UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TESE DE DOUTORADO

UMA CONTRIBUIÇÃO À ESTIMATIVA DE INDICADORES DE DESEMPENHO DO ESTADO OPERACIONAL DE CABOS ISOLADOS SOB A AÇÃO DAS ARBORESCÊNCIAS

FERNANDO NOGUEIRA DE LIMA

SETEMBRO
2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UMA CONTRIBUIÇÃO À ESTIMATIVA DE INDICADORES DE DESEMPENHO DO ESTADO OPERACIONAL DE CABOS ISOLADOS SOB A AÇÃO DAS ARBORESCÊNCIAS

Tese de Doutorado submetida à Universidade Federal de Uberlândia por Fernando Nogueira de Lima como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Banca Examinadora:

José Carlos de Oliveira, PhD – Orientador (UFU)
Darizon Alves de Andrade, PhD – Co-Orientador (UFU)
Luis Carlos Origa de Oliveira, Dr (UNESP)
Mário Fabiano Alves, PhD (PUCMG)
José Wilson Resende, PhD (UFU)
Antonio Carlos Delaiba, Dr (UFU)

UMA CONTRIBUIÇÃO À ESTIMATIVA DE INDICADORES DE DESEMPENHO DO ESTADO OPERACIONAL DE CABOS ISOLADOS SOB A AÇÃO DAS ARBORESCÊNCIAS

Fernando Nogueira de Lima

Tese apresentada por Fernando Nogueira de Lima à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD (Orientador) – UFU	Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

À minha esposa Zoraidy, às minhas
filhas Tatianne e Christiane e ao
meu filho Rafael.
Pelo amor, dedicação e estímulos
sempre recebidos.

AGRADECIMENTOS

Em especial ao professor José Carlos de Oliveira, pela amizade, confiança e ensinamentos recebidos.

Ao professor Darizon Alves de Andrade, pelas importantes contribuições e aprendizado.

À senhora Marly Junqueira, pela presteza no encaminhamento de todos os assuntos vinculados à secretaria de Pós-Graduação.

Ao professor Antonio de Pádua Finazzi, pelo apoio no desenvolvimento de programas computacionais.

Ao professor Bismarck Castillo Carvalho, pelas diversas contribuições técnicas.

Ao engenheiro Ivandro Antonio Bacca, pela colaboração na utilização do software ATPDraw.

Ao engenheiro Carlos Eduardo Tavares e à sua esposa, arquiteta Angélica Pereira Marsicano Tavares, pelo apoio e generosidade no compartilhamento de seus conhecimentos.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMT, pelo incentivo e contribuições eventuais.

A CAPES por ter concedido suporte financeiro a esta pesquisa.

À minha família, pela compreensão e incentivo ao longo da realização deste trabalho.

RESUMO

Lima, F. N. Uma Contribuição à Estimativa de Indicadores de Desempenho do Estado Operacional de Cabos Isolados sob a Ação das Arborescências FEELT-UFU, Uberlândia, 2008, 208 páginas.

As questões relacionadas com a qualidade de energia elétrica representam, efetivamente, desafios crescentes para o setor de engenharia elétrica. No que tange ao fornecimento de energia com qualidade e confiabilidade, um dos problemas consiste na descontinuidade não programada de suprimento devido à ocorrência de falhas em componentes diversos da instalação, particularmente aqueles relativos a defeitos na isolação nos cabos de potência, responsáveis por parcela significativa das paradas intempestivas de consumidores. Uma das principais causas da degradação da isolação de cabos de potência é o fenômeno conhecido por arborescência que provoca o envelhecimento precoce dos cabos elétricos, podendo ocasionar o rompimento do material dielétrico. Diversos estudos e métodos diagnósticos vêm sendo desenvolvidos para a detecção dessas arborescências objetivando informações sobre o nível de degradação da camada isolante, com vistas à manutenção preventiva e acompanhamento da sua vida útil, predizendo as condições operacionais da isolação dos cabos elétricos. É nesse contexto que se insere a presente tese, a qual está direcionada para o desenvolvimento de uma metodologia para identificação do estado operacional da camada isolante, com base na análise da corrente de fuga. A técnica de modelagem empregada fundamenta-se no domínio do tempo e utiliza a decomposição em séries de FOURIER para identificação da contribuição harmônica dos sinais envolvidos no estudo, a partir dos quais são determinados indicadores de estado que são utilizados para o estabelecimento de diagnósticos da severidade da degradação.

Palavras-Chave

Arborescências, cabos de energia, corrente de fuga, deterioração, diagnóstico.

ABSTRACT

Lima, F. N. A Contribution to the Estimation of Indicators of the Operational State of Insolated Power Cables with Water Trees FEELT-UFU, Uberlândia, 2008, 208 pp.

Distinct matters related to power quality challenges represent areas of growing interest for the electric engineering community. By considering the subject of power supply with quality and reliability, the continuity of the supply appears as a very important task to be fulfilled. As a matter of fact, the occurrence of failures in components and installations, in special those related to the misoperation of power cables, emerges as a relevant point to be tackled. Within this context arises the insulation degradation due to the known water treeing phenomenon. This effect has been reported as a cause for precocious aging of insolated cables and subsequent impacts upon the dielectric material. Focusing this subject, this thesis aims at presenting a methodology for estimating the actual operational conditions of a given insolated cable by the loss current analysis. The technique here employed is based upon time domain representation and uses the Fourier decomposition for identification of the harmonic contribution of the currents involved from which the methodology provides means to establishing insulation state indicators so as to forecast information about the cable life expectance conditions.

Keywords

Water trees, power cables, loss current, degradation, diagnostic

SUMÁRIO

Capítulo I

Introdução Geral

1.1 – Considerações iniciais 1
1.2 – O contexto da presente tese 3
1.3 – Estado da arte 6
1.4 – As contribuições desta tese 7
1.5 – A estrutura da tese 7

Capítulo II

Deterioração de Cabos Isolados

2.1 – Considerações iniciais 10
2.2 – O polietileno reticulado: Aplicação como material de isolação em cabos de energia 11
2.3 – Fenômenos responsáveis pela deterioração de cabos isolados 17
2.4 – O fenômeno de degradação por arborescências 20
2.5 – A morfologia das arborescências 23
2.6 – O processo de geração das arborescências 25
2.7 – Fatores de influência 32
2.8 – Propagação de arborescências elétricas a partir de arborescências em água. 38
2.9 – Considerações finais. 46

Capítulo III

Métodos e indicadores de estado

3.1 – Considerações iniciais 47
3.2 – Métodos diagnósticos *off-line* 48
3.3 – Métodos diagnósticos *on-line*. 54
3.4 – Diagnóstico utilizando dois indicadores 73
3.5 – Considerações Finais 75

Capítulo IV

Modelagem de cabos elétricos degradados por arborescências

4.1 – Considerações iniciais 76
4.2 – Modelos para representação das arborescências em cabos elétricos 77
4.3 – Proposta de modelo matemático para o fenômeno de arborescências em cabos 86
4.4 – Considerações Finais 102

Capítulo V

Validação do modelo proposto

5.1 – Considerações iniciais 103
5.2 – Medição experimental da componente ativa da corrente de fuga 105
5.3 – Metodologia para modelagem da degradação para obtenção computacional da parcela ativa da corrente de fuga 110
5.4 – Considerações finais 133

Capítulo VI

Proposta de metodologia para diagnóstico de cabos isolados

6.1 – Considerações iniciais 135
6.2 – Análise da contribuição harmônica presente na corrente de fuga 136
6.3 – Uma proposta de modelo equivalente para representar o isolamento de um cabo com arborescência. 144
6.4 – Desenvolvimento de modelos equivalentes para estudos com degradação não uniforme 145
6.5 – Simulações de degradações não uniformes 151
6.6 – Proposta de metodologia para identificar o nível de degradação de cabos isolados submetidos a sinais de alimentação com harmônicos. 167
6.7 – Validação dos processos propostos através de ensaios laboratoriais 172
6.8 – Proposta de metodologia para diagnóstico de cabos isolados 188
6.9 – Considerações finais 193

Capítulo VII

Conclusões gerais

CONCLUSÕES GERAIS 195

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 201

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo da estrutura molécula do polietileno. 13
Figura 2.2 – Representação de cadeias macromoleculares. (a) Cadeia sem ramificação; (b) cadeia com ramificações e (c) cadeia reticulada ou com ligações cruzadas ou, ainda, tridimensional. 14
Figura 2.3 – Foto ilustrativa de um cabo de média tensão isolado com XLPE..... 15
Figura 2.4 – Foto ilustrativa da degradação por arborescência. 21
Figura 2.5 — Fotografias típicas de arborescências cabos XLPE de: a) 12 kV, b) 52 kV e ... 25
c) 145 kV, que sofreram falhas em serviço devido à degradação [23]. 25
Figura 2.6 – Conceito eletrofísico da geração e crescimento das arborescências. 28
Figura 2.7 – Arborescência do tipo vented-tree. 30
Figura 2.8 – Arborescência do tipo bow-tie-tree. 30
Figura 2.9 – Falhas na camada de isolação devido à presença de arborescências. 31
Figura 2.10 – Relação entre arborescência e estresse elétrico: a) tamanho das arborescências; b) número de arborescências. 35
Figura 2.11 – Relação entre o tamanho médio das arborescências e a freqüência..... 36
Figura 2.12 – Identificação da área de uma arborescência. 39
Figura 2.13 – Tensão inicial versus área da arborescência. 40
Figura 2.14 – Efeito da remoção da tensão na arborescência elétrica. 41
Figura 2.15 – Influência da reaplicação da tensão de alimentação..... 41
Figura 2.16 – Etapas da degradação: a) etapa inicial; b) etapa de crescimento da arborescência em água e c) surgimento da arborescência elétrica..... 43
Figura 2.17 – Arborescências elétricas originadas em bow-tie-tree..... 44
Figura 3.1 – Circuito para medição da corrente contínua de fuga [40]. 49
Figura 3.2 – Polarização, despolarização e método da tensão residual [40]..... 51
Figura 3.3 – Curvas características da tensão residual em função do tempo:..... 52
A – Cabo novo; B, C, D – Cabos deteriorados [42]. 52
Figura 3.4 – Circuito para medição da tgδ [41]..... 56
Figura 3.5 – tgδ on-line e tgδ off-line [48]..... 57
Figura 3.6 – Representação da isolação do cabo [49]..... 58
Figura 3.7 – Diagrama fasorial representativo da tensão e da corrente de fuga..... 59
Figura 3.8 – Princípio da formação da componente contínua da corrente de fuga [48]. 62
Figura 3.9 – Tensão aplicada ao cabo e correspondente corrente de fuga na presença de arborescências..... 64
Figura 3.10 – Relação entre o comprimento da arborescência e componente CC [51]..... 65
Figura 3.11 – Corrente de fuga ativa para diferentes níveis de tensão [61]..... 67
Figura 3.12 – Correlação entre o DHT_I e o comprimento das arborescências da corrente de fuga ativa [56]..... 68
Figura 3.13 – Correlação entre a tgδ e o comprimento das arborescências da corrente de fuga [56]. 69
Figura 3.14 – Correlação entre o ângulo de fase do terceiro harmônico e o tamanho das arborescências [55]. 71
Figura 3.15 – Correlação entre o comprimento das arborescências e o ponto de ruptura da isolação [55]. 71
Figura 3.16 – Curva para diagnóstico do nível de degradação [54]. 72
Figura 4.1 – Representação de uma amostra de cabo degradado. 78
Figura 4.2 – Circuito equivalente de uma amostra de cabo isolado degradado. 78

Figura 4.3 – Característica V-I na isolação degradada de um cabo elétrico [55]. 83
Figura 4.4 – Tensão e corrente medidos numa amostra da isolação de um cabo degradado [55]. 84
Figura 4.5 – Modelo representativo da isolação de um cabo com a presença de arborescências. 85
Figura 4.6 - Curva característica V-I do diodo na região de polarização direta. 87
Figura 4.7 - Curva característica V-I das arborescências [55]. 87
Figura 4.8 - Circuito equivalente do isolamento de um cabo, com arborescências. 92
Figura 4.9 – Característica V-I das arborescências: a) referência b) modelo proposto. 93
Figura 4.10 – Corrente de fuga no domínio do tempo. 94
Figura 4.11 – Espectro de freqüência da corrente de fuga. 94
Figura 4.12 – Curvas característica V-I das arborescências: a) referência b) modelo proposto. 95
Figura 4.13 – Circuito para medição da corrente de fuga em fase com a tensão [54]. 96
Figura 4.14 – Circuito equivalente da corrente de fuga: a) amostra sem degradação b) amostra com degradação. 97
Figura 4.15 – Corrente de perdas por efeito Joule. 97
Figura 4.16 – Espectro de freqüência da corrente de perdas por efeito Joule. 98
Figura 4.17 – Correntes presentes na camada isolante. 99
Figura 4.18 – Corrente de fuga: a) modelo referência [55] b) modelo proposto. 100
Figura 4.19 – Oscilogramas da tensão de alimentação e da corrente de fuga. 101
Figura 4.20 – Característica V-I das arborescências. 101
Figura 5.1 - Circuito utilizado para a medição da componente ativa da corrente de fuga [65-66]. 105
Figura 5.2 - Componentes da corrente envolvidas no circuito de medição [66]. 107
Figura 5.3 - Circuito utilizado para medição da corrente de fuga ativa [69]. 108
Figura 5.4 – Correntes em amostras de cabos com diferentes níveis degradação [54]. 109
Figura 5.5 - Circuito equivalente do isolamento de um cabo apresentando arborescências. . 111
Figura 5.6 – Correntes de fuga medida e calculada considerando o harmônico de ordem 3: a) Formas de onda b) Espectrograma. 114
Figura 5.7 – Correntes de fuga medida e calculada considerando os harmônicos de ordens 3 e 5: a) Formas de onda b) Espectrograma. 115
Figura 5.8 – Corrente de fuga medida e calculada considerando os harmônicos de ordens 3, 5 e 7: a) Forma de onda b) Espectrograma. 116
Figura 5.9 – Correntes de fuga medida e calculada considerando o harmônico de ordem 3: a) Formas de onda b) Espectrograma. 118
Figura 5.10 – Correntes de fuga medida e calculada considerando: a) harmônico de ordem3 b) harmônicos de ordens 3 e 5. 119
Figura 5.11 – Corrente de fuga medida e calculada: a) φ = 0° b) φ = 30° c) φ = 60° e φ =90°. 120
Figura 5.12 – Corrente de fuga medida e calculada: harmônicos de ordens 3 e 5 121
Figura 5.13 – Corrente de fuga ativa medida e calculada considerando o harmônico de ordem 3: a) Forma de onda b) Espectrograma. 122
Figura 5.14 – Corrente de fuga ativa medida e calculada considerando os harmônicos de ordens 3, 5, 7 e 9: a) Forma de onda b) Espectrograma. 123
Figura 5.15 – Correntes de fuga e componentes na camada isolante considerando os harmônicos de ordens 3, 5, 7 e 9). 124
Figura 5.16 - Formas de onda das tensões no ramo representativo do processo da degradação. 125
Figura 5.17 - Característica V-I das arborescências – computacional. 126

Figura 5.18 – Correntes de fuga medida e calculada: a) Forma de onda b) Espectrograma.. 127
Figura 5.19 – Corrente de fuga reativa: a) Forma de onda b) Espectrograma. 128
Figura 5.20 - Correntes de fuga total: a) Forma de onda b) Espectrograma. 129
Figura 5.21 - Formas de onda das tensões no ramo representativo do processo da degradação. 129
Figura 5.22 - Característica V-I das arborescências – computacional..... 130
Figura 5.23 – Correntes de fuga ativa medida e calculada: a) Forma de onda b) Espectrograma. 131
Figura 5.24 – Corrente de fuga reativa: a) Forma de onda b) Espectrograma. 131
Figura 5.25 – Corrente de fuga total: a) Forma de onda b) Espectrograma..... 132
Figura 5.26 - Formas de onda das tensões no ramo representativo do processo da degradação. 132
Figura 5.27 - Característica V-I das arborescências – computacional..... 133
Figura 6.1 – Formas de onda do terceiro harmônico da corrente de fuga: total e da componente em fase com a tensão..... 137
Figura 6.2 – Formas de onda do terceiro harmônico da corrente de fuga: total, componente reativa e a diferença entre estas. 138
Figura 6.3 – Composição da contribuição harmônica reativa. 140
Figura 6.4 – Composição da contribuição harmônica ativa. 141
Figura 6.5 – Correntes harmônicas que estão presentes na isolação sob estudo. 141
Figura 6.6 – Correntes de fuga presentes na isolação (Nh=7)..... 142
Figura 6.7 – Decomposição das correntes de fuga ativa e reativa..... 143
Figura 6.8 - Circuito equivalente do isolamento de um cabo, com arborescências..... 144
Figura 6.9 – Circuito equivalente representativo de uma amostra degradada..... 146
Figura 6.10 – Blocos representativos das amostras de cabos com diferentes graus de degradação: a) sem degradação; b) 3kV/100h; c) 3kV/300h e d) 3kV/500h. 147
Figura 6.11 – Determinação da corrente de fuga: a) Circuito utilizado; b) Formas de Onda. 148
Figura 6.12 – Decomposição da corrente de fuga: a) Ativa e b) Reativa. 149
Figura 6.13 – Degradação não uniforme: a) Circuito utilizado; b) Corrente de fuga e c) Espectrograma da corrente de fuga..... 150
Figura 6.14 – Circuito equivalente para simular degradação não uniforme: “b” e “c”. 151
Figura 6.15 – Formas de onda das correntes de fuga – Caso A. 152
Figura 6.16 – Espectrograma relacionado com a corrente de fuga total da figura 6.15. 153
Figura 6.17 – Formas de ondas das correntes ativas – Caso A. 154
Figura 6.18 – Formas de ondas da corrente de fuga em fase com a tensão – Caso A: a) Referência; b) Calculado..... 155
Figura 6.19 – Circuito utilizado para simular degradação não uniforme: “c” e “d”. 158
Figura 6.20 – Formas de ondas das correntes de fuga – Caso B. 158
Figura 6.21 – Espectrograma relacionado com a corrente de fuga total da figura 6.20. 159
Figura 6.22 – Formas de ondas das correntes ativas – Caso B. 160
Figura 6.23 – Formas de ondas da corrente de fuga em fase com a tensão – Caso B: a) Referência; b) Calculado..... 161
Figura 6.24 – Circuito equivalente de um cabo degradado não uniformemente..... 164
Figura 6.25 – Forma de onda da corrente de fuga total – Caso C. 165
Figura 6.26 – Espectrograma da corrente de fuga total – Caso C. 165
Figura 6.27 – Formas de onda das correntes de fuga – Caso C..... 166
Figura 6.28 – Tensão de Alimentação: a) Forma de onda; b) Espectro de freqüência..... 169
Figura 6.29 – Corrente de fuga: a) Forma de onda; b) Espectro de freqüência considerando a contribuição harmônica da tensão de alimentação e das arborescências..... 170

Figura 6.30 – Corrente de fuga: a) Forma de onda; b) Espectro de freqüência considerando exclusivamente a contribuição harmônica devido às arborescências. 171
Figura 6.31 – Arranjo experimental utilizado para as medições das correntes de fuga. 174
Figura 6.32 – Esquema utilizado para aplicação de tensão nas amostras de cabo para amostragem da corrente de fuga. 175
Figura 6.33 – Fotografia do arranjo laboratorial utilizado para as medições..... 175
Figura 6.34 – Detalhe da conexão para medida da corrente de fuga. 176
Figura 6.35 – Detalhe de uma medição de corrente de fuga e tensão aplicada. 176
Figura 6.36 – Corrente de fuga e respectivo conteúdo harmônico - Amostra A – Tensão aplicada de 8kV. 178
Figura 6.37 – Corrente de fuga e respectivo conteúdo harmônico - Amostra B – Tensão aplicada de 8kV. 179
Figura 6.38 – Corrente de fuga e respectivo conteúdo harmônico - Amostra C – Tensão aplicada de 8kV. 180
Figura 6.39 – Formas de onda das correntes de fuga da amostra A. 182
Figura 6.40 – Forma de onda da corrente de fuga e: a) componente reativa; b) componente ativa. 183
Figura 6.41 – Formas de onda das correntes de fuga da amostra B. 184
Figura 6.42 – Forma de onda da corrente de fuga e: a) componente reativa; b) componente ativa. 184
Figura 6.43 - Formas de onda das correntes de fuga da amostra C. 185
Figura 6.44 – Forma de onda da corrente de fuga e: a) componente reativa; b) componente ativa. 185
Figura 6.45 - Avaliação do isolamento por indicador e classe. 188
Figura 6.46 – Metodologia para determinação dos indicadores de estado. 192

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tempo para ruptura e número de arborescências em amostras de cabos envelhecidas a temperatura ambiente. 45
Tabela 2.2 – Tempo para ruptura e número de arborescências em amostras de cabo envelhecidas a 60°C. 45
Tabela 3.1 – Critérios de avaliação da isolação pela tgδ em cabo submetido a 3,8kV. 56
Tabela 3.2 – Critérios para diagnosticar a resistência de isolação em cabos XLPE. 61
Tabela 3.3 – Critérios para diagnóstico da isolação em cabos classe 6,6kV. 65
Tabela 3.4 – Critérios para diagnóstico da isolação em cabos classe 10kV. 66
Tabela 3.5 – Critérios para diagnóstico da isolação em cabos classe: 6,6kV. 73
Tabela 3.6 – Comparação do desempenho dos diagnósticos 74
Tabela 5.1 – Resultados considerando o terceiro harmônico. 115
Tabela 5.2 – Resultados considerando os harmônicos de ordens 3 e 5. 116
Tabela 5.3 – Resultados considerando os harmônicos de ordens 3, 5 e 7. 117
Tabela 5.4 – Resultados considerando o terceiro harmônico. 118
Tabela 6.1 – Síntese dos módulos e fases das correntes do Caso A. 153
Tabela 6.2 – Síntese dos módulos e fases do caso A. 155
Tabela 6.3 – Indicadores de estado – Caso A. 156
Tabela 6.4 – Síntese dos módulos e fases do caso B. 159
Tabela 6.5 – Síntese dos módulos e fases do caso B. 161
Tabela 6.6 – Indicadores de estado – Caso B. 162
Tabela 6.7 – Síntese dos módulos e fases do Caso C. 166
Tabela 6.8 - Características das amostras de cabo utilizadas nos ensaios. 176
Tabela 6.9 - Indicadores de estado. 186

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	–	Ângulo de perdas dielétricas
δ_{max}	–	Máximo ângulo de perdas dielétricas admissível
$tg\delta$	–	Fator de perdas dielétricas
$tg\delta_{max}$	–	Máximo fator de perdas dielétricas admissível
I_f	–	Corrente de fuga total
I_p	–	Parcela ativa da corrente de fuga
I_c	–	Parcela reativa da corrente de fuga
X_C	–	Reatância capacitiva
V_1	–	Tensão fase-neutro aplicada ao cabo
R	–	Resistência da isolação
P	–	Potência ativa
P_{max}	–	Máxima potência ativa admissível
i_{cc}	–	Componente contínua da corrente de fuga
v	–	Tensão de alimentação ou de suprimento
V_m	–	Valor máximo da tensão de alimentação ou de suprimento
V_{rms}	–	Valor eficaz de tensão
ω	–	Freqüência angular
i	–	Corrente de fuga
n	–	Ordem do harmônico
θ_n	–	Ângulo de fase do harmônico de ordem n
θ_1	–	Ângulo de fase da componente fundamental
I_n	–	Valor máximo da corrente harmônica de ordem n
I_1	–	Valor máximo da corrente fundamental
C_0	–	Capacitância nominal da isolação
R_0	–	Resistência nominal da isolação

C_r	–	Capacitância residual
ΔC_0	–	Incremento da capacitância nominal devido à degradação
i_{arb}	–	Corrente de fuga devido à degradação por arborescência
I_D	–	Corrente do diodo semicondutor
V_D	–	Tensão aplicada à junção semicondutora
I_s	–	Corrente de saturação reversa
k	–	Constante função de parâmetros intrínsecos à construção do diodo
k_{arb}	–	Constante relacionada com o grau de degradação do cabo isolado
v_d	–	Tensão nos diodos representativos da região deteriorada
v_r	–	Tensão na resistência representativa da região degradada
v_{cr}	–	Tensão residual na região não degradada
i_d	–	Corrente que circula em uma amostra de cabo degradada
i_n	–	Corrente que circula em uma amostra de cabo não degradada
D_1, D_2	–	Diodos semicondutores
i_0	–	Corrente nominal de fuga
$i_{\Delta c0}$	–	Incremento de corrente de fuga de 50 Hz, devido à degradação
R_1, R_2	–	Resistências para identificação de nível de tensão
I_N	–	Vetor da corrente que circula em uma amostra não degradada
I_D	–	Vetor da corrente que circula em uma amostra degradada
N_1, N_2, N_3	–	Número de espiras
C_x	–	Capacitância representativa de uma amostra degradada
R_x	–	Resistência representativa de uma amostra degradada
I_x	–	Corrente representativa de uma amostra de cabo degradada
I_{xr}	–	Componente ortogonal ativa de I_x
I_{xc}	–	Componente ortogonal reativa de I_x
I_s	–	Corrente representativa de uma amostra não degradada
I_{s1}, I_{s2}	–	Correntes de ajuste para medição da corrente de fuga ativa
I_{s2}'	–	Parcela ativa da corrente de fuga medida

C_d – Capacitância da ponte capacitiva

R_d – Resistência da ponte capacitiva

C_s – Capacitância do circuito para medição da tgδ

R_s – Resistência do circuito para medição da tgδ

i_c – Componente fundamental capacitiva da corrente de fuga

i_r – Componente fundamental resistiva da corrente de fuga

i_h – Contribuição harmônica da corrente de fuga

V_{ef} – Valor eficaz da tensão de alimentação ou de suprimento

I_{ef} – Valor eficaz da corrente de fuga

I_{1ef} – Valor eficaz da componente fundamental da corrente de fuga

t – Tempo

f – Freqüência de operação

φ – Defasagem entre a contribuição harmônica total e a fundamental

R_{ad} – Resistência de adequação à não linearidade da degradação

R_{eq} – Resistência equivalente da isolação

C_{eq} – Capacitância equivalente da isolação

R_{eq_h} – Resistência equivalente da isolação devido aos harmônicos

C_{eq_h} – Capacitância equivalente da isolação devido aos harmônicos

i_{fuga_total} – Corrente de fuga total

i_{fuga_ativa} – Componente ativa da corrente de fuga

$i_{distorcida}$ – Corrente de fuga distorcida

$i_{f_fundamental}$ – Componente fundamental ativa e reativa da corrente de fuga

$i_{f_harmônicos}$ – Contribuição harmônica ativa e reativa da corrente de fuga

i_{h_c} – Corrente harmônica de natureza capacitiva

i_{h_r} – Corrente harmônica de natureza resistiva

i_{h_arb} – Corrente harmônica devido à degradação

d – Comprimento da amostra de cabo isolado

d_1 – Comprimento da região não degradada da amostra

d_2	–	Comprimento da região degradada da amostra
d_3	–	Comprimento da região degradada cheia de água
C_1	–	Capacitância da região não degradada
C_2	–	Capacitância da região degradada
G_2	–	Condutância da região degradada
q_1	–	Carga armazenada na região não degradada
q_2	–	Carga armazenada na região degradada
V_a - V_b	–	Diferença de potencial entre dois pontos
j	–	Densidade de corrente
j_{G2}	–	Densidade de corrente da camada degradada cheia de água
E	–	Campo elétrico
σ_0	–	Condutividade da camada degradada cheia de água
σ_{d3}	–	Condutividade da camada com vazios
ε_0	–	Permissividade dos espaços vazios na camada degradada
ε_{r1}	–	Permissividade da região não degradada
ε_{r2}'	–	Permissividade da região degradada
h	–	Dependência da condutância em função da tensão
S	–	Área do condutor
p	–	Polarização
dp	–	Depolarização
CC	–	Corrente contínua
CA	–	Corrente alternada
DHT_I	–	Distorção harmônica total de corrente
$DHT_{I\,max}$	–	Máxima distorção harmônica de corrente admissível
BD	–	Ponto de ruptura da camada isolante
$LiBr$	–	Sal Brometo de Lítio
$NaCl$	–	Sal Cloreto de Sódio
PVC	–	Cloreto de Polivinila

PE	–	Polietileno
EPR	–	Borracha Sintética de Etileno
XLPE	–	Polietileno reticulado
LDPE	–	Polietileno de baixa densidade
HDPE	–	Polietileno de alta densidade
LLDPE	–	Polietileno Linear de Baixa Densidade
MATLAB	–	*Matrix Laboratory*
ATP	–	*Alternative Transients Program*
ATPDraw	–	*Graphical Preprocessor to ATP*
OFDM	–	*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

CAPÍTULO I

Introdução geral

1.1 – Considerações iniciais

O acelerado crescimento do consumo de energia elétrica, tanto pelos setores produtivos como domésticos, tem originado uma série de problemas para a manutenção do fornecimento de energia com qualidade e confiabilidade. Como produto do próprio crescimento, condições adversas foram criadas, provocando, em muitos casos, a descontinuidade não programada de suprimento de energia devido à ocorrência de falhas em componentes diversos das instalações elétricas. Esse cenário tem exigido projetos de cabos e instalações com critérios cada vez mais rigorosos.

Em particular, com relação aos equipamentos utilizados para o transporte da energia elétrica, notadamente nas instalações abrigadas, defeitos em cabos de potência ocorrem com uma freqüência que constitui motivo de preocupação por parte de todos os agentes envolvidos nessa questão. Nos sistemas de distribuição de energia elétrica, comumente, a maioria das falhas é atribuída aos cabos de potência [1]. Levantamentos realizados por empresas do setor elétrico evidenciaram que defeitos na isolação de cabos representam parcela significativa de paradas intempestivas de consumidores, acarretando prejuízos de ordem econômica/financeira, além de possíveis violações dos padrões

mínimos de qualidade, estabelecidos pelos órgãos reguladores do setor elétrico brasileiro.

O transporte de energia elétrica em longas distâncias, tradicionalmente, tem sido realizado através de linhas aéreas. Contudo, em áreas urbanas com alta densidade populacional vem crescendo a utilização de cabos isolados, ensejando a realização de estudos, assim como o desenvolvimento de novas tecnologias que assegurem um melhor conhecimento sobre os fenômenos que comprometem a vida útil da isolação. Nessa perspectiva, merece destaque o acompanhamento das condições de operação e níveis de degradação desses cabos, com vistas a minimizar ou mesmo evitar as interrupções não programadas, eliminando, em decorrência disso, os prejuízos e desconfortos associados a essas interrupções.

Uma das causas de deterioração da isolação de cabos de potência é o fenômeno conhecido como arborescência em água ou simplesmente arborescência (*water tree*). Esse tipo de degradação foi identificado e relatado pela primeira vez na década de 60 [2], e desde então, tem crescido o interesse da comunidade científica, assim como das concessionárias de energia elétrica e dos fabricantes de cabos em relação a esse tema com o intuito de melhor entender a forma como se processa esse tipo de agressão e, em conseqüência, identificar as maneiras de minimizar seus efeitos ou ainda, monitorar a sua evolução no isolante.

Nesse sentido, a presente tese se propõe a desenvolver um modelo matemático para representar a corrente de fuga que flui através da camada isolante de um cabo apresentando degradação por arborescências, com o intuito de estabelecer uma metodologia que possibilite o diagnóstico das condições operacionais da camada isolante, com base em indicadores de estado.

1.2 – O contexto da presente tese

Os problemas relacionados com o suprimento de energia elétrica podem acarretar uma série de inconvenientes aos consumidores e dispositivos. Estes envolvem desde pequenas alterações no funcionamento de equipamentos até perda de equipamentos e parada do processo produtivo [3-8]. Um dos componentes do sistema elétrico relacionado diretamente com esses problemas são os cabos elétricos, que são responsáveis pela interligação geração/carga e, assim como a maioria dos diversos dispositivos que perfazem o sistema elétrico estão sujeitos a operar fora das suas condições ideais.

A interrupção no fornecimento de energia elétrica traz uma série de transtornos tanto para as concessionárias de energia, com reflexos na arrecadação, quanto para seus clientes. Isso porque, essas ocorrências comprometem a produção, seja pela descontinuidade do processo produtivo em si, seja pelos custos adicionais relacionados com a manutenção corretiva ou substituição de equipamentos avariados, o que, em última análise, pode acarretar prejuízos financeiros significativos [9].

Por outro lado, para o caso específico de empresas concessionárias de energia, dentre os procedimentos que são utilizados para avaliar a qualidade do produto disponibilizado, neste caso a energia elétrica, destaca-se a aplicação dos indicadores de desempenho de qualidade da energia elétrica fornecida: DEC, FEC, DIC e FIC, o que pode resultar inclusive na penalização pecuniária da empresa na forma de multas [10]. Além disso, convém ressaltar, que adicionalmente, a empresa poderá também, ser responsabilizada por eventuais perdas de produtos perecíveis ou de produtos que tenham deixado de ser produzidos em decorrência de uma parada intempestiva do suprimento [9].

