia-a-dia pela concessionária seriam apropriados para a realização dos ensaios envolvendo faltas fase-terra de alta impedância, sendo portanto desnecessário a aquisição de equipamentos especiais apenas para tal propósito.

Além disso, o roteiro visando os ensaios instrumentais apresentados neste capítulo pode ser também seguido quando se deseja testar a adequabilidade de outros tipos de TCs e TPs quando das suas utilizações em ensaios envolvendo faltas.

4 Estratégias de Realização de Ensaios Experimentais

4.1 Introdução

A identificação de faltas de alta impedância num sistema elétrico de distribuição de energia elétrica radial se constitui num desafio técnico de operação e ao mesmo tempo num problema que as concessionárias de energia elétrica enfrentam tanto no Brasil como nos demais países. Esta problemática recebe atenção especial, pois além de comprometer o fornecimento adequado de energia elétrica representa uma potencial situação de risco a população. Dessa maneira, verifica-se junto a bibliografia correlata, os inúmeros esforços dedicados a rápida e eficiente identificação e localização de pontos onde cabos condutores se romperam e se dispõem sobre o solo, sobre cruzetas, entre outras possibilidades, sem que as proteções de sobrecorrente possam sinalizar sua ocorrência.

Com o aumento do consumo de energia elétrica e os valores rigorosos para os índices de desligamento, a realização dos ensaios experimentais em um alimentador de distribuição de energia elétrica (ANEXO II), visando obter registros de correntes e tensões durante faltas de alta impedância, obrigou a equipe envolvida a um rigoroso planejamento destes ensaios, tendo em vista atender não só o aspecto técnico e a interrupção no fornecimento de energia, bem como o aspecto da segurança pessoal dos envolvidos nos ensaios e ainda da população transeunte da região onde se realizaram os respectivos testes. Assim, esse capítulo objetiva apresentar detalhadamente os aspectos que permearam o planejamento dos ensaios, os detalhes tratados nos pré-ensaios e a execução dos referidos ensaios.

4.2 Falta Fase-Terra com Solo Seco

Este tipo de defeito no sistema de distribuição de energia elétrica é o mais comum e o mais difícil de sensibilizar os dispositivos de proteção. Tem-se assim, a necessidade de realização de vários ensaios que contemplem tal situação. O primeiro ensaio de curto-circuito fase-terra foi com o solo seco e as condições operativas no instante do defeito podem ser listadas como se segue:

- Religamento automático no local dos ensaios em posição bloqueado.
- Janela de amostragem utilizada no oscilógrafo de 10 seg.

Como este foi o primeiro ensaio realizado, utilizou-se o mesmo na verificação do nível de curto-circuito no ponto e refinamento dos procedimentos de ensaios.

O ensaio compreendeu a queda do condutor em solo seco. A técnica de soltar o cabo foi a mesma que está descrita no ANEXO III que aborda os pré-ensaios, ou seja, utilizando a equipe e os equipamentos de linha viva.

O primeiro passo executado na preparação do ensaio foi o eletricista no cesto de linha viva soltar o condutor da cadeia de isoladores. Em seguida a corda isolante foi amarrada ao cabo e passada pela cinta na parte inferior do poste e, na seqüência, foi fixada no caminhão por medida de segurança, conforme apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.1. Corda isolante utilizada para soltar o condutor: (a) Corda passando pela cinta na parte inferior do poste; (b) Ponta da corda amarrada ao caminhão antes do início do ensaio.

Após todas as verificações foi acionada a buzina, que estava instalada no caminhão de apoio, próxima ao oscilógrafo, conforme se apresenta na Figura 4.2.

Os eletricistas encarregados de soltarem a corda contaram mentalmente de 3 a 5 segundos e soltaram a corda, fazendo com o que cabo em queda livre atingisse o solo, provocando um curto fase-terra, em condições similares ao rompimento de condutor de fase de uma rede aérea de distribuição.



Figura 4.2. Buzina utilizada para acionar o instante de início dos ensaios.

O toque da buzina além de oferecer o sinal para liberar a corda, foi de fundamental importância para partida (*trigger*) dos oscilógrafos local e remoto (subestação) já que não havia outro meio de sincronização entre eles disponível.

A Figura 4.3 apresenta a chave corta-circuito no poste de derivação, bem como o instante de fechamento de uma das fases para a energização do mesmo. A partir deste instante a mesa já possuía tensão nas chaves de aferição, ficando o ramal energizado até a entrada do religador automático, mostrado na Figura 4.6.



Figura 4.3. Chave corta-circuito que deriva o ramal, no instante da energização do mesmo.

Para as medições das grandezas elétricas foram instalados conjuntos de transformadores de corrente e de potencial no primeiro poste após a derivação. A Figura 4.4 ilustra a instalação destes equipamentos no poste, bem como a posição do caminhão que serviu de base para receber os circuitos secundários a fim de realizar as conexões necessárias as medições.



Figura 4.4. Instalação dos TP's e TC's utilizados na medição durante os ensaios.

Os terminais secundários dos TP's e TC's foram enviados ao oscilógrafo passando por uma mesa com o conjunto de chaves de aferição, por uma canaleta e em seguida conectado ao mesmo. A Figura 4.5 apresenta essas conexões.



Figura 4.5. Sistema de medição e aferição: (a) Conexões das chaves de aferição; (b) Conexões das chaves de aferição aos bornes do oscilógrafo.

Também foi instalado no ramal um religador automático coordenado com outro religador automático a montante e ainda com o relé Siemens instalado na subestação. A Figura 4.6 mostra a instalação do religador automático, bem como o veículo da ELEKTRO que serviu de base para a mesa com fonte de alimentação e laptop comunicando com o respectivo religador da Copper.



Figura 4.6. Instalação do religador automático e veículo da ELEKTRO com laptop.

Após todas as providências, posicionou-se em condições seguras o profissional responsável pelas filmagens dos ensaios, conforme pode ser visto na Figura 4.7.



Figura 4.7. Posição do profissional responsável pelas filmagens dos ensaios.

Na subestação foram tomadas todas providências necessárias, como instalação do oscilógrafo no painel do alimentador 30 da subestação Rio Claro III, utilizando-se para tanto um conjunto de chaves de aferição disponível e já instalado no próprio painel. A Figura 4.8 mostra o interior do painel do alimentador com os respectivos transdutores de corrente empregados em todos os ensaios.



Figura 4.8. Vista interior do painel de proteção do alimentador 30 da SE Rio Claro III.

A seguir, na Figura 4.9 são mostrados os detalhes das conexões com as garras de medição de corrente do oscilógrafo, bem como a conexão do circuito de potencial.





Figura 4.9. Detalhes das conexões do oscilógrafo no painel do alimentador 30 da SE RIC III: (a) Conexões das garras de corrente e circuito de potencial; (b) Conexões do oscilógrafo ao painel.

Após isolação da área de trabalho pelos responsáveis da defesa civil e segurança do trabalho da ELEKTRO, conforme Figura 4.10, deu-se início aos ensaios.



Figura 4.10. Isolamento da área de trabalho durante os ensaios: (a) Bloqueio da estrada ao local dos ensaios; (b) Bloqueio do outro lado do local dos ensaios, onde se encontrava o caminhão da equipe da linha viva.

Os ensaios fase-terra foram realizados lançando-se ao solo a fase externa da extremidade esquerda de quem olha para a Figura 4.11.





Após o acionamento da buzina e seguindo todos os passos previamente analisados e consolidados, lançou-se o cabo ao solo provocando um curto-circuito fase-terra em condições de solo seco. Figura 4.12 ilustra o cabo tocando o solo.



Figura 4.12. Condutor energizado em contato com o solo provocando curto-circuito fase-terra.

A Figura 4.13 a seguir ilustra em detalhe a formação do arco elétrico quando o cabo toca o solo.



Figura 4.13. Detalhe do arco elétrico durante contato do condutor energizado com o solo.

A Figura 4.14 apresenta como ficou o solo após a ocorrência do curto-circuito.



Figura 4.14. Aparência do solo após o curto circuito fase-terra em solo seco: (a) Buracos causados no solo devido a curto circuito; (b) Pedaços de pedras queimadas no instante do curto circuito.

Na Figura 4.15 também há uma ilustração de um pedaço de pedra retirada do local onde ocorreu a queda do condutor.



Figura 4.15. Detalhe de furo na pedra devido a queda de condutor energizado.

Conforme já mencionado anteriormente, este ensaio foi feito com o bloqueio do religamento automático do religador instalado no local dos ensaios.

O próximo ensaio realizado foi idêntico, apenas liberou-se o religamento automático do religador local. A seqüência de religamento ficou assim: 1º religamento com tempo de 1,5s, 2º religamento com tempo de 2,5s e o 3º religamento com tempo de 2,5s. As janelas de amostragem dos oscilógrafos ficaram ajustadas em 20s.

No quinto ensaio a seqüência de religamento foi a seguinte: 0,5s para o 1º religamento e 20s para o 2º religamento. As janelas de amostragem dos oscilógrafos foram alteradas para 30s.

Nos demais ensaios com solo seco, mudaram-se apenas as seqüências de religamentos e as janelas de amostragem.

O próximo ensaio realizado ainda foi queda de condutor de fase (falta faseterra), porém não mais em solo seco e sim sobre brita, conforme pode ser observado na Figura 4.16. O religamento automático estava em serviço e ajustado para: 1º religamento em 0,5s e o 2º religamento em 20s. O ajuste da subestação no grupo 2 (Anexo IV) e a janela de amostragem em 20s.



Figura 4.16. Posição da brita no solo onde o cabo energizado foi lançado.

A Figura 4.17 mostra a posição dos eletricistas no momento que soltava a corda. A mesma foi solta gradativamente até o condutor atingir o solo.



Figura 4.17. Posição dos eletricistas no momento que soltam a corda isolada que suportava o condutor energizado.