Materiais poliméricos, como o polietileno, têm sido largamente utilizados como isolantes em cabos e acessórios para redes de distribuição de energia elétrica, por mais de quatro décadas. Dos diversos materiais disponíveis para isolação de cabos, o polietileno reticulado (XLPE) tem obtido destaque em função de um conjunto de características tecnológicas que lhe conferem vantagens relativamente às demais opções disponíveis no mercado. Essas características justificam sua massiva utilização em cabos isolados para redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica em média tensão. Todavia, quando submetido a uso continuado em ambientes úmidos, sabe-se que tais componentes – cabos e acessórios - podem sofrer um processo de degradação das suas propriedades isolantes, podendo chegar, até mesmo, a uma ruptura dielétrica prematura dos cabos.

A degradação por arborescência (*treeing*) consiste em um dos principais fatores que podem levar à falha de cabos isolados em redes subterrâneas, com conseqüente interrupção do serviço, uma vez que o fenômeno provoca o envelhecimento precoce dos cabos elétricos, podendo ocasionar o rompimento do material dielétrico e conseqüente falha entre condutor e a blindagem ou terra, levando a uma perda de energia pelo curto-circuito e interrupção do fornecimento da mesma no caso de concessionárias, e parada do processo produtivo em complexos industriais.

Pesquisas científicas enfocando a busca de estratégias de diagnósticos *on-line* do estado operacional da isolação de cabos elétricos têm merecido a atenção de pesquisadores e, em decorrência disso, várias proposições podem ser encontradas na literatura especializada. Basicamente, a idéia está dirigida para o estabelecimento de um procedimento que seja capaz de monitorar em tempo real as condições de isolamento dos cabos de energia. Para tanto, a identificação de

parâmetros ou variáveis diretamente correlacionados com o estado da qualidade da isolação do cabo são imperativas.

Os cabos isolados com XLPE fabricados atualmente são muito mais resistentes ao fenômeno de arborescência se comparados com aqueles produzidos nas primeiras gerações, na década de 70. O motivo é que a tecnologia tem feito grandes progressos, após importantes fatores terem sido identificados. Dentre eles, pode-se citar a garantia de limpeza dos materiais e suavização das interfaces da camada semicondutora/isolante. Portanto, um fator de motivação para as investigações deste tema está relacionado com a grande quantidade de cabos advindos das primeiras gerações de isolantes XLPE que ainda estão em utilização e que demandariam uma expressiva quantidade de recursos financeiros para realizar as devidas substituições.

É nesse contexto que a presente tese se insere, ou seja, no sentido de buscar novos procedimentos que possibilitem a realização de diagnósticos específicos e de forma preditiva com respeito ao fenômeno de degradação por arborescências. Para tanto é desenvolvida uma modelagem do fenômeno da arborescência, reconhecendo suas características não lineares e estabelecendo como meta, a extração de informações relevantes ao conhecimento do estado operacional de um determinado cabo isolado, estando o mesmo em operação. Para alcançar esse objetivo, as seguintes atividades são desenvolvidas:

- Caracterização do fenômeno da arborescência, focando cabos isolados com polietileno reticulado (XLPE);

- Revisão dos modelos tradicionais utilizados para representar cabos isolados de energia;

- Proposta de modelagem do fenômeno da arborescência para a representação de cabos considerando a presença de degradações;

- Estabelecimento de indicadores para aferir as condições operacionais da camada isolante submetida à degradação por arborescências e;

- Apresentação de uma metodologia para diagnóstico da degradação em cabos isolados com XLPE por meio da corrente de fuga.

1.3 – Estado da arte

Tendo em vista que a presente tese surge, no âmbito da Universidade Federal de Uberlândia, como um primeiro trabalho nesta área de conhecimentos e que, na revisão bibliográfica, não foi possível identificar, nas contribuições nacionais, dissertações ou teses que tratassem este tema de forma abrangente, destaca-se que as discussões próprias à contextualização do estado da arte do tema assumem importância marcante para a fixação das bases e experiências mundiais existentes sobre o assunto. Devido a isso, considerou-se apropriado preencher essa lacuna não apenas com um texto inicial e introdutório, mas sim, de apresentar em detalhes, na perspectiva dos objetivos desta tese, os documentos existentes e seus pontos focais no corpo principal desta pesquisa, fato este do qual se originaram os capítulos II e III, assim como a parte inicial do capítulo IV, como será oportunamente descrito.

1.4 – As contribuições desta tese

As principais contribuições do trabalho proposto se resumem em:

• Proposta de modelagem do fenômeno de arborescência para a representação de cabos considerando a presença de degradação;

• Apresentação de uma metodologia que possibilita, a partir do espectrograma da corrente de fuga total que flui através da camada isolante, a determinação das respectivas parcelas ativa e reativa dessa corrente de fuga, independentemente da degradação ocorrer de forma uniforme ou não uniforme;

• Determinação de indicadores de desempenho do estado operacional da camada isolante, com base no espectrograma das componentes ativa e reativa, da corrente de fuga total;

• Proposição de um método diagnóstico que correlaciona diversos indicadores, possibilitando a realização de diagnósticos mais próximos da realidade da degradação presente no cabo em análise, comparativamente a diagnósticos baseados em apenas um indicador.

1.5 – A estrutura da tese

Diante dos objetivos e contribuições propostas, além deste capítulo introdutório, esta tese é desenvolvida de acordo com a estrutura a seguir:

Capítulo II – Deterioração de cabos isolados

Este capítulo discorre sobre os principais fatores que contribuem para a degradação de cabos isolados, com destaque para o fenômeno denominado arborescência, abordando sua morfologia, processo de geração e crescimento, assim como a etapa final que precede ao rompimento da camada isolante.

Capítulo III – Métodos e indicadores de estado

Neste capítulo são apresentados diversos métodos destinados à aferição das condições operacionais da isolação de cabos de energia, destacando suas vantagens e limitações, bem como os resultados atingidos via determinados indicadores de estado. Os métodos são diferenciados entre os que necessitam que o cabo esteja desenergizado (*off-line*) e os que são realizados com o cabo em plena operação (*on-line*).

Capítulo IV – Modelagem de cabos isolados degradados por arborescências

Esta unidade está direcionada ao detalhamento da modelagem de cabos isolados com vistas a investigar as condições operativas da camada isolante quando estes estiverem submetidos à degradação. Para tanto, utilizar-se-á de modelagens no domínio do tempo e decomposição em séries de FOURIER para identificação da contribuição harmônica no processo de degradação desses cabos, tendo em vista a

característica não-linear do fenômeno de arborescência.

Capítulo V – Validação do modelo proposto.

Esta seção destina-se a avaliar o desempenho do modelo proposto, tendo por referência as formas de onda da corrente de fuga, parcela ativa, obtidas experimentalmente a partir de amostras de cabos envelhecidas em laboratório e apresentando diferentes níveis de degradação.

Capítulo VI – Proposta de metodologia para diagnóstico de cabos isolados.

Este capítulo apresenta inicialmente uma metodologia para identificar, a partir da corrente de fuga total, as componentes ativa e reativa dessa corrente de fuga. Em seguida apresenta uma proposta de metodologia utilizando, concomitantemente, informações de diferentes indicadores de estado com vistas à obtenção de resultados mais próximos da realidade. Nesse sentido, são analisados os resultados dos indicadores de estado perante degradações uniforme e não uniformes.

Capítulo VII- Considerações finais.

Por fim, procede-se à apresentação de uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados com o trabalho como um todo. Além disso, são ressaltadas questões vinculadas às principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

DETERIORAÇÃO DE CABOS ISOLADOS

2.1 – Considerações iniciais

A degradação do material isolante, que é um fenômeno que acarreta a redução da expectativa de vida útil de cabos elétricos, pode ser causada por diversos fatores de natureza interna e/ou externa. Esses fatores estabelecem seus mecanismos pela conjunção de solicitações de natureza térmica, elétrica, química ou mecânica que podem ocorrer em conjunto ou em separado. Uma das causas de deterioração da isolação de cabos elétricos é o fenômeno denominado arborescência. A ocorrência de arborescências tem sido apontada como sendo o principal fenômeno de degradação em materiais poliméricos, em particular, o polietileno utilizado como isolante em cabos de distribuição de energia.

Nessa perspectiva, e com o intuito de estabelecer uma base conceitual sobre as arborescências este capítulo aborda preliminarmente o polietileno reticulado como material isolante em cabos de energia e a constituição de um cabo elétrico. Em seguida se detém aos fatores responsáveis pela deterioração de cabos isolados com ênfase no fenômeno de degradação por arborescência, destacando a morfologia, tipos, processo de geração e fatores de influência para o surgimento das arborescências. O capítulo encerra-se com a abordagem sobre a fase final caracterizada pela ruptura da isolação que é precedida pelo

surgimento de arborescências elétricas (*electrical trees*) nas vizinhanças das arborescências em água (*water trees*).

2.2 – O polietileno reticulado: Aplicação como material de isolação em cabos de energia

A partir da década de 50, tornou-se disponível uma gama de materiais sintéticos de natureza polimérica para utilização em fios e cabos isolados, pelo processo de extrusão. Dentre esses materiais, os mais atrativos foram o Cloreto de Polivinila (PVC) e o Polietileno (PE) como isolantes de cabos de média tensão. Vale destacar que esses materiais possuem como característica comum a termoplasticidade, isto é, a deformabilidade como conseqüência do escorregamento das moléculas, entre si, quando o material atinge temperaturas acima da temperatura máxima admissível em regime contínuo (70 ^{o} C), situação em que não mantém a sua forma original, até mesmo pela ação exclusiva do seu próprio peso. Com o propósito de superar essa limitação, foram desenvolvidos os materiais termofixos, como o Polietileno Reticulado (XLPE) e a Borracha Sintética de Etileno (EPR). Como conseqüência, a classe térmica desses materiais é aumentada para 90 ^{o} C em regime contínuo, além do desempenho totalmente diferenciado em temperaturas mais elevadas, possíveis de ocorrer em serviço (sobrecargas e curto-circuito).

Cabos elétricos para instalações subterrâneas são dotados de um conjunto de camadas com finalidades dielétricas e mecânicas. Em função do nível de tensão e/ou do local de instalação, diversos materiais podem ser utilizados para desempenhar a função de isolante, dentre eles o polietileno. A ampla utilização do polietileno advém do seu baixo custo, associado às suas características físicas, químicas, elétricas e mecânicas. De acordo com essas características, as formas mais conhecidas são: polietileno de baixa densidade (LDPE); polietileno

de alta densidade (HDPE); polietileno linear da baixa densidade (LLDPE) e o polietileno reticulado (XLPE) [11]. Nesse sentido, em consonância com o foco desta tese, são abordados a seguir, alguns aspectos físicos e construtivos do polietileno, em sua forma reticulada.

2.2.1 – O polietileno reticulado

O polietileno reticulado (XLPE) é um material que há mais de 40 anos tem sido utilizado como material de isolação de cabos de potência. Justifica-se sua massificação, conforme já destacado, em função de suas características físicas, químicas, elétricas, mecânicas e baixo custo, que o tornam atrativo para a fabricação de cabos e acessórios para a distribuição de energia elétrica, nos diferentes níveis de tensão utilizados nos sistemas elétricos, particularmente em média tensão.

Salienta-se que em cabos de alta tensão usados sob tensão alternada (CA), o LDPE vem sendo substituído pelo XLPE devido ao seu melhor desempenho mecânico em altas temperaturas. O XLPE permite ao cabo resistir às condições de sobrecargas temporárias quando a sua temperatura aumenta acima da temperatura máxima admissível pelo polietileno, que em regime contínuo é de 70 ^{o} C. O XLPE pode suportar a temperatura de 90° C indefinidamente, 130° C por até 36 horas durante situações de emergências e 250° C por poucos segundos durante uma situação de curto-circuito [12].

O XLPE é um polímero que faz parte do grupo dos isolantes sólidos (ou extrudados), obtidos a partir do processamento do próprio polietileno. Os polímeros são grandes moléculas constituídas de muitos segmentos menores ou unidades básicas e repetidas chamadas de “meros”.

A título de ilustração, a figura 2.1 mostra a estrutura molecular do polietileno, que se apresenta como uma cadeia linear, a mais simples dentre os hidrocarbonetos poliméricos. Sua estrutura linear é constituída pela repetição do monômero-(CH2)n [13]. Na figura, as esferas escuras representam átomos de carbono e as esferas claras átomos de hidrogênio.

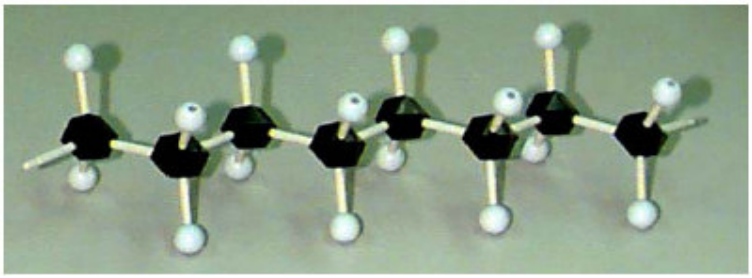


Figura 2.1 – Modelo da estrutura molécula do polietileno.

Os polímeros podem ter suas cadeias sem ramificações, adquirindo conformação em zigue-zague ou podem apresentar ramificações, cujo grau de complexidade pode ir até o extremo da formação de retículos, resultando então o que se denomina polímero reticulado, ou polímero com ligações cruzadas, ou polímero tridimensional (XLPE).

A transformação do polietileno em polietileno reticulado é alcançada por meio da aplicação de processos químicos, os quais transformam o primeiro, um polímero de cadeia linear, num polímero tridimensional. Na verdade, as cadeias lineares são fisicamente ligadas de maneira que, toda célula básica que compõe o reticulado, seja conectado a outras três ou mais unidades básicas, em todas as direções, conferindo ao material a característica termofixa, ou seja, que tem o atributo de não amolecer quando aquecido.

A formação de retículos, devido às ligações cruzadas entre moléculas, “amarra" as cadeias, impedindo o seu deslizamento, umas sobre as outras,

aumentando a resistência mecânica e tornando o polímero infusível e insolúvel. A figura 2.2 representa essas estruturas de modo simplificado [14].

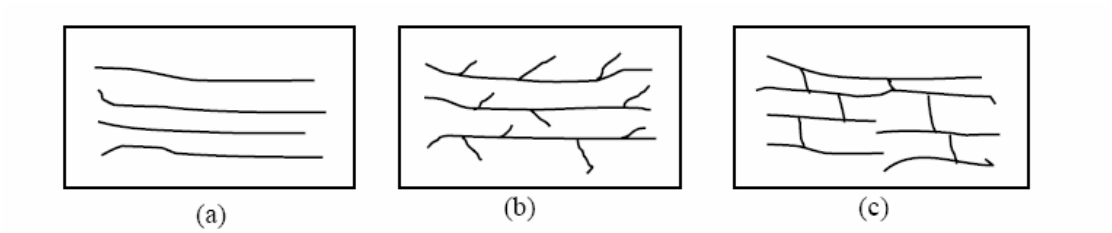


Figura 2.2 – Representação de cadeias macromoleculares. (a) Cadeia sem ramificação; (b) cadeia com ramificações e (c) cadeia reticulada ou com ligações cruzadas ou, ainda, tridimensional.

2.2.2 – Constituição de um cabo isolado de média tensão

Materiais poliméricos são amplamente utilizados na fabricação de cabos para distribuição de energia elétrica. Os cabos são fabricados pelo processo de extrusão, onde o condutor metálico (cobre ou alumínio) recebe uma camada de polímero diretamente pela matriz da extrusora, em seguida é resfriado; puxado e bobinado em um equipamento de sistema contínuo. No caso de cabos com dupla camada, são duas extrusoras trabalhando simultaneamente. Para os cabos de polietileno reticulado (XLPE) ainda há a necessidade de uma etapa adicional para promover a reticulação do polímero [15].

Com o objetivo de ilustrar os principais componentes constituintes de um cabo de energia isolado, a figura 2.3 ilustra uma foto de um cabo unipolar de média tensão, isolado com XLPE, no qual podem ser observadas as distintas camadas que compõem o componente. Destacam-se como componentes principais: O elemento metálico condutor; a isolação, as blindagens internas e externas e a capa ou cobertura, que confere proteção mecânica ao conjunto.

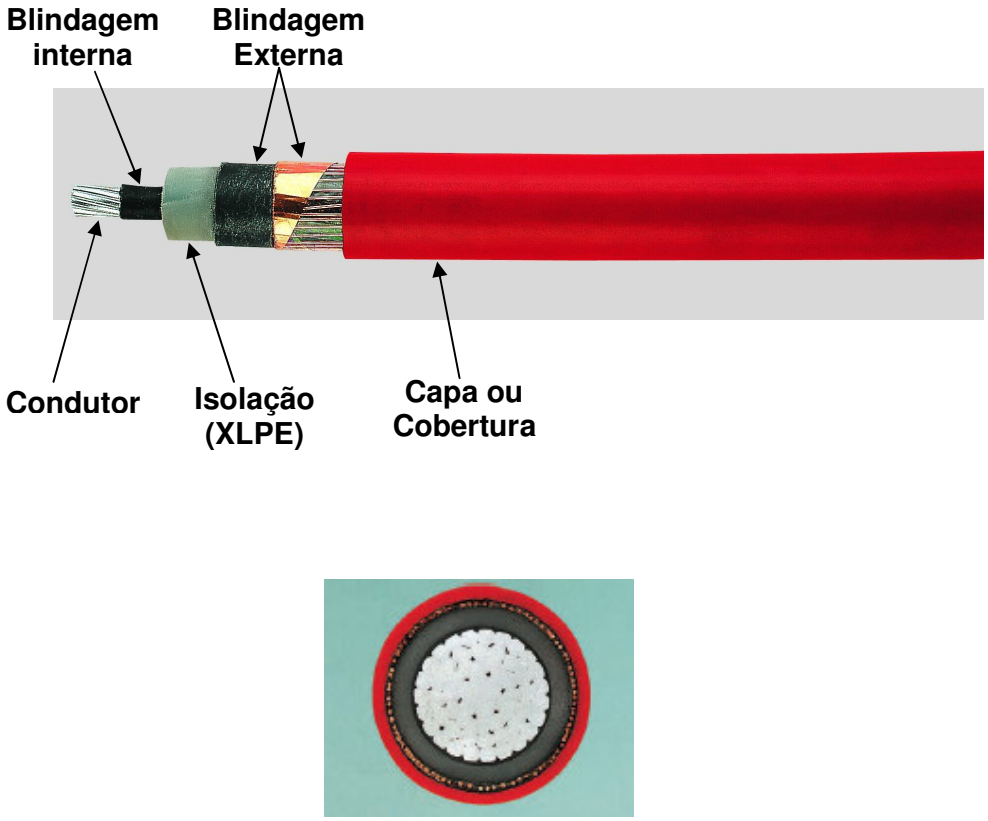


Figura 2.3 – Foto ilustrativa de um cabo de média tensão isolado com XLPE.

Os componentes principais de cabos de energia estão descritos na seqüência.

- Condutor: Cobre nu, têmpera mole, ou alumínio, do tipo redondo compacto.

- Blindagem interna ou do Condutor: Camada semicondutora aplicada por extrusão.

- Isolação: Composto termofixo de Polietileno Reticulado (XLPE), para temperatura normal de operação no condutor de 90°C.

- Blindagem externa ou da isolação:
    - - Parte não metálica: Camada semicondutora aplicada por extrusão (retirada a frio);
    - - Parte metálica: Fios de cobre nu, têmpera mole.

- Cobertura: Composto termoplástico à base de Cloreto de Polivinila (PVC).

Para situações em que os cabos ficam expostos a esforços mecânicos superiores aos encontrados normalmente, além dos componentes descritos anteriormente, torna-se necessário camadas adicionais, sobre a capa não metálica, denominadas de armações, que conferem ao cabo maior resistência nas direções axial e radial do cabo. A armadura mais comum é constituída por fitas de aço aplicadas helicoidalmente.

A atmosfera úmida (água, sal, poluição, etc.) associada ao campo elétrico de alta intensidade provoca o fenômeno conhecido como arborescência, na isolação. Uma vez que esse fenômeno danifica a isolação em um período de tempo de operação relativamente curto, os cabos de alta tensão de XLPE necessitam de barreiras contra a entrada de umidade no revestimento metálico, instalados sob revestimentos externos. Os revestimentos metálicos podem ser de alumínio, aço inoxidável, chumbo, fita laminada de alumínio ou fita laminada de chumbo.

2.3 – Fenômenos responsáveis pela deterioração de cabos isolados

A deterioração do material isolante de cabos isolados ocorre devido a diferentes fenômenos, que se manifestam e atuam de formas diferenciadas nos materiais isolantes, contribuindo para a redução da vida útil desses dispositivos. Nessa perspectiva, este item tem por objetivo elucidar os principais tipos de deterioração a que os cabos isolados estão expostos ou submetidos. São eles:

a) Deterioração térmica

Este tipo de deterioração ocorre quando os limites térmicos suportados pelo isolante do cabo são ultrapassados. Normalmente, a causa desse acréscimo de temperatura está associada a curto-circuitos ou sobrecargas. No entanto, nos dias atuais, as redes elétricas com qualidade comprometida, têm contribuído de forma significativa para a elevação da temperatura nos dispositivos mencionados. Esses incrementos, acima do admissível pelos cabos, ocasionam amolecimentos, oxidações, evaporações e ressecamentos no material isolante, que, por constituírem mudanças estruturais, reduzem sua resistência dielétrica [16].

b) Deterioração elétrica

A deterioração elétrica é proveniente de descargas parciais que ocorrem no interior da isolação. As descargas parciais internas nos isolantes se dão devido à existência de espaços vazios em seu interior em conseqüência, por exemplo, de impurezas contidas no material isolante, ou à heterogeneidade do material com pontos de elevada condutividade, ou ainda, em virtude das

imperfeições nas interfaces de isolantes dispostos em camadas, tal como ocorre nos pontos de defeitos nas camadas semicondutoras junto ao isolante [16]. Esses defeitos levam à concentração das linhas de campo elétrico nas suas proximidades. Essa concentração de linhas de campo dá início ao processo de descargas parciais que erodem as cavidades no interior do dielétrico até a sua perfuração [17]. Em acréscimo, as redes elétricas que apresentam baixa qualidade de energia, também contribuem para o aumento dessas descargas parciais. Essas, por sua vez, aumentam gradativamente com o tempo e com o esforço elétrico, causando desgastes ou corrosões na estrutura da isolação, que conduzem ao enfraquecimento da mesma, diminuindo assim, sua resistência dielétrica. As estruturas dos cabos e respectivos processos de fabricação têm tido constantes inovações tecnológicas a fim de evitar que rupturas e/ou falhas ocorram na isolação devido ao fenômeno dessa natureza [16].

c) Deterioração química

A manifestação deste tipo de degradação é mais freqüente, e comum, em indústrias petroquímicas que empregam, produzem ou extraem produtos inflamáveis como: gasolina, querosene, solventes, etc. Essas substâncias em contato com os cabos isolados podem vir a ocasionar corrosões nas camadas de proteção, dando origem a pequenas fendas e/ou fissuras. Tais anomalias tendem a aumentar progressivamente com o tempo, conduzindo a aumentos das descargas parciais, as quais comprometem a capacidade da isolação do isolante. Todavia, vale salientar que, atualmente, as falhas e os prejuízos advindos desse fenômeno são amortizados, ou reduzidos consideravelmente através do emprego de cabos especiais, desenvolvidos justamente para utilização nos ambientes acima citados [16].

d) Deterioração devido à instalação

Este tipo de degradação ou agressão ocorre principalmente nos cabos instalados em locais de difícil acesso (dutos, eletrodutos, galerias, calhas, etc.). Esses locais são propícios para a ocorrência de torções e/ou sobretensões mecânicas que, dependendo da intensidade, podem vir a comprometer ou mesmo danificar a isolação dos cabos, ocasionando em seu interior pequenas fissuras que contribuem para o aumento de descargas parciais localizadas, diminuindo desta forma, sua capacidade de isolação. Além disso, vale salientar que, além das possíveis causas, acima mencionadas, nestas instalações é freqüente a presença de pequenos animais, tais como roedores que podem eventualmente agredir os dispositivos existentes nesses locais. Para minimizar os efeitos de tais ocorrências, principalmente das sobretensões mecânicas, existem cabos isolados de média tensão dotados de armadura. No entanto, estes apresentam custos adicionais em relação ao cabo convencional, que acabam, em algumas situações, restringindo sua utilização [16].

e) Deterioração à absorção de umidade

A deterioração ocasionada pela absorção de água, devido ao fenômeno de arborescência ocorre com mais freqüência em cabos com isolação XLPE. Este fenômeno se manifesta devido à umidade absorvida pelo cabo ou a formações de moléculas de água em seu interior, originadas em espaços vazios decorrentes de reações químicas ou corpos estranhos inseridos no material isolante. Essas moléculas de água diminuem a tensão de ruptura suportável pelo isolante, levando-o a um alto estresse elétrico, reduzindo sua resistência dielétrica. Com o desenvolvimento tecnológico, o processo de fabricação dos cabos bem como

suas estruturas e compostos vêm sendo modificados e melhorados a fim de reduzir esse tipo de degradação. Vale ressaltar, que esse fenômeno pode ser causado indiretamente por um ou mais fatores de degradação, como aqueles já referidos nessa sessão [16]. Por essa razão será mais detidamente analisado ao longo deste estudo.

2.4 – O fenômeno de degradação por arborescências

Arborescência é um fenômeno de pré-ruptura dielétrica e representa um tipo de degradação que evolui no dielétrico por ação de um campo elétrico, sendo o mais provável mecanismo de falha elétrica em dielétricos extrudados. Quando o fenômeno ocorre em meio seco é denominado de arborescência elétrica e acontece devido a descargas parciais oriundas de pontos de alta solicitação elétrica. As arborescências também podem ocorrer em ambientes úmidos e progredir mais lentamente, devido inclusive a descargas parciais não detectáveis oriundas de pontos de pequena solicitação elétrica. Neste caso, são denominadas de arborescências em água ou simplesmente arborescências [18].

As arborescências têm sido apontadas como um dos principais mecanismos de degradação responsáveis pela falha de cabos isolados de redes subterrâneas. Uma hipótese é que esse tipo de degradação está associado a mecanismos de migração de água contendo íons na presença de campo elétrico, envolvendo também fenômenos de oxidação e quebra de cadeia [19-22].

Quando ocorrem em meio úmido, as arborescências, figura 2.4, são micro-cavidades formadas no interior da isolação a polietileno de cabos elétricos de média e alta tensão, devido ao acúmulo de moléculas de água, em um determinado ponto do isolante.

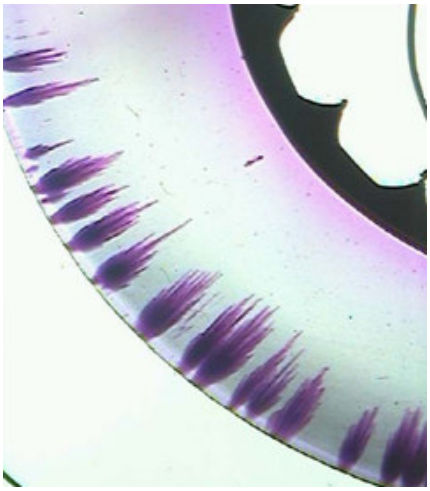


Figura 2.4 – Foto ilustrativa da degradação por arborescência.

As arborescências relacionam-se com a difusão de umidade ou vapor de água pelo dielétrico, comum aos materiais poliméricos e consistem em mudanças localizadas e permanentes na morfologia da isolação, associadas às mudanças químicas. Mas, em todos os casos com infiltração de água. O perigo dessas arborescências se deve ao fato de que a infiltração de água modifica as propriedades dielétricas do polímero. Sob condições de operação, a distribuição do campo elétrico em torno da arborescência é modificada. Além disso, devido às correntes associadas ao deslocamento de cargas dentro da arborescência, pode ocorrer aquecimento localizado, e especialmente nos casos de picos de tensão, em que uma arborescência elétrica for gerada, isso pode conduzir a uma falha no cabo isolado [23].

Arborescência elétrica é um fenômeno de pré-ruptura elétrica e está associado principalmente à existência de vazios e impurezas no interior da isolação e com a ocorrência de descargas parciais quando o dielétrico é submetido a um campo elétrico. As descargas parciais causam o aquecimento de pontos localizados. Esse processo de degradação é reconhecido através da formação de canais, a partir do ponto de origem, que apresentam a forma de um

arvoredo. As arborescências elétricas produzem cavidades em forma de canais, com encaminhamento paralelo ao campo elétrico aplicado, e são resultantes da decomposição do material. Este fenômeno pode ser controlado quando são aprimoradas as técnicas de produção do material isolante, como a tripla extrusão, limpeza do material e do processamento, e a injeção de aditivos, como a acetofenona, que inibem reações iônicas necessárias ao desenvolvimento da arborescência [17].

Diferentemente da arborescência elétrica, que apresenta um crescimento rápido, levando à ruptura do polietileno em pouco tempo, a arborescência em água tem crescimento lento e a ruptura do material ocorre com seu processo de envelhecimento, em torno de dez anos de vida, segundo a literatura técnica. A arborescência em água consiste de caminhos filamentares entre pequenas cavidades, paralelos ao campo elétrico, pelas quais penetra a umidade sob a ação de um gradiente elétrico. A umidade pode estar tanto no estado líquido quanto de vapor e, com a temperatura de trabalho do dielétrico, os pontos com água serão os mais quentes e, portanto, submetidos à alta pressão e grande concentração de campo elétrico. Essas condições levam o vapor de água a se difundir a partir do ponto inicial para as proximidades [24].

Por meio de experiências de campo [23] foi possível constatar que, depois de alguns anos em contato com ambientes úmidos, podem ocorrer arborescências na isolação dos cabos. Foi observado, também, que cabos de mesma especificação e fabricação submetidos às mesmas condições ambientais e ao mesmo carregamento, podem apresentar comportamentos diferentes quanto à geração e aparência das arborescências.

O avanço tecnológico propiciou uma considerável melhoria nas características dos isolantes, com vistas a reduzir o aparecimento das arborescências, bem como minimizar o seu impacto. Dentre essas estratégias

destacam-se: a modificação no "design" dos cabos, a utilização de polietileno perfilado ou de seção embutida, adoção de blindagem ou simplesmente purificando o polímero. Outros procedimentos, como por exemplo, a injeção ou cobertura do cabo com silicone, pode reduzir a taxa de crescimento das arborescências. Além disso, vários agentes retardantes foram desenvolvidos com a finalidade de evitar o surgimento de arborescências e têm sido utilizados como aditivos em cabos novos [12], [25-26].

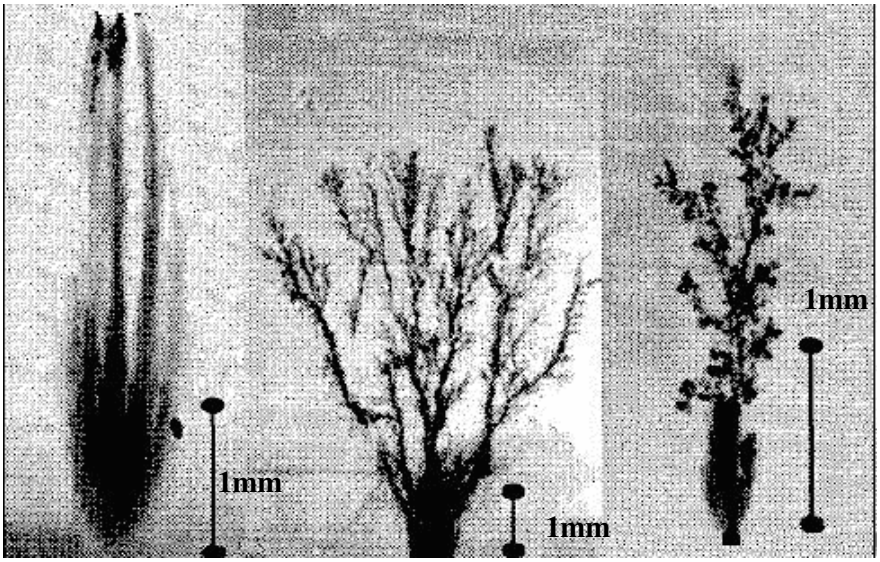
Salienta-se que o fenômeno enfocado exerce influência, de forma direta, na distorção da corrente de fuga, na diminuição da tensão de ruptura suportável pelo dielétrico, na redução da resistência da isolação e no aumento no número de ocorrências de descargas parciais [16].

2.5 – A morfologia das arborescências

Durante algum tempo, as arborescências foram um grande mistério para a comunidade científica devido à complexidade da medição e a dificuldade de quantificar o fenômeno. No entanto, recentemente, chegou-se a um entendimento de que essas arborescências consistem de aglomerados de moléculas de água na matriz do polímero que, nos últimos estágios, se conectam, podendo formar canais contínuos que apresentam, conforme já mencionado, o aspecto de ramos de uma árvore quando vistos por meio de microscópios. Daí o nome arborescências. Além disso, também ocorrem alterações nas propriedades elétricas como, por exemplo, mudança na constante dielétrica e no movimento de cargas espaciais, o qual é responsável pela característica não linear do fenômeno. Este último efeito ocasiona um crescimento do campo elétrico nas extremidades dos micro-canais, que, em casos avançados, pode levar à ruptura do dielétrico. Se um campo elétrico é aplicado, a polarização interna faz com que as cargas se movimentem na

arborescência e se acumulem na região limite entre o contorno das arborescências e a região não degradada do polímero. Esse efeito é a razão para um incremento localizado de campo elétrico nas pontas das arborescências, e finalmente por meio de arborescências elétricas a ruptura do cabo pode ter início [23].

Um fator relevante na investigação das arborescências é a constatação de que, após a retirada da tensão aplicada ao condutor, há uma tendência das micro-cavidades secarem e com isso ocorrer um aumento da resistência dielétrica, apesar de uma pequena quantidade de água permanecer dentro da isolação [23]. Dessa forma, enquanto os danos mecânicos no polímero na região danificada são permanentes, o acúmulo de água pode ser alterado através de alguns parâmetros externos tais como temperatura do isolante, gradientes de temperatura, nível de umidade e tensão de alimentação. Porém, o parâmetro decisivo será o balanço entre a concentração local de água dissolvida e a solubilidade no polímero [22]. A presença de arborescências ocorre independentemente da classe de tensão a que o cabo esteja submetido. Vale registrar que quanto maior o estresse a que o cabo está submetido, tanto maior são os riscos de incidência e de crescimento das arborescências. Além disso, o comprimento crítico das arborescências decresce significativamente com o incremento da tensão de operação. A figura 2.5 mostra arborescências típicas encontradas em cabos de diversas classes de tensão. Em todos esses casos é possível observar longas arborescências elétricas crescendo a partir da extremidade das arborescências em água [27].



(a) (b) (c)

Figura 2.5 — Fotografias típicas de arborescências cabos XLPE de: a) 12 kV, b) 52 kV e c) 145 kV, que sofreram falhas em serviço devido à degradação [23].

2.6 – O processo de geração das arborescências

Com relação aos mecanismos de formação e crescimento de arborescências, existem atualmente três correntes principais de pensamento, quais sejam: 1) mecânica 2) elétrica e 3) química. Na escola mecânica é sugerido que vazios preenchidos com água são formados por forças mecânicas induzidas pelo campo elétrico. Na escola elétrica, o parâmetro principal é a tensão a qual pode iniciar e suportar o crescimento de arborescências, enquanto na escola química, íons e oxidação representam os principais agentes. É razoável entender que arborescência é conseqüência da combinação desses processos, ainda não sendo possível estabelecer a proporção relativa de cada um desses processos na geração do fenômeno em tela [28]. Embora o mecanismo de geração das arborescências não seja de todo perfeitamente entendido, tem sido observado que provavelmente os seguintes fatores estão envolvidos [28-29]:

- Presença de água;
- Existência de campo elétrico;
- Presença de contaminantes.

Qualquer conceito sobre a geração de arborescências tem origem em constatações experimentais e é usado para explicar a influência de diferentes parâmetros no surgimento e no crescimento de arborescências. Igualmente qualquer tentativa para detectar arborescências em cabos tem que partir das mudanças morfológicas localizadas e eletricamente importantes devido às arborescências. Em serviço, somente correntes externamente mensuráveis, em conseqüência do movimento das cargas dentro e na proximidade das arborescências depois da aplicação de campo elétrico à isolação, é que podem ser usadas para a detecção das arborescências em cabos [23]. O processo de geração e crescimento desse fenômeno somente acontece em ambientes onde exista uma alta taxa de umidade exterior à isolação de cabos que operam sempre em ambientes de temperaturas elevadas, e que ainda tenham áreas onde o campo elétrico seja não uniforme. Portanto, sem esses fatores não haveria o aparecimento de tal problema, no entanto, os locais onde são instalados os cabos de potência isolados a XLPE são essencialmente subterrâneos, onde há muita umidade e calor. Uma vez que é praticamente impossível a obtenção de campos elétricos uniformes ao logo do material isolante, devido a impurezas e micro-fissuras provocadas por estresse mecânico, então o surgimento de arborescências é praticamente inevitável. Nesse sentido, torna-se muito importante conhecer os mecanismos responsáveis pelo surgimento desse fenômeno.

Segundo as referências [23], [31-32] as arborescências têm inicio devido à presença de impurezas na isolação ou danos mecânicos que modificam o campo elétrico daquela região e na existência externa de água na forma de umidade em torno do cabo que, com o aumento de sua temperatura e conseqüente alteração em sua solubilidade, penetra no interior do isolante na forma de moléculas esparsas. Devido às forças dielétricas existentes no campo elétrico não uniforme, ocorre um acúmulo localizado de moléculas de água na região de maior intensidade de campo. Esse acúmulo continuará até que ocorra um processo contrário de difusão, que tende a homogeneizar a concentração de água, estabelecendo um equilíbrio, ou a concentração local exceda a solubilidade no polímero e ocorra a precipitação das gotículas de água. Com a contínua absorção de moléculas de água, há um aumento da pressão interna do polímero, acarretando fissuras e conseqüente formação de ramificações, que, muitas vezes, podem se conectar a outras gotículas já formadas ou em formação. No local onde tem início as arborescências, a concentração de campo elétrico produz estresse de Maxwell. Por causa da polarização, as moléculas de água próximas ao local danificado são direcionadas para o ponto de maior intensidade do campo pelo fenômeno conhecido como "*dielectrophoresis*", surgindo assim, micro-gotículas no interior da isolação. O campo elétrico, por sua vez, se torna mais intenso nas regiões de fronteira entre as extremidades dos ramos das arborescências e o material dielétrico ainda intacto, alternando forças de Maxwell nesses pontos, podendo causar novas fadigas e rupturas na estrutura da isolação, uma vez que o campo elétrico nesses locais gera vibrações mecânicas nos ramos das arborescências, aumentando as ramificações. A figura 2.6 resume o processo descrito.

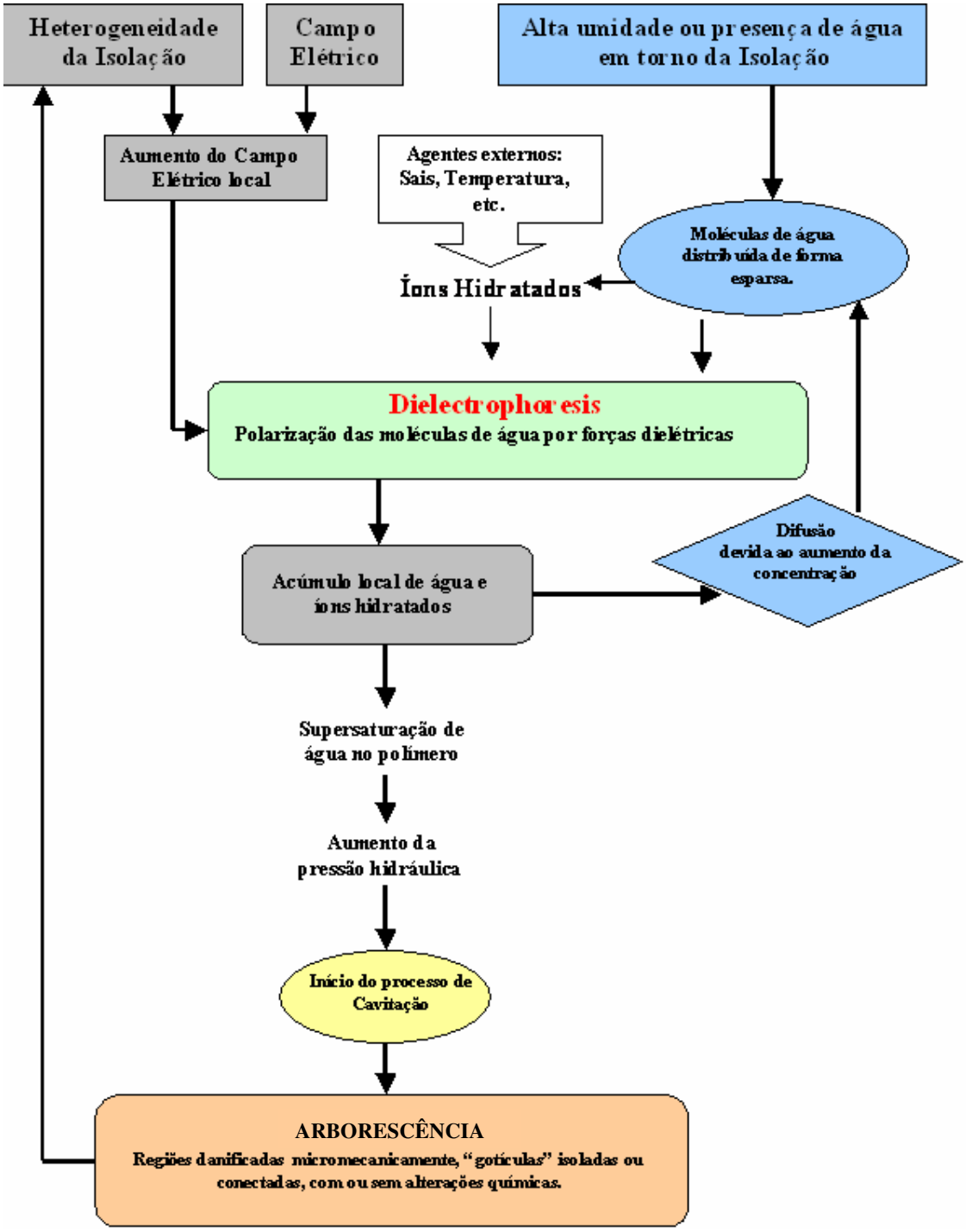


Figura 2.6 – Conceito eletrofísico da geração e crescimento das arborescências.

As arborescências podem se manifestar de duas maneiras [21]: (a) *vented-tree,* figura 2.7, que surgem a partir das extremidades do material isolante, os quais estão em contato com o condutor ou com a blindagem/capa e crescem em direção ao interior do isolante. Iniciam-se muitas vezes a partir de poros presentes nestas superfícies formados durante o processo de fabricação, ou pela ação de certos líquidos, detergentes e óleos que promovam algum tipo de estresse mecânico nesses pontos; e (b) *bow-tie-tree,* figura 2.8, que crescem do interior da isolação para as extremidades, se constituindo na forma mais comum do fenômeno, sendo conseqüência direta da presença de impurezas no interior do dielétrico ou estresse mecânico devido ao transporte e/ou manuseio desses cabos.

Nesse contexto além das impurezas da isolação que criam as arborescências do tipo *bow-tie-tree* é importante considerar a existência de íons na camada de isolação na medida em que também contribui para o surgimento e crescimento das arborescências. A partir dessas constatações e com base em verificações experimentais sobre a influência de partículas de sais na geração de arborescências *bow-tie-trees* foi possível concluir que íons, em particular, desempenham importante papel no processo de geração das arborescências na isolação de cabos elétricos [23].

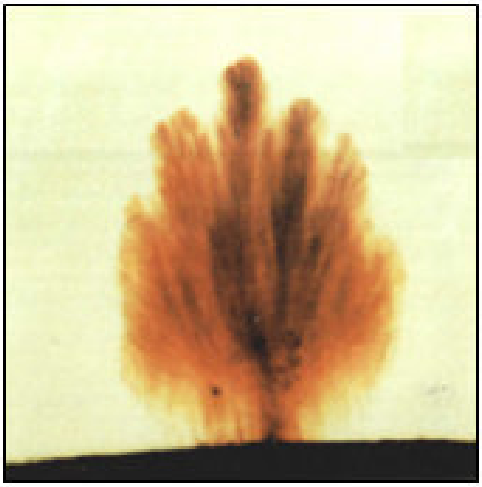


Figura 2.7 – Arborescência do tipo vented-tree.

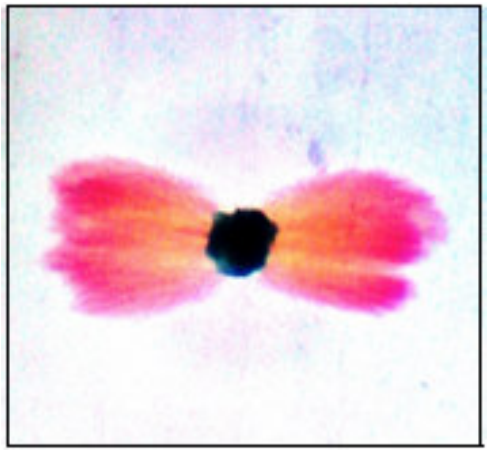


Figura 2.8 – Arborescência do tipo bow-tie-tree.

As árvores do tipo *vented-tree* são mais perigosas do que as do tipo *bow-tie-tree* porque diminuem a resistência dielétrica do isolador e alcançam um ponto em que acontece a avaria [32]. Na figura 2.9 podem ser observadas falhas na camada de isolação devido à presença de arborescências.

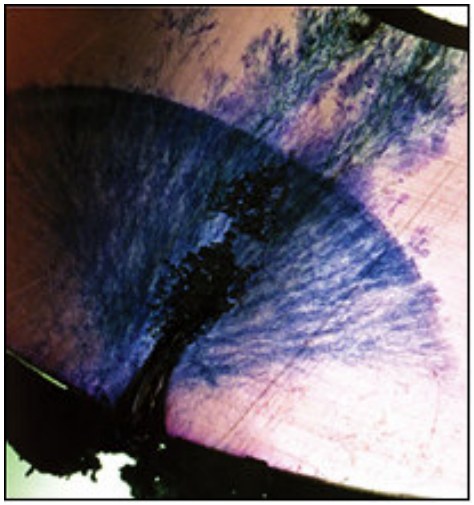


Figura 2.9 – Falhas na camada de isolação devido à presença de arborescências.

Outro aspecto a ser considerado diz respeito ao estresse mecânico aplicado à cadeia de polímero devido ao crescimento das arborescências que facilita a ocorrência de alguns ataques químicos tais como a oxidação. Conseqüentemente, modificações químicas na região afetada pelo fenômeno não podem ser consideradas surpresas no processo de geração eletrofísico. Ademais, diferenças químicas em arborescências elétricas encontradas em testes de campo e em testes laboratoriais podem ser explicadas não só pelo tipo de ambiente em que ocorrem, como também pelo tempo de envelhecimento. Em laboratório, consegue-se um envelhecimento acelerado pela aplicação de níveis elevados de estresses elétricos em cabos submersos em recipientes contendo água previamente aquecida, o qual não é suficiente para o aparecimento da oxidação [33].

Em [23], foi constatado através de estudos com microscópios que, em regiões pré-deterioradas havia canais com diâmetros que não excediam 1μm, enquanto em regiões atacadas por arborescências esses canais chegavam a ter até 4μm de diâmetro. Esses canais, em regiões pré-deterioradas, indicam a existência de um pré-estágio do fenômeno. Isso se deve ao fato de que, nesses

locais, as moléculas de água se deslocam com maior facilidade em direção às pontas dos ramos da arborescência e, também, pela ocorrência da precipitação dessa água, quando há o estabelecimento de uma supersaturação local ou é cessado o estresse elétrico aplicado ao cabo.

Assim, fica claro que o essencial no processo de geração das arborescências é o acúmulo de água na isolação seguido pela ruptura do polímero. A influência prejudicial de outros fatores também contribui para a conceituação do mecanismo, embora, não se tenha uma concordância geral em torno do assunto.

2.7 – Fatores de influência

2.7.1 – Influência da temperatura

A influência da temperatura no mecanismo de geração e crescimento das arborescências é objeto de investigação de diversos autores [23], [30], [34-35] e, no entanto, há pouca concordância a respeito do assunto. Todavia, a maioria dos trabalhos indica que a temperatura pode contribuir de formas distintas para o crescimento das arborescências. A elevação de temperatura altera a solubilidade tanto da água quanto da isolação, permitindo que a umidade existente em volta do cabo penetre mais facilmente e, com isso, acelere o desenvolvimento do fenômeno até que ocorra um desequilíbrio de tal maneira que o aumento de temperatura seja tão significativo que haja uma evaporação excessiva a ponto de secar as cavidades das arborescências. Na referência [33] conseguiram altos níveis de degradação em pouco tempo, quando empregam temperaturas de até 75°C em tanques de envelhecimento. Em [35] foi constatado que a temperatura tem menor influência na geração das *vented-trees* do que na geração das *bow-*

tie-trees que crescem mais rapidamente em altas temperaturas. Entretanto, tanto num caso quanto no outro, o tempo para que se dê a ruptura da isolação são sempre menores quando o envelhecimento se dá a temperaturas elevadas devido à diminuição acentuada da resistência dielétrica, que pode ocasionar a ruptura do material, com o passar do tempo. Isto conduz à conclusão que embora a temperatura não tenha influência relevante na iniciação e no crescimento das arborescências do tipo *vented-tree*, ela é importante no processo final da avaria. Dessa forma, percebe-se que o gradiente de temperatura é um importante parâmetro na evolução do processo de degradação da isolação.

2.7.2 – Influência de sais e de outros íons

A presença de partículas de sais no polímero pode ser vista como pontos de início de futuras arborescências, porém ainda há muita discussão a respeito da influência das propriedades químicas de sais ou outros íons na geração e crescimento do fenômeno. Em relação à influência de soluções aquosas de sais, tais como LiBr ou NaCl, apesar de também não haver um consenso geral, algumas investigações indicam que estas retardam o aparecimento das arborescências ao reduzirem a pressão de saturação externa ao polímero, a qual se sobrepõe a outros efeitos (temperatura, nível de umidade, etc), forçando uma precipitação da água contida na isolação, dessa forma, quanto maior for a concentração de sal na água, menor será a geração das arborescências.

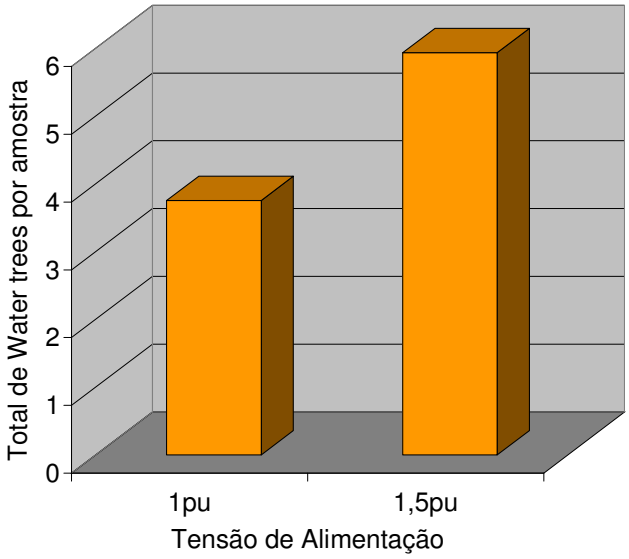
Por meio da utilização de diferentes concentrações de sal de LiBr como eletrólito na base da arborescência *(water-needle*), foi possível constatar que com concentrações mais elevadas de sal são geradas arborescências menores. O resultado é compatível com os encontrados em amostras de cabo XLPE de 20 kV submetidos a uma solução concentrada de NaCl, no qual se identificou muito

menos arborescências do que nas amostras submetidas à água pura. Esse fato está em acordo com resultados os quais relatam que cabos utilizados em região costeira não apresentaram degradação significativa por arborescência, como conseqüência do sal da água do mar e do fato da temperatura da água ser inferior à temperatura do isolamento, o que contribui para impedir o surgimento de arborescências [23]. Porém, na publicação [36] foi constatado, em laboratório, que a ação degradativa da água do mar, comparativamente à água de torneira, aumentou, em pequena quantidade, o número de ocorrências do fenômeno, assim como o tamanho, em pequenas proporções, dos ramos das arborescências.

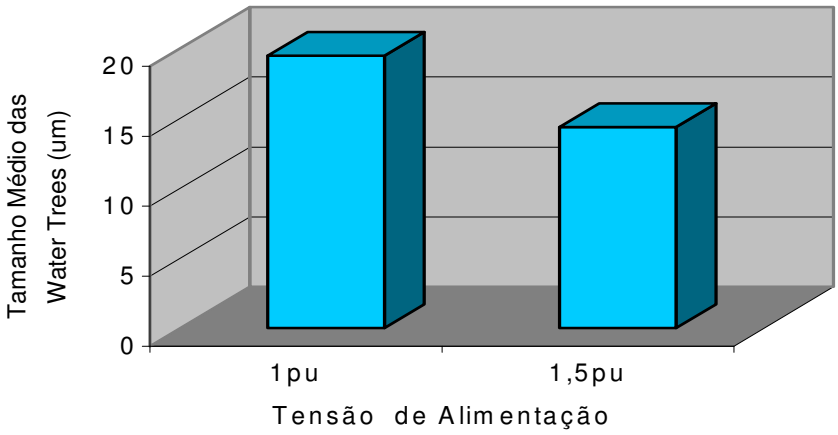
Esses resultados contraditórios evidenciam a complexidade que envolve o estudo deste fenômeno e a necessidade de aprofundamento das pesquisas com vistas ao pleno entendimento dos fatores de influência.

2.7.3 – Influência do estresse elétrico

A presença de campo elétrico é fundamental para o processo de deterioração discutido neste capítulo. Assim, o estresse elétrico empregado em um cabo é responsável diretamente pelo processo de ruptura do dielétrico. Dessa maneira, a referência [36] indica que, tensões acima da nominal aceleram o mecanismo de degradação, particularmente devido a arborescências do tipo *bow-tie-tree*, elevando a quantidade de ocorrências, porém, com respeito ao tamanho das arborescências, estas foram menores que aquelas encontradas para casos em que se empregou tensão nominal. Com isso, o aumento do estresse elétrico aplicado aos cabos previamente deteriorados eleva a probabilidade de ruptura do dielétrico. A figura 2.10 (a) mostra a relação entre a quantidade de arborescências e a tensão de alimentação e a figura 2.10 (b), por sua vez, relaciona o tamanho médio das arborescências com os mesmos níveis de tensão.



(a)



(b)

Figura 2.10 – Relação entre arborescência e estresse elétrico: a) tamanho das arborescências; b) número de arborescências.

2.7.4 – Influência da freqüência da tensão de alimentação

A freqüência dos sistemas de potência está na faixa de 50 a 60Hz. Porém muitos desses sistemas estão sujeitos às tensões harmônicas e transitórias cujas freqüências podem alcançar alguns kiloHertz. Recentes investigações indicam que a freqüência do estresse elétrico aplicado à isolação exerce grande influência no processo de formação de *bow-tie-trees*. Cabos submetidos a tensões com freqüência de 500Hz, tiveram um aumento de 61% no tamanho das arborescências em relação àquelas originadas de tensões com 50Hz. Os estudos concluem também que a freqüência não contribui para o desenvolvimento de *vented-trees*, sendo que não foram observadas diferenças nas formações analisadas para as duas situações propostas, quais sejam 50 e 500Hz. A figura 2.11 relaciona os dois parâmetros em evidência [36].

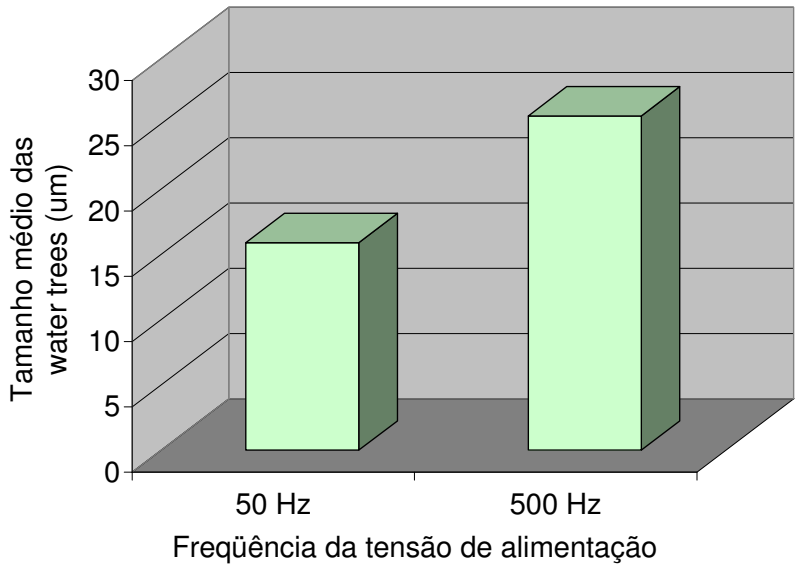


Figura 2.11 – Relação entre o tamanho médio das arborescências e a freqüência.

Dessa forma, pode-se esperar que redes que contenham altos índices de distorção harmônica de tensão, os cabos nelas instalados estejam sujeitos a níveis de degradação superiores àqueles encontrados em sistemas onde a tensão seja puramente senoidal.

2.7.5 – Influência de outros fatores

Outros fatores diferentes daqueles mencionados nos itens precedentes contribuem para o surgimento e crescimento das arborescências. Dentre esses, podemos citar o tempo de envelhecimento, constituição química do isolante, qualidade das instalações elétricas, etc.

Quanto ao tempo de envelhecimento a que o isolante está submetido, parece óbvio que o nível de deterioração é diretamente proporcional à idade do cabo. Isso porque, o processo de propagação do fenômeno é lento em condições normais de operação, isto é, em laboratório consegue-se encurtar este tempo de alguns anos para poucos meses.

A constituição química da isolação pode influenciar tanto retardando o processo quanto o acelerando, pois, diferenças na dopagem do material causam diferenças no campo elétrico, dentro do polímero. Além disso, novos produtos estão sendo utilizados de forma a reduzir consideravelmente as ocorrências de arborescências.

A qualidade nas instalações elétricas é um fator determinante no processo de geração das arborescências. Isso porque, uma instalação inadequada dos cabos pode causar estresse mecânicos no polímero, os quais serão pontos de distorção do campo elétrico.

2.8 – Propagação de arborescências elétricas a partir de arborescências em água.

O tipo de deterioração em cabos poliméricos devido a arborescências é um fenômeno de múltiplas fases. A fase final caracterizada pela ruptura da isolação tem início quando uma arborescência elétrica se inicia nas vizinhanças da arborescência em água. Essa fase é usualmente menor em duração do que as fases referentes ao surgimento e ao crescimento e tem sido menos estudada [35].

A arborescência elétrica, conforme já mencionado, é um fenômeno de pré-ruptura elétrica e está associado principalmente à existência de vazios e impurezas no interior da isolação e com a ocorrência de descargas parciais quando o dielétrico é submetido a um campo elétrico. As descargas parciais internas nos isolantes ocorrem devido à existência de micro-vazios ou à heterogeneidade do material com pontos de elevada condutividade, ou ainda, nas imperfeições das interfaces de isolantes dispostos em camadas, tal como ocorre nos pontos de defeitos nas camadas semicondutoras junto ao isolante. Esses defeitos levam à concentração das linhas de campo elétrico nas suas proximidades. As descargas parciais, por sua vez, causam o aquecimento de pontos localizados [24].

A fim de esclarecer o mecanismo de propagação de uma arborescência elétrica a partir de uma arborescência em água dentro do polietileno, foram observadas, simultaneamente, as características das descargas parciais, da propagação das arborescências elétricas e de fenômenos associados. Foi constatado que a tensão em que se dá o início da arborescência elétrica aumenta com a área de degradação da arborescência em água. Uma arborescência elétrica é iniciada a partir da ponta de um micro canal de água. Quando ela se conecta

com o micro canal de água da base da arborescência, as descargas parciais tornam-se grandes abruptamente [37-39].

As formas das arborescências diferem uma das outras, por isso a respectiva área é definida como o produto do comprimento horizontal a e do comprimento vertical b, figura 2.12. A tensão que dá início às arborescências elétricas é mostrada como uma função da área da arborescência em água, conforme apresentado na figura 2.13. Observa-se que essa tensão inicial cresce com o aumento da área da arborescência, particularmente para os casos em que a freqüência de operação está acima da freqüência nominal de 60Hz. O aumento da tensão inicial implica na geração de arborescências elétricas que apresentam maiores riscos para a ruptura da camada isolante. Salienta-se que a área de uma arborescência em água igual à zero m^2, significa que a mesma não foi identificada pelos métodos utilizados no estudo. [37-39].

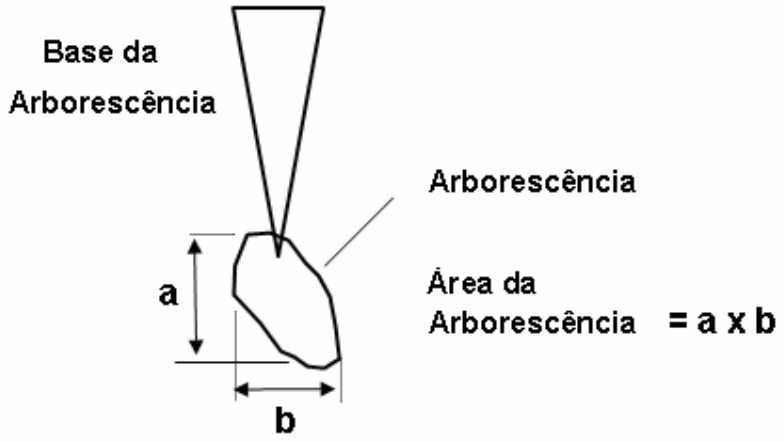


Figura 2.12 – Identificação da área de uma arborescência.

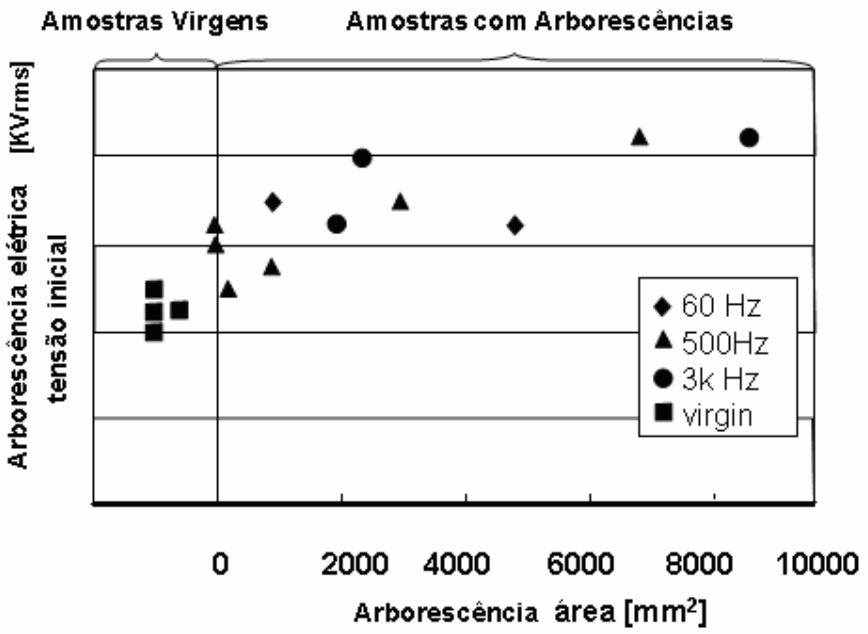


Figura 2.13 – Tensão inicial versus área da arborescência.

Há dois tipos de crescimento de arborescências elétricas. Uma delas se dá quando só ocorrem pequenas descargas parciais localizadas nas pontas das arborescências elétricas. Na outra, as descargas parciais são significativas e se dão por toda a região da arborescência elétrica. Em qualquer situação, após ser removida a tensão, a água enche os micro-canais da arborescência elétrica e em decorrência disso as arborescências em água*s* se propagam a partir das extremidades das arborescências elétricas, quando a tensão é aplicada outra vez [37-39]. A figura 2.14 mostra o resultado da observação ótica após a tensão ter sido removida. Nessa situação constata-se que a arborescência elétrica no seu todo, perdeu o contraste, sugerindo que os micro-canais se encheram de água.

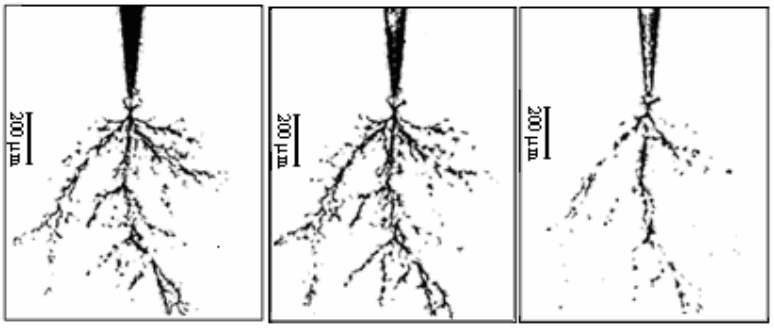


Figura 2.14 – Efeito da remoção da tensão na arborescência elétrica.

A Figura 2.15 mostra os resultados da observação ótica depois que uma tensão de 5kVrms (3kHz) foi reaplicada durante 1 hora, sendo possível constatar a propagação da arborescência em água até às extremidades da arborescência elétrica.

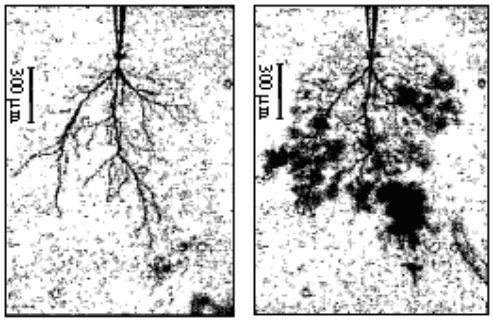


Figura 2.15 – Influência da reaplicação da tensão de alimentação.