4.3 Queda de Condutor Sobre Cruzeta de Madeira

Também foi realizado curto-circuito fase-terra, provocado por queda do condutor sobre a cruzeta. Este tipo de defeito é comum nas redes aéreas de distribuição. A Figura 4.18 mostra o condutor sobre a cruzeta, com o eletricista e o responsável pelas filmagens no cesto.

Para a realização deste ensaio a equipe de linha viva soltou o condutor dos isoladores, colocando-o sobre a cruzeta. Em seguida foi ligado o disjuntor correspondente ao religador automático, provocando um curto-circuito fase-terra, sendo que a impedância de falta consistiu desde a madeira, ferragens do poste de concreto e terra propriamente dita.



Figura 4.18. Condutor sobre a cruzeta pronto para ser energizado.

4.4 Rompimento e Queda de Condutor de Fase do Lado da Carga

Para a realização deste defeito alguns procedimentos tiveram de ser bem estruturados e sincronizados. Para simular a queda de condutor do lado da carga utilizando a mesma estrutura montada para os outros ensaios foi necessário abrir uma das fases da fonte (a fase que foi lançada ao solo). Como os consumidores ficariam sem uma fase, foi estabelecido tempo máximo para realização deste ensaio de onze minutos.

Imediatamente após os registros da ocorrência de fase aberta, foi lançado o cabo ao solo, utilizando os mesmos procedimentos para os curtos-circuitos faseterra.

Quando o cabo é lançado ao solo o retorno da corrente se faz pela subestação e pelos primários dos transformadores de distribuição trifásicos e também por alguns transformadores monofásicos ao longo do alimentador (MRTs). A impedância de falta é extremamente alta neste caso, dificultando de sobremaneira a sensibilização dos dispositivos de proteção.

No caso deste ensaio foi possível registrar os níveis de corrente de curtocircuito, conforme poderá ser observado no capítulo seguinte.

Imediatamente após os registros da ocorrência de fase aberta, foi lançado o cabo ao solo, utilizando os mesmos procedimentos para os curtos-circuitos faseterra.

Neste ensaio o religamento automático ficou bloqueado e o grupo de ajuste do religador foi o número 1 (Anexo IV). A duração total deste ensaio foi de oito minutos.
5 Resultados de Medições dos Ensaios Experimentais

5.1 Introdução

Os ensaios experimentais foram realizados tendo como premissa as deliberações acertadas ao longo dos pré-ensaios (ANEXO III), bem como nos aspectos pontuados nas reuniões que antecederam os ensaios. Dessa forma, este capítulo é responsável por apresentar os resultados experimentais obtidos por meio dos referidos ensaios. A fim de organizar coerentemente a apresentação de tais resultados, será dedicada a cada ensaio uma subseção onde serão destacados os gráficos de corrente e tensão oscilografados tanto no local dos ensaios como na subestação Rio Claro III. Além disso, as seções estão organizadas de maneira a refletir a ordem cronológica de realização dos ensaios.

5.2 Falta Fase-Terra com Solo Seco e Religamento Automático Bloqueado

Nesse ensaio inicial o condutor fase foi deixado cair sobre o solo seco conforme planejado e simulado durante os pré-ensaios de falta fase-terra. No entanto, a chave religadora instalada no ramal de ensaio foi ajustada com o grupo de ajuste 1 (Anexo IV) tendo a função de religamento automático bloqueada. O objetivo desse ensaio foi a verificação do nível de curto-circuito fase-terra no local dos ensaios, bem como do refinamento dos procedimentos de ensaio. Dessa maneira, foi realizado um total de três repetições para esse ensaio, no entanto, devido aos ajustes operacionais e coordenação de equipe a primeira repetição não

foi registrada na subestação, da mesma maneira que a segunda repetição não foi oscilografada junto ao local da falta. Para ilustrar os resultados obtidos, apresenta-se na Figura 5.1 os gráficos de tensão e corrente oscilografados no local da falta para a primeira repetição.



Figura 5.1. Gráfico das correntes e tensões durante o ensaio na sua primeira repetição oscilografada no local da falta.

Pode-se observar pelos gráficos apresentados na Figura 5.1 que a falta faseterra foi interrompida depois de dois ciclos pela chave religadora e que durante sua ocorrência foi observada uma queda de tensão na fase faltosa conforme esperado teoricamente.

A segunda repetição não foi oscilografada no local de ocorrência da falta conforme descrito anteriormente, no entanto, sua oscilografia foi registrada junto a subestação e os gráficos de tensão e corrente são apresentadas por meio da Figura 5.2.



Figura 5.2. Gráfico das correntes e tensões durante o ensaio na sua segunda repetição oscilografada na subestação.

Por meio do gráfico de corrente apresentado na Figura 5.2 se verifica que os sinais observados tiveram as presenças de ruídos de medição os quais podem ser em parte atribuídos ao efeito corona constatado na subestação. A duração dessa falta foi de aproximadamente dois ciclos e meio e alterações sensíveis da tensão na subestação durante a ocorrência da falta não foram observadas.

A terceira e última repetição desse primeiro ensaio foi realizada após a correção dos pontos falhos observados ao longo da execução da primeira e segunda repetição. Dessa maneira, os valores de tensão e corrente durante a falta foram oscilografados tanto na subestação como no local de ocorrência dos ensaios. Assim, na Figura 5.3 estão os gráficos de tensão e corrente oscilografados no local da falta.



Figura 5.3. Gráfico das correntes e tensões durante o ensaio na sua terceira repetição oscilografada no local da falta.

A duração da terceira falta foi de cerca de dois ciclos e meio conforme se observa por meio do gráfico de corrente da Figura 5.3. Verificando-se o gráfico de tensão no ponto da falta constata-se uma queda de tensão durante a ocorrência da falta além de um rápido distúrbio transitório de tensão conforme destacado na Figura 5.3 e ampliado por meio da Figura 5.4.



Figura 5.4. Distúrbio de tensão observado durante a terceira repetição do primeiro ensaio junto ao local de ensaio.

A Figura 5.5 apresenta a terceira repetição do primeiro ensaio oscilografada



Figura 5.5. Gráficos de corrente de linha e tensão de fase durante o ensaio na sua terceira repetição oscilografada na subestação.

na subestação.

Como podem ser verificadas por meio dos gráficos da Figura 5.5, as correntes de linha foram mensuradas com a adição de um ruído e distúrbios visíveis tanto em amplitude como em formato, fatos estes que não foram verificados para as formas de onda de tensão.

5.3 Falta Fase-Terra com Solo Seco e Religamento Automático em Serviço

O procedimento experimental adotado ao longo desses ensaios foi idêntico ao adotado no ensaio descrito na Seção 5.2. No entanto, a chave religadora foi ajustada de maneira a permitir o religamento após a interrupção de uma determinada falta. Assim, diversas situações de religamento foram propostas e testadas e os valores de tensão e corrente para cada um dos ajustes de religamento ensaiados serão apresentados nos itens seguintes.

(A) Religamentos 1,5s – 2,5s – 2,5s (uma rápida e três lentas)

Neste ensaio a chave religadora foi ajustada com o grupo de ajuste 1, descrito no ANEXO IV, sendo sua atuação descrita por uma operação rápida e três lentas e os ensaios realizados compreenderam um total de 5 repetições cada qual oscilografada tanto pela subestação como no local de realização dos ensaios. Assim, apresenta-se na Figura 5.6 os gráficos de corrente oscilografados no local de ensaio referentes a primeira repetição.



Figura 5.6. Gráficos de corrente de linha durante o ensaio na sua primeira repetição oscilografada no local da falta.

Como pode ser observado por meio do gráfico de corrente da Figura 5.6, o ensaio procedeu conforme previsto, ou seja, a chave religadora entrou em modo de bloqueio após três tentativas de religamento. Observa-se ainda por meio do gráfico de tensão (primeiro religamento) ilustrado na Figura 5.7 que durante os instantes de falta foi constatada uma subtensão na fase faltosa e uma sobretensão na Fase B.



Figura 5.7. Gráfico de tensão após o primeiro religamento (primeira repetição).

Verifica-se ainda, com relação a tensão após o primeiro religamento, que no instante de fechamento da chave deu-se início a um curto transitório o qual é apresentado na Figura 5.8.



Figura 5.8. Detalhe do distúrbio de tensão no instante do primeiro religamento da primeira repetição de ensaio.

O distúrbio de tensão no local de falta não foi observado apenas no primeiro religamento, mas também no instante de queda do condutor ao solo, conforme Figura 5.9, e nos demais religamentos efetuados pela chave religadora assim como apresentado na Figura 5.10.



Figura 5.9. Detalhe do distúrbio de tensão no instante de contato do condutor com o solo na primeira repetição de ensaio.





Verifica-se por meio do gráfico de tensão da Figura 5.10 (a) que o distúrbio de tensão no segundo religamento foi ínfimo se comparado com o primeiro e terceiro religamento. Esse fato pode ser explicado pela possível ausência de arco elétrico no instante do segundo religamento.

A oscilografia desse ensaio fora também realizado na subestação, sendo que a Figura 5.11 apresenta o referido registro para as correntes de linha ao longo de todo o ensaio até o momento de bloqueio da chave religadora.



Figura 5.11. Gráficos de corrente de linha durante o ensaio na sua primeira repetição oscilografada na subestação.

Da mesma maneira como observado na tensão oscilografada no local do ensaio, verifica-se junto a tensão oscilografada na subestação um distúrbio na forma de onda de tensão nos instantes de religamento. Para ilustrar tal fenômeno, apresenta-se na Figura 5.12 as formas de onda de tensão no instante do primeiro e do terceiro religamento. Distúrbios de tensão no segundo religamento não foram observados tanto no local de realização dos ensaios como na subestação.



Figura 5.12. Detalhe do distúrbio de tensão na primeira repetição de ensaio oscilografado na subestação: (a) Primeiro religamento; (b) Terceiro religamento.

A segunda repetição desse ensaio foi realizada seguindo os mesmos moldes da primeira repetição e os valores de tensão e corrente foram oscilografados tanto pela subestação como no local de execução dos ensaios. Da mesma maneira como na primeira repetição, observou na tensão oscilografada no local de realização das faltas a queda de tensão da fase faltosa e a sobretensão das demais fase. Ainda com relação as tensões no local de falta, observaram-se distúrbios transitórios nos instantes de religamento da chave. Para ilustrar esse comportamento, a Figura 5.13 ilustra as tensões para o instante de primeiro, segundo e terceiro religamento.



Figura 5.13. Distúrbios de tensão: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento; (c) Terceiro religamento.

Para ilustrar as correntes oscilografadas ao longo dessa segunda repetição

de ensaio, tem-se na Figura 5.14 os referidos gráficos.



Figura 5.14. Gráficos de corrente de linha e tensão de fase durante o ensaio na sua segunda repetição no local da falta.

Nessa segunda repetição não foram observados distúrbios sensíveis de tensão na subestação. Dessa maneira, apresenta-se na Figura 5.15 o gráfico das correntes observadas no instante de queda do condutor ao solo oscilografada na subestação.



Figura 5.15. Gráfico das correntes de linha observadas na subestação no instante de queda do condutor ao solo.

As correntes observadas nos religamentos seguintes ao primeiro desligamento foram cerca de duas vezes superiores a corrente apresentada na Figura 5.15. Para ilustrar as correntes oscilografadas nos três religamentos, apresenta-se na Figura 5.16 os seus respectivos gráficos.



Figura 5.16. Correntes de religamento: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento; (c) Terceiro religamento.

Como pode ser observada por meio dos gráficos da Figura 5.16, a amplitude das correntes nos três religamentos foi aproximadamente a mesma, bem como o tempo que a chave religadora requereu para abrir. As demais repetições forneceram resultados semelhantes aos observados nas duas primeiras repetições. Assim, na seqüência serão apresentados os gráficos de tensão e corrente observados tanto no local de realização de ensaios como na subestação, no entanto, sem ressaltar os detalhes destacados apresentados para a primeira e segunda repetição do ensaio. Dessa maneira, apresenta-se na Figura 5.17 a forma de onda de corrente total oscilografada no local dos ensaios destacando a forma de onda de corrente após a queda do condutor ao solo para a terceira repetição.



Figura 5.17. Forma de onda da corrente oscilografadas no local de ensaio para a terceira repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo.

A Figura 5.18 ilustra as mesmas correntes apresentadas na Figura 5.17 oscilografadas da subestação.



Figura 5.18. Forma de onda oscilografadas na subestação para a terceira repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo.

O gráfico de corrente oscilografado no local da falta para a quarta repetição é apresentado na Figura 5.19, destacando-se a corrente verificada após o contato do condutor com o solo.



Figura 5.19. Forma de onda oscilografadas no local de falta para a quarta repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo.

Como podem ser observadas por meio das Figuras 5.17 e 5.19, as faltas oscilografadas ocorreram com diferentes ângulos, permitindo assim que análises com uma completude maior possam ser realizadas o que veio a ressaltar a importância da realização de diversas repetições para cada ensaio. Da mesma maneira como realizado acima, apresenta-se na Figura 5.20 as mesmas correntes oscilografadas por meio do sistema de medida instalado na subestação.



Figura 5.20. Forma de onda oscilografadas na subestação para a quarta repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo.

Por fim, apresenta-se na Figura 5.21 a corrente oscilografada no local da falta para a quinta e última repetição. Em adição, apresenta-se o transitório de corrente observado para o segundo religamento.



Figura 5.21. Forma de onda oscilografadas no local de falta para a quinta repetição: (a) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo; (b) Detalhe do transitório de corrente observado no segundo religamento.

O transitório de corrente verificado no local de falta para a quinta repetição não foi registrado na subestação conforme se destaca por meio dos gráficos da Figura 5.22.



Figura 5.22. Forma de onda oscilografadas na subestação para a quinta repetição: (a) Forma de onda total; (b) Destaque para a corrente no instante de queda de cabo ao solo.

(B) Religamento 0,5s – 20s (três lentas)

Neste ensaio as condições experimentais descritas no item anterior permaneceram inalteradas. No entanto, a chave religadora foi ajustada com o grupo de ajuste 2 (ANEXO IV), o qual previa a operação da chave com dois religamentos sendo o primeiro após 0,5s após o primeiro desligamento e o segundo religamento ocorrendo após 20s depois do segundo desligamento. O número de repetições totalizou quatro séries as quais foram efetuadas as condições descritas. Para ilustrar a seqüência de operação da chave religadora apresenta-se na Figura 5.23 a corrente total oscilografada para a primeira repetição destacando a corrente após a queda do cabo ao solo.



Figura 5.23 – Corrente de linha oscilografadas no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total oscilografada; (b) Detalhe da corrente após o toque do cabo no solo.

Conforme se pode verificar por meio dos gráficos apresentados na Figura 5.23, no instante do primeiro religamento ocorreu um surto de corrente de elevada magnitude. As correntes após o primeiro e o segundo religamento são apresentadas graficamente por intermédio da Figura 5.24.



Figura 5.24. Corrente de linha oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente após o primeiro religamento; (b) Corrente após o segundo religamento.

As correntes oscilografadas na subestação para essa repetição são apresentadas na Figura 5.25.



Figura 5.25. Correntes oscilografadas na subestação para a primeira repetição: (a) Corrente após a queda do condutor no solo; (b) Corrente após o primeiro religamento; (c) Corrente após o segundo religamento.

Os distúrbios de tensão verificados no local da falta foram semelhantes aos observados no ensaio apresentado no item anterior. Com relação a tensão oscilografada na subestação não foram verificados distúrbios sensíveis na sua respectiva forma de onda.

Os resultados obtidos por meio da segunda repetição se assemelharam com os resultados relativos a primeira repetição. A semelhança foi observada tanto em amplitude quanto em formato. Dessa maneira, apresenta-se de forma reduzida as correntes oscilografadas no local de ocorrência da falta por meio da Figura 5.26.





Ainda com relação a essa segunda repetição, apresenta-se na Figura 5.27 os gráficos das correntes registradas na subestação após a queda do condutor no solo, após o primeiro e o segundo religamento.





Os resultados obtidos por meio da terceira e quarta repetição também foram semelhantes aos resultados verificados por meio da primeira e da segunda repetição, sendo que em todas as repetições o parâmetro diferenciador foi o ângulo de ocorrência da falta, o qual é possível de verificar por meio das formas de onda oscilografadas na subestação. Dessa maneira, apresenta-se na Figura 5.28 o gráfico das correntes iniciais registradas na subseção para cada uma das repetições efetuadas nesse ensaio.





Figura 5.28. Correntes iniciais oscilografadas da subestação: (a) Primeira repetição; (b) Segunda repetição; (c) Terceira repetição; (d) Quarta repetição.

(C) Religamento 5s – 10s (três lentas)

Neste ensaio a chave religadora foi ajustada com o grupo de ajuste 3 (ANEXO IV), de maneira que após o primeiro desligamento, o primeiro religamento ocorreria após 5 segundos e o segundo religamento após 10 segundos do segundo desligamento. As condições de ensaio empregadas foram as mesmas utilizadas nos ensaios descritos anteriormente no Item (A) e Item (B) e o número de repetições realizadas totalizou três séries.

A corrente total oscilografada no local da falta na primeira repetição é apresentada na Figura 5.29 com destaque para a corrente observada após a queda do condutor no solo. Por meio da corrente total oscilografada se pode verificar a operação da chave religadora e, por meio da corrente após o toque do condutor no solo, observa-se a evolução temporal da corrente de falta para esse tipo de ensaio.



(a) Corrente total oscilografada; (b) Detalhe da corrente após o toque do cabo no solo.

Ainda com relação a Figura 5.29 observa-se que os valores de pico aumentaram para cada religamento fato esse explicado pelo aquecimento do sistema cabo-solo. A tensão no local da falta também fora também oscilografada e, nos instantes de falta, os valores instantâneos se alteraram de maneira a se observar subtensões na fase faltosa. Para ilustrar, apresenta-se na Figura 5.30 o gráfico de tensão oscilografada no local da falta focando o surto de tensão no instante do segundo religamento.



Figura 5.30. Detalhe da tensão de fase oscilografada no local da falta na primeira repetição no instante do segundo religamento.

Nessa primeira repetição, a oscilografia realizada na subestação não apresentou distúrbios sensíveis de tensão, sendo verificado apenas as correntes de falta. Assim, apresenta-se na Figura 5.31 a corrente total oscilografada na subestação destacando a corrente registrada após a queda do condutor no solo.



Figura 5.31. Corrente de linha oscilografada na subestação na primeira repetição: (a) Corrente total oscilografada; (b) Detalhe da corrente após o toque do cabo no solo.

Comparando-se esse ensaio com aquele descrito e apresentado no Item (B) pode-se citar que diferiram entre si apenas nos tempos de religamento ajustados na chave religadora. Assim, torna-se conveniente destacar como as demais repetições diferiram entre si em função do ângulo de falta. Para tanto, apresenta-se na Figura 5.32 os instantes iniciais de falta para cada repetição visto pela oscilografia da subestação.



Figura 5.32. Correntes iniciais oscilografadas da subestação: (a) Primeira repetição; (b) Segunda repetição; (c) Terceira repetição.