O processo de crescimento de uma arborescência elétrica a partir de uma arborescência em água pode ser resumido como segue: inicialmente, uma arborescência elétrica tem início na extremidade de uma arborescência em água. Então, a arborescência elétrica conecta-se com a base da arborescência em água e descargas parciais se tornam significativas na arborescência elétrica. Além disso, a mudança na pressão do gás nos micro-canais e, o subseqüente crescimento de caminhos filamentares na arborescência elétrica faz com que a descarga ocorra por mais tempo e por muitos trajetos.

Portanto, o estágio final da avaria começa quando uma arborescência elétrica tem início de uma arborescência em água. Essa arborescência elétrica ocorre geralmente na extremidade da arborescência em água, ou na superfície adjacente enquanto a arborescência em água avança na isolação. Raramente a arborescência elétrica se origina da raiz da arborescência em água e, freqüentemente, mas nem sempre, confina-se ao volume da arborescência em água. A arborescência elétrica se propaga através da isolação, eventualmente atravessando-a, provocando, em decorrência disso, a falha. A figura 2.16 ilustra as etapas referentes ao surgimento e a evolução de uma arborescência em água, assim como o estabelecimento da arborescência elétrica em um cabo de média tensão, classe 15kV.

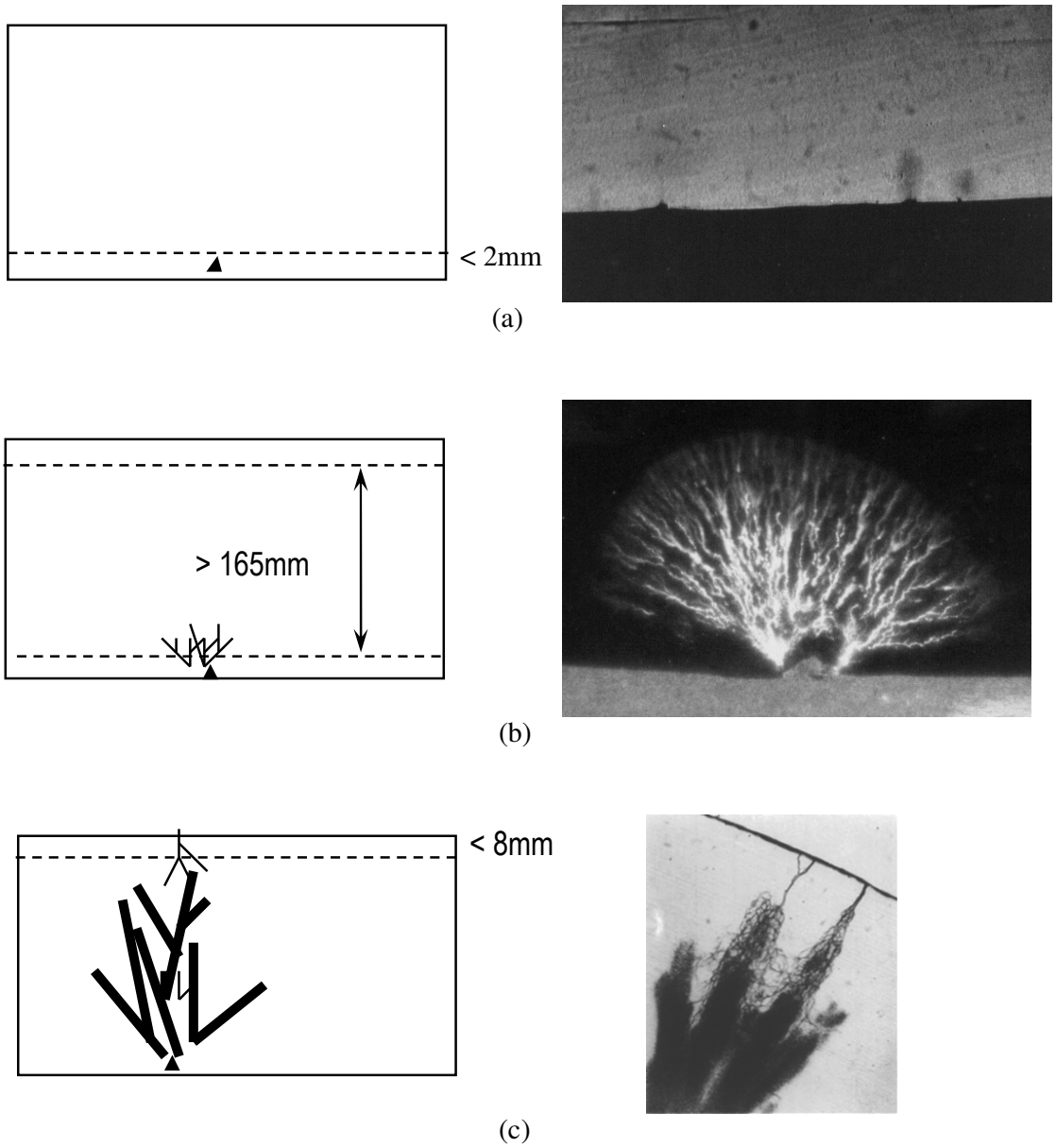


Figura 2.16 – Etapas da degradação: a) etapa inicial; b) etapa de crescimento da arborescência em água e c) surgimento da arborescência elétrica.

A figura 2.17, por sua vez, apresenta a formação de extensas arborescências elétricas, a partir de pequena arborescência do tipo *bow-tie-tree*.

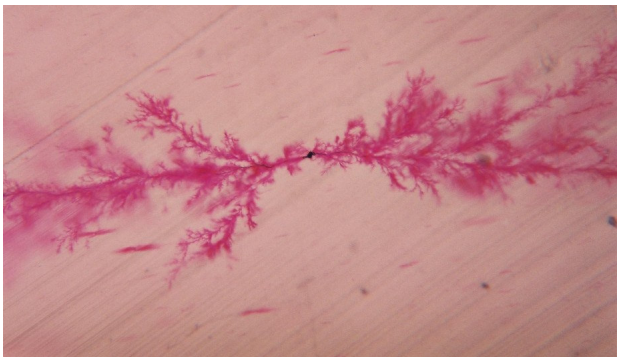


Figura 2.17 – Arborescências elétricas originadas em bow-tie-tree.

Com vistas a evidenciar a influência da temperatura na formação de arborescências e no processo de avaria da camada isolante, são apresentadas, a seguir, as tabelas 2.1 e 2.2, que mostram os tempos para que ocorra a avaria em amostras de cabos LDPE, de aproximadamente 1 milímetro de espessura, envelhecidos a temperatura ambiente e a 60ºC, com tensão de 6 kV (1kHz), respectivamente. Constatou-se que na temperatura ambiente, um grande número de arborescências em água ocorre na isolação, mas muito poucas arborescências elétricas são iniciadas e que, às vezes, nas etapas iniciais do envelhecimento, surge uma arborescência elétrica, que eventualmente pode causar uma ruptura. Para a temperatura de 60º C, o número das arborescências em água que surgem na isolação é significativamente menor, mas uma porcentagem bem maior dessas arborescências resulta na formação de arborescências elétricas. A maior taxa de crescimento das arborescências em água ocorre na temperatura ambiente, mas o processo da avaria é mais acelerado na alta temperatura [35], [38]. Ressalta-se que as arborescências elétricas se iniciaram sempre na superfície aterrada, onde as arborescências em água penetraram na isolação.

Tabela 2.1 – Tempo para ruptura e número de arborescências em amostras de cabos envelhecidas a temperatura ambiente.

Tempo para ruptura (h)	Número de Arborescências	Número de Árvores Elétricas (*)
1551,1	210	1
1759,1	141	4
1965,4	74	2
2245,0	145	1
2245,1	56	4
2491,2	85	4
2513,0	49	2
4024,0	325	10

(*) uma árvore elétrica foi acrescida para cada ruptura.

Tabela 2.2 – Tempo para ruptura e número de arborescências em amostras de cabo envelhecidas a 60°C.

Tempo para ruptura (h)	Número de Arborescências (*)	Número de Árvores Elétricas (*)
1357,0	9	5
1387,6	13	5
1504,0	18	8
1616,6	13	9
1775,7	2	1
1776,6	8	5
1780,4	2	1
2221,2	3	2

(*) uma árvore elétrica e uma arborescência foram acrescidas para cada ruptura.

2.9 – Considerações finais.

Este capítulo introdutório voltou seu foco para uma revisão didática sobre os diversos aspectos relativos ao surgimento e evolução do fenômeno de degradação por arborescência. Inicialmente foi apresentado o polietileno como material isolante em cabos elétricos. Em seguida, foram feitas algumas considerações sobre os tipos mais comuns de deterioração ou degradação a que estão sujeitos. Nesse sentido procurou-se identificar e apresentar como se manifestam esses fenômenos e como contribuem para o envelhecimento precoce do dispositivo em questão. Dos fenômenos abordados, mereceu destaque a degradação por arborescência, seja por se tratar do foco principal desta tese, seja pelo fato de representar de um dos fatores que mais influenciam na qualidade do isolante dos cabos elétricos e, por conseqüência, na redução da vida útil dos mesmos.

Vale ressaltar que existem vários fatores os quais afetam a ruptura final da isolação, alguns deles, se controlados adequadamente, pode resultar no prolongamento da vida útil do cabo, dentre eles, o estresse elétrico, a forma de onda da tensão, a temperatura, os contaminadores e a resistência da isolação à oxidação. No caso da deterioração que ocorre na isolação devido à presença de arborescências esta pode ser dividida em três estágios básicos: a iniciação da arborescência, o crescimento e a avaria final da isolação. Impedir ou prolongar qualquer destes estágios contribui para estender a vida da isolação. Daí, a importância de se conhecer o mecanismo de cada estágio. Muito embora os estágios da iniciação e do crescimento sejam estudados extensivamente, seus mecanismos não são ainda bem compreendidos.

CAPÍTULO III

Métodos e indicadores de estado

3.1 – Considerações iniciais

Os cabos de energia que são fabricados atualmente apresentam boa proteção contra o fenômeno de arborescências. No entanto, esse tipo de degradação da camada isolante continua sendo uma das principais causas de falhas nesses dispositivos. Além disso, conforme mencionado anteriormente, grande parte dos cabos instalados foi produzida nas primeiras gerações, décadas atrás, com tecnologias que os tornam muito menos resistentes a esse tipo de degradação. Por essas razões e objetivando a minimização de falhas em cabos de energia, torna-se necessário a obtenção de informações que possam retratar ou predizer quais as condições operacionais da isolação de cabos elétricos. Surge, portanto, a necessidade de se obter indicadores de estado que permitam expressar a situação momentânea em que se encontra o cabo.

Nessa perspectiva, diversos métodos para aferir o estado de conservação de cabos elétricos de potência podem ser encontrados na literatura especializada sobre este tema. Esses métodos podem ser divididos em *off-line* e *on–line.* No caso dos métodos *off-line* o cabo a ser diagnosticado deve estar sem carregamento e também desenergizado. Ao contrário disso, os métodos *on-line* são realizados com o cabo em pleno funcionamento.

Vale destacar que, ao contrário da maioria dos equipamentos que perfazem um sistema elétrico, a exemplo de transformadores, motores, bancos de

capacitores, etc., os cabos elétricos isolados, normalmente, são instalados em locais de difícil acesso, que na maioria das vezes, dificulta inspeções visuais e a realização de manutenções periódicas. Somado a isso, há ainda que se considerar que os mesmos são desprovidos de equipamentos designados à realização de diagnósticos de seu estado operacional em condições de tempo real. Assim, o desenvolvimento de metodologias e de dispositivos que sejam capazes de quantificar e analisar o índice de degradação da isolação dos cabos em tempo real é de fundamental importância nesta área de estudo.

Tendo em vista tais fatos, este capítulo tem como objetivo, apresentar as principais estratégias utilizadas para obtenção de indicadores de estado que retratem a situação operacional no que tange aos níveis de degradação da camada isolante, destacando as respectivas vantagens e limitações.

3.2 – Métodos diagnósticos *off-line*

Este item tem por objetivo apresentar de forma resumida métodos diagnósticos *off-line*. Existem diversas metodologias, contudo, nesta tese destacaremos os seguintes métodos:

- Método da corrente contínua de fuga [16], [40-41];
- Medição da tensão residual [41], [42-44];
- Método da corrente de polarização e despolarização [40], [43-44];
- Espectroscopia dielétrica [45], [46-47].

3.2.1 – Método da corrente contínua de fuga

A metodologia empregada neste método associa o índice de degradação do material isolante dos cabos com o nível da componente contínua da corrente de fuga, que flui através da blindagem da isolação. O método consiste na aplicação de uma tensão contínua entre o condutor e a blindagem da isolação do cabo, medindo-se a correspondente corrente contínua gerada pela aplicação dessa tensão. A título de exemplo, para um cabo de classe 6,6kV, a tensão contínua de teste é aumentada gradativamente, em degraus de 2, 4, 6 e 8kV, com duração de 30 segundos. Na seqüência, a tensão é aumentada para 10kV por um intervalo de tempo de aproximadamente 10 minutos. A correspondente corrente contínua de fuga é medida para todos os valores de tensão aplicados e também, durante os subseqüentes 10 minutos de aplicação da máxima tensão contínua de teste [41]. A figura 3.1 apresenta o circuito para medição da corrente contínua de fuga.

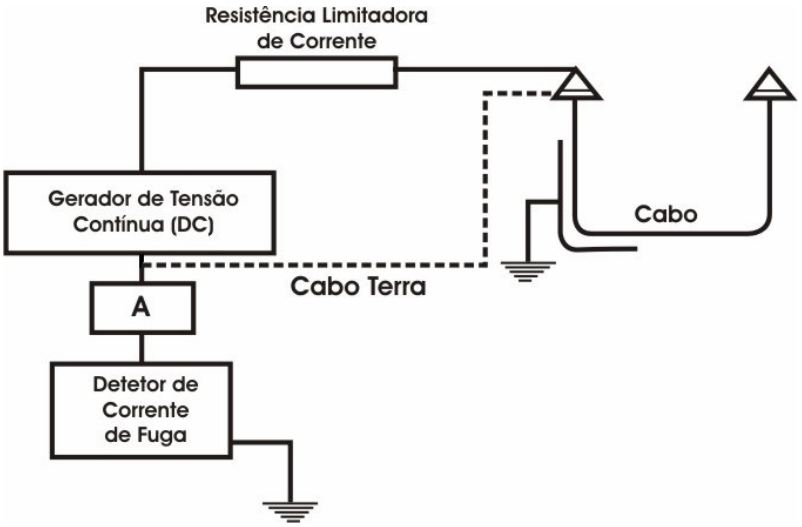


Figura 3.1 – Circuito para medição da corrente contínua de fuga [40].

Este método é utilizado para avaliar e quantificar os níveis de degradação da isolação dos cabos para a grande maioria dos tipos de deterioração a que

esses dispositivos estão sujeitos. Todavia esta metodologia apresenta algumas limitações, dentre as quais é possível mencionar [16], [40-41]:

- O cabo a ser diagnosticado deve estar sem carga e desenergizado;
- O método requer a utilização de fontes de tensão contínua de grande porte para a realização dos testes;
- Não é possível a realização simultânea de cabos, ou seja, os cabos devem ser analisados e diagnosticados individualmente;
- Mesmo se tratando de medições em cabos individuais, o tempo necessário para a realização dos testes é muito grande.

3.2.2 – Método da tensão residual

O diagnóstico da isolação do cabo por este método se baseia no fato de que cabos com sinais de degradação apresentam tensões residuais maiores do que aquelas observadas em cabos não degradados [42]. O procedimento utilizado pode ser dividido em três partes, conforme indicado na figura 3.2. Durante um determinado tempo o cabo é submetido a uma tensão contínua. Em seguida, o cabo é desconectado da tensão de alimentação e aterrado por um determinado tempo. Por fim, a tensão residual é medida em condição de circuito aberto. As duas primeiras etapas também são conhecidas como método da polarização e método da depolarização, respectivamente [40], [43].

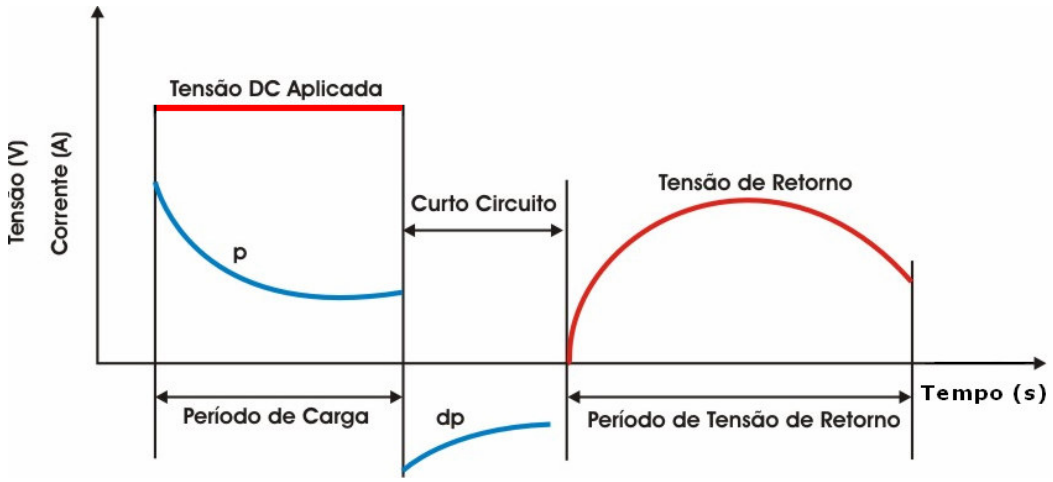


Figura 3.2 – Polarização, despolarização e método da tensão residual [40].

Com a aplicação da tensão contínua o dielétrico é carregado durante certo tempo devido ao processo de polarização. Após a retirada da fonte de tensão, os dipolos na isolação começam o processo de relaxação, gerando um campo elétrico mensurável. Ou seja, o método da tensão residual mede a tensão resultante da aplicação de um campo elétrico, enquanto que os métodos de polarização e despolarização medem a corrente gerada pelo campo elétrico [44].

Neste método os parâmetros a serem considerados são: a tensão e período de carregamento, o período de aterramento e o período da tensão de retorno. Os parâmetros característicos, para fins de diagnóstico, são: o valor máximo da tensão residual, a corrente de polarização e a corrente de despolarização [40]. Ressalta-se que a tensão residual é função não apenas do nível de degradação da camada isolante, mas, também, do comprimento do cabo [45].

Em [42] para a realização deste tipo de teste, o cabo é energizado com uma tensão contínua de 1kV/mm e aterrado por aproximadamente 10 segundos. Transcorrido esse tempo, o cabo então é desconectado do terminal de terra. Passados cerca de 10 minutos da aplicação dessa tensão é feita a medição do

acréscimo de tensão que se dá no condutor, denominado de tensão residual ou tensão de retorno.

A figura 3.3 apresenta, a título de ilustração, o comportamento característico da tensão residual em função do tempo para diferentes ensaios com amostras de cabos degradados e não degradado [42]. Para possibilitar a comparação entre as deteriorações dessas amostras seria imperativo que as mesmas pertencessem ao mesmo tipo de cabo e apresentassem o mesmo comprimento, condições essas não estabelecidas na referência consultada.

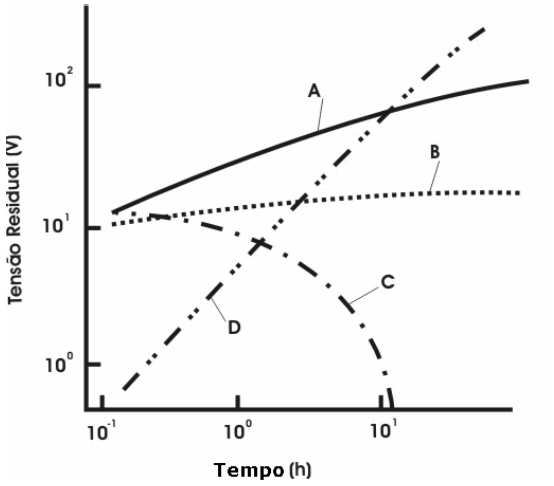


Figura 3.3 – Curvas características da tensão residual em função do tempo: A – Cabo novo; B, C, D – Cabos deteriorados [42].

As limitações ou desvantagens deste método são basicamente as mesmas do método anterior, quais sejam:

- Os cabos devem estar desenergizados para a execução dos testes;

- As medições são realizadas separadamente, um cabo de cada vez. Tal procedimento acarreta longos períodos para realização de ensaios;

- Existe a necessidade de utilização de fontes de tensão CC, com tensão muito elevada.

3.2.3 – Método da Espectroscopia dielétrica

A espectroscopia dielétrica consiste em um método para medir a resposta dielétrica da camada isolante, no domínio da freqüência [44], [46-47]. Usualmente é utilizado um intervalo de variação de freqüência que varia de 0,1 Hz a 1 kHz para medir a resposta dielétrica desejada. Trata-se de um método relativamente novo e os resultados advindos dessa técnica têm sido fortemente pesquisados [44]. Neste método é feito medição da permissividade complexa para diversas freqüências e o conjunto de valores medidos serve para analisar as propriedades dielétricas da camada isolante.

As arborescências contribuem para o incremento das perdas e da capacitância no material isolante degradado, sendo esses dois parâmetros dependentes da tensão. Essa dependência é utilizada como um fator de diferenciação do nível de degradação no processo de espectroscopia dielétrica para cabos XLPE, de média tensão [32]. A limitação deste método está relacionada com a necessidade de que o cabo esteja desenergizado durante a realização dos testes diagnósticos.

Vale ressaltar que existem outras metodologias para diagnóstico *off-line* de cabos isolados. Dentre elas é possível citar: diagnóstico por meio de descargas parciais [32], reflectrometria no domínio do tempo [33] e corrente de relaxação isotérmica [44].

3.3 – Métodos diagnósticos *on-line*.

As exigências contínuas de crescimento de índices de produtividade nos processos industriais exigem, em contrapartida, uma contínua monitoração em relação a todos os procedimentos relacionados com o processo de produção. Nesse sentido, a interrupção de atividades, particularmente no que tange ao fornecimento de energia, tem conseqüências no processo produtivo, que em última análise repercute sob a forma de prejuízos de ordem financeira. Daí é que sobressai a necessidade e a importância de desenvolvimento de métodos diagnósticos das condições operacionais da camada isolante de cabos isolados, estando o cabo em plena operação. A seguir serão apresentados os seguintes métodos *on-line*:

- Método do fator de perdas dielétricas (medição da tgδ) [16], [41], [48-49];
- Método da potência dissipada [16], [49];
- Método da medição da resistência de isolação [16], [42], [50];
- Método da componente contínua da corrente fuga CA [16], [48-49], [51-53];
- Método da distorção harmônica total [54-63];
- Análise da fase e do módulo do terceiro harmônico [54-55].

3.3.1 – Método do Fator de Perdas Dielétricas

Quando um cabo isolado é submetido a uma tensão de alimentação CA a corrente que flui na isolação é quase que totalmente capacitiva, estando adiantada da tensão em 90˚. Todavia, uma pequena parcela da corrente de fuga tem a mesma fase da tensão e corresponde às perdas por dissipação na isolação. O fator de perda dielétrica (tgδ) corresponde à relação entre a componente ativa e a componente reativa da corrente de fuga e representa um indicador capaz de avaliar as perdas na isolação. Em geral, ele tende a crescer com o aumento da deterioração dielétrica e se trata de um indicador que reflete um valor médio das degradações que ocorrem ao longo do cabo. Ou seja, é tanto mais confiável quanto mais uniformemente se estabelecer a degradação.

No caso da ocorrência de diferentes graus de deterioração esse indicador não é capaz de distinguir entre uma deterioração devido à existência de muitas pequenas arborescências de uma deterioração advinda de poucas, porém longas arborescências que possam apresentar maior risco para a isolação. Essa constatação é um indicativo de que o fator de perda dielétrica está relacionado com as perdas, mas não necessariamente com a gravidade da avaria aqui entendida como o comprimento da arborescência, na medida em que esse parâmetro é relevante para a ruptura da isolação. O valor máximo permissível para este indicador é encontrado nos manuais do fabricante.

A figura 3.2 ilustra um circuito para medir o ângulo de perdas da isolação. A tabela 3.1, por sua vez, mostra os intervalos e critérios para diagnóstico de um cabo isolado com XLPE, submetido a uma tensão de 3,8kV [41].

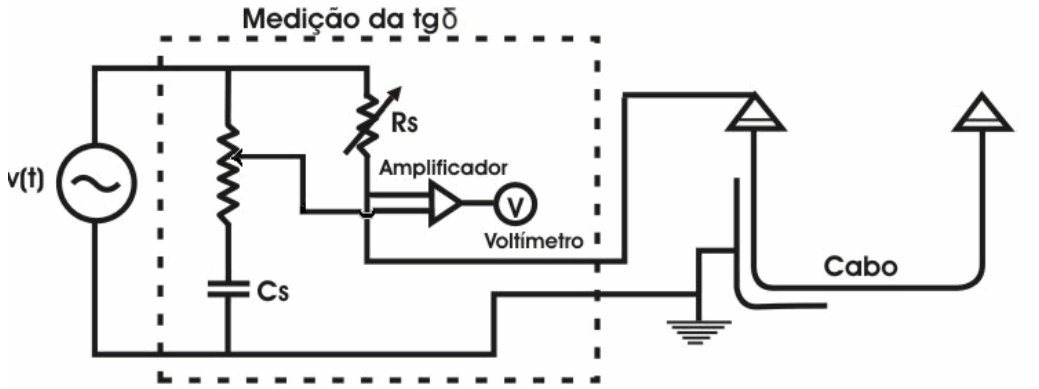


Figura 3.4 – Circuito para medição da tgδ [41].

Tabela 3.1 – Critérios de avaliação da isolação pela tgδ em cabo submetido a 3,8kV.

Item	**Avaliação**		
	Não-Deteriorado	Levemente Deteriorado	Deteriorado
tgδ em 3,8 kV	tgδ ≤ 0,1%	0,1 ≤ tgδ ≤ 5 %	tgδ > 5 %

Esta metodologia também pode ser realizada com o cabo desenergizado. Nesse sentido, a figura 3.5 apresenta a correlação entre os valores do ângulo de perdas dielétricas (tgδ) referente a um conjunto de medições, desse indicador de estado, realizadas em diversas linhas de transmissão pelo método *on-line* (linha em operação) e pelo método *off-line* (linha desenergizada). As medições foram realizadas em cabos XLPE, classe 6,6kV [48]. Observa-se uma boa correlação entre esses valores, notadamente a partir de tgδ =1, região em que a correlação correspondente se aproxima do valor unitário. Em outras palavras, os valores obtidos pelos dois métodos tornam-se mais próximos, na medida em que aumenta a degradação, na camada isolante.

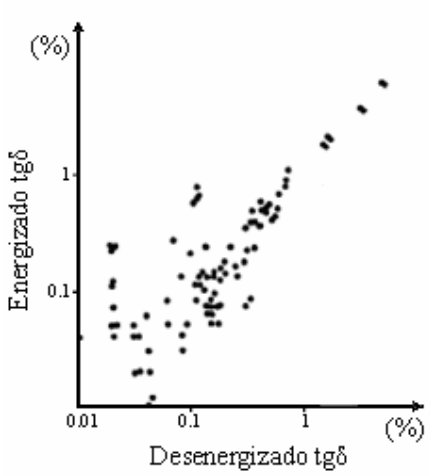


Figura 3.5 – tgδ on-line e tgδ off-line [48].

Esta estratégia de avaliação é amplamente utilizada, sobretudo pelo fato de não requerer a desenergização do cabo. Dentre as suas limitações pode-se citar [16], [49]:

- O elevado tempo que se faz necessário para a realização das medições, tendo em vista que os cabos devem ser analisados separadamente;

- Este parâmetro (tgδ) refere-se a um valor médio ao longo do cabo, podendo, portanto, por vezes, conduzir a diagnósticos incorretos, seja porque determinados níveis da tgδ, em pontos localizados, acima dos valores permitidos podem ser camuflados, seja porque poucas arborescências de tamanho longo e, portanto de maior risco para a isolação, podem apresentar menores perdas do que muitas arborescências, porém de pequeno comprimento.

3.3.2 – Método da Potência Dissipada

Devido às dificuldades existentes para a medição do fator de perdas dielétricas (tgδ), sobretudo por se apresentar em valores de grandeza muito pequenos, é possível lançar mão de outros parâmetros que possam estar associados com a variação desse mesmo indicador. Uma das possibilidades identificadas na literatura é utilizar a potência dissipada no dielétrico, na medida em que tanto ela quanto o fator de perdas estão intimamente relacionadas com a parcela ativa da corrente de fuga [16], [49].

Com base na representação da isolação do cabo, figura 3.6, e no diagrama fasorial apresentado na figura 3.7, é possível obter a corrente capacitiva do cabo, equação (3.1), utilizando-se a reatância capacitiva e a tensão nominal fornecida nos catálogos dos fabricantes de cabos isolados.

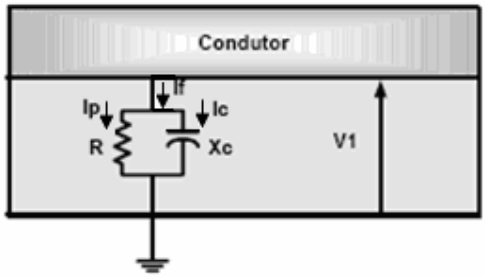


Figura 3.6 – Representação da isolação do cabo [49].

Sendo,

I_f – corrente de fuga;

I_p – parcela da corrente representativa das perdas Joule;

I_c – componente capacitiva;

R – resistência da isolação;

X_c – reatância capacitiva da isolação;

V_1 – tensão fase - neutro aplicada ao cabo;

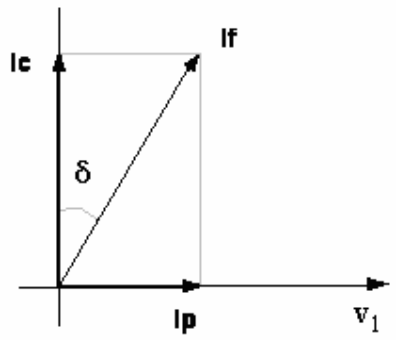


Figura 3.7 – Diagrama fasorial representativo da tensão e da corrente de fuga.

$$I_c = \frac{V_1}{X_c} \tag{3.1}$$

A reatância capacitiva apresentada na equação (3.1) é função da freqüência do sistema e da capacitância apresentada pela isolação do cabo. Partindo do pressuposto que a freqüência de operação do sistema elétrico é constante e que a capacitância obtida via parâmetros físicos e geométricos do cabo também seja fixa, conclui-se que a corrente capacitiva será, então, uma função da tensão aplicada ao cabo. Admitindo-se que a tensão seja a nominal do cabo, logo a corrente de fuga capacitiva do dielétrico será a nominal e, uma vez preservada a qualidade do isolamento e a geometria do cabo, a mesma possui valor constante.

A parcela ativa da corrente de fuga do dielétrico, por sua vez, será dada por:

$$I_p = I_c * tg\delta \tag{3.2}$$

Sendo,

δ - ângulo de perdas da isolação.

Para uma camada isolante a resistência de isolação e a potencia ativa podem ser expressas por meios das equações (3.3) e (3.4), respectivamente.

$$R = \frac{V_1}{I_p} \tag{3.3}$$

$$P = \frac{V_1^2}{R} \tag{3.4}$$

Substituindo-se (3.2) e (3.3) em (3.4), obtém-se:

$$P = \frac{V_1^2 * tg\delta}{X_c} \tag{3.5}$$

Daí a máxima potência dissipada pode ser calculada a partir do máximo ângulo de perdas admissível pelo isolante ($tg\delta_{max}$), disponível no catálogo do fabricante, considerando que tanto a freqüência do sistema quanto a capacitância obtida através de parâmetros fixos e geométricos do cabo seja constantes. Portanto sempre que ocorrer variação da potência, isso é um sinal indicativo de que o material isolante está modificando as suas propriedades dielétricas.

Assim, conclui-se que, se a $tg\delta$ estiver acima dos valores permissíveis, a potência também estará, e, desta forma, este último parâmetro poderá ser empregado para diagnosticar o estado de degradação do dielétrico [16], [49].

Uma limitação deste método é que, por meio da potência dissipada, não é possível diferenciar um resultado advindo de uma deterioração devido a muitas arborescências de pequeno comprimento, de uma degradação conseqüência de poucas, porém longas arborescências, que representa maior risco para a isolação.

3.3.3 – Método da Medição da Resistência de Isolação

Outro indicador utilizado para analisar e avaliar os danos sofridos pela isolação de cabos está relacionado com a clássica resistência de isolamento. A camada isolante de cabos isolados pode ser representada eletricamente por uma capacitância em série ou em paralelo com uma resistência. À medida que a degradação evolui, ocorre um acréscimo das perdas com um incremento na corrente de fuga. Ou seja, a degradação acarreta um decréscimo no valor da resistência de isolação do cabo, sendo assim a medição da resistência de isolação permite, por meio de medições realizadas ao longo do tempo, analisar e avaliar os prováveis danos acarretados ao isolante dos cabos. Quando esse indicador se situar em níveis abaixo dos limites permitidos é sinal de que o isolante está perdendo suas características dielétricas, mais precisamente, sua capacidade de isolação [16], [42], [50].

A referência [43] apresenta os critérios de avaliação e respectivos valores para a resistência de isolação para o caso de um cabo XLPE, de média tensão.

Tabela 3.2 – Critérios para diagnosticar a resistência de isolação em cabos XLPE.