(D) Religamento 0,5s – 30s (três lentas)

Nesse ensaio, como nos demais apresentados anteriormente, as condições experimentais se mantiveram inalteradas. No entanto, o grupo de ajuste da chave religadora foi alterado passando a ser o grupo de ajuste 4 (ANEXO IV). Por meio desse grupo de ajuste, o primeiro religamento foi programado para ocorrer após 0,5 segundo após o primeiro desligamento e o segundo religamento ocorrendo após 30 segundos do segundo desligamento. Para verificar esse referido ajuste da chave religadora, apresenta-se na Figura 5.33 o gráfico da corrente total oscilografada no local do ensaio com destaque para a corrente registrada logo após a queda do condutor no solo para a primeira repetição de um total de três.



Figura 5.33. Corrente de linha oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total oscilografada; (b) Detalhe da corrente após o toque do cabo no solo.

Pode-se observar por meio da Figura 5.33(a) que os valores de pico registrados para cada um dos instantes sofreu acréscimo nos seus valores absolutos o que pode ser interpretado como sendo uma evolução temporal da falta em virtude do aquecimento e acomodação mecânica na interface cabo-solo. Para destacar as correntes registradas após o primeiro e o segundo religamento apresentam-se na Figura 5.34 as referidas correntes.



Figura 5.34. Correntes de linha oscilografadas no local da falta após os religamentos da chave religadora na primeira repetição: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento.

Em virtude dos religamentos, a tensão no local de falta sofreu distúrbios transitórios rápidos os quais podem ser observados por meio dos gráficos da Figura

5.35.



Figura 5.35. Distúrbios de tensão observados no local da falta nos instantes de religamento da primeira repetição: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento.

Apesar da falta ser do tipo fase-terra, não apenas a tensão da fase faltosa sofre distúrbios, mas também as demais fases do sistema são perturbadas e praticamente com a mesma intensidade. No entanto, o distúrbio de tensão no instante que o cabo toca o solo é muito menos perceptível que quando dos instantes de religamento. Os distúrbios de tensão observados no local de falta nos instantes de religamento são também verificados na subestação, porém, de maneira menos intensa conforme se apresenta na Figura 5.36.



Figura 5.36. Distúrbios de tensão observados na subestação nos instantes de religamento da primeira repetição: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento.

A segunda e terceira repetição apresentou resultados semelhantes aos observados da primeira repetição. No entanto, cabe ressaltar que tais repetições diferiram entre si quanto ao ângulo de falta como pode se observar por meio da Figura 5.37.



Figura 5.37. Correntes iniciais oscilografadas da subestação: (a) Primeira repetição; (b) Segunda repetição; (c) Terceira repetição.

5.4 Formação de Arco Elétrico Entre Fase e Terra com Solo Seco

Neste ensaio, como descrito na Seção 4.2, o condutor fase foi solto pelos eletricistas responsáveis pela sustentação do cabo lentamente até o rompimento da rigidez dielétrica do ar e um arco elétrico em fase e terra ser registrado. Para tanto,

três grupos de ajuste da chave religadora foram empregados nos ensaios de maneira que os resultados obtidos serão apresentados nos itens que seguem.

(A) Religamento 1,5s – 2,5s – 2,5s (uma rápida e três lentas)

O grupo de ajuste da chave religadora empregado nesse primeiro ensaio foi o grupo de ajuste 1 (ANEXO IV). Em virtude da máxima distância para a ocorrência do arco elétrico ser de apenas alguns milímetros eventualmente o cabo tocou o solo, fato este que não prejudicou a oscilografia das correntes de arco. Os valores de máxima corrente observados nesses ensaios foram sensivelmente inferiores aos registrados nos ensaios de curto fase-terra como pode ser observado por meio dos gráficos da Figura 5.38.



Figura 5.38. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total oscilografada; (b) Corrente de arco inicial.

Além dos valores inferiores de corrente observados nesses ensaios, verificase também diferenças na progressão da falta, bem como diferentes formas de onda quando comparadas com os ensaios de curto fase-terra apresentados anteriormente. Para ilustrar as diferenças observadas, apresenta-se na Figura 5.39 os gráficos das correntes de faltas para os instantes temporais que sucederam o primeiro, o segundo e o terceiro religamento.



Figura 5.39. Correntes oscilografadas no local de falta para a primeira repetição: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento; (c) Terceiro religamento.

Como os valores de corrente observados durante esses ensaios foram mínimos, torna-se conveniente, para fins de apresentação de resultados, não apresentar os valores instantâneos das correntes, pois em virtude do ruído observado, as correntes faltosas podem inclusive ser sobreposta pelos referidos ruídos. Como exemplo desse fato apresenta-se na Figura 5.40 a corrente total oscilografada da subestação para a segunda repetição.



Figura 5.40. Corrente total oscilografada na subestação para a segunda repetição.

Como se pode observar por meio da Figura 5.40 não é possível identificar visualmente o instante onde a falta ocorreu, pois nesse ensaio a corrente de falta registrada possui amplitude igual ou inferior aos ruídos de oscilografia. No entanto, essa limitação pode ser contornada se, ao invés de se utilizar os valores instantâneos de corrente usar os valores eficazes em função do tempo para tais grandezas elétricas. Dessa maneira, apresenta-se na Figura 5.41 o gráfico de corrente eficaz de neutro para todo o intervalo de oscilografia.



Figura 5.41. Corrente total oscilografada na subestação para a segunda repetição.

Como se observa por meio do gráfico da Figura 5.41, a identificação do instante de ocorrência da falta para correntes de falta de baixa amplitude pode ser facilitada quando o valor eficaz da corrente é empregado ao invés de se utilizar seu valor instantâneo.

Como nas demais repetições a amplitude das correntes de falta apresentaram patamares semelhantes a essa primeira repetição, os registros oscilografados serão apresentados em termos da corrente eficaz de neutro observada no local de falta e na subestação. Assim, tem-se na Figura 5.42 o gráfico da corrente de neutro eficaz oscilografada no local da falta e na subestação para a terceira repetição.



Figura 5.42. Corrente eficaz de neutro para a terceira repetição: (a) Corrente no local da falta; (b) Corrente na subestação.

Em virtude do nível de ruído na subestação ser superior ao verificado em campo tem-se patamares diferentes de corrente eficaz de neutro no local da falta e na subestação conforme se verifica na Figura 5.42. No entanto, para os instantes de ocorrência de falta, os valores eficazes registrados foram muito próximos tanto em magnitude quanto em formato. Para complementar a análise desse ensaio, apresenta-se na Figura 5.43 o gráfico da corrente eficaz de neutro oscilografadas no local da falta e na subestação para a primeira repetição.



Figura 5.43. Corrente eficaz de neutro para a primeira repetição: (a) Corrente no local da falta; (b) Corrente na subestação.

(B) Religamento 0,5s – 20s (três lentas)

Neste ensaio os procedimentos experimentais empregados na sua execução foram semelhantes aos utilizados na realização do ensaio descrito e apresentado no Item (A) com exceção do grupo de ajuste da chave religadora. O ajuste utilizado na chave religadora fora aqueles descrito no Anexo IV sob a denominação de grupo de ajuste 2 (Anexo IV), o qual previa dois religamentos, sendo o primeiro após 0,5 segundo do primeiro desligamento e o segundo religamento após 20 segundos do segundo desligamento.

Essa descrição de seqüência de operação pode ser observada por meio da Figura 5.44 onde se apresenta a corrente total oscilografada no local da falta com destaque para a corrente inicial do arco elétrico.



Figura 5.44. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total oscilografada; (b) Corrente de arco inicial.

Como se pode observar por meio dos gráficos da Figura 5.44, o nível de ruído das medições impedem a perfeita visualização das correntes instantâneas de falta. Dessa maneira, torna-se mais uma vez conveniente a apresentação das correntes faltosas por meio de seus valores eficazes da forma de onda, como apresentado na Figura 5.45 para as correntes de falta registradas na terceira repetição.



local da falta; (b) Corrente na subestação.

A segunda repetição desse ensaio não resultou em oscilografias tanto em campo como na subestação de maneira que a apresentação dos registros de tensão e corrente será omitido por não permitir análise de correntes de falta. Em complemento a análise desse ensaio, apresenta-se na Figura 5.46 o valor eficaz das tensões de fase registradas no local da falta para a terceira repetição.



Figura 5.46. Tensões eficazes de fase ao longo da terceira repetição.

Como se pode observar por meio do gráfico da Figura 5.46 durante os intervalos de ocorrência das faltas houve subtensões na fase faltosa (Fase A), assim

como na Fase C e sobretensões na Fase B. O mesmo fenômeno não se manifestou de maneira tão sensível nas tensões oscilografadas na subestação.

(C) Religamento 5s – 20s (três lentas)

O grupo de ajuste adotado para a chave religadora nesse ensaio foi o grupo de ajuste 3 (Anexo IV), e os procedimentos experimentais empregados nas duas repetições realizadas foram os mesmos adotados e descritos anteriormente.

Para ilustrar o comportamento das grandezas elétricas nesses ensaios, apresenta-se na Figura 5.47 o gráfico de corrente obtido pela oscilografia efetuada no local dos ensaios.



Figura 5.47. Oscilografia das correntes de linha registradas no local da falta (primeira repetição).

Como pode ser observada por meio da Figura 5.47(a), a amplitude máxima das correntes oscilografadas foi apenas poucas vezes superior ao ruído intrínseco as medições. Assim, torna-se mais conveniente apresentar as formas de onda de correntes em termos de seus valores eficazes do que em termos de seus valores instantâneos. Dessa maneira, apresenta-se na Figura 5.48, os valores eficazes das correntes oscilografadas no local da falta.



Figura 5.48. Correntes eficazes no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente da fase faltosa; (b) Corrente de neutro.

A segunda repetição decorreu de maneira não planejada uma vez que a chave religadora instalada no local das faltas não operou corretamente. Em virtude dessa falha operacional, a chave religadora posicionada a montante do local da falta atuou conforme programada ocasionando uma interrupção temporária do fornecimento de energia no local de ensaios. Para ilustrar a maneira pela qual a referida chave religada operou, apresenta-se na Figura 5.49 o gráfico da tensão oscilografada no local da falta.



Figura 5.49. Tensão oscilografada no local da falta na segunda repetição.

Para ilustrar os transitórios de tensão nos quatro instantes de desligamento, apresenta-se na Figura 5.50 o gráfico das tensões para cada um dos referidos instantes.



Primeiro desligamento; (b) Segundo desligamento; (c) Terceiro desligamento; (d) Quarto desligamento.

Em complemento aos gráficos apresentados na Figura 5.50, apresenta-se na Figura 5.51 os gráficos de tensão que ilustram os transitórios de tensão nos instantes de religamento da chave.



Figura 5.51. Transitórios de tensão após os religamentos da chave religadora: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento; (c) Terceiro religamento.

O sistema de medição da subestação não registrou a primeira falta. No entanto, para a segunda repetição a oscilografia de tensão e corrente foi efetuada conforme se apresenta por meio dos valores eficazes para corrente na Figura 5.52.



Figura 5.52. Valores eficazes na subestação na segunda repetição: (a) Correntes eficazes; (b) Tensões eficazes.

5.5 Falta Fase-Terra com Brita Seca

Os ensaios de curto-circuito fase-terra com condutor sobre brita foram realizados com o objetivo de se verificar semelhanças e diferenças com os ensaios de curto-circuito com condutor sobre solo seco. Em virtude da resistência média da brita ser superior a resistência do solo seco, espera-se que as correntes de falta possuam valores instantâneos inferiores a aqueles apresentados nos ensaios com solo seco.

(A) Religamento Automático Bloqueado

Nesse primeiro ensaio a chave religadora foi ajustada conforme o grupo de ajuste 1 (Anexo IV), no entanto, tendo o religamento automático bloqueado. Os procedimentos experimentais adotados nesse ensaio foram semelhantes aos utilizados nos ensaios de curto-circuito com solo seco a fim de se possibilitar uma comparação com os primeiros ensaios.

Apresenta-se na Figura 5.53 a corrente de falta oscilografada no local da falta, bem como se destaca a corrente logo após a queda do condutor ao solo até o instante de bloqueio da chave religadora.





Pode-se verificar por meio dos gráficos da Figura 5.53 que além da corrente de falta possuir valores pequenos, sua medida está comprometida por ruídos. Tais ruídos dificultam a visualização das correntes de falta principalmente nas oscilografias da subestação. Esse fato pode ser ilustrado conforme se faz por meio da Figura 5.54 onde se apresentam os valores instantâneos das correntes de linha e de neutro, bem como seus respectivos valores eficazes, medidos na subestação.



Figura 5.54. Corrente oscilografada na subestação: (a) Corrente instantânea registrada; (b) Corrente eficaz registrada.

Observando-se o gráfico da Figura 5.54(a) não é possível afirmar se a falta fora oscilografada ou não. No entanto, por meio do gráfico da Figura 5.54(b) verifica-se com precisão o instante inicial e instante final da falta.

(B) Religamento 1,5s – 2,5s – 2,5s (uma rápida e três lentas)

Neste ensaio o religamento automático da chave religadora foi habilitado e a metodologia experimental foi semelhante aquela adotada no ensaio anterior. O número de repetições executadas totalizou quatro séries sendo que a corrente total oscilografada na primeira série é apresentada na Figura 5.55.


Figura 5.55. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Detalhe da corrente de falta.

As correntes observadas nos instantes de tempo que sucedem os religamentos são importantes, pois fornecem informações da maneira como esse tipo de falta evolui no tempo. Dessa maneira, apresenta-se na Figura 5.56 as correntes que sucederam o primeiro e o segundo religamento nessa primeira repetição.



Figura 5.56. Corrente oscilografada no local da falta após os religamentos: (a) Primeiro religamento; (b) Segundo religamento.

Ilustrando a corrente oscilografada na subestação, apresenta-se na Figura 5.57 os valores eficazes oscilografadas na subestação.



Figura 5.57. Correntes eficazes oscilografadas na subestação na primeira repetição.

A segunda repetição realizada apresentou resultados semelhantes aos da primeira repetição de maneira que se apresenta na Figura 5.58 o gráfico das correntes eficazes registradas tanto no local da falta como na subestação.



Figura 5.58. Correntes eficazes oscilografadas na segunda repetição: (a) Correntes eficazes no local da falta; (b) Correntes eficazes na subestação.

Pode-se verificar por meio dos gráficos da Figura 5.58 que o emprego do valor eficaz na apresentação dos valores oscilografados constitui numa importante ferramenta para análise e visualização de pequenas correntes de falta.

Da mesma maneira como realizada para a segunda repetição, tem-se na Figura 5.59 o gráfico das correntes eficazes oscilografadas tanto na subestação como no local da falta para a terceira repetição e na Figura 5.60 os referidos gráficos para a quarta repetição.



Figura 5.59. Correntes eficazes oscilografadas na terceira repetição: (a) Correntes eficazes no local da falta; (b) Correntes eficazes na subestação.



Figura 5.60. Correntes eficazes oscilografadas na quarta repetição: (a) Correntes eficazes no local da falta; (b) Correntes eficazes na subestação.

Como se pode observar por meio dos gráficos de correntes eficazes apresentados por meio da Figura 5.58, 5.59 e 5.60, verifica-se em cada repetição valores eficazes distintos e maiores a cada repetição. Além dessa progressão do valor eficaz a cada repetição observaram-se também comportamentos temporais distintos nas referidas repetições. Essas alterações podem em parte ser explicada pelo fato de que as correntes de curto de uma dada repetição alteraram as características do arranjo da brita, resultando novas condições experimentais para as repetições que seguiram.

5.6 Falta Fase-Terra com Condutor Sobre a Cruzeta

O curto-circuito observado quando um condutor fase toca e repousa numa cruzeta apresenta valores instantâneos de corrente muito pequeno e inferiores a corrente de carga do alimentador, impedindo a identificação do curto por parte dos dispositivos de proteção contra sobre corrente da subestação.

Assim, diversos ensaios de curto circuito fase-terra com condutor sobre a cruzeta foram realizados a fim de se obter informações tanto quantitativas quanto qualitativas sobre esse tipo de falta.

Os ensaios realizados foram divididos em dois grupos principais. No primeiro grupo a chave religadora possuiu o religamento automático bloqueado, sendo que no segundo esse recurso foi habilitado. Nos itens que seguem são apresentados os resultados mais significativos registrados em cada repetição de ensaio executado.

(A) Religamento Automático Bloqueado

Nesse ensaio o religamento automático da chave religadora foi bloqueado e o grupo de ajuste empregado correspondeu ao grupo de ajuste 1 (Anexo IV). A preparação do ensaio se deu com o posicionamento do condutor fase sobre a cruzeta ainda com a chave religadora aberta. Após a liberação por parte da Equipe de Linha Viva a chave religadora foi fechada e os valores de tensão e corrente foram oscilografados tanto no local da falta como na subestação. Devido a alta impedância desse tipo de falta, as correntes oscilografadas apresentam valores ínfimos, o que

impede a distinção de sua ocorrência frente a oscilografia realizada conforme se apresenta por meio da Figura 5.61.



Figura 5.61. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Detalhe da corrente de falta.

(B) Religamento 1,5s – 2,5s – 2,5s (uma rápida e três lentas)

Neste ensaio o religamento automático da chave religadora foi habilitado e a metodologia experimental manteve-se semelhante aquela adotada no ensaio anterior. O número de repetições executadas totalizou duas séries sendo que a corrente total oscilografada na primeira série é apresentada na Figura 5.62.



Figura 5.62. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Corrente eficaz oscilografada.

Como se pode observar por meio dos gráficos da Figura 5.62, os valores de corrente de falta evoluíram em amplitude a cada religamento, sendo este um possível indicativo de degradação térmica da cruzeta sob a qual o condutor foi repousado. Na segunda repetição realizada, devido aos ventos verificados no local da falta, o condutor fase sob ensaio tocou a mão francesa do poste resultando em uma corrente de curto-circuito superior aquela freqüentemente registrada nos curtos-circuitos fase-terra envolvendo a cruzeta. Ilustrando a corrente oscilografada nessa repetição, apresenta-se na Figura 5.63 o gráfico da corrente total oscilografada no local da falta, bem como o respectivo gráfico da corrente eficaz calculada.



Figura 5.63. Corrente oscilografada no local da falta na segunda repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Corrente eficaz oscilografada.

Devido a magnitude das correntes verificadas nessa segunda repetição, a oscilografia realizada da subestação forneceu resultados substanciais os quais são apresentados graficamente por meio da Figura 5.64.



Figura 5.64. Corrente oscilografada na subestação para a segunda repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Corrente eficaz oscilografada.

5.7 Falta Fase-Terra Lado Carga com Solo Seco

Nesse ensaio a chave religadora foi ajustada segundo o grupo de ajuste 1 (Anexo IV), tendo o religamento automático habilitado. Apresentando-se a corrente total oscilografada no local da falta, tem-se a Figura 5.65, onde se destaca também a corrente instantânea logo após o toque do condutor no solo.



Figura 5.65. Corrente oscilografada no local da falta na primeira repetição: (a) Corrente total registrada; (b) Detalhe da corrente de falta.

Como os valores de correntes registradas possuíram valores de pico inferiores a 2 Ampére, torna-se também conveniente apresentar as correntes de falta por meio dos seus valores eficazes. Assim, na Figura 5.66 tem-se o gráfico das correntes eficazes registradas no local da falta para a primeira, a segunda e a terceira repetição.



Figura 5.66. Correntes de linha oscilografadas no local da falta: (a) Primeira repetição; (b) Segunda repetição; (c) Terceira repetição.

Devido aos valores mínimos de corrente registrados nesse tipo de falta, valores perceptíveis de corrente não foram registrados na oscilografia da subestação, sendo necessário análises mais sofisticadas para se tecer conclusões mais apuradas.