Resistência da Isolação (MΩ)	**Avaliação**	**Providências**
$R \geq 1000$	Não deteriorado	-
$1000 < R \leq 100$	Levemente Deteriorado	Monitoração em menores espaços de tempo
$100 < R \leq 10$	Deteriorado	Preparação de novo cabo
$R \leq 10$	Altamente Deteriorado	Substituição imediata

Uma das limitações deste método diz respeito ao fato de que as medições devem ser realizadas individualmente, o que acarreta longos períodos para a execução dos testes [16].

3.3.4 – Método da Componente Contínua

Quando da manifestação de arborescências em cabos isolados é possível identificar uma pequena parcela de corrente contínua superposta à corrente alternada de fuga, que flui entre a superfície do condutor e a blindagem da isolação. Essa componente contínua está intimamente relacionada com o grau de deterioração da isolação do cabo. Ou seja, quanto maior a degradação por arborescências (*treeing*) maior será o valor dessa componente contínua [51-52].

A figura 3.8 apresenta uma representação elucidativa da formação dessa componente contínua para o caso de uma arborescência do tipo *vented-tree* iniciando-se no condutor em direção à blindagem [48]. Normalmente é nessa direção que se dá esse tipo de deterioração, podendo, no entanto, ocorrer, com menor incidência, no sentido inverso [16].

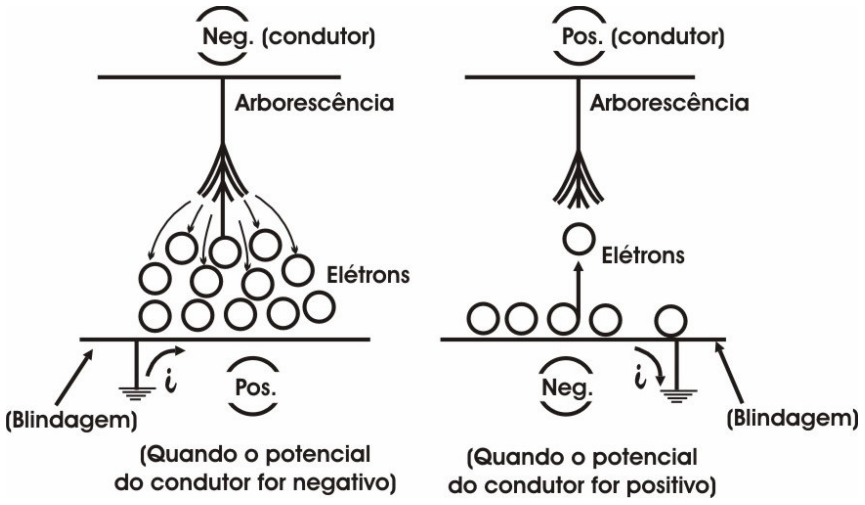


Figura 3.8 – Princípio da formação da componente contínua da corrente de fuga [48].

Se o cabo estiver desenergizado, isto é sem tensão de alimentação, então os elétrons existentes na camada isolante encontram-se desorientados face à inexistência de campo elétrico que os direcione. Quando o cabo for alimentado com uma tensão alternada, os elétrons são submetidos a um direcionamento cuja direção será função do respectivo campo elétrico aplicado. Quando o semiciclo negativo da onda de tensão estiver passando pelo condutor, a arborescência está negativa, injetando cargas negativas em direção à blindagem da isolação (força de repulsão). Nessa situação, a corrente convencional ocorre no sentido da blindagem para o condutor. Quando houver inversão de polaridade e o semiciclo positivo da onda de tensão estiver passando pelo condutor, a isolação da blindagem injeta elétrons da arborescência. Nesta situação ocorre uma força de atração. Nesse instante, tem-se que a corrente convencional flui no sentido do condutor para a blindagem da isolação [16].

Existem inúmeras teorias e contradições a respeito do surgimento da componente contínua devido à presença de arborescências. No entanto, grande parte dos especialistas defende que a manifestação desse fenômeno se assemelha ao efeito de polaridade que se manifesta em eletrodos não uniformes, ou seja, assimétricos. Assim, a quantidade de cargas injetadas do condutor para a blindagem através da arborescência é maior do que aquelas atraídas pela arborescência quando o semiciclo positivo passa pelo condutor. Espera-se que a injeção e a atração das cargas negativas ocorram devido ao potencial formado pelas cargas no isolante e a tensão aplicada ao condutor [16]. Dessa forma, o movimento das cargas negativas pode ser medido como uma componente contínua superposta à corrente alternada de fuga, conforme ilustrado na figura 3.9, onde a escala para a componente de corrente contínua foi estabelecida arbitrariamente com vistas a maximizar, visualmente, a influência dessa componente na forma de onda da corrente de fuga alternada.

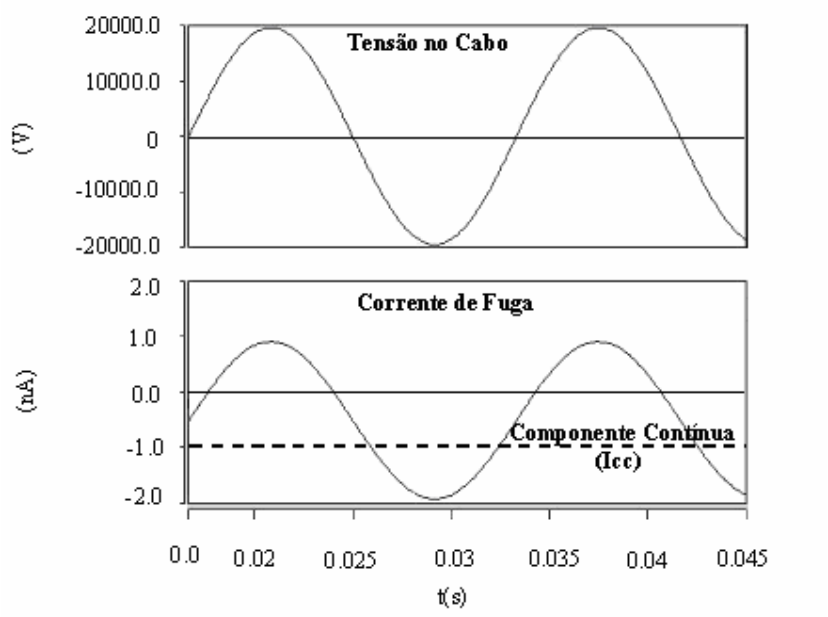


Figura 3.9 – Tensão aplicada ao cabo e correspondente corrente de fuga na presença de arborescências.

Um aspecto relevante em relação a este indicador de estado diz respeito ao fato de que o mesmo também está relacionado com o comprimento das arborescências, conforme pode ser observado na figura 3.10, podendo ser um indicador adequado para identificação da severidade da deterioração, tendo em vista que o tamanho da arborescência é um fator importante para avaliar os riscos a que estão sujeitos o cabo [51]. Além disso, a existência dessa componente contínua aponta para a diminuição da tensão de ruptura suportável pelo dielétrico, para a redução da resistência de isolação e para o aumento no número de ocorrências de descargas parciais, particularidades intrínsecas à presença de arborescência na camada isolante [53].

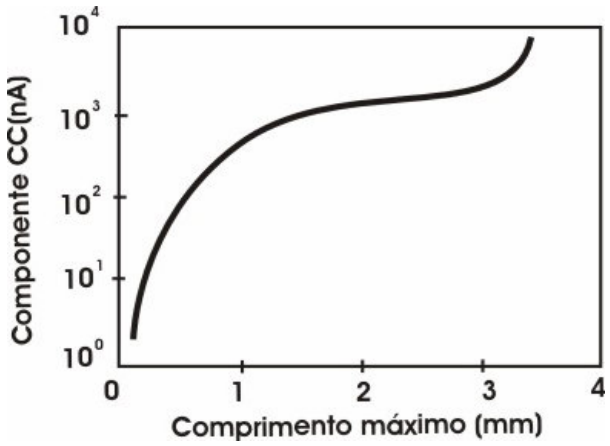


Figura 3.10 – Relação entre o comprimento da arborescência e componente CC [51].

A maior dificuldade para a utilização deste indicador está no fato da componente contínua se manifestar com amplitudes da ordem de nanoampères (nA), dificultando uma leitura precisa, sobretudo se considerarmos que alguns dispositivos eletrônicos utilizados para tal fim, apresentam níveis de *off-set* da ordem de miliampères (mA) [49].

A tabela 3.3 apresenta o resultado de medições da componente contínua para fins de estabelecimento de critérios para diagnósticos da isolação, em cabos classe 6,6kV [41]:

Tabela 3.3 – Critérios para diagnóstico da isolação em cabos classe 6,6kV.

Critérios	**Avaliação**
0,5 nA ou menos	Não deteriorada
0,5 a 30 nA	Deteriorada e necessitando de maior atenção por parte da manutenção preventiva
30 nA ou mais	Extensamente degradada e o cabo precisa ser urgentemente substituído

A tabela 3.4, por sua vez, apresenta o resultado de medições da componente contínua para fins de estabelecimento de critérios para diagnósticos da isolação, em cabos classe 10kV [51]:

Tabela 3.4 – Critérios para diagnóstico da isolação em cabos classe 10kV.

Critérios	Avaliação
10nA ou menos	Não deteriorada
10 a 100nA	Deteriorada e necessitando de maior atenção por parte da manutenção preventiva
100nA ou mais	Extensamente degradada e o cabo precisa ser urgentemente substituído

3.3.5 – Método da Distorção Harmônica da Corrente de Fuga

Mais recentemente, estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos tendo por objetivo a análise da distorção da corrente de fuga, mais precisamente da contribuição harmônica presente na parcela ativa da corrente de fuga [54-63]. Isso porque, mesmo perante um sinal de alimentação puramente senoidal, os cabos, submetidos a diferentes níveis de degradação por arborescência, apresentam uma corrente de fuga distorcida, contendo, predominantemente, componentes harmônicos ímpares, particularmente a componente de terceira ordem [54-57]. A análise da evolução dos níveis de degradação demonstrou que quanto maior a severidade da degradação tanto maior será a não linearidade produzida pelas arborescências.

A figura 3.11 apresenta a forma de onda da corrente de fuga, parcela ativa, para diferentes níveis de tensão. Observa-se que quanto mais elevado for o nível de tensão a que a amostra está submetida tanto maior será a distorção harmônica presente na corrente de fuga e, portanto, mais degradada se encontra a amostra.

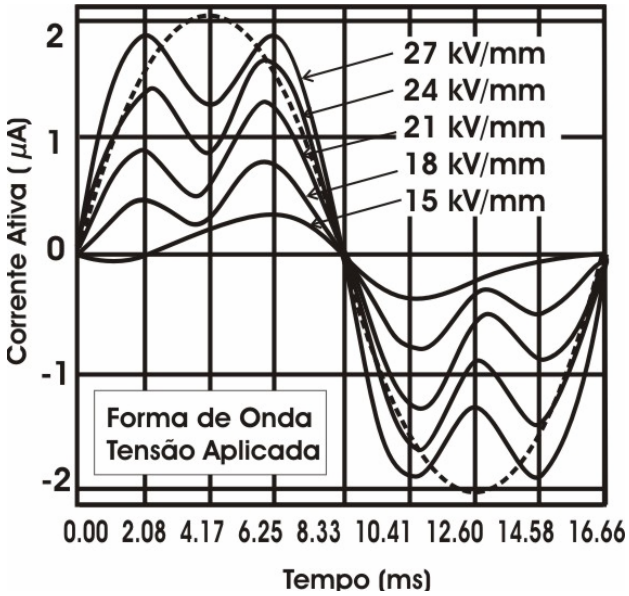


Figura 3.11 – Corrente de fuga ativa para diferentes níveis de tensão [61].

Nessa perspectiva e considerando a aplicação de uma tensão do tipo:

$$v(t) = V_m sen(\omega t) \tag{3.6}$$

Então a corrente de fuga pode ser expressa por (3.7).

$$i(t) = \sum_{n=2}^{n\max} I_n sen(n\omega t + \theta_n) \tag{3.7}$$

Levando-se em conta que a taxa de distorção harmônica está diretamente associada à presença de harmônicos, então o DHT_I se apresenta como um indicador do estado de degradação da camada isolante, que pode ser determinado por meio de (3.8).

$$DHTI = \sqrt{\sum_{n=2}^{n\max} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} * 100 \tag{3.8}$$

Sendo,

I_n = Valor máximo da corrente para o harmônico de ordem n;

I_1 = Valor máximo da corrente fundamental;

n = Ordem do harmônico.

Uma informação relevante sobre esse indicador reside no fato de que o mesmo apresenta uma melhor correlação com o comprimento das arborescências do que o fator de perdas dielétricas (tgδ), conforme pode ser observado nas figuras 3.12 e 3.13 [56]. É importante registrar que essa constatação advém dos resultados de experimento onde a degradação foi obtida por meio de condições controladas, produzindo arborescências do tipo *vented-tree* com densidade e comprimento bem definidos, permitindo correlacionar o comprimento das arborescências com o DHT_I e com a tgδ.

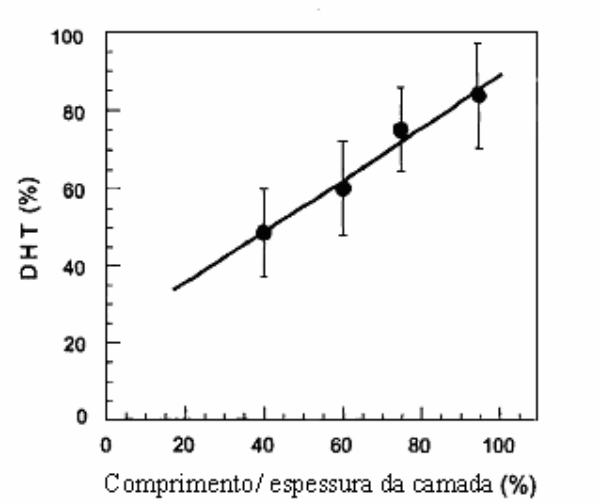


Figura 3.12 – Correlação entre o DHT_I e o comprimento das arborescências da corrente de fuga ativa [56].

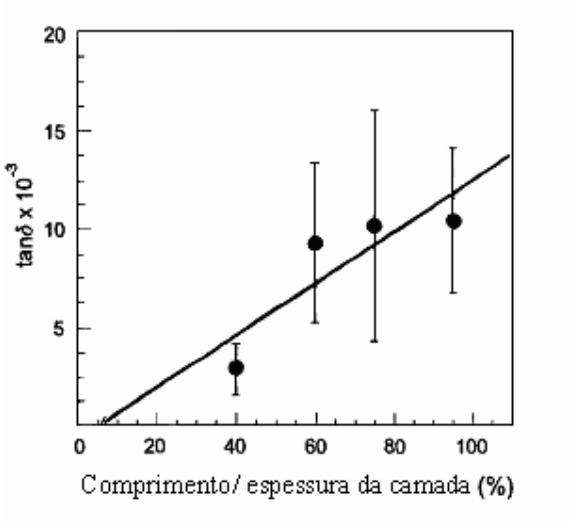


Figura 3.13 – Correlação entre a tgδ e o comprimento das arborescências da corrente de fuga [56].

Na análise deste indicador se faz necessário levar em consideração a presença de tensões operacionais distorcidas, comuns em sistemas de potência na medida em que tais distorções terão influencia direta no nível de distorção da corrente de fuga. Além disso, é preciso levar em conta a freqüência de operação, uma vez que o aumento da freqüência, para um mesmo nível de tensão, implica no aumento da amplitude da corrente de fuga [58-59], [63].

Outro parâmetro a ser considerado é a temperatura de operação, tendo em vista que para níveis mais elevados de temperatura, quanto maior a tensão de suprimento, maior será o acréscimo na relação entre o módulo do terceiro harmônico e o módulo da componente fundamental. Essa relação corresponde ao DHT_I considerando-se apenas a contribuição do terceiro harmônico [62].

Devido à sensibilidade deste método em relação ao comprimento das arborescências, o mesmo se torna adequado para utilização em determinadas classes de tensão nas quais os cabos elétricos são submetidos a alto estresse. Nessas situações em que se faz necessário considerar a presença de pequenas

arborescências que não são identificadas nos métodos convencionais nem são prejudiciais em classes de tensões menores. O diagnóstico por meio da identificação dos harmônicos existentes na corrente de fuga se apresenta como uma opção viável, podendo, no entanto, ser aplicado indistintamente a todas as classes de tensão.

3.3.6 – Ângulo e fase do terceiro harmônico da componente ativa da corrente de fuga

Existe uma estreita relação entre o nível de degradação e o módulo e ângulo do terceiro harmônico de tal forma que com o aumento do nível de degradação, ocorre uma redução gradativa no valor do ângulo desse harmônico e uma tendência de crescimento no valor do respectivo módulo. Diferentemente da fase, o módulo do terceiro harmônico, segundo a literatura pesquisada, pode apresentar consideráveis dispersões. O ângulo e o módulo do terceiro harmônico são obtidos por meio da decomposição, em séries de Fourier, da forma de onda da parcela ativa da corrente de fuga. A correlação entre o ângulo de fase do terceiro harmônico e o comprimento das arborescências, assim como entre o ponto de ruptura e o ângulo de fase θ_3, para amostras de cabos XLPE com 0,5 mm de espessura e para pedaços de cabos de 5 a 7 m, são apresentadas nas figuras 3.14 e 3.15, respectivamente. Constata-se uma boa correlação entre θ_3 e o comprimento das arborescências, assim como entre o ponto de ruptura da camada isolante e o ângulo de fase do terceiro harmônico. Observa-se que, quanto maior o comprimento das arborescências mais o ângulo de fase, θ_3 tende a zero. Por outro lado, quanto menor for esse ângulo de fase, menor é o estresse de tensão requerido para que ocorra a ruptura da camada isolante [55].

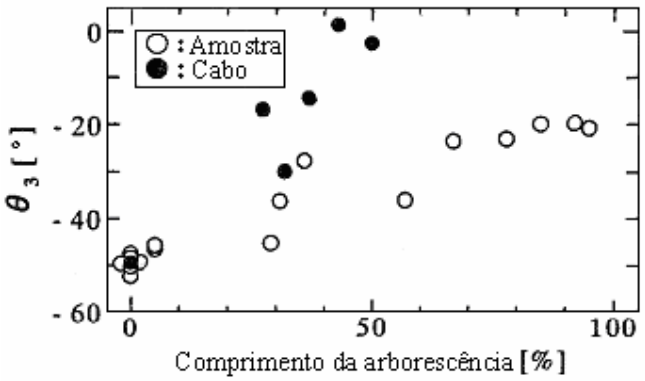


Figura 3.14 – Correlação entre o ângulo de fase do terceiro harmônico e o tamanho das arborescências [55].

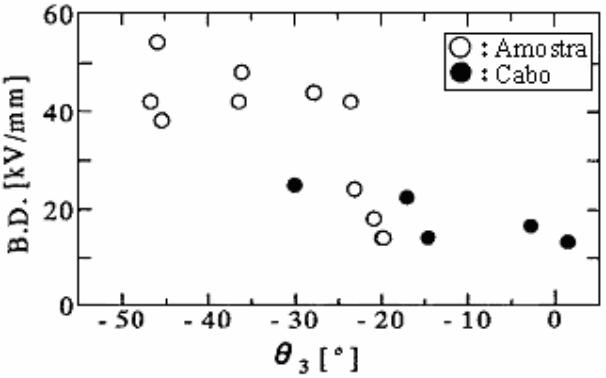


Figura 3.15 – Correlação entre o comprimento das arborescências e o ponto de ruptura da isolação [55].

A distorção harmônica na corrente de fuga é a soma total dos harmônicos que são geradas por cada arborescência, contemplando assim, aquelas provenientes de pequenas, médias ou longas arborescências. Porém, existem distintas densidades de degradação ao longo dos cabos. Para cada caso é possível identificar um módulo e um ângulo correspondente ao terceiro harmônico, que, a rigor, deveriam ser analisados separadamente. Eles diferem, entre si, em função do tipo de distribuição da degradação presente em cada cabo.

A seguir é apresentado um método capaz de identificar arborescências que sejam prejudiciais à isolação, sem ser influenciado pelas distribuições da degradação existentes na isolação.

Esta metodologia procura contornar a limitação de outros métodos que não diferenciam entre a ocorrência de várias arborescências com leves degradações daquelas com poucas arborescências, mas apresentando sérias degradações. A contribuição harmônica, presente na corrente de fuga, corresponde à soma dos harmônicos gerados por cada arborescência e, portanto, podendo conter sinais devido a arborescências de tamanho longo, médio e pequeno. Considerando-se que, existem, ao longo do cabo, diferentes densidades de deteriorações, caracterizando distintas distribuições de degradações, adotam-se como referência os valores do módulo e da fase do terceiro harmônico, obtidos em laboratório, com amostras de cabos apresentando desde leves até severas degradações, cada uma correspondente a uma determinada distribuição de arborescências. A avaliação do nível de degradação existente na isolação é feita por meio do gráfico apresentado na figura 3.16, que ilustra as amplitudes e respectivas fases para cada uma das distribuições adotadas como referência (1, 2, 3, 4, 5 e 5 distribuições de arborescências) [54].

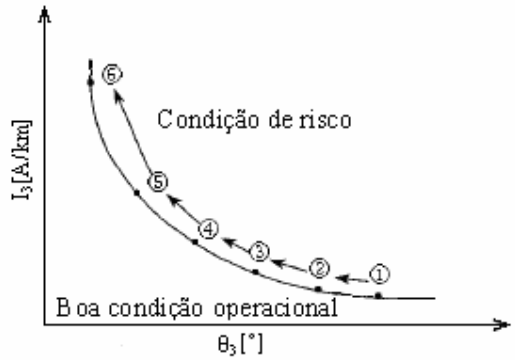


Figura 3.16 – Curva para diagnóstico do nível de degradação [54].

Assim, uma vez identificado o módulo e a fase do harmônico de terceira ordem, da parcela ativa da corrente de fuga do cabo sob análise, confronta-se esses dados com a curva previamente estabelecida, por meio do procedimento anteriormente referido. Se o ponto estiver situado abaixo da curva o cabo encontra-se em bom estado de conservação. No caso do ponto situar-se acima da curva o cabo encontra-se em situação de risco.

3.4 – Diagnóstico utilizando dois indicadores

Devido à complexidade que envolve o fenômeno de degradação por arborescências a tendência é que o diagnóstico seja feito analisando-se mais de um indicador de estado. Nesse sentido, na referência [41] é apresentado um modelo de diagnóstico, utilizando cabos isolados com XLPE, classe 6,6kV, deteriorados por arborescência, avaliando tanto o ângulo de perdas dielétricas (tgδ) quanto a componente contínua da corrente de fuga. Ou seja, o método utiliza, simultaneamente, dois indicadores de estado para realizar a análise da camada isolante do cabo isolado.

Os critérios para o diagnóstico do estado de conservação do cabo foram estabelecidos na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Critérios para diagnóstico da isolação em cabos classe: 6,6kV.

Avaliação	Componente CC	tgδ
A	0,5nA ou menos	0,1% ou menos
B	0,5 a 30nA	0,1 a 0,15%
C	30nA ou mais	0,15% ou mais

- Avaliação A: O cabo está isento de deteriorações;

- Avaliação B: A camada isolante encontra-se um pouco deteriorada e o cabo necessitando de maior atenção por parte do setor de manutenção;

- Avaliação C: A isolação encontra-se extensamente deteriorada e o cabo precisando ser urgentemente substituído.

A validação do modelo de diagnóstico pôde ser comprovada por meio da comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos separadamente e os apurados conjuntamente, conforme pode ser constatado na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Comparação do desempenho dos diagnósticos

	Avaliação A	**Avaliação B**	**Avaliação C**
Componente CC	80%	7%	60%
tgδ	79%	12%	79%
tgδ – Componente CC	80%	27%	100%

Esses resultados permitem concluir que a análise conjunta dos dois indicadores de estado se mostrou muito eficiente para os casos em que os cabos apresentavam elevada degradação, permitindo uma avaliação com 100% de acertos para essas condições. O que significa dizer que, em alguns dos cabos analisados, um indicador de estado se mostrou mais adequado do que o outro para identificar a degradação presente na camada isolante. Todavia, esse procedimento foi pouco preciso quando da avaliação de cabos isolados com baixos níveis de degradação. Vale ressaltar que este método permitiu a leitura dos indicadores de estado em linhas que estavam operando. Outro aspecto a ser

considerado é que o tempo de medições ainda esteve muito alto, algo em torno de 30 minutos para a realização do diagnóstico de uma única linha.

3.5 – Considerações Finais

O presente capítulo sintetizou os métodos diagnósticos *off-line* e *on-line* disponíveis na literatura especializada. Em todos os métodos apresentados o objetivo central é a identificação de parâmetros associados à degradação que possam ser utilizados como indicadores de estado, para aferir o nível de degradação em que se encontra o cabo. Devido à complexidade que caracteriza a degradação por arborescências, a análise conjunta de diversos indicadores, cada um mostrando um aspecto particular do fenômeno, possibilita diagnósticos mais próximos da realidade, sendo, portanto, mais confiáveis do que aqueles advindos de apenas um indicador isoladamente. Por essa razão, a metodologia perseguida nesta tese, pautar-se-á, a princípio, em indicadores do tipo: ângulo de perdas ($tg\delta$), potência dissipada (P), distorção harmônica total (DHT_I) e o ângulo de fase do terceiro harmônico (θ_3), grandezas estas intimamente relacionadas com a corrente de fuga presente na isolação dos cabos.

CAPÍTULO IV

Modelagem de cabos elétricos degradados por arborescência

4.1 – Considerações iniciais

Conforme já mencionado no item 3.35, do capítulo anterior, pesquisas recentes comprovaram que a deterioração de cabos elétricos pelo fenômeno de arborescência, acarreta uma contribuição para a distorção da corrente de fuga, de tal forma que quanto maior for o nível de degradação tanto maior será a distorção harmônica presente na corrente de fuga. Nesse sentido, este capítulo abordará a modelagem de cabos elétricos no domínio do tempo, contemplando a degradação por arborescência. O desafio que se apresenta consiste em incluir na formulação matemática do modelo de cabos elétricos a característica não-linear das arborescências.

Nesta etapa dos estudos a validação do modelo proposto levará em conta tão-somente os resultados de simulações computacionais identificadas na literatura especializada, as quais consideram os valores dos parâmetros do modelo com base em medições da corrente de fuga, realizadas em laboratório.

4.2 – Modelos para representação das arborescências em cabos elétricos

O fenômeno que envolve o surgimento e propagação das arborescências de cabos isolados que operam em ambientes úmidos, conforme já abordado, tem sido objeto de diversos estudos e pesquisas, contemplando os aspectos elétricos, químicos e mecânicos.

A caracterização do fenômeno, associada à necessidade de identificação de metodologias que permitam, com segurança, diagnosticar as condições operacionais da isolação de cabos isolados ensejam o desenvolvimento de modelos matemáticos que reproduzam, de forma adequada, o comportamento de um cabo isolado submetido à degradação por arborescências. Nesse sentido, nesta parte dos estudos são apresentados modelos matemáticos encontrados na literatura para representar o fenômeno em uma amostra degradada de cabo, bem como modelos para representação da corrente de fuga em cabos com arborescência.

4.2.1 – Fundamentos para modelagem da arborescência de uma amostra de cabo degradado

Uma imagem representativa de uma amostra de cabo isolado com degradação está ilustrada na figura 4.1. Observa-se que a amostra pode ser dividida em duas camadas como indicado, uma correspondendo à parte não degradada, de espessura d_1 e a outra apresentando arborescências, de espessura d_2 [64-65].

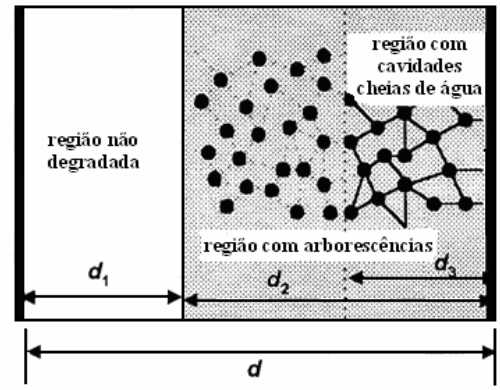


Figura 4.1 – Representação de uma amostra de cabo degradado.

O circuito equivalente da figura 4.2 pode ser utilizado para representar a impedância equivalente da isolação do cabo degradado, onde a parte sadia d_1 do isolamento, acrescida da região d_2, degradada sem a presença de água, é representada por C_1 e a parte comprometida d_3, com cavidades cheias de água, é representada por C_2 em paralelo com a condutância G_2. Devido à presença de canais cheios de água, é razoável assumir que a camada d_3 apresenta condutância bem maior do que as demais camadas, de modo a ser possível desconsiderar as condutâncias das regiões d_1 e $(d_2 - d_3)$.

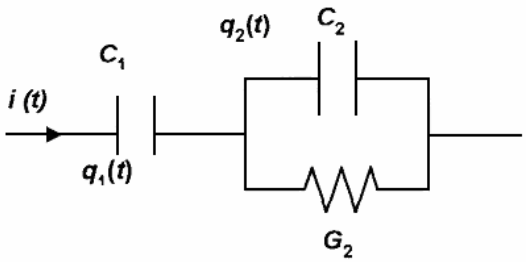


Figura 4.2 – Circuito equivalente de uma amostra de cabo isolado degradado.

A permissividade relativa ε_{r1}=2,3 é usada para a região d_1. A permissividade relativa ε_{r2} da região d_2 pode ser aproximada pela subtração da capacitância C_0 e condutância G_0, referentes à região d_1, da capacitância C e

condutância G da amostra, considerando d_2 = 0,46 mm. Neste caso, ε_{r2} = 2,94 (60 Hz).

A densidade de corrente j_{G2} através da camada d_3 é assumida como dependente do campo elétrico E aplicado à camada, podendo ser representada pela equação (4.1) [64]:

$$j_{G2} = (\sigma_0 / h)\sinh\left(hE\right) \tag{4.1}$$

O parâmetro σ_0 representa a condutividade da camada d_3 submetida a campos elétricos de pequena intensidade e h, por sua vez, caracteriza a dependência da condutância da camada em função da tensão.

A corrente elétrica *i(t)* se relaciona com a densidade de corrente j como segue:

$$i(t) = j\,S \tag{4.2}$$

Onde S representa a área pela qual a corrente circula. Sendo assim, a corrente $i(t)$ através do circuito pode ser determinada por meio da equação (4.3):

$$i(t) = \frac{dq_2(t)}{dt} + \frac{\sigma_0}{h}\sinh\left[h\,E\right]S \tag{4.3}$$

Considerando que a diferença de potencial entre dois pontos pode ser determinada pela equação (4.4):

$$V_a - V_b = \int_a^b E\,dl \tag{4.4}$$

A tensão V nos terminais de C_2 pode ser definida, de forma aproximada, em função do campo elétrico E por:

$$V = E\, d_3 \tag{4.5}$$

Sendo

$$V = \frac{q_2(t)}{C_2} \tag{4.6}$$

Então,

$$E = \frac{q_2(t)}{d_3\, C_2} \tag{4.7}$$

Substituindo (4.7) em (4.3), tem-se:

$$i(t) = \frac{dq_2(t)}{dt} + \frac{\sigma_0 S}{h} \sinh\left[\frac{h\, q_2(t)}{d_3 C_2}\right] \tag{4.8}$$

Onde S representa a área do condutor e $q_2(t)$ a carga de C_2.

A corrente total $i(t)$ que flui na isolação pode ser determinada por meio de resolução numérica da equação (4.8) [64]. Assim, subtraindo da corrente total (4.8) a corrente capacitiva que flui em C_2, obtém-se a corrente CA de fuga, responsável pelo efeito Joule.

A condutância G_2 e a capacitância C_2 da camada d_3 são expressas por [64]:

$$G_2 = \sigma_{d3} \frac{S}{d_3} \tag{4.9}$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r2}' \frac{S}{d_3} \tag{4.10}$$

Sendo ε_0 a permissividade dos espaços vazios e σ_{d3} a condutividade nessa parte do material, submetido ao campo elétrico. Quanto à C_1 pode ser definida como:

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{(2,3\varepsilon_0)/d_1} + \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_{r2}{}' /(d_2 - d_3)} \tag{4.11}$$

Efetuando a transformação do circuito equivalente da figura 4.2 em uma combinação paralela de capacitância e de condutância, os parâmetros C - capacitância equivalente e $tg\ \delta$ - fator de perdas dielétricas na isolação, podem ser obtidos como segue:

$$C = \frac{\omega^2 C_1 C_2 \left(C_1 + C_2\right) + C_1 G_2^2}{G_2^2 + \omega^2 \left(C_1 + C_2\right)^2} \tag{4.12}$$

e

$$tg\ \delta = \frac{\omega C_1^2 G^2}{\omega^2 C_1 C_2 \left(C_1 + C_2\right) + C_1 G_2^2} \tag{4.13}$$

Variando-se os parâmetros desse modelo, a freqüência, assim como os níveis de tensão é possível analisar os correspondentes níveis de degradação em termos da presença de harmônicos por meio das equações (4.12) e (4.13). Conforme destacado anteriormente, o conhecimento do fator de perdas dielétricas é um dos indicadores utilizados para diagnosticar o estado da isolação de cabos. Na seqüência será abordada a característica não linear da corrente de fuga que flui em uma amostra de cabo degradada por arborescências, assim como modelagens, para cabos degradados, levando em conta essa não linearidade.