Conclusões

A execução de ensaios de faltas fase-terra de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica requer um profundo planejamento para garantir a segurança dos envolvidos com os mesmos, da população na vizinhança e do sistema de distribuição de energia elétrica.

Nesta dissertação foram apresentadas estratégias experimentais que permitiram a realização de cinco tipos de faltas de alta impedância, ou sejam, curtocircuito fase-terra com solo seco, curto-circuito fase-terra (lado carga) com solo seco, curto-circuito fase-terra com a brita seca, formação de arco elétrico entre fase e terra com solo seco e curto-circuito fase-terra com condutor sobre a cruzeta.

Para cada tipo de ensaio mencionado anteriormente, as grandezas elétricas de tensões e correntes foram mensuradas através de oscilógrafos digitais posicionados em dois locais diferentes, sendo um desses na Subestação Rio Claro 3 e o segundo no próprio ramal onde os ensaios foram realizados. Tais procedimentos permitiram a aquisição e a disponilização de diversos dados experimentais envolvidos com as situações de faltas de alta impedância.

Mais especificamente, registrou-se de forma detalhada o comportamento envolvido com as correntes de baixas amplitudes envolvidas em tais situações, sendo as mesmas de difícil detecção pelo sistema de proteção de falta de alta impedância convencional, com destaque também para as baixíssimas correntes de falta fase-terra do lado carga. Para cada tipo de ensaio realizado, disponibilizou-se ainda um conjunto de 4 grupos de ajustes diferentes da proteção a montante do ponto de defeito, tendo os mesmos tempos de religamentos distintos. Em suma, as estratégias apresentadas no decorrer da dissertação fornecem os procedimentos passo a passo para a realização de ensaios de faltas de alta impedância, servindo também de subsídios para a execução de novos ensaios e contribuindo ainda no aprimoramento de técnicas e equipamentos eficazes para a detecção desses tipos de falta. Entre as diversas contribuições da dissertação, podese pontuar as seguintes:

- Disponibilização da seqüência passo a passo para a realização de ensaios experimentais envolvendo faltas de alta impedância em linhas aéreas de distribuição, tanto do ponto de vista operacional como metodológico.
- Fornecimento de um conjunto expressivo de medições reais de grandezas elétricas relacionados aos diversos tipos de faltas que foram realizadas durante os ensaios experimentais.
- Disponibilização de requisitos exigidos aos equipamentos de oscilografias quando de suas aplicações em registros de grandezas elétricas envolvidas com as faltas de alta impedância.
- Contemplação de aspectos de segurança a serem observados quando da realização de ensaios de faltas de alta impedância, assim como dos grupos de ajustes pertinentes aos dispositivos de proteção.

Outro aspecto importante advindo das estratégias experimentais apresentadas é que todos os ensaios efetivados foram realizados utilizando os próprios TCs e TPs disponíveis na própria concessionária, evitando o uso de equipamentos especiais para tais propósitos.

Como trabalhos futuros a serem explorados, os resultados experimentais disponibilizados, os quais envolvem oscilografias reais de tensões e correntes

referentes as diversas faltas efetuadas, podem ser utilizados para a investigação de métodos mais precisos de identificação e localização de faltas, especialmente aqueles baseados em sistemas inteligentes.

Bibliografia

- ANSI/IEEE C62.92.4/1991. IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems, Part IV, Distribution, Description.
- AUCOIN, B. M., RUSSEL, B. D. *Detection of Incipient and Low Current Faults in Electric Distribution Systems*, In: 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1989. Washington, p. 53-158.
- AUCOIN, B. M., RUSSEL, B. D. Challenges in Technology Development and Commercialization: A Case Study of Fallen Power Line Detection, In: International Conference on Engineering and Technology Management, 1996. Vancouver, p.47-51.
- CHOI, M. S., LEE, S. J., LEE, D. S. A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 1, p. 35-41, 2004.
- CHUNJU, F., HUARONG, C., WEIYONG, Y. Application of Six-sequence Fault Components in Fault Location for Joint Parallel Transmission Line. Tsinghu Science and Technology, v. 10, n. 2, p. 247-253, 2005.
- ELMORE, W. A. *Protective Relaying Theory and Applications*. New York: Marcel Dekker, Second Edition, 2003. 432p.

- FILLIPPIN C. G., PENTEADO NETO, R. A., STENZEL, J. N., MANCINI FILHO, E., GAMBOA, L. R. A., SCARASSATI, P. C. Sistemas de Segurança Contra Rompimento de Cabos Condutores em Linhas de Distribuição. In: Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2003. Salvador, p.173-178.
- GIGUER, S. *Proteção de Sistemas de Distribuição*. Porto Alegre: Editora Sagra, 1988. 343p.
- GOES, E. A. Uma Abordagem Baseada em Rede Neural Artificial para Localização de Trecho de Linha de Distribuição de Energia Elétrica em Curto-Circuito.
 Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2001. 128p.
- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, Florianópolis: UFSC, 1999. 230p.
- KINDERMANN, G. *Curto Circuito*. Aranda Editora Técnica e Cultural Ltda, 3ª Edição, 2003. 211p.
- LI, L., REDFERN, M. A. A Review of Techniques to Detect Downed Conductors in Overhead Distribution Systems, In: 7th International Conference on Developments in Power Systems Protection, 2001. Amsterdam, p.169-172.
- LUO, S., KEZUNOVIC, M., SEVICK, D. R. Locating Faults in the Transmission Network Using Field Measurements, Simulation Data and Genetic Algorithm. Electric Power Systems Research, v. 71, p. 169-177, 2004.
- MAHMOOD, W. N., MUKERJEE, R. N., Ramachandaramurthy, V. K. Fault Point Identification in a Power Network Using Single-point Measurement, In: IEEE TENCON Conference, 2004. Chiang Mai (Tailândia), p. 381-384.

- MARTINS, L. S., MARTINS, J. F., FERNÃO PIRES, V., ALEGRIA, C. M. A Neural Space Vector Fault Location for Parallel Doublé-circuit Distribution Lines. Electrical Power & Energy Systems, v. 27, p. 225-231, 2005.
- MASON, C. R. *The Art and Science of Protective Relaying*. New York: John Wiley & Sons, 1956. 410p.

NBR 5456/1987. Eletricidade Geral – Terminologia.

- NBR 8769/1985. Diretrizes Para Especificação de Um Sistema de Proteção Completo – Procedimento.
- STEVENSON, W. D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. São Paulo: McGraw–Hill, 4ª Edição, 1988, Tradução Ademaro A. M. B. Cotrim. 347p.
- TOMSOVIC, K., BAKKEN, D. E., VENKATASUBRAMANIAN, V., BOSE, A. Designing the Next Generation of Real-time Control, Communication, and Computations for Large Power Systems. Proceedings of the IEEE, v. 93, n. 5, p. 965-979, 2005.
- WESTER, C. G. *High Impedance Fault Detection on Distribution Systems*, In: 42nd Annual Rural Electric Power Conference, 1998. Saint Louis, p.1-5 (C5).
- YAOZHONG, G. New Types of Protective Relaying and Fault Location Theory and Technique. China: Xi'an Jiao Tong University Press, 1996.
- YOUSSEF, O. A. S. Combined Fuzzy-logic Wavelet-based Fault Classification Technique for Power System Relaying. IEEE Transactions on Power Delivery,
 v. 19, n. 2, p. 582-589, 2004a.
- YOUSSEF, O. A. S. Applications of Fuzzy-logic-wavelet-based Techniques for Transformers Inrush Currents Identification and Power System Faults

Classification, In: IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004b. New York, p. 553-559.

Anexo I – Aspectos Relacionados aos Oscilógrafos

I.1 Visão Geral do Equipamento

A visão geral do equipamento de medição Yokagawa (Linha 708E, modelo 7018020) é mostrada através das Figuras I.1 a I.4. Em relação a Figura I.1, mostra-se a parte frontal do equipamento, a qual comporta as teclas e botões que permitem o ajuste das funcionalidades do mesmo.



Figura I.1. Painel frontal do equipamento de medição.

A partir da numeração inserida na Figura I.1, observa-se que os principais dispositivos e teclas que compõem a parte frontal do equipamento são os seguintes:

1. Tela LCD: Permite a visualização dos sinais aquisitados.

2. Tecla ESC: Fecha menus pop-up's ou menus referentes as teclas.

3. Botão e Anel de Movimento: Altera valores selecionados ou movimenta o cursor. O anel externo incrementa mais rapidamente os ajustes.

4. Menu Vertical: Usado para ajustes do eixo vertical.

5. Menu Horizontal: Usado para ajustes do eixo horizontal.

6. Menu Trigger: Usado para ajustes do Trigger.

7. Terminal Funcional Terra e Saída COMP: Conexão terra e sinais de saída usados para compensação da ponta de prova.

8. Teclas de Funções: Mostra o menu correspondente a cada tecla.

9. Teclas de Menu: Acessa os itens correspondentes mostrados na tela.

A Figura I.2 mostra uma visão geral da parte lateral esquerda do equipamento, a qual é destinada ao acoplamento de diversos dispositivos de entrada e saída de dados, permitindo a interligação do equipamento com outros componentes.



Figura I.2. Painel lateral esquerdo do equipamento de medição.

Por intermédio da numeração inserida na Figura I.2, observa-se que os principais conectores de entrada e saída presentes na parte lateral esquerda do equipamento são:

1. Conector GP-IB: Permite a conexão com uma interface externa.

2. Drive de Disquete: Possibilita o acesso a uma unidade de disco flexível.

3. Saída de Vídeo: Permite a conexão com outra unidade de vídeo.

4. Conector RS-232: Permite a conexão com uma interface externa.

5. Conector SCSI: Conecta a um disco rígido externo ou outra interface externa.

6. Conector Centronics: Conecta impressora utilizando um conector Centronics.

7. Terminal de Saída Trigger: Disponibiliza um sinal de trigger para o acoplamento de outros equipamentos que devem estar em sincronia com o oscilógrafo.

8. Terminal de Entrada de Relógio Externo: Permite o uso de relógio externo para

a sequencialização das operações internas do equipamento.

9. Conector de Energia: Possibilita a entrada de energia elétrica no equipamento.
10. Interruptor de Energia: Possibilita o ligamento e o desligamento do equipamento.

11. Ventilação: Permite manter a temperatura interna do equipamento em níveis compatíveis para o seu funcionamento adequado. A Figura I.3 mostra uma visão geral do painel lateral direito do equipamento, o qual é destinado principalmente ao acoplamento de pontas de prova e cabos de medição, possibilitando que a aquisição de sinais seja feita pelo equipamento.



Figura I.3. Painel lateral direito do equipamento de medição.

Em relação a Figura I.3, observa-se que esta parte do oscilógrafo permite as conexões dos seguintes dispositivos:

1. Terminais de Entrada: Conexão de pontas de prova e cabos de medidas.

2. Terminais Funcionais de Terra: Acoplamento de terra externo.

A Figura I.4 mostra em destaque a parte superior do equipamento de medição.



Figura I.4. Vista superior do equipamento de medição.

Por intermédio da Figura 1.4, nota-se que a parte superior do equipamento é composta pelos seguintes acessórios:

1. Impressora Interna: Utilizada para imprimir os gráficos mostrados no LCD.

2. Alça de Locomoção: Usada para transportar o oscilógrafo.

I.2 Características Funcionais dos Equipamentos

Todas as características funcionais do oscilógrafo podem ser acessadas através dos botões, teclas e menus que compõem o painel frontal do equipamento. A Figura I.5 mostra o menu vertical com as suas principais teclas e botão.



Figura I.5. Vista frontal do menu vertical do equipamento de medição.

Nesta figura as teclas rotuladas de *CH*1 a *CH*8 acessam o menu de ajuste de cada canal. Tais acessos permitem habilitar/desabilitar o respectivo canal, ajustar diversas características intrínsecas do canal, tais como tensão offset, acoplamento, atenuação de ponta de prova, pré-ajustes, limite da largura de banda, inversão e valores de escala. Permite também selecionar o canal para se operar com o botão *V/DIV*. Quando um canal é ligado, o LED acima da respectiva tecla é aceso.

Em relação ao botão V/DIV a sua função consiste de ajustar a sensibilidade do eixo de tensão. Antes de girar este botão, deve-se selecionar a canal o qual se quer ajustar, pressionando sua tecla correspondente. No caso de se mudar a escala quando a aquisição estiver suspensa, o novo valor torna-se eficaz quando a aquisição recomeçar.

Em relação ao menu horizontal que também compõe o painel frontal do oscilógrafo, a Figura I.6 ilustra o único botão associado ao mesmo.



Figura I.6. Vista frontal do menu horizontal do equipamento de medição.

Em referência ao botão rotulado *TIME/DIV*, o mesmo é usado para ajustar a escala de tempo. Alterando a escala enquanto a aquisição estiver suspensa, o novo valor se torna efetivo quando as aquisições recomeçarem.

Em relação ao menu de Trigger, o mesmo é composto de três teclas conforme apresentadas na Figura I.7.



Figura I.7. – Vista frontal do menu de trigger do equipamento de medição.

Neste menu a tecla *SIMPLE* aciona o menu para o trigger simples, o trigger e sua fonte. O modo de Trigger simples está selecionado quando o indicador localizado acima estiver iluminado. A tecla *ENHANCED* habilita o menu de trigger avançado para ajuste complexo de trigger, sendo que este modo está ativado quando o indicador localizado acima estiver iluminado. A tecla *POSITION/DELAY* é usada para ajustar a posição de trigger ou intervalo de trigger. O indicador *TRIG* D acende quando o trigger é ativado.

Algumas outras teclas que compõem o equipamento de medição são apresentadas na Figura I.8.



Figura I.8 – Vista frontal das teclas de funcionalidades do equipamento de medição.

Em relação a Figura I.8 as funcionalidades das teclas acima referenciadas são as seguintes:

Tecla MEASURE: Aciona o menu para executar a medida automática de parâmetros da forma de onda.

da forma de onda.

Tecla CURSOR: Aciona o menu para medida do cursor.

Tecla MATH: Aciona o menu para computação da forma de onda.

Tecla HISTORY: Aciona o menu para recuperar dados da memória de histórico.

Tecla ZOOM: Aciona o menu para ajuste de zoom.

- **Tecla DISPLAY:** Aciona a tela do menu display. Para reproduzir o menu para ajuste de display X-Y, pressionar SHIFT + DISPLAY.
- **Tecla SETUP:** Aciona o menu de auto-ajuste que configura automaticamente as teclas para valores apropriados de acordo com o sinal de entrada e o menu de inicialização que restaura as configurações padrões para as de fábrica. Para mostrar o menu de calibração na tela pressionar SHIFT + SETUP.

Tecla ACQ: Mostra o menu de método de aquisição.

- **Tecla START/STOP:** Inicia ou interrompe uma aquisição de acordo com a modalidade de Trigger selecionada. O indicador acima desta tecla é iluminado durante a aquisição.
- **Tecla RESET:** Restaura os valores alterados pelo botão de movimento e anel seletor.
- **Tecla SELECT:** Ativa o item de menu selecionado pelo botão de movimento e anel seletor.
- Setas (Teclas < >): Usadas para deslocar a posição da coluna do valor numérico a ser ajustado pelo botão de movimento e anel seletor.
- **Tecla SNAP SHOT:** Repete aquisições enquanto indica a atual forma de onda na tela.

Tecla CLEAR: Apaga a atual forma de onda mostrada.

- **Tecla COPY:** Usada para impressão dos dados da tela. Pressionando SHIFT+COPY, pode-se salvar ou imprimir a imagem da tela. Pode-se usar impressora interna, GP-IB interface, disquete, MO ou SCSI externo como destino do arquivo.
- **Tecla FILE:** Mostra o menu usado para salvar, carregar ou executar operações em arquivos no drive de disquete, disco MO, ou dispositivo SCSI externo.
- **Tecla MISC:** Indica o menu para selecionar a opção GO/NO-GO, a inteface GP-IB, os ajustes da configuração de sistema, a verificação do status de sistema, o ajuste da proteção de tela, e a função de auto-diagnóstico.

Tecla SHIFT+CLEAR: Apaga o estado remoto.

Tecla HELP: Liga ou desliga a janela de ajuda.

Tecla SHIFT: Usado para utilizar as funções marcadas em roxo no painel. Pressionando a tecla SHIFT o modo SHIFT é ativado, pressionando–a novamente, torna-se inativo. O modo SHIFT está selecionado quando o indicador localizado acima estiver aceso.

O Botão de movimento e o anel seletor são usados para ajustar valores numéricos, mover os cursores de medida, selecionar itens dos menus, e executar outras operações de seleção. O botão de movimento muda o valor em passos fixos, quando é girado. Com o anel seletor, o tamanho do passo aumenta mais rapidamente enquanto o anel é girado.



Figura I.9. Vista frontal da tela de medição com seus diversos parâmetros de status.

Todas as medições que são executadas pelo equipamento são registradas em sua tela de visualização. A Figura I.9 ilustra uma tela de medição com os seus principais indicadores de status de parâmetros. Por intermédio da numeração inserida na Figura I.9., tem-se as seguintes indicações:

- 1. V/DIV: Indica a sensibilidade do eixo de tensão do canal selecionado.
- Modo de Aquisição: Indica quando o modo de aquisição que está sendo utilizado.
- Posição da Barra na Tela: Indica as posições de trigger e de zoom, conforme mostrados na ilustração da Figura I.10.



Figura I.10. Ilustração da posição da barra na tela.

4. T/DIV, Taxa de Amostragem: A taxa de amostragem varia de acordo com o ajuste T/DIV e o tamanho do registro.

- 5. Nível Ground: Indica a posição do nível de terra.
- 6. Posição Vertical: Indicador de posicionamento vertical.
- 7. Formato do display: A forma de onda mostrada na tela pode ser dividida em 1, 2,
- 3, 4, 6 ou 8 seções.
- 8. Nível de Trigger: Indicador da posição de ocorrência de trigger.
- 9. Estado de Aquisição: Corresponde a um dos seguintes status:

Running: aquisição está em andamento.

Stopped: aquisição está interrompida.

Auto Calibration: auto calibração.

Waiting for trigger: aguardando trigger.

10. Número de Aquisições: Indica o número de aquisições executadas é mostrado.

11. Comentário: Indica o comentário que será adicionado aos dados das telas que estiverem sendo exportadas, por exemplo, para a impressora interna.

12. Data/Hora: Mostra a data e hora.

13. Teclas de Menu: Altera os formatos dos procedimentos computacionais gráficos do equipamento.

14. Data/Hora da Conclusão: Indica o horário da finalização da aquisição de dados.

I.3 Procedimentos de Inicialização e Interrupção de Aquisição

Os procedimentos de inicialização e interrupção de uma aquisição podem ser realizados de várias formas. Os três principais métodos que são utilizados para iniciar e interromper uma aquisição de dados são os seguintes:

1. Usando a tecla de START/STOP: Os dados são continuamente adquiridos e exibidos de acordo com o modo de Trigger.

2. Usando a tecla de menu "Single Start" no modo ACQ: Pressionando as teclas para alterar o modo Trigger para normal. Quando um Trigger é ativado, o tamanho do registro de dados específico é uma vez adquirido e a forma de onda é exibida.

3. Usando a tecla de menu "Log Start" no modo ACQ: Pressionando as teclas para desabilitar o modo Trigger. O tamanho do registro de dados específico é uma vez adquirido e a forma de onda é exibida.