4.2.2 – Caracterização da corrente de fuga do isolante

Um material isolante perfeito apresentaria apenas a corrente capacitiva em quadratura com a tensão de alimentação. Na prática, contudo, os dielétricos apresentam imperfeições que são evidenciadas pela circulação de outra componente, qual seja a corrente de condução. Essa componente da corrente de fuga, em fase com a tensão de alimentação, representa as perdas por dissipação na isolação. A soma das duas componentes mencionadas, em quadratura, dará como resultante a corrente total ou de fuga.

Estudos experimentais e teóricos têm demonstrado que a corrente de fuga que flui entre a superfície do condutor e a blindagem da isolação de um cabo com presença de arborescências apresenta um comportamento não linear, com um conteúdo harmônico considerável. Particularmente, merece destaque a componente de terceira ordem e uma pequena componente contínua. Os estudos realizados permitiram constatar, ainda, que o nível de distorção harmônica, bem como a amplitude da corrente contínua está intimamente relacionado com o grau de degradação em que se encontra a isolação do cabo [54-63].

De maneira a ilustrar a não linearidade entre a corrente de fuga e a tensão de alimentação, a figura 4.3 exibe a característica V-I, de uma amostra muito degradada por arborescências, submetida a uma tensão puramente senoidal [55].

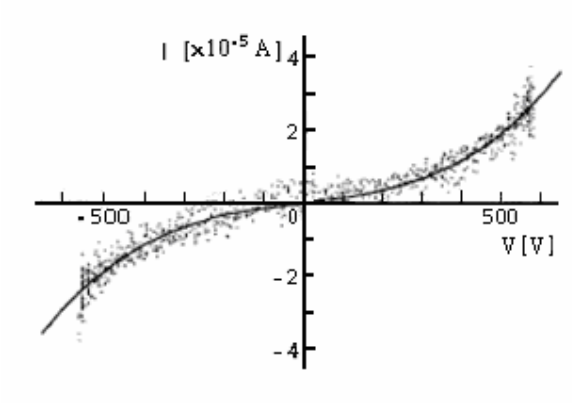


Figura 4.3 – Característica V-I na isolação degradada de um cabo elétrico [55].

A relação entre a corrente e a tensão de um material com um conjunto de arborescências, com base na figura 4.3, pode ser aproximada, utilizando-se técnicas de interpolação, pela equação (4.14).

$$i = \frac{1}{R}\left(v + k_{arb} v^3\right) \tag{4.14}$$

Sendo:

i = corrente que flui na isolação degradada

k_{arb} = constante;

R = resistência de isolação;

v = tensão de alimentação

Com vistas a definir um elemento representativo dessa não linearidade, faz-se necessário considerar que se o cabo estiver desenergizado, ou seja, sem tensão, então as cargas elétricas contidas na isolação estão com polarizações aleatórias, pois não existe nenhuma "força" que os guiem e/ou orientem numa determinada direção. No entanto, se o cabo for energizado com uma tensão

alternada, ocorrerá uma orientação dos dipolos, cuja direção dependerá do campo elétrico aplicado. Nesse contexto, a dificuldade imposta pelas cavidades, ao movimento dessas cargas dentro do polímero, pode ser interpretada como uma resistência não linear colocada em série com a capacitância de fuga remanescente da área não deteriorada, por onde circulará a corrente distorcida, a qual é gerada devido à aplicação da tensão senoidal entre o cabo e a blindagem.

De maneira a retratar de forma mais adequada o fenômeno em questão, a figura 4.4 ilustra as formas de onda da tensão e da componente da corrente de fuga referente às perdas Joule, obtidas experimentalmente de uma amostra de cabo degradado. Observa-se que, apesar da forte deformação dessa componente, esta se encontra em fase com a tensão de alimentação, fato esse, que reforça a adoção de uma resistência não linear para representar a arborescência [55].

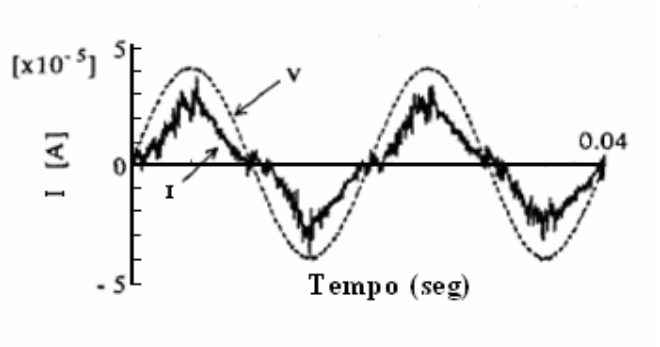


Figura 4.4 – Tensão e corrente medidos numa amostra da isolação de um cabo degradado [55].

4.2.3 – Modelo para representação da camada isolante degradada

Nessa linha de raciocínio, o modelo de uma camada isolante submetida ao fenômeno de arborescência pode ser representado pelo circuito indicado na figura 4.5, no qual a região com arborescência é representada por um resistor

não linear em série com uma capacitância, correspondente à região ainda não degradada. O capacitor C_0 em paralelo com a resistência R_0 representa as condições normais da isolação não degradada. O capacitor C_r, por sua vez, diz respeito à parte da camada isolante remanescente, não degradada [55]. Convém destacar que, muito embora a região com arborescência seja representada apenas por um componente resistivo, a equação correspondente à corrente que flui através dele foi obtida a partir da característica V-I de uma amostra de cabo degradada por arborescência, e, portanto, considerando tanto a parcela de natureza resistiva quanto a parcela de natureza capacitiva dessa corrente de fuga, independentemente do nível de degradação presente da camada isolante.

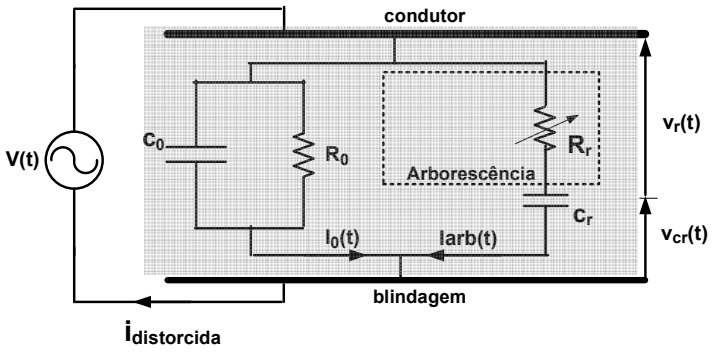


Figura 4.5 – Modelo representativo da isolação de um cabo com a presença de arborescências.

A corrente $i_{arb}(t)$ que flui através da arborescência, tendo por referência (4.14), pode ser expressa por (4.15):

$$i_{arb}(t) = \frac{1}{R}\left[k_{arb}\, v_r^3(t) + v_r(t)\right] \tag{4.15}$$

4.3 – Proposta de modelo matemático para o fenômeno de arborescências em cabos

A idéia central, proposta neste estudo é considerar a hipótese, ainda não explorada na literatura especializada, que consiste na possibilidade de que a característica não linear das arborescências tenha comportamento similar à curva característica do diodo semicondutor na região de polarização direta. Com o auxílio da física do estado sólido, é possível mostrar que as características gerais de um diodo semicondutor são definidas pela equação (4.16), para as regiões de polarização direta e reversa [67]:

$$I_D = I_s \left(e^{kV_D} - 1 \right) \tag{4.16}$$

Sendo k função de parâmetros intrínsecos à construção do diodo e da temperatura de operação e Is a corrente de saturação reversa. Para fins comparativos, a figura 4.6 é indicativa da característica V-I típica de um diodo polarizado diretamente, porém operando numa região para a qual ainda não ocorreu o processo de condução plena. Por outro lado, a figura 4.7, extraída da referência [55], evidencia a relação V-I para amostras de cabos elétricos com distintos níveis de degradação por arborescência. Percebe-se, pois, que o desempenho do semicondutor nessa região evidencia uma boa concordância qualitativa entre as curvas características V-I do diodo e das arborescências, particularmente em relação ao caso de maior degradação. Portanto, esta analogia permite concluir que o fenômeno arborescência pode ser equiparado a uma curva de operação de um diodo em sua região de polarização direta, submetido a níveis de tensão onde o fluxo de elétrons não consegue atravessar a junção. Muito embora a equivalência qualitativa deve-se observar que, enquanto as escalas das correntes para ambas as figuras possuem boa correspondência

numérica, as das tensões sugerem a necessidade de uma adequação para apropriá-las ao processo aqui almejado.

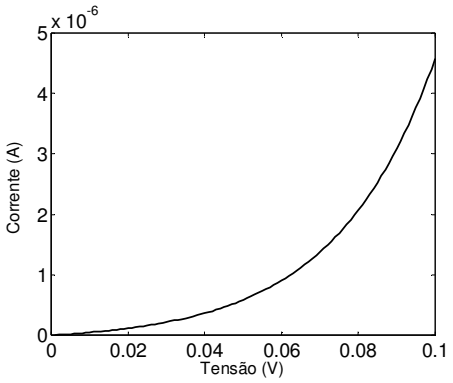


Figura 4.6 - Curva característica V-I do diodo na região de polarização direta.

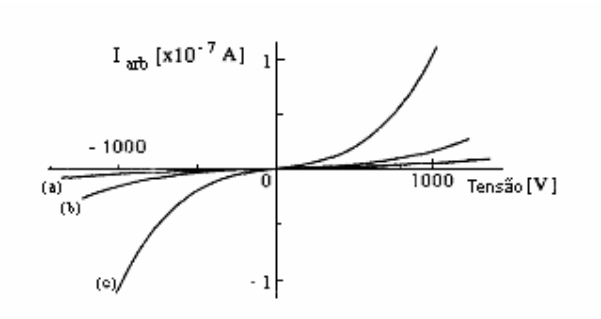


Figura 4.7 - Curva característica V-I das arborescências [55].

As análises precedentes indicam ainda que o fenômeno de arborescência possa ser representado por um modelo análogo a dois diodos em anti-paralelo, um polarizado diretamente no ciclo positivo e o outro no ciclo negativo, do sinal senoidal de alimentação. Isto se faz necessário pelo fato de que a condução de corrente no cabo ocorre para as duas polaridades de tensão, respeitadas suas distinções.

Com tal premissa em mente, a questão subseqüente está na adequação dos parâmetros do modelo do diodo, equação (4.16), à respectiva característica

imposta pelo fenômeno em foco, de modo a assegurar, no equacionamento, a inclusão da resistência de isolação e a compatibilidade da escala de tensão.

Na expressão (4.16), as grandezas I_D e V_D representam, respectivamente, a corrente e tensão no semicondutor. A constante k é função de parâmetros intrínsecos à construção do diodo e da temperatura de operação e Is é a corrente de saturação reversa. Esta última grandeza deve, na seqüência, ser expressa em função de variáveis que a correlacionem com a tensão aplicada ao diodo, que seria, via analogia, a mesma de operação do cabo, e uma variável que expresse a resistência não linear oferecida pelo semicondutor ou pelo isolamento do cabo. Assim procedendo, representa-se a corrente de saturação reversa por (4.17).

$$I_s = \frac{V}{R^m} \tag{4.17}$$

Destaca-se que "m" tem por propósito representar a não-linearidade associada com a resistência, sendo a definição de seu valor objeto de discussões posteriores. A substituição da variável V_D por simplesmente V implica em eliminar o significado de tensão direta pela tensão aplicada ao cabo. É também importante destacar que tal tensão ocorre de forma variável no tempo, fato este que exige uma alteração da formulação para contemplar a modelagem neste domínio.

Vale ressaltar que, no que tange aos níveis de tensão envolvidos, há uma grande diferença entre aquelas associadas com a operação do diodo e aquelas relacionadas com as solicitações impostas às camadas isolantes do cabo. À luz desta realidade torna-se imperativa a mudança da escala das tensões para a inserção de valores que envolvem uma grande escala, a exemplo da indicada na figura 4.8. Com tal propósito foi adotada uma escala logarítmica para fins da representação matemática. Substituindo a expressão (4.17) em (4.16) e

utilizando-se da função logarítmica acima referida obtém-se (4.18). Também, nesta formulação a corrente I_D foi substituída por $i_{arb}(t)$. Esta simbologia tem dois propósitos, um associado com a caracterização do fenômeno da arborescência, e outro, vinculado com o tratamento da corrente e respectiva tensão no domínio do tempo. A constante k, por sua vez, foi substituída por k_{arb} com o propósito de representar um parâmetro relacionado com o nível de degradação em que se encontra o cabo.

$$i_{arb}(t) = \frac{v(t)}{R^m}\left\{ e^{n\ln\left[k_{arb}\, v(t)\right]} - 1 \right\} \tag{4.18}$$

Uma vez que a tensão na expressão anterior representa uma grandeza que pode se apresentar com valores nulos e também negativos, e que estes não são compatíveis com a representação logarítmica, torna-se necessário alterar a equação (4.18) para a forma polinomial, por meio de um tratamento matemático envolvendo propriedades associadas às funções exponencial e logarítmica, como segue:

Considerando a propriedade $\ln(k)^n = n\ln(k)$, a expressão (4.18) pode ser escrita na seguinte forma:

$$i_{arb}(t) = \frac{v(t)}{R^m}\left\{ e^{\ln\left[k_{arb} v(t)\right]^n} - 1 \right\} \tag{4.19}$$

Fazendo

$$e^{\ln\left[k_{arb} v(t)\right]^n} = y \tag{4.20}$$

e

$$x = \ln\left[k_{arb}\, v(t)\right]^n \tag{4.21}$$

Então,

$$e^{x} = y \tag{4.22}$$

Aplicando-se logaritmo em ambos os lados de (4.22) vem:

$$\ln e^{x} = \ln y \tag{4.23}$$

Daí é possível escrever:

$$x \ln e = \ln y \tag{4.24}$$

Sendo $\ln e = 1$, logo:

$$x = \ln y \tag{4.25}$$

Substituindo (4.25) em (4.22):

$$e^{\ln y} = y \tag{4.26}$$

Comparando a equação (4.26) com o termo exponencial de (4.19) é possível concluir que:

$$e^{\ln\left[k_{arb} v(t)\right]^{n}} = \left[k_{arb} v(t)\right]^{n} \tag{4.27}$$

Substituindo (4.27) em (4.19):

$$i_{arb}(t) = \frac{v(t)}{R^{m}}\left[k_{arb}{}^{n} v^{n}(t) - 1\right] \tag{4.28}$$

Rearranjando obtém-se:

$$i_{arb}(t) = \frac{1}{R^{m}}\left[k_{arb}{}^{n} v^{n+1}(t) - v(t)\right] \tag{4.29}$$

Após uma série de aproximações, obteve-se um conjunto de valores para as constantes m e n que resultam numa boa correlação entre as curvas para o

diodo e aquelas representativas para o fenômeno da arborescência. Deste conjunto de parâmetros, optou-se pela adoção de m=n=2. Nestes termos, substituindo m=n=2 na equação (4.29) chega-se a expressão (4.30), que corresponde ao modelo matemático para a relação entre as correntes e tensões associadas com a manifestação das arborescências, particularmente para a curva (c) da figura 4.7.

$$i_{arb}(t) = \frac{1}{R^2}\left[k_{arb}^2 v^3(t) - v(t)\right] \tag{4.30}$$

A fusão de conceitos clássicos associados com a modelagem de cabos e a inserção do fenômeno da degradação originam o circuito equivalente da figura 4.8. Nesta, os parâmetros C_0 e R_0 representam, respectivamente, a capacitância e a resistência paralela da isolação sob condições normais, enquanto que os dois diodos em anti-paralelo, conectados em série com o capacitor C_r, estão vinculados com o fenômeno da degradação das características do isolamento do cabo. No que tange a inserção deste último capacitor, este tem por propósito representar a parte remanescente da camada isolante, ainda não atingida pela degradação. A figura ainda destaca a existência de uma corrente total de fuga advinda da composição de duas outras, uma representando a situação normal de operação, $i_0(t)$, e outra, $i_{arb}(t)$, associada com a presença do fenômeno da arborescência.

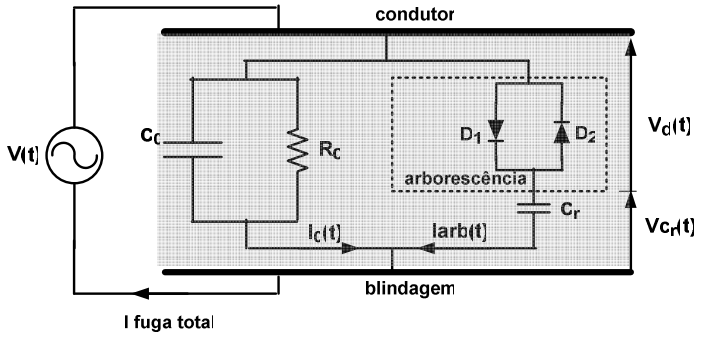


Figura 4.8 - Circuito equivalente do isolamento de um cabo, com arborescências.

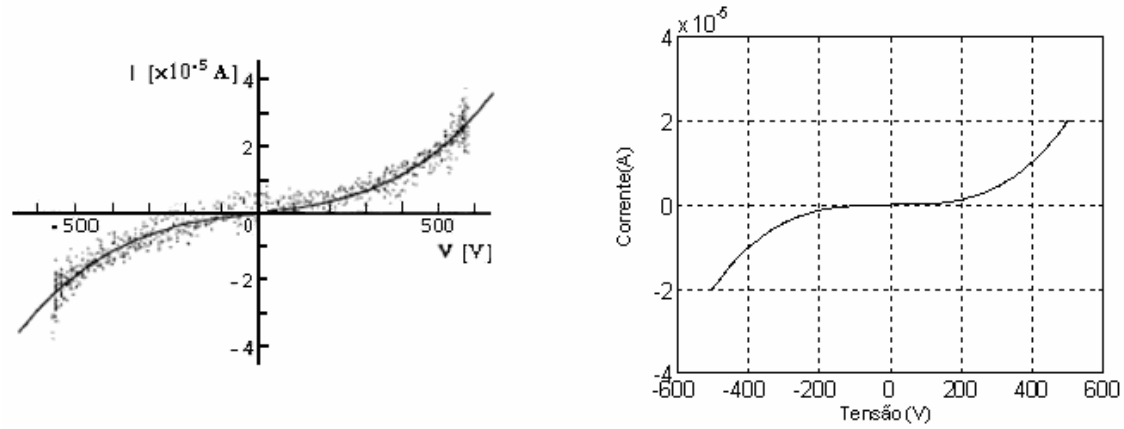
Em consonância com as premissas estabelecidas, a possibilidade da utilização de dois elementos semicondutores, com características distintas, constitui-se num recurso muito importante para a modelagem de correntes de fuga com componentes contínuas e harmônicos, que ocorrem em muitas situações reais quando da manifestação das arborescências. Nestas circunstâncias, as correntes de fuga registradas passam a se apresentar com a forma indicada na expressão (4.31), que contempla uma assimetria na forma de uma componente CC, fato este que encontra respaldo nas referências [48], [52] e [68].

$$i_{arb}(t) = \frac{1}{R^2}\left[k_{arb}^2\, v_d^3(t) - v_d(t)\right] + i_{CC} \tag{4.31}$$

É importante destacar que a corrente $i_{arb}(t)$ representa a corrente de fuga, devido à deterioração, presente na camada isolante.

Com vistas a uma análise preliminar do desempenho do modelo matemático proposto foram realizadas simulações computacionais no ambiente MATLAB. Em uma delas, utilizou-se como referência a figura 4.3, a qual para fins de facilitar a comparação desejada encontra-se reproduzida na figura 4.9 a. Salienta-se, novamente, que nessa simulação não foi considerada a influência da

capacitância residual referente à camada isolante não atingida pela degradação, tendo em vista que a curva de referência está relacionada com uma amostra de cabo muito degradada. Quanto à tensão de alimentação esta foi considerada como um sinal senoidal puro com valor de pico igual a 500 V. Como produto da simulação do modelo proposto, e impondo as mesmas condições operativas adotadas no estudo tomado como referência, obteve-se a curva V-I característica ilustrada na figura 4.9 b. Para a simulação deste caso, o valor do parâmetro R foi determinado pela relação entre a tensão e corrente, para V=500, ou seja: R=25 Mega ohms. Para essa condição adotou-se k_{arb}=10.



(a) (b)

Figura 4.9 – Característica V-I das arborescências: a) referência b) modelo proposto.

Complementarmente, através da metodologia desenvolvida, torna-se possível a obtenção da corrente de fuga no material isolante, no domínio do tempo, cujo comportamento pode ser apreciado na figura 4.10. É oportuno destacar que a curva usada como referência [55] está relacionada com a freqüência de 50 Hz, fato este que impôs a utilização da freqüência mencionada. A figura 4.11, por sua vez, apresenta o respectivo espectro de freqüência da

corrente de fuga, que evidencia a presença do terceiro harmônico, indicativo da característica não linear das arborescências.

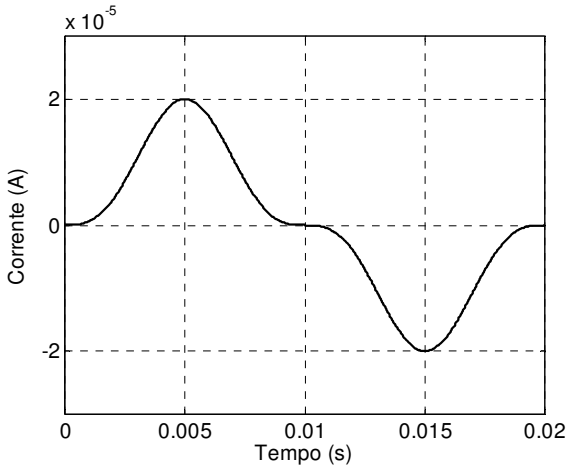


Figura 4.10 – Corrente de fuga no domínio do tempo.

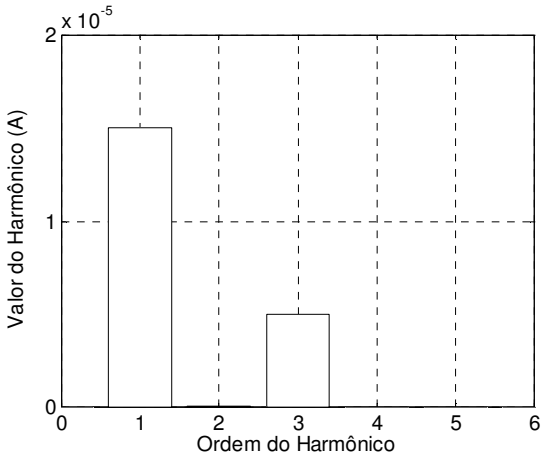
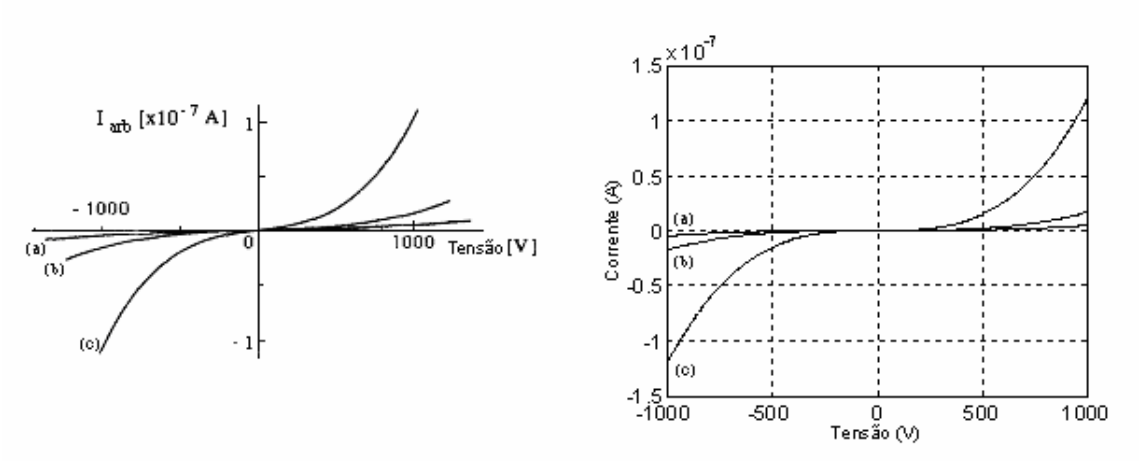


Figura 4.11 – Espectro de freqüência da corrente de fuga.

Numa segunda simulação, utilizando os mesmos critérios da simulação anterior, buscou-se reproduzir as curvas mostradas na figura 4.7, que a exemplo do caso anterior, também foi reproduzida, com o intuito de facilitar a comparação aqui desejada, e se encontra ilustrada na Figura 4.12 a. Nesta simulação o parâmetro R foi considerado igual à relação entre a tensão e

corrente, para a curva mais degradada e para um valor de tensão igual a 1000V, ou seja: R=8300 Mega ohms. Nesta simulação os valores para a constante k_{arb} foram de: 90,9 para a curva (c), 34,2 para a curva (b) e 18,6 para a curva (a), respectivamente. Para este caso, de igual maneira, o modelo proposto apresentou um bom resultado, aferido pelo desempenho das curvas traçadas, que apresentam uma semelhança muito próxima às da referência em pauta, conforme pode ser constatado na figura 4.12.



(a) (b)

Figura 4.12 – Curvas característica V-I das arborescências: a) referência b) modelo proposto.

Prosseguindo com as investigações para avaliação da metodologia proposta, realizou-se um novo estudo, desta vez, levando-se em consideração a capacitância residual correspondente à parte da camada isolante ainda não atingida pela degradação. Para este terceiro caso, tomou-se como referência a curva característica V-I correspondente à maior degradação apresentada na figura 4.12, cuja tensão de alimentação é um sinal senoidal puro com um valor de pico igual a 1000V.

Nesta etapa dos estudos se faz necessário destacar que a corrente disponibilizada na literatura e que será utilizada na presente simulação, diz respeito à componente da corrente de fuga em fase com a tensão de alimentação. Outra informação relevante para o pleno entendimento das investigações aqui descritas se refere ao procedimento que é utilizado para a medição dessa corrente. Nesse sentido, ressalta-se que os autores da referência [54] utilizaram um circuito de medição que possibilita a comparação da corrente que flui em uma amostra de cabo degradada, $i_d(t)$, com o valor da corrente em uma amostra de cabo não degradado, $i_n(t)$, representada no experimento por um capacitor, ambas submetidas ao mesmo nível de tensão, conforme apresentado na figura 4.13.

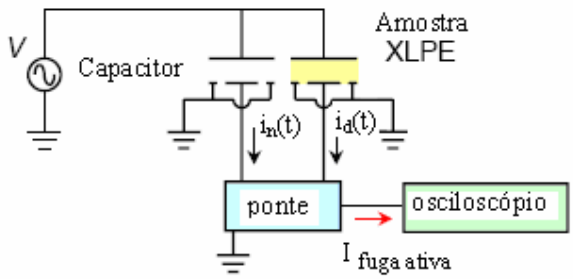
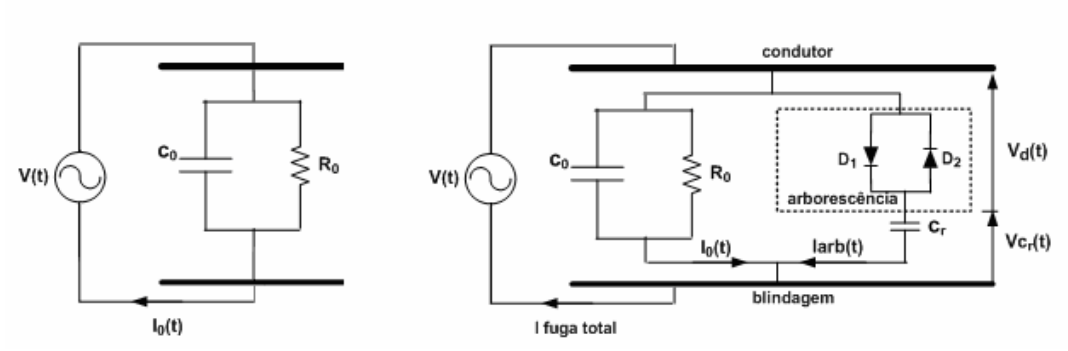


Figura 4.13 – Circuito para medição da corrente de fuga em fase com a tensão [54].

Este circuito possibilita, pelo ajuste adequado de parâmetros internos, a determinação da diferença dessas duas correntes, mais precisamente, permite a identificação da parcela da corrente de fuga que está em fase com a tensão e é responsável pelas perdas por efeito Joule. Para efeitos de simulação computacional, essas duas correntes foram representadas pelos circuitos indicados na figura 4.14, desconsiderando a resistência nominal da isolação.



(a) (b)

Figura 4.14 – Circuito equivalente da corrente de fuga: a) amostra sem degradação b) amostra com degradação.

A figura 4.15 mostra a forma de onda da corrente de fuga relativa às perdas adicionais devido à arborescência, obtida retirando-se a componente capacitiva $i_0(t) + i_{\Delta C0}(t)$ da corrente de fuga total que flui na amostra degradada.

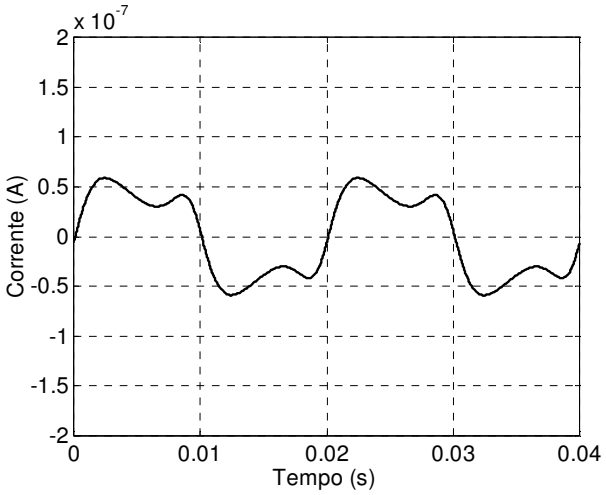


Figura 4.15 – Corrente de perdas por efeito Joule.

Ressalta-se, que a corrente $i_{\Delta C0}(t)$ corresponde ao incremento de corrente capacitiva, 50 Hz, devido à variação da capacitância nominal em virtude da evolução da degradação, sendo obtida pela variação da capacitância C_0 com vistas à identificação do valor que corresponda à forma de onda desejada. A

corrente $i_{arb}(t)$, por sua vez, é calculada por meio da expressão (4.30), sendo necessário, para tanto, a resolução da equação diferencial (4.32), utilizando-se de métodos numéricos.

$$\frac{1}{R^2}\left[k_{arb}^2\, v_d(t)^3 - v_d(t)\right] = C_r \frac{d}{dt}\left[v(t) - v_d(t)\right] \tag{4.32}$$

Nesta expressão, com base na figura 4.9, $v_d(t)$ representa a queda de tensão na região com degradação.

Nesta simulação, a distorção identificada na corrente de fuga é resultante da contribuição harmônica de terceira, quinta e sétima ordem, conforme pode ser observado no correspondente espectro de freqüência ilustrado na figura 4.16. Nesta simulação, para os parâmetros do circuito foram adotados os seguintes valores:

$\Delta C_0 = 0{,}15$pF

$C_r = 0{,}37$pF

R = 10000 Mega ohms

$k_{arb} = 167$

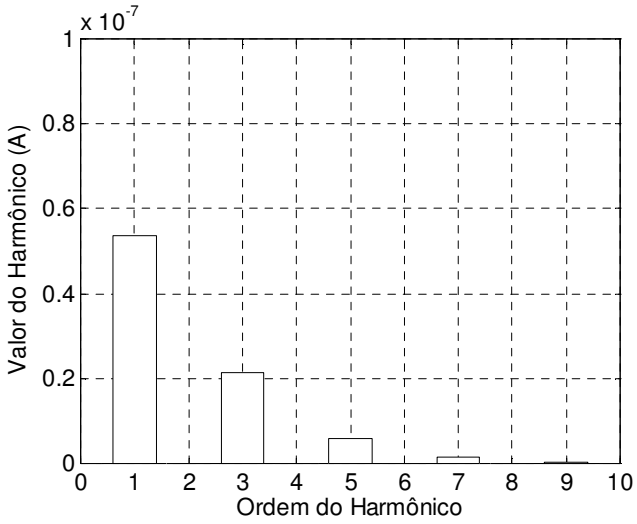


Figura 4.16 – Espectro de freqüência da corrente de perdas por efeito Joule.

A corrente $i_{arb}(t)$ e as respectivas componentes: capacitiva e resistiva, presentes na camada isolante da amostra devido à degradação estão apresentadas na figura 4.17. É importante registrar que, em virtude da não disponibilidade do valor da capacitância C_0, na literatura consultada, a rigor, nesta simulação, a corrente total coincide com a parcela da corrente devido à degradação $i_{arb}(t)$, fato esse que não compromete o objetivo aqui desejado, qual seja a determinação da componente ativa da corrente de fuga.

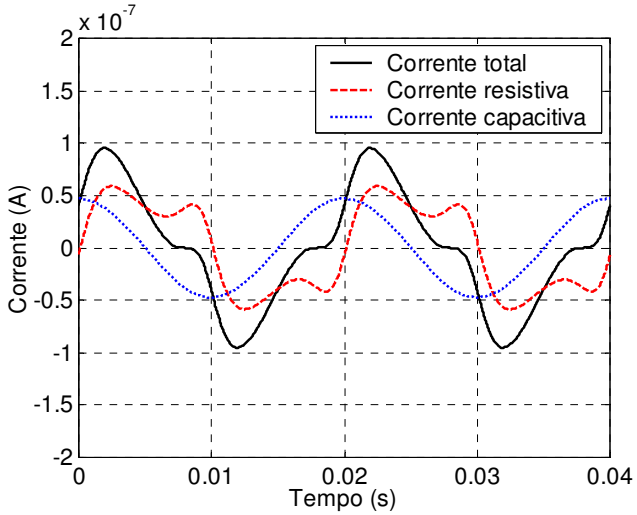


Figura 4.17 – Correntes presentes na camada isolante.

Comparando-se os resultados obtidos nesta simulação, particularmente a curva mostrada na figura 4.15, obtida com o modelo proposto, com a forma de onda da corrente de fuga disponível na referência [55], é possível concluir que o modelo proposto apresentou um bom desempenho, indicativo de que o mesmo pode representar adequadamente o fenômeno de arborescência, conforme pode ser constatado na figura 4.18. É importante salientar que a curva adotada como referência foi obtida por meio de simulação computacional, utilizando os valores dos parâmetros com base no experimento realizado em laboratório, com amostras de cabos degradados. Os dados em questão não foram disponibilizados

na literatura consultada, por essa razão, para fins de simulação com o modelo proposto, esses parâmetros foram determinados por tentativas. A generalização desta modelagem e do procedimento utilizado para determinar a parcela ativa da corrente de fuga, fica condicionada à validação do modelo e da metodologia, tendo por referência formas de onda da corrente de fuga obtidas em laboratório, validação essa que será objeto de estudo do próximo capítulo, desta tese.

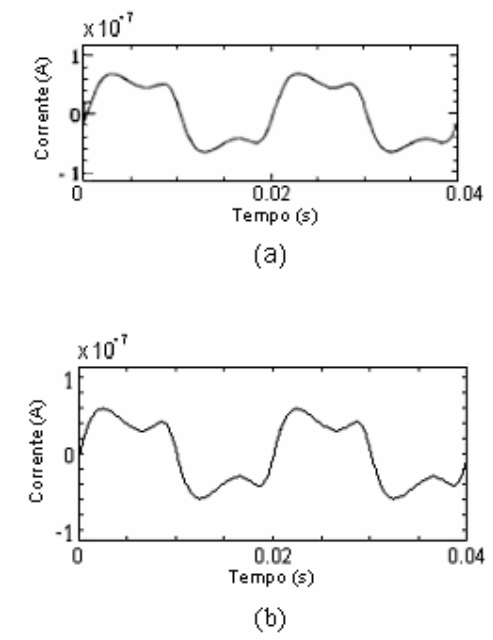


Figura 4.18 – Corrente de fuga: a) modelo referência [55] b) modelo proposto.

O fato da corrente de fuga objeto de análise nestas simulações estar praticamente em fase com a tensão de alimentação, figura 4.19, ratifica o entendimento de que a arborescência pode ser representada por um elemento de natureza resistiva. Nesse sentido, vale registrar que os indicadores a serem utilizados para fins de diagnóstico do nível de degradação presente na camada isolante: potencia dissipada, distorção harmônica total, ângulo de perdas dielétricas, módulo e fase do terceiro harmônico, dependem da parcela da corrente de fuga em fase com a tensão. Ressalte-se que na figura 4.19 a tensão é

apresentada numa escala reduzida, tão-somente para mostrar que a corrente se encontra em fase com a tensão, portanto a escala vertical se aplica apenas à corrente de fuga.

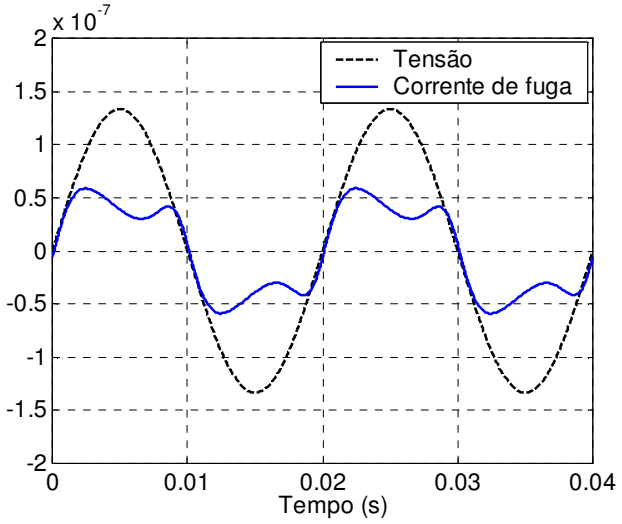


Figura 4.19 – Oscilogramas da tensão de alimentação e da corrente de fuga.

A figura 4.20 ilustra a característica *V-I* da isolação para o nível de degradação, por arborescências, adotado nesta simulação que leva em conta a capacitância residual devido à parte não degradada da camada isolante.

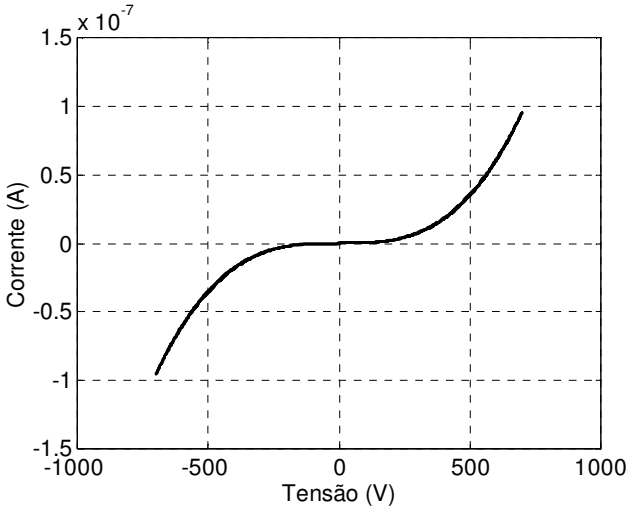


Figura 4.20 – Característica V-I das arborescências.

4.4 – Considerações Finais

A presente etapa desta tese abordou os princípios basilares necessários para o estabelecimento de um modelo computacional de cabos elétricos de média tensão, introduzindo a representação da degradação da camada isolante conhecida como arborescência.

Os estudos se voltaram para o estabelecimento de uma modelagem de cabos isolados, utilizando-se técnicas no domínio do tempo. Essa particularidade permite o estudo do desempenho do cabo sob quaisquer condições operativas, tanto em regime permanente como em situações transitórias.

Encerrando os trabalhos definidos para este capítulo, simulações computacionais preliminares foram realizadas, tendo por meta, mostrar o desempenho da modelagem matemática desenvolvida. Os resultados preliminares obtidos evidenciaram um desempenho satisfatório do modelo, haja vista a boa correlação alcançada comparativamente aos estudos/oscilogramas utilizados como referência.

Merece destaque a constatação de que a degradação devida à arborescência confere uma característica não linear ao material isolante, tanto mais acentuada, quanto maior o dano apresentado. Essa característica deverá ser explorada com maior profundidade no próximo capítulo, direcionando os estudos para a obtenção de indicadores que permitam um diagnóstico da situação real em que se encontra a isolação de um cabo elétrico, a partir da corrente de fuga que flui na camada isolante do cabo.

CAPÍTULO V

Validação do modelo proposto

5.1 – Considerações iniciais

Estudos investigativos sobre o fenômeno da arborescência almejam como aplicação final, atingir uma metodologia através da qual seja possível o estabelecimento de medidas práticas para se evitar, preventivamente, os impactos decorrentes de interrupções intempestivas do suprimento elétrico. Nessa perspectiva, e tendo por referência o foco deste estudo, é indispensável que os modelos e metodologias desenvolvidos para esse fim, possibilitem, a partir da corrente de fuga, a extração de indicadores de estado que reflitam as condições operacionais da camada isolante de um determinado cabo, encontrando-se este em operação.

Não obstante as potencialidades desejáveis nos modelos de cabos, uma das dificuldades identificadas na literatura especializada, diz respeito à inexistência de modelagens matemáticas que reproduzam satisfatoriamente a forma de onda da corrente de fuga perante a presença de arborescências, particularmente no que se refere às componentes ativa e reativa, quando se trata de cabos com elevado grau de degradação. Em situações deste tipo, conforme já mencionado, observa-se a existência significativa de componentes harmônicos.

Assim sendo, torna-se imperativo aprofundar os estudos com vistas a identificar, na composição da corrente de fuga, incluída a contribuição devido às arborescências, as de natureza puramente capacitiva e aquelas responsáveis pela dissipação devido ao efeito Joule. Para tal finalidade, é fundamental o reconhecimento da freqüência associada a cada uma das componentes observadas na corrente de fuga.

Nesse cenário, e com o intuito de disponibilizar uma ferramenta que permita a realização de estudos mais apurados e de forma preditiva com respeito à degradação por arborescências, a presente etapa deste estudo destina-se à implementação computacional e validação experimental dos modelos desenvolvidos na etapa precedente. Dessa forma, este capítulo tem por meta reproduzir, computacionalmente, formas de onda da corrente de fuga obtidas por via laboratorial, disponibilizadas na literatura especializada. Assim, em atendimento a esses objetivos, o presente capítulo, contempla:

- Descrição da metodologia utilizada para a medição de correntes de fuga ativa em amostras de cabos isolados com polietileno reticulado (XLPE), atingidos ou não por degradação devido a arborescências;

- Estabelecimento de um programa computacional, utilizando o ambiente MATLAB, com vistas à determinação dos parâmetros de amostras da isolação de cabos que apresentem degradações uniformes. Os dados alcançados serão utilizados para reproduzir computacionalmente as formas de onda das correntes de fuga ativa, obtidas experimentalmente. Para esse fim será utilizado o modelo de cabo desenvolvido no capítulo anterior;

5.2 – Medição experimental da componente ativa da corrente de fuga

O processo de desenvolvimento e validação de modelos computacionais de cabos isolados exige a obtenção e registro de correntes de fuga nas camadas isolantes de condutores contemplados, para serem utilizados como referência nos trabalhos de validação experimental.

A componente ativa da corrente de fuga é justamente aquela que vem sendo utilizada por diversos pesquisadores para a realização de estudos com vistas a avaliar o estado operacional da camada isolante. Nesse sentido, conforme já mencionado no capítulo III, a distorção harmônica total dessa parcela da corrente de fuga, bem como o módulo e a fase do terceiro harmônico se constituem em importantes indicadores para identificação do nível de degradação presente no cabo.

Com esse intuito, inicialmente, é apresentado na figura 5.1, o esquema de um circuito, dos mais simples, utilizado para a medição da componente ativa da corrente de fuga. [65-66].

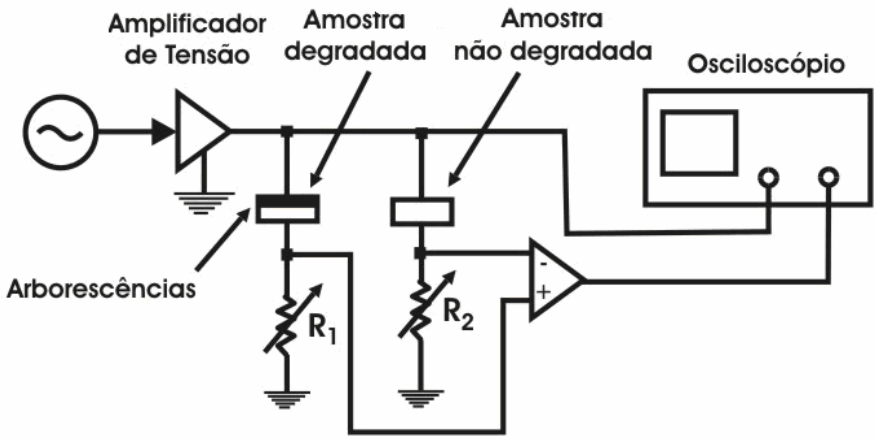


Figura 5.1 - Circuito utilizado para a medição da componente ativa da corrente de fuga [65-66].

O princípio de operação básico do esquema anterior, dedicado à medição de correntes de fuga ativa em materiais isolantes supridos por fonte senoidal, é descrito na seqüência. Antes, porém, convêm identificar as correntes que fluem em cada um dos ramos do circuito, sendo: $i_n(t)$ - corrente correspondente à amostra não degradada, $i_d(t)$ – correspondente na amostra degradada e $[i_d(t) - i_n(t)]$ – corrente correspondente à saída do amplificador diferencial.

O sinal de suprimento senoidal é inicialmente amplificado, de maneira a alcançar o nível de tensão a ser aplicada às amostras de cabo, sem degradação e apresentando degradação devido a arborescências. As correntes que fluem nos ramos das duas amostras são, então, injetadas nos terminais do amplificador diferencial. Por meio da observação das formas de onda da tensão e da corrente na saída do amplificador diferencial é possível ajustar o valor da resistência R_2, que é utilizada para detecção da corrente que flui através da amostra não degradada, de modo a fazer com que a diferença entre as duas correntes esteja em fase com a tensão aplicada. É importante registrar que se trata de um procedimento simplificado que desconsidera a existência de harmônicos de natureza capacitiva, no processo de degradação.

O valor eficaz de cada uma das componentes da corrente de fuga anteriormente nominadas está ilustrado no diagrama fasorial da figura 5.2 [65]. Vale destacar que, muito embora o reconhecimento de que a forma de onda associada com o processo da degradação da isolação dê origem a correntes não-senoidais, a representação fasorial objetiva tão somente evidenciar o processo da composição das componentes focadas no estudo.

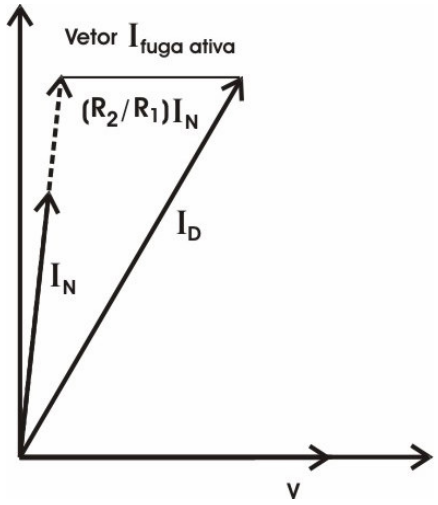


Figura 5.2 - Componentes da corrente envolvidas no circuito de medição [66].

A rigor, a corrente de perdas em questão, pode ser representada utilizando-se séries de Fourier, conforme a expressão (5.1).

$$i_{fuga\ ativa} = \sum_{n=1}^{m} I_n seno\left(n\,\omega t + \theta_n\right) \tag{5.1}$$

Sendo:

$\theta_1 = 0$

Na figura 5.3 está apresentado um circuito mais elaborado para determinação da parcela ativa da corrente de fuga em uma amostra de cabo degradada [69].

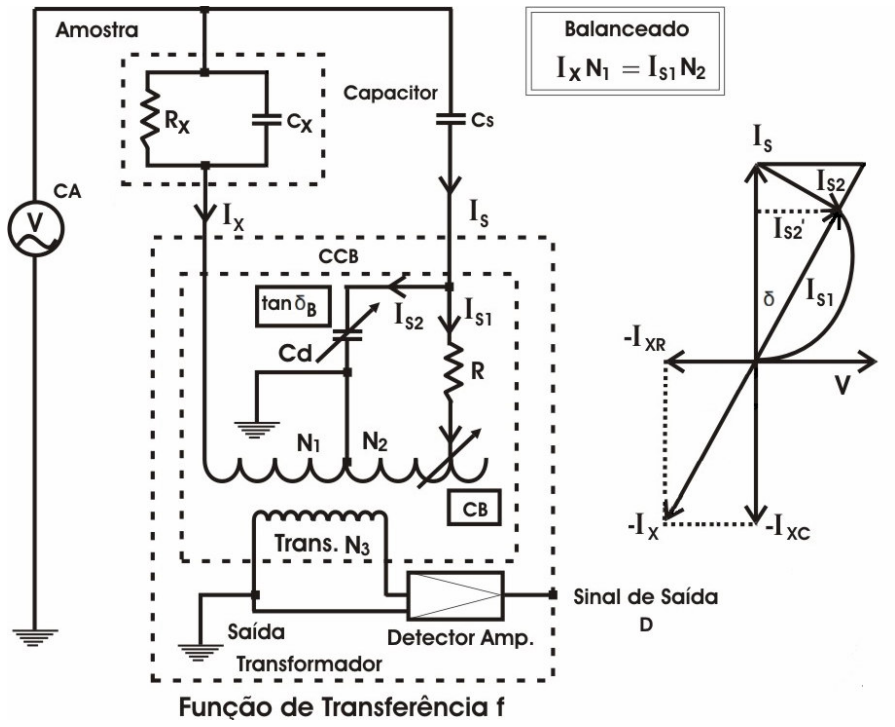


Figura 5.3 - Circuito utilizado para medição da corrente de fuga ativa [69].

Trata-se de um circuito que utiliza uma ponte capacitiva que efetua a comparação entre a corrente que flui em uma amostra de cabo com degradação e a corrente que flui em um capacitor padrão, o qual representa uma amostra de cabo sem degradação. I_x e I_s são as correntes que fluem na amostra e no capacitor, respectivamente. Neste circuito, a corrente denominada I_s se divide em duas componentes, I_{s1} e I_{s2}, através da resistência R e da capacitância C_d, da ponte. Em determinada condição I_{s1} cancela I_x. Isso é possível pelo ajuste de N_2 e C_d de tal forma que $I_x\ N_1 = I_{s1}\ N_2$, situação essa em que a corrente I_{s2} flui diretamente para a terra. Nessa condição é feito o ajustamento de C_d, de modo a zerar a corrente I_{s2}, fazendo com que surja uma corrente correspondente a I_{s2} na saída do transformador. Considerando que a tgδ da isolação em diversos materiais poliméricos é da ordem de 10^{-3} para 10^{-4}, então a corrente I_{s2} é adotado como sendo uma aproximação aceitável de I_{s2}', que é a componente ativa da

corrente de fuga desejada, conforme pode ser constatado no diagrama fasorial da figura 5.3.

5.2.1 – Correntes de fuga experimentais – curvas de referências

A metodologia computacional em tela, desenvolvida para realizar a aferição do grau de degradação de um cabo acometido por arborescências, tem como ponto inicial, o registro da componente ativa da corrente de fuga de um dispositivo físico, em campo. Todavia, salienta-se que nesta tese, busca-se a reprodução computacional das correntes de fuga, parcela ativa, ilustradas na figura 5.4, obtidas da referência [54], com vistas à avaliação de desempenho dos modelos matemáticos desenvolvidos e respectivos programas implementados. A estratégia proposta, contudo, tem validade para qualquer situação real em que seja disponibilizado o sinal da corrente de fuga ativa e a tensão de alimentação.

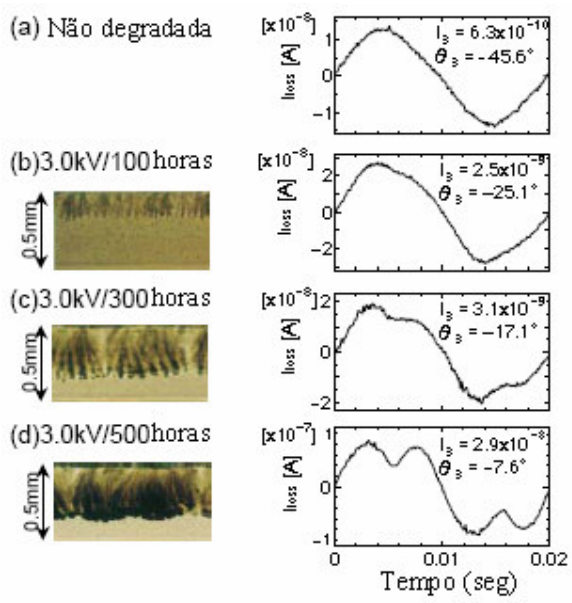


Figura 5.4 – Correntes em amostras de cabos com diferentes níveis degradação [54].

Salienta-se que as curvas ilustradas na figura 5.4, correspondem às correntes de fuga ativas, obtidas em experimentos com amostras de cabos apresentando diferentes graus de degradação. As degradações por arborescências foram produzidas mantendo-se um lado de cada amostra de 0,5mm, imerso em uma solução de 1mol/l de NaCl, submetidas a uma tensão de 3kV (1kHz), por períodos de tempo determinados, em função da maior ou menor degradação desejada. Isso porque, quanto maior o tempo de aplicação da tensão, maior será o grau de degradação obtido. Os diferentes tempos de aplicação de tensão utilizados foram: 100h, 300h e 500 horas, respectivamente. Com vistas a acelerar o processo de degradação, foi adotada a freqüência de 1 kHz. Sendo que, para fins de medição da corrente de fuga desejada, a tensão de teste aplicada à amostra já degradada foi de 1kV (50Hz). Nesse caso, adotou-se a freqüência nominal de operação do sistema elétrico [54]. Isso se deve ao fato de que a referência consultada adota a freqüência de operação do sistema elétrico do Japão, onde o estudo foi desenvolvido.

Feito esse destaque, a seguir procede-se com a descrição do método desenvolvido para alcançar a reprodução da corrente de fuga ativa, que culmina com a determinação de indicadores que possibilitem um diagnóstico sobre sua integridade física e, em conseqüência, permite informações sobre o potencial risco de interrupção da operação em decorrência de falha da isolação do mesmo.

5.3 – Metodologia para modelagem da degradação para obtenção computacional da parcela ativa da corrente de fuga

Para reproduzir as correntes de fuga, de natureza resistiva, obtidas por meio de medições em laboratório, figura 5.4, foi utilizado o circuito equivalente

para cabos isolados abordado anteriormente no capítulo 4, e que se encontra reproduzido na figura 5.5, o qual contempla a representação do fenômeno de arborescências presentes na isolação do cabo.

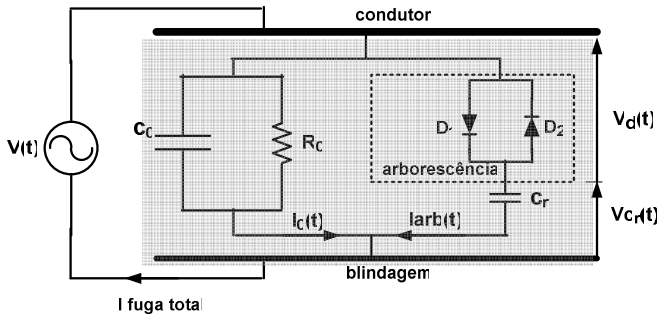


Figura 5.5 - Circuito equivalente do isolamento de um cabo apresentando arborescências.

A corrente $i_0(t)$ evidenciada na figura, conforme já referido, corresponde à corrente nominal do cabo sem degradação, ao passo que a corrente $i_{arb}(t)$ está associada ao incremento da corrente de fuga devido à degradação e que pode ser expressa pela equação (5.2). Vale ressaltar, que neste estudo não é considerada a possível existência da componente contínua i_{cc}, da corrente de fuga.

$$i_{arb}(t) = \frac{1}{R^2}\left[k_{arb}^2 \, v_d^{\,3}(t) - v_d(t)\right] \tag{5.2}$$

A parcela de interesse da corrente de fuga para os fins aqui delineados é aquela em fase com a tensão de alimentação, isto é, a componente ativa da corrente de fuga. Dessa forma, e a partir da expressão anterior, esta é obtida subtraindo-se de (5.2) a componente da corrente de natureza capacitiva devido à degradação. O processo para obtenção dessa corrente exige a determinação dos parâmetros do modelo matemático proposto, considerando-se, para tanto, o arranjo da figura 5.5 e estabelecendo-se um determinado estado de degradação

do cabo. Com esse intuito, foram estabelecidos os seguintes passos para a busca da solução:

- Representação da corrente de fuga de referência, utilizando um programa computacional desenvolvido na linguagem DELPHI, que, a partir de uma forma de onda tomada como referência, procede à identificação das coordenadas de cada ponto da curva (leitura) e posterior representação computacional da mesma.

- De posse dos dados alcançados na alínea anterior e com auxílio de outro programa computacional, desenvolvido no ambiente MATLAB, efetuam-se os seguintes passos:

    - Determinação do espectro de freqüência e o valor eficaz verdadeiro da corrente de fuga medida ou de referência, levando-se em conta as ordens dos harmônicos de interesse;

    - Cálculo da corrente de fuga $i_{arb}(t)$ que flui através da camada isolante. Para essa finalidade, é feita, continuamente, a variação dos parâmetros k_{arb} e C_r do modelo matemático, tendo como entradas e referências de buscas iterativas, o valor eficaz verdadeiro e a fase do terceiro harmônico da corrente de fuga ativa medida ou de referência;

    - A partir da corrente de fuga $i_{arb}(t)$, é realizado, computacionalmente, um procedimento matemático com vistas a reproduzir o experimento que identifica a parcela ativa da

corrente de fuga que flui em uma camada isolante degradada. Essa componente ativa é determinada subtraindo-se a parcela capacitiva da corrente de fuga $i_{arb}(t)$;

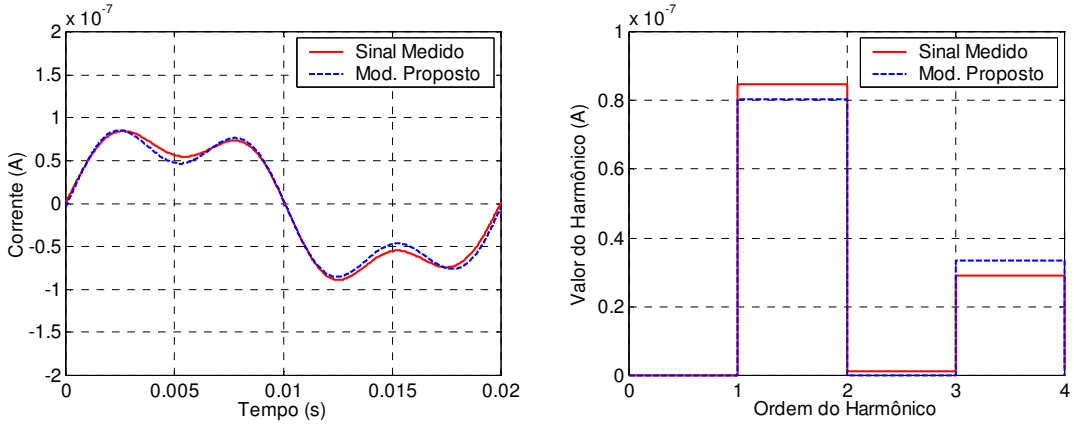
- Por último, determinam-se as formas de ondas de correntes e tensões envolvidas na modelagem, assim como, os indicadores de estado desejados.

Nesta etapa dos estudos, o valor referente à variação da capacitância nominal, devido ao fenômeno de degradação foi obtido por tentativas, tendo sido, portanto, tratado como uma variável de entrada do programa computacional. Além disso, devido à indisponibilidade dos parâmetros nominais da amostra sem degradação, os mesmos foram desconsiderados nas simulações sem acarretar prejuízos para os resultados, haja vista serem dispensáveis para o presente propósito. Portanto, a corrente total, nesta etapa do estudo, será igual à $i_{arb}(t)$. Em acréscimo, a resistência de isolação em todas as simulações foi considerada igual à relação entre a tensão de alimentação e o valor de pico da fundamental da parcela ativa da corrente de fuga, obtida por decomposição, dessa corrente de fuga, em séries de Fourier.

Na implementação computacional do modelo, o procedimento adotado para determinar a corrente de fuga em fase com a tensão foi o de subtrair de (3.2) a corrente capacitiva de 50 Hz, que surge devido à degradação. Ressalta-se que, de maneira a simplificar a análise dos resultados, na simulação inicial, foi considerada apenas a influência do terceiro harmônico de natureza resistiva, o que não invalida o método e nem os resultados atingidos.

- **Caso A: Reprodução computacional da forma de onda indicada na figura 5.4 (d)**

Tomando-se por referência a forma de onda ilustrada na figura 5.4 (d), correspondente à amostra que apresenta o maior grau de degradação, observa-se que a forma de onda calculada, segundo a metodologia aqui proposta, apresenta resultados animadores em relação à forma de onda medida em laboratório, conforme pode ser constatado na figura 5.6 (a). Não obstante a semelhança entre as formas de onda constata-se que o DHT_I calculado, apresenta um valor da ordem de 20% superior ao valor esperado, conforme mostra a tabela 5.1. Esse percentual pode variar para mais ou para menos, alterando-se o valor da capacitância correspondente à degradação e por conseqüência o espectrograma da figura 5.6 (b). É importante esclarecer que nesta simulação foi adotado o valor de 0,3pF para a capacitância devida à degradação e que os valores indicados na Tabela 5.1 foram calculados via decomposição de séries de Fourier.



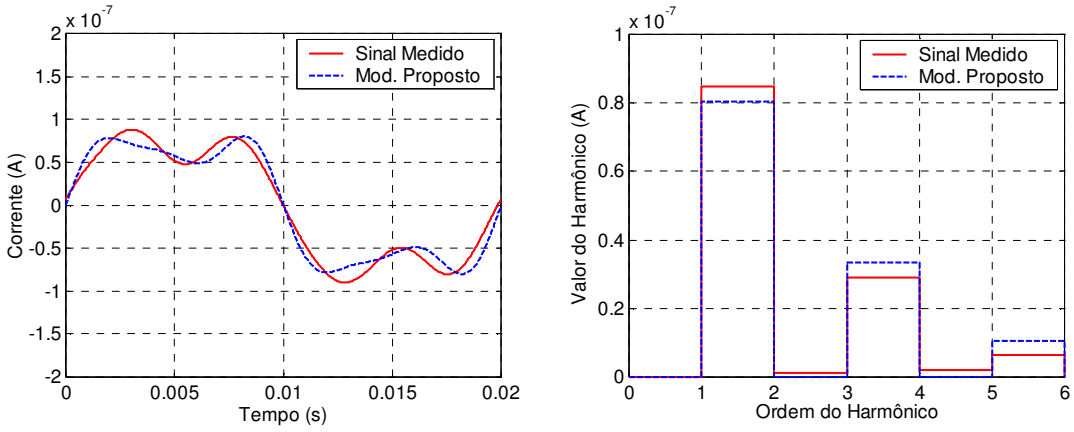
(a) (b)

Figura 5.6 – Correntes de fuga medida e calculada considerando o harmônico de ordem 3: a) Formas de onda b) Espectrograma.

Tabela 5.1 – Resultados considerando o terceiro harmônico.

	Valor Recuperado	**Valor Calculado**	**Erro (%)**
DHT_I (%)	34,28	41,24	20,3
I_{ef} (nA)	63,25	62,00	2,0
I_1 (nA)	84,61	81,06	4,2
θ_1 (°)	2,74	0,80	242,5
I_3 (nA)	28,98	33,43	15,4
θ_3 (°)	-10,55	349,48	0,0

Em uma segunda simulação, desta feita levando-se em conta os harmônicos de terceira e quinta ordens, constatou-se que a forma de onda da corrente de fuga, obtida computacionalmente, apresentou significativa distorção em relação à forma de onda medida em laboratório, evidenciando um resultado insatisfatório, conforme ilustrado na figura 5.7 (a). Neste caso, o DHT_I calculado, tabela 5.2, apresentou uma diferença da ordem de 23%, quando comparado com o valor esperado.



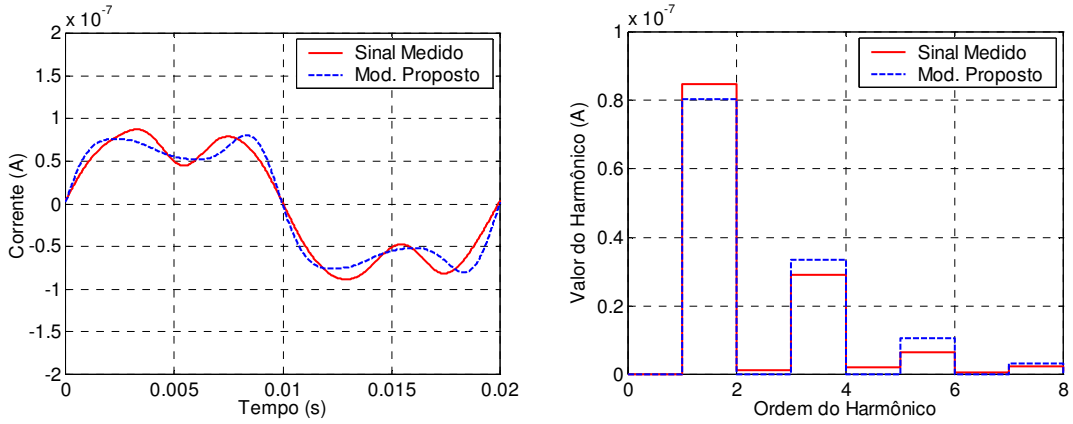
(a) (b)

Figura 5.7 – Correntes de fuga medida e calculada considerando os harmônicos de ordens 3 e 5: a) Formas de onda b) Espectrograma.

Tabela 5.2 – Resultados considerando os harmônicos de ordens 3 e 5.