Quando a exibição está em modo de rolagem, as operações "Single Start" ou "Log Start" são dadas como se segue.

Apertando a tecla de menu "*Single Start*", o modo de Trigger é fixado para modo Normal. Depois de aquisitar a quantidade de dados especificada a partir da ativação do Trigger, a exibição da forma de onda é interrompida.

Apertando a tecla de menu "Log Start", o modo de Trigger é desabilitado. Depois de aquisitar a quantidade de dados especificada, a exibição da forma de onda é interrompida.

Iniciando e interrompendo enquanto a aquisição está em andamento

Interrompendo a aquisição, interromperão também temporariamente a acumulação de dados. Recomeçando a aquisição irá também recomeçar a acumulação a partir do ponto o qual a aquisição foi paralisada.

Iniciando e interrompendo a aquisição durante os Modos Averaging ou Sequential

Interrompendo uma aquisição também irá interromper o processamento dos dados. Recomeçando uma aquisição irá iniciar, do zero, o processamento dos dados.

Fixando o modo de aquisição da forma de onda ao ligar-se o aparelho

Pode-se selecionar ou não começar uma aquisição de forma de onda quando o interruptor de energia for ligado. Por exemplo, pode-se fixar este modo para ON caso se queira começar a aquisição de forma de onda quando o aparelho é ligado após uma queda de energia.

Anexo II – Detalhes do Alimentador de Distribuição de Energia Elétrica

Os ensaios experimentais foram todos realizados no Alimentador 30 da Subestação Rio Claro 03, situada na cidade de Rio Claro – SP, entre os dias 18 e 20 de maio de 2004. Os registros dos sinais de corrente e tensão foram realizados através de dois oscilógrafos Yokogawa, linha DL 708 E, modelo 7018020-1-D-HF/M2/C8/G2/F2, sendo que um oscilógrafo ficou posicionado na subestação Rio Claro 03 e o outro no próprio local de ocorrência das faltas. Os detalhes envolvendo as características e funcionalidades desses equipamentos são detalhadamente abordados no capítulo anterior. A Tabela II.1 mostra detalhes de identificação do alimentador piloto.

Denominação do Alimentador	Alimentador 30		
Origem do Alimentador	Subestação Rio Claro 03		
Cidade do Alimentador	Rio Claro – SP		
Tipo do Alimentador	Aéreo, Trifásico, Sem Condutor Neutro, Ramificado.		
Tensão Nominal	13,8 kV – 60 Hz		
Trechos Troncos	Trechos 1-15a → condutores CAA 336 MCM Trechos 16-42 → condutores CAA 2/0 AWG		
Trechos Ramais	Condutores CAA 2 AWG		
Empresa Proprietária	ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S/A		

 Tabela II.1.
 Identificação do alimentador Piloto.

As informações pertinentes as características do transformador de potência suprindo o alimentador piloto são apresentadas na Tabela II.2.

Potência Nominal	25/33.3 MVA	
Origem do Alimentador	Subestação Rio Claro 03	
Tensão Nominal	138 – 3,8 kV	
Tipo de Ligação	$Y_a - Y_a - D$	
Impedância	10,5 – 13,9 % (Primário – Secundário)	
Aterramento do Lado BT	Direto	

Tabela II.2. Identificação do transformador de potência.

Em referência as potências de curto-circuito do sistema a Tabela II.3 descreve os valores associados as mesmas.

Local	Primário do Transformador da SE Rio Claro 03		
P _{CC-3F}	1613,8 MVA (-71,5º)		
P _{CC-1F}	1093,2 MVA (-75,2º)		
Potência de Base	100 MVA		
Tensão de Base	138 kV		

Tabela II.3. Identificação das potências de curto-circuito.

Os parâmetros referentes as características dos condutores, tais como a resistência por unidade de comprimento (*Ohms/km*) e a indutância por unidade de comprimento em (*H/km*), são mostrados na Tabela II.4.

Condutor	R ₊ (Ω)	R ₀ (Ω)	Χ ₊ (Ω)	Χ ₀ (Ω)
2 AWG	1,0500	1,2300	0,5290	2,0980
2/0 AWG	0,5560	0,7500	0,5130	2,0770
336 MCM	0,1900	0,3680	0,3960	1,9600

 Tabela II.4.
 Parâmetros referentes as características dos condutores.

O carregamento típico da corrente de fase na origem do alimentador piloto é ilustrado por intermédio da Figura II.1.



Figura II.1. Carregamento típico da corrente de fase na origem do alimentador piloto.

Anexo III – Execução das Atividades de Pré-ensaios

O período de pré-ensaios foi de fundamental importância, pois todas as correções e definições foram então consolidadas.

Durante os pré-ensaios a chave corta-circuito localizada na saída do ramal destinado aos ensaios estava aberta, porém, os testes de manipulação dos condutores foram feitos utilizando procedimentos de linha viva.

A execução dos pré-ensaios foi de fundamental importância para a definição dos procedimentos de ensaio, dos equipamentos a serem empregados e das posições de cabo ao solo que deveriam ser observadas durante a execução dos ensaios experimentais. Todos esses aspectos foram registrados por fotografias e são descritos neste anexo.

III.1 SIMULAÇÃO DE FALTAS (CURTOS-CIRCUITOS) FASE-TERRA

Os procedimentos adotados durante a simulação dos ensaios de faltas (curtos-circuitos) fase-terra fizeram uso da equipe de linha viva que foram acompanhados pela Equipe de Manutenção de Equipamentos Especiais, pelos responsáveis técnicos das áreas de proteção do sistema, pelos técnicos da área de operação, pelos técnicos de manutenção de rede e por técnicos da área de segurança do trabalho.

O procedimento básico para a realização desse tipo de ensaio constituiu na manipulação do condutor de fase utilizado para simular a falta. O referido condutor foi sustentado por meio de uma roldana fixada na cruzeta substituindo a cadeia de isolador uma vez que se tratava de um poste de fim de linha. Na sua extremidade, o condutor foi preso por uma corda isolante utilizada, geralmente, nos serviços de linha viva e a sustentação mecânica do cabo ficou a cargo do eletricista situado no cesto do caminhão de linha viva. Para ilustrar adequadamente tal procedimento, apresenta-se na Figura III.1 uma foto panorâmica da situação ora comentada.



Figura III.1. Manipulação do condutor durante a simulação do curto fase-terra.

Para detalhar o sistema de roldana empregado ao longo dos pré-ensaios, bem como durante os ensaios, apresenta-se na Figura III.2 uma foto destacando o referido sistema.



Figura III.2. Detalhe da corda e roldana durante a manipulação do condutor na simulação do curto fase-terra.
Para facilitar a manipulação da corda durante os ensaios, a corda foi atravessada por uma cinta fixada no poste a uma altura de aproximadamente de um metro e vinte centímetros conforme apresentado na Figura III.3.



Figura III.3. Detalhes da cinta de passagem; (a) Fixação da cinta; (b) Inserção da corda pela cinta de passagem.

Após a passagem pela cinta, a corda foi segura por dois eletricistas que controlaram a porção de cabo em contato com o solo além de auxiliar no restabelecimento do condutor a posição original conforme se destaca por meio da Figura III.4.



Figura III.4. Eletricista sustentando o condutor fase durante os pré-ensaios de faltas fase-terra.

A queda do cabo ao solo era executada soltando-se a corda de sustentação do cabo e o próprio peso do condutor era responsável por dar início a sua queda, simulando dessa forma uma situação real de falta fase-terra com condutor sobre o solo. Para ilustrar a dinâmica de queda do condutor sobre o solo, apresenta-se na Figura III.5(a) o condutor sob ensaio em queda livre instantes depois de sua soltura, na seqüência, na Figura III.5(b) o referido cabo repousando sobre o solo.



Figura III.5. Simulação de queda de condutor ao solo; (a) Cabo em queda livre; (b) Cabo repousado ao solo após a queda.

Inúmeras simulações de queda de condutor ao solo foram realizadas com o objetivo de se determinar o local onde o cabo tocaria o solo, bem como para se verificar a coerência das medidas de seguranças planejadas.

III.2 DELIBERAÇÕES E CRITÉRIOS

Durante os pré-ensaios, além da preparação com a linha desenergizada, analisou-se e buscou-se tomar as decisões, critérios e posicionamentos que garantissem efetivamente os ensaios e a segurança de todos os envolvidos, inclusive dos consumidores conectados no Alimentador 30 da ELEKTRO. Diante disso alguns critérios foram deliberados em reunião conjunta. Dentre as referidas deliberações pode-se destacar a maneira como os ensaios seriam iniciados. Assim, ficou acordado que o cabo somente seria solto após uma sinalização sonora (buzina) que ficaria num local estratégico e audível a todos. O acionamento desta buzina só ocorreria quando todos os responsáveis definidos previamente confirmassem e liberassem suas tarefas. Entre estes operadores pode-se citar o operador do oscilógrafo no local de ensaio e da subestação, o operador do religador automático no local de ensaio, o responsável pela equipe da linha viva, o responsável pela Segurança do Trabalho, o Responsável pela Defesa Civil, o Responsável pela isolação do local de queda do cabo e o responsável pela posição segura das demais pessoas envolvidas.

Outros aspectos abordados em reunião após os pré-ensaios foi o levantamento de todas as necessidades, contatos internos e externos a ELEKTRO, apoios, materiais de qualquer natureza, entre outros, de maneira que se definiu o respectivo responsável para cada item citado.

Anexo IV – Ajustes dos Equipamentos de Proteção



GRUPO DE AJUSTES 1



GRUPO DE AJUSTES 2

0,01 +

1

10

100

1.000 Corrente (A)^{10.000}

GRUPO DE AJUSTES 3



Coordenograma RCT30 x RL01205(W&B) x RL Pto da Falta

GRUPO DE AJUSTES 4



Coordenograma RCT30 x RL01205(W&B) x RL Pto da Falta