	Valor Recuperado	**Valor Calculado**	**Erro (%)**
DHT_I (%)	35,23	43,24	22,7
I_{ef} (nA)	63,43	62,45	1,5
I_1 (nA)	84,61	81,06	4,2
θ_1 (°)	2,74	0,80	242,5
I_3 (nA)	28,98	33,43	15,4
θ_3 (°)	-10,54	349,48	0,0
I_5 (nA)	6,52	10,54	61,7
θ_5 (°)	129,53	16,67	87,1

Essa constatação de que a inclusão de harmônicos adicionais conduz a resultados insatisfatórios é confirmada pela forma de onda obtida na terceira simulação que inclui a influência dos harmônicos de ordens: 3, 5 e 7, figura 5.8, situação em que o a discrepância do DHT_I calculado, tabela 5.3, foi, também, da ordem de 23%, comparativamente ao DHT_I esperado.



(a) (b)

Figura 5.8 – Corrente de fuga medida e calculada considerando os harmônicos de ordens 3, 5 e 7: a) Forma de onda b) Espectrograma.

Tabela 5.3 – Resultados considerando os harmônicos de ordens 3, 5 e 7.

	Valor Recuperado	**Valor Calculado**	**Erro (%)**
DHT_I (%)	35,36	43,41	22,8
I_{ef} (nA)	63,46	62,49	17,3
I_1 (nA)	84,61	81,06	4,2
θ_1 (°)	2,74	0,80	242,5
I_3 (nA)	28,98	33,43	15,4
θ_3 (°)	-10,54	349,48	0,0
I_5 (nA)	6,52	10,54	61,7
θ_5 (°)	129,53	16,67	87,1
I_7 (nA)	2,47	3,26	32,0
θ_7 (°)	-53,51	41,85	86,3

A maior discrepância encontrada quando da inclusão de harmônicos outros, além do terceiro, levou à busca de respostas para esse comportamento, a princípio, inesperado.

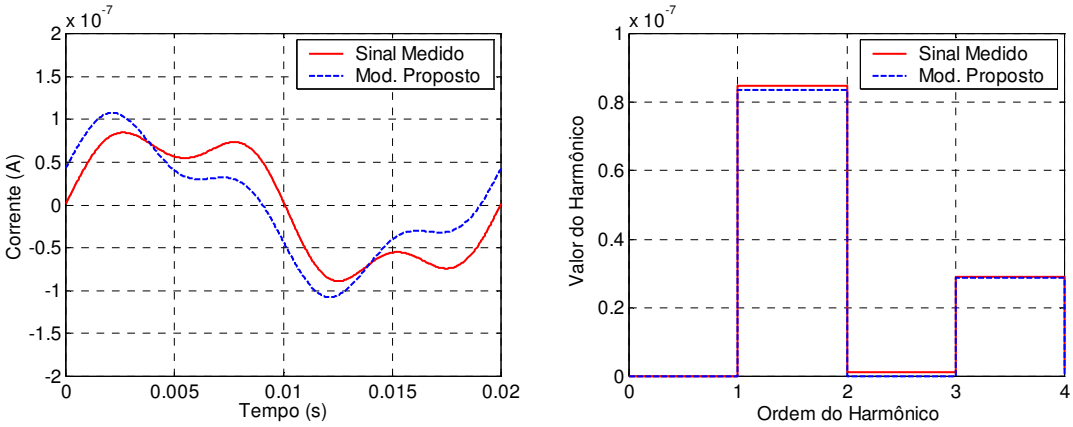
Em virtude disso, procedeu-se à realização de estudos adicionais desta feita tendo como parâmetro o DHT_I em vez da forma de onda das correntes sob análise. Isso porque, esse indicador além de não depender dos ângulos de fase dos componentes harmônicos é, de fato, o que permite a identificação do grau de degradação de um cabo e não o oscilograma propriamente dito.

Assim procedendo, em outra seqüência de estudos, buscou-se, por tentativas, identificar parâmetros que assegurassem um DHT_I compatível com o valor esperado e correspondente à forma de onda da parcela ativa da corrente de fuga medida. Nessa perspectiva, atribuindo-se o valor de 0,11pF para o valor da capacitância devido à degradação foi possível alcançar êxito nesse propósito,

como pode ser constatado na tabela 5.4. Todavia, as formas de onda apresentam significativas discrepâncias entre si, conforme mostra a figura 5.9 (a).

Tabela 5.4 – Resultados considerando o terceiro harmônico.

	Valor Recuperado	**Valor Calculado**	**Erro (%)**
DHT_I (%)	34,28	34,21	0,0
I_{ef} (nA)	63,25	62,57	1,1
I_1 (nA)	84,61	83,72	1,0
θ_1 (°)	2,74	34,29	1151,4
I_3 (nA)	28,98	28,64	1,2
θ_3 (°)	-10,54°	349,48	0,0

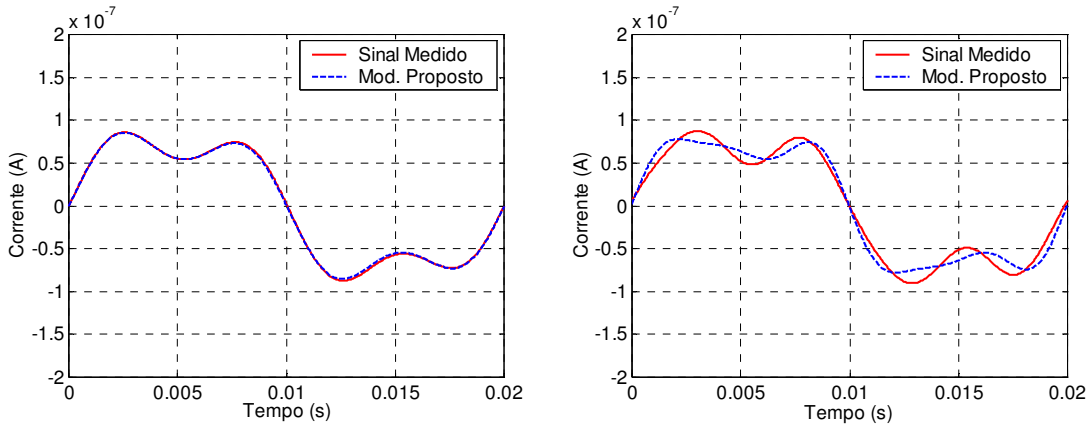


(a) (b)

Figura 5.9 – Correntes de fuga medida e calculada considerando o harmônico de ordem 3: a) Formas de onda b) Espectrograma.

Em todos os casos até aqui simulados, constatou-se divergências mais acentuadas entre as fases da fundamental e dos harmônicos, calculadas e medidas, do que em relação às demais variáveis quando comparadas entre si. No caso, em particular, da tabela 5.4, a divergência mais significativa ocorreu na fase da componente fundamental. Os valores encontrados mostram claramente

que a diferença existente entre as formas de onda medida e calculada se deve exclusivamente à questão de diferenças entre os ângulos dos respectivos sinais de corrente. Essa constatação permitiu levantar a hipótese de efetuar a correção do ângulo, inicialmente, somente da fundamental, de modo a torná-lo igual ao valor desejado e previamente conhecido. Para o caso em que somente se encontra presente o terceiro harmônico, este procedimento assegurou um excelente desempenho, como pode ser observado na figura 5.10 (a), porém apresentou resultados insatisfatórios quando da inclusão do quinto harmônico, conforme ilustrado na figura 5.10 (b).



(a) (b)

Figura 5.10 – Correntes de fuga medida e calculada considerando: a) harmônico de ordem3 b) harmônicos de ordens 3 e 5.

Uma avaliação de todas as investigações até aqui realizadas indica que, para a solução do problema em tela, a atenção deve ser dirigida para o defasamento existente entre a contribuição harmônica e a fundamental. Ou seja, para se reproduzir computacionalmente o fenômeno de arborescência, se faz necessário identificar uma forma de ajustar o defasamento dos harmônicos, em relação à fundamental, pois assim procedendo, pode-se conseguir uma concordância satisfatória entre o sinal reproduzido e o de referência.

Nessa linha investigativa e considerando-se apenas a contribuição do terceiro harmônico, procedeu-se a um conjunto de simulações nas quais foram introduzidas variações na defasagem do terceiro harmônico de 0 a 90 graus em relação à componente fundamental e constatou-se que, na medida em que essa defasagem aumentava em direção ao ângulo de 90, a forma de onda calculada se aproximava daquela obtida em laboratório, culminando por reproduzir a figura 5.10 (a) para um defasamento igual a 90 graus, conforme pode ser observado na figura 5.11.

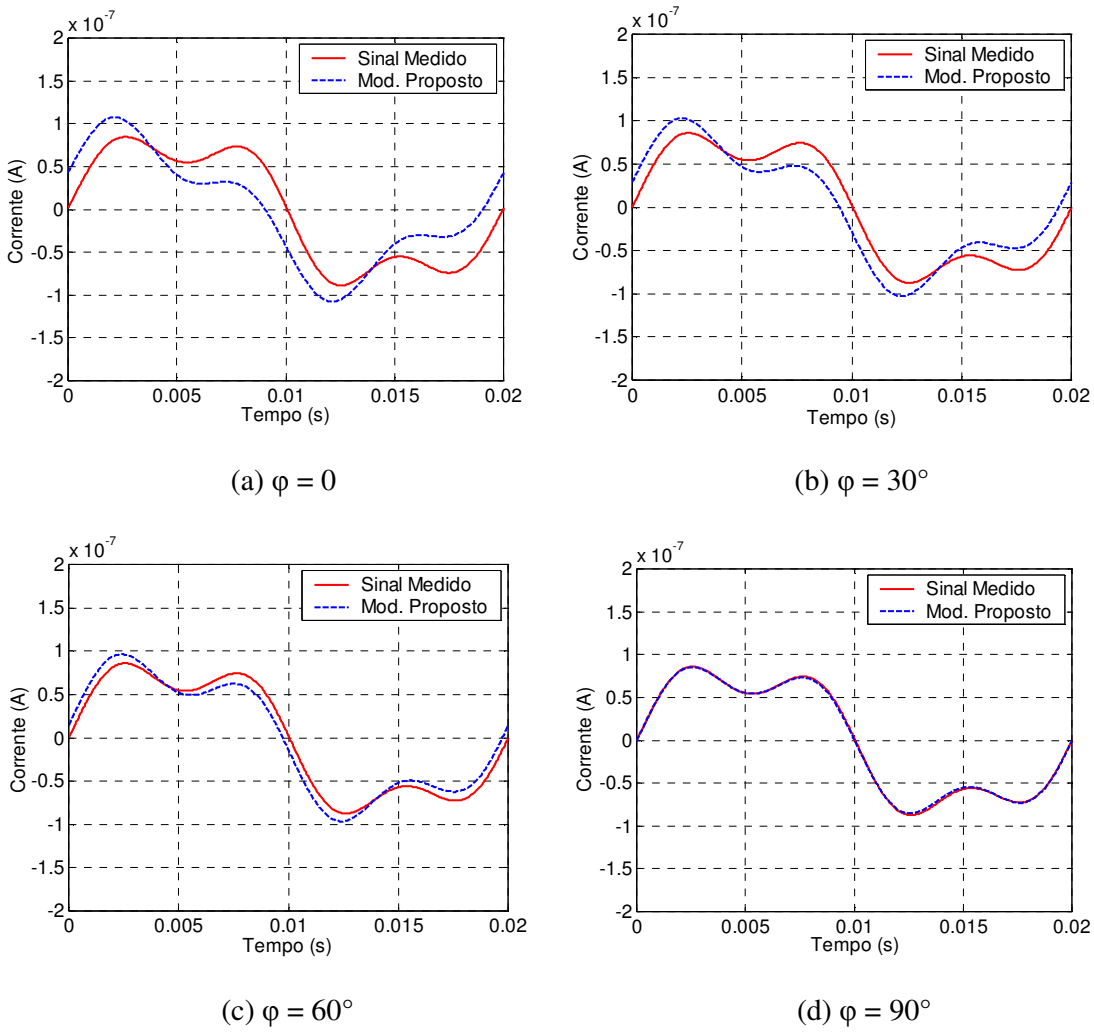


Figura 5.11 – Corrente de fuga medida e calculada: a) φ = 0° b) φ = 30° c) φ = 60° e φ =90°.

As correntes que fluem na camada isolante são de natureza capacitiva e resistiva. Por essa razão levantou-se a hipótese de que o ângulo a ser adotado na busca da solução do problema deva ser de 90 graus, incidindo em cada harmônico em relação à fundamental. Nessa linha de raciocínio, foram realizadas simulações considerando-se, sequenciadamente, a contribuição de diferentes ordens de harmônicos. Os resultados encontrados deram conta de que a defasagem individual de cada harmônico em 90 graus, em relação à fundamental não conduz à solução desejada, conforme pode ser constatado na figura 5.12, situação na qual foi considerada a influência do terceiro e do quinto harmônico.

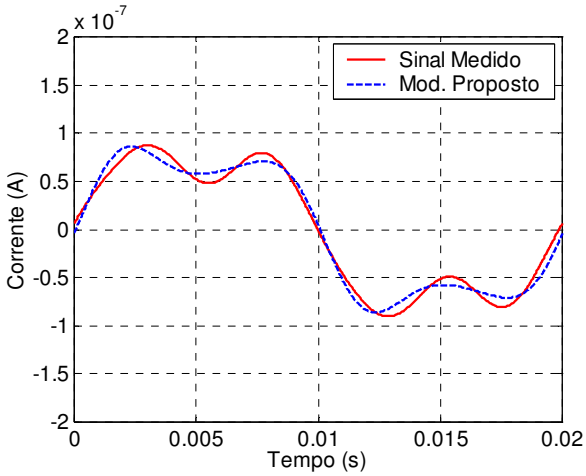
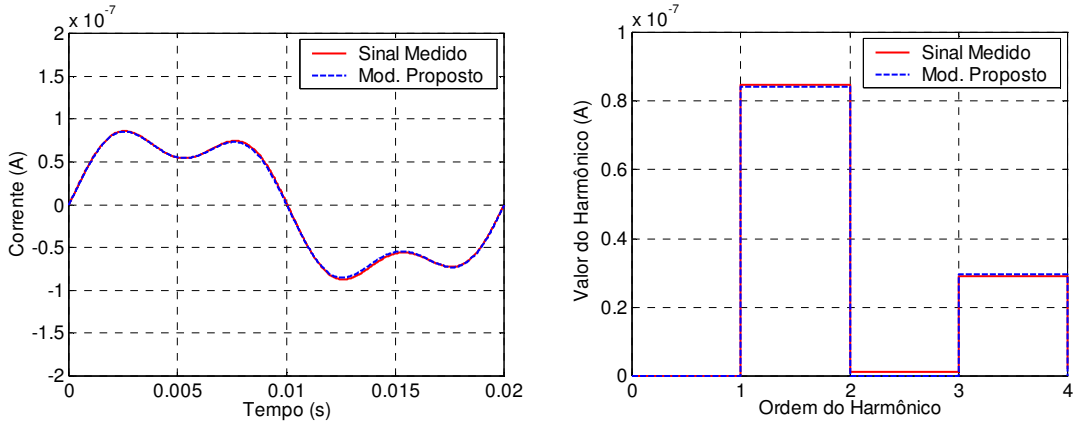


Figura 5.12 – Corrente de fuga medida e calculada: harmônicos de ordens 3 e 5

Esse resultado, não satisfatório, permitiu levantar a hipótese de que o defasamento deve ser aplicado ao sinal resultante do somatório dos harmônicos em relação à fundamental, em vez de aplicado a cada harmônico, individualmente. Nesse sentido, lançou-se mão de um tratamento matemático utilizado em processamento digital de sinais, mais precisamente da técnica de modulação denominada OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [70]. Essa técnica possibilita a defasagem do conjunto de harmônicos de um

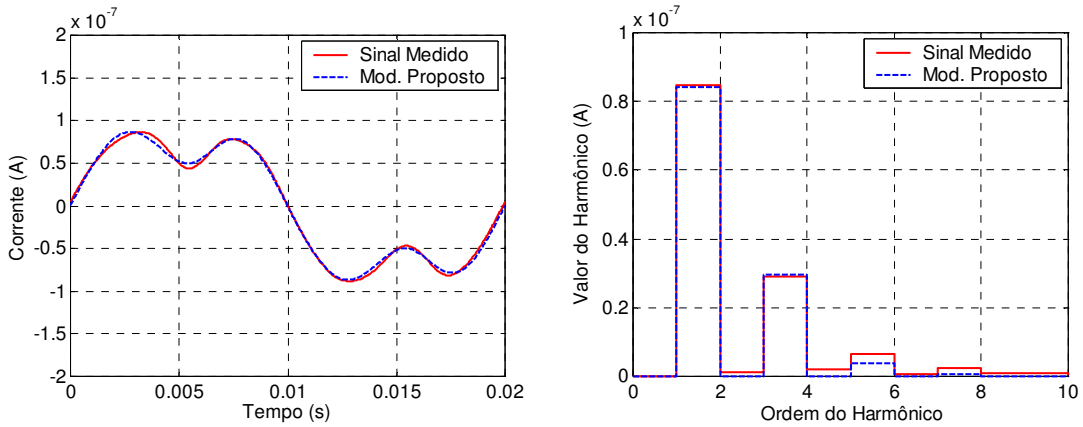
determinado sinal em relação à fundamental, o que é conseguido defasando-se, alternadamente, em +90 e -90 graus, cada harmônico em relação à fundamental. Assim procedendo foi possível reproduzir, computacionalmente, com êxito, a forma de onda da corrente de fuga medida em laboratório, o que pode ser constatado nas figuras 5.13 e 5.14. No resultado apresentado na figura 5.13 foi considerado apenas o terceiro harmônico enquanto que a figura 5.14 corresponde a uma simulação que contempla os harmônicos de ordens: 3, 5,7 e 9.

Uma análise mais detida sobre essa metodologia mostrou que a mesma possibilita a identificação da parcela de harmônicos de natureza capacitiva presente no isolamento, devido à degradação. Em outras palavras, revelou que o defasamento, em +90 e -90 graus, imposto à contribuição harmônica corresponde, na verdade, a se eliminar da corrente de fuga $i_{arb}(t)$, quando da recomposição dessa corrente de fuga por séries de Fourier, a parcela referente aos harmônicos de natureza capacitiva presente na camada isolante.



(a) (b)

Figura 5.13 – Corrente de fuga ativa medida e calculada considerando o harmônico de ordem 3: a) Forma de onda b) Espectrograma.



(a) (b)

Figura 5.14 – Corrente de fuga ativa medida e calculada considerando os harmônicos de ordens 3, 5, 7 e 9: a) Forma de onda b) Espectrograma.

Os resultados mostrados evidenciam uma boa correlação entre as formas de onda da corrente que foi extraída dos experimentos com aquela obtida através da modelagem aqui proposta. Salienta-se que os parâmetros R, C associados à amostra de material isolante empregado não foram disponibilizados pela referência utilizada. Para contornar essa restrição, na simulação com o modelo proposto, o valor da resistência de isolação foi obtido da relação entre a tensão e a corrente fundamental da corrente medida. No que tange à variação da capacitância introduzida pela degradação, comparativamente ao valor nominal representativo da camada isolante de um cabo ideal, esta foi encontrada por meio de tentativas.

Dentre as causas que podem ser atribuídas para as pequenas divergências encontradas entre os resultados, destaca-se a questão da desconsideração, neste trabalho, dos componentes harmônicos pares. Estas se fazem presentes, em menor escala, no sinal de corrente medido. Outra razão para essas pequenas discrepâncias está na diferença nos módulos e nos ângulos de fase dos harmônicos de ordem impar, notadamente a partir do quinto harmônico, como

destacado na figura 5.14 (b), que se tornam maiores à medida que a freqüência considerada aumenta.

Os resultados alcançados permitem, portanto, concluir que, por meio da presente metodologia é possível encontrar a forma de onda das correntes que estão presentes na camada isolante, quais sejam: a corrente total que flui na isolação $i_{arb}(t)$ e suas respectivas componentes de natureza capacitiva e resistiva, conforme apresentado na figura 5.15. Neste caso, os parâmetros do circuito equivalente foram:

$R = 1{,}18 * 10^{10}\Omega$, Cr = 0,8pF e k_{arb}= 149,5.

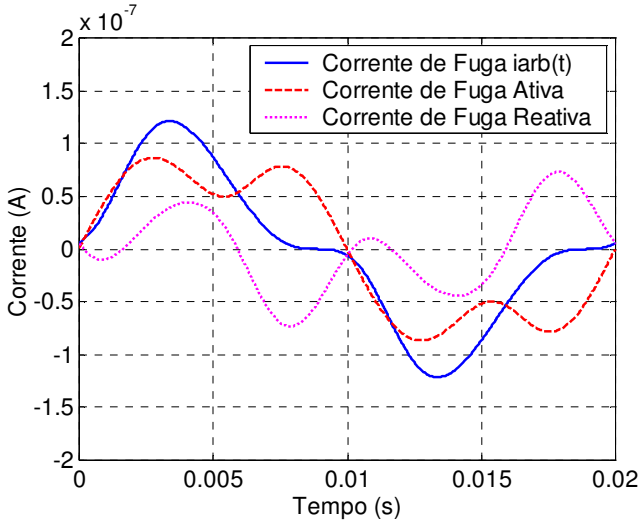


Figura 5.15 – Correntes de fuga e componentes na camada isolante considerando os harmônicos de ordens 3, 5, 7 e 9).

Complementarmente, a figura 5.16 apresenta as formas de onda correspondentes às tensões envolvidas no processo (Figura 5.5), a saber: tensão do cabo - v(t), tensão na região onde ocorre a arborescência – $v_d(t)$ e, finalmente, no capacitor em série com a representação da arborescência – $v_{cr}(t)$. Tensões essas especificadas no circuito equivalente da camada isolante com degradação. É importante registrar que em situações em que a degradação é menos severa, a

forma de onda da tensão na arborescência tende a se aproximar, cada vez mais, da tensão de alimentação v(t). Nessa condição, a tensão no capacitor tende para zero, o que leva a corrente $i_{arb}(t)$ a tender para o valor nominal e em fase com a tensão de alimentação, indicando ser representativa da resistência nominal da camada isolante, relacionada, portanto, com a inexistência de degradação.

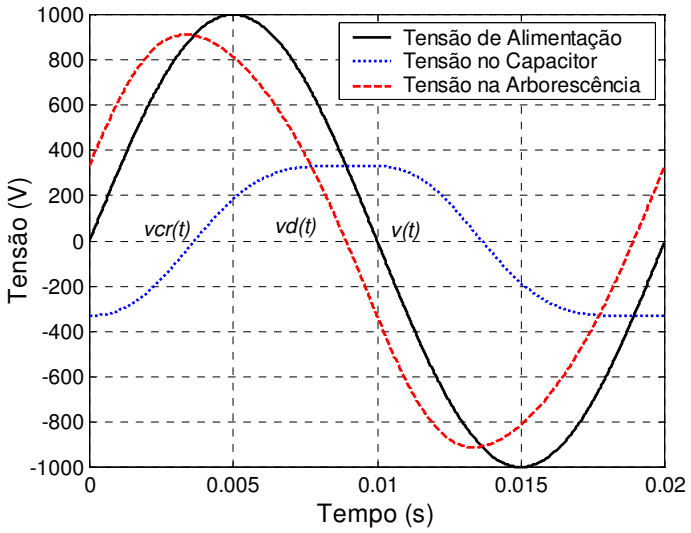


Figura 5.16 - Formas de onda das tensões no ramo representativo do processo da degradação.

Uma vez explicado e entendido o processo para a reprodução satisfatória da corrente de fuga fluindo no material isolante, é possível sintetizar as potencialidades da metodologia ora apresentada, que possibilita a determinação, para as tensões e correntes de fuga, do espectro de freqüência e das seguintes grandezas: valor eficaz verdadeiro, distorção harmônica total, ângulo de perdas dielétricas e potência dissipada na isolação. Ressalta-se que estas grandezas constituem-se em indicadores que se fazem necessários ao estabelecimento de uma sistemática para o diagnóstico do nível de degradação de um cabo elétrico.

Encerrando o conjunto de estudos apresentados, a figura 5.17 ilustra a característica V-I das arborescências para o nível de degradação adotado.

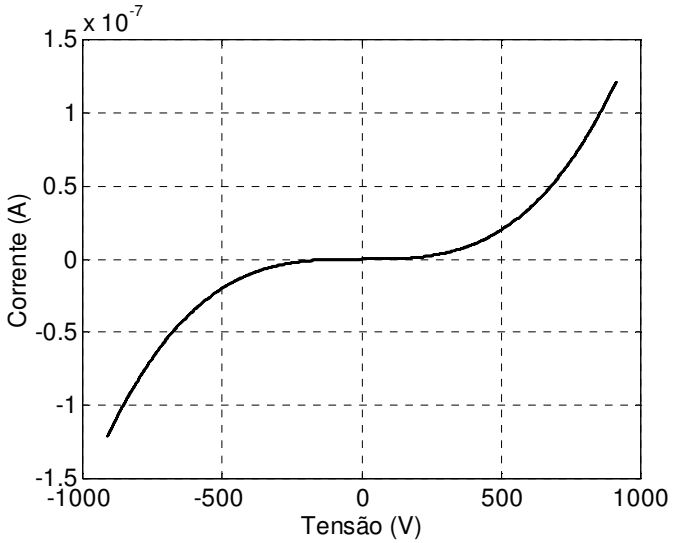


Figura 5.17 - Característica V-I das arborescências – computacional.

Um ponto a ser salientado é o fato de que, juntamente com o aumento da degradação, observa-se o surgimento de harmônicos de até nona ordem, todavia, apresentando valores bem inferiores ao de terceira ordem. A título de ilustração, nesse caso simulado, referente à amostra com maior nível de degradação, o terceiro harmônico corresponde a 35% da componente fundamental, o quinto harmônico representa 4,6%, o sétimo 0,56% e o nono 0,06%.

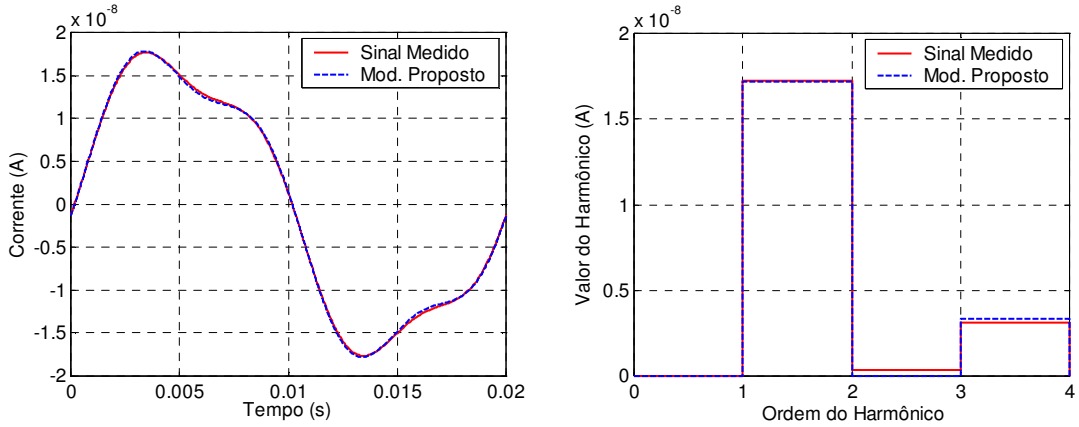
A etapa seguinte consistiu na validação do modelo matemático desenvolvido no que tange à recuperação das formas de ondas ilustradas nas figuras 5.4 (b) e 5.4 (c), situações onde a amostra de cabo isolado apresenta níveis menores de degradação, comparativamente ao caso anteriormente analisado. Nesses casos, conforme esperado, o equacionamento matemático (5.2), não é suficiente para reproduzir de forma adequada a não linearidade relativa a essas degradações. Isso porque, a não linearidade diminui com a redução do grau de degradação da camada isolante. Por esse motivo, se faz necessário a adequação do modelo matemático, conforme (5.3), para contemplar as especificidades de situações como essas ora analisadas.

$$i_{arb}(t) = \frac{1}{R^2}\left[k_{arb}^2 v_d^{\,3}(t) - v_d(t)\right] + \frac{v_d(t)}{R_{ad}} \tag{5.3}$$

O primeiro termo da equação (5.3) representa a contribuição não linear e o segundo termo está relacionado à adequação da não linearidade ao grau de degradação presente na amostra de cabo isolado, em análise. Para cada nível de deterioração se faz necessário determinar uma resistência de adequação R_{ad}, correspondente à degradação presente na amostra.

- **Caso B: Reprodução computacional da forma de onda indicada na figura 5.4 (c)**

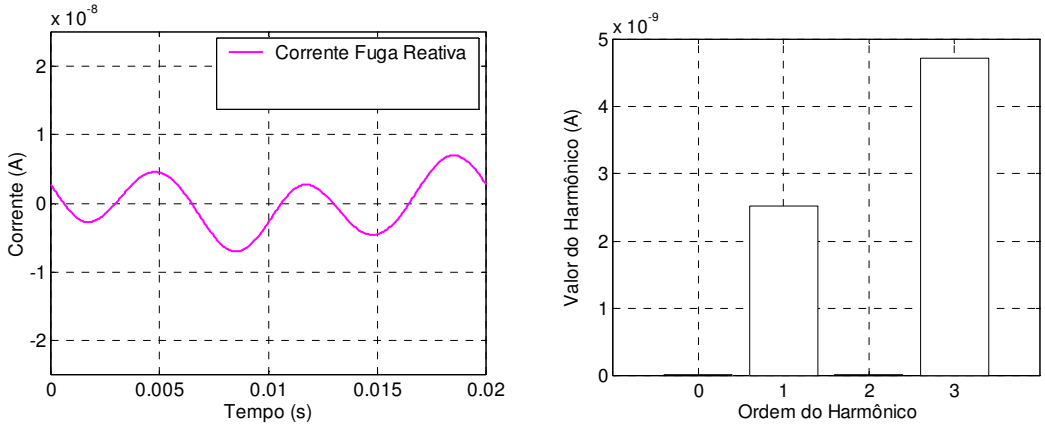
A figura 5.18 apresenta, comparativamente, as formas de ondas para a corrente de fuga ativa, obtida por meio da simulação computacional e advinda do experimento anteriormente mencionado, figura 3.4 (c), evidenciando boa concordância entre os resultados. Esses resultados agregam o harmônico de ordem 3 e indicam, com clareza, a redução da não linearidade do fenômeno em pauta quando da diminuição da presença de arborescências.



(a) (b)

Figura 5.18 – Correntes de fuga medida e calculada: a) Forma de onda b) Espectrograma.

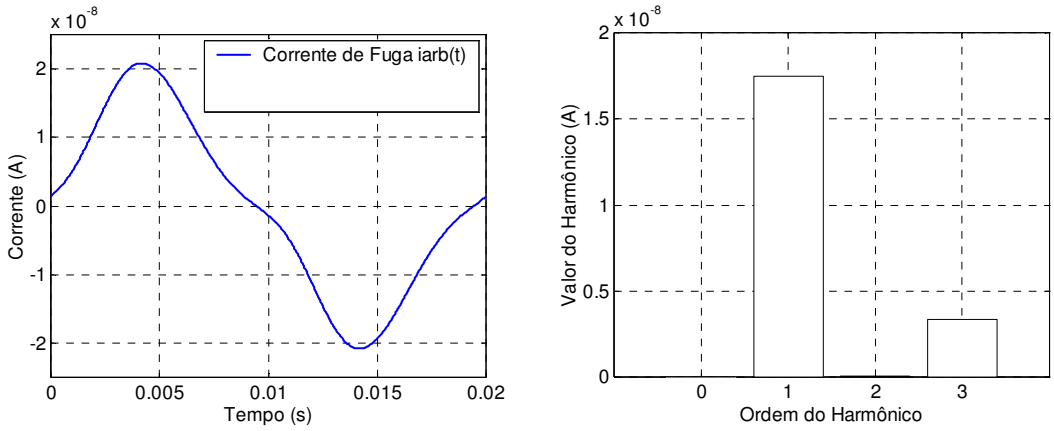
Em acréscimo, a figura 5.19 ilustra a forma de onda e o espectrograma da corrente de natureza capacitiva presente na amostra e que surge devido especificamente à degradação.



(a) (b)

Figura 5.19 – Corrente de fuga reativa: a) Forma de onda b) Espectrograma.

A figura 5.20, por sua vez, apresenta a corrente de fuga total $i_{arb}(t)$, representada pela soma da parcela ativa da corrente de fuga e da parcela reativa dessa corrente de fuga. Neste caso, adotou-se o valor de 0,008pF para a variação da capacitância devido à degradação, bem como os seguintes valores para os parâmetros do circuito equivalente: R = 5,8* $10^{10}\Omega$, Cr = 0,17pF, R_{ad} = 13,2*$10^{10}\Omega$ e k_{arb} = 220, obtidos através da metodologia proposta.



(a) (b)

Figura 5.20 - Correntes de fuga total: a) Forma de onda b) Espectrograma.

Adicionalmente, a figura 5.21 apresenta as formas de ondas correspondentes às tensões envolvidas no processo, quais sejam: tensão do cabo, tensão na região onde ocorre arborescência e, finalmente, no capacitor série a esta. Vale atentar para a tendência, já mencionada, da tensão na arborescência em direção à forma de onda da tensão de entrada.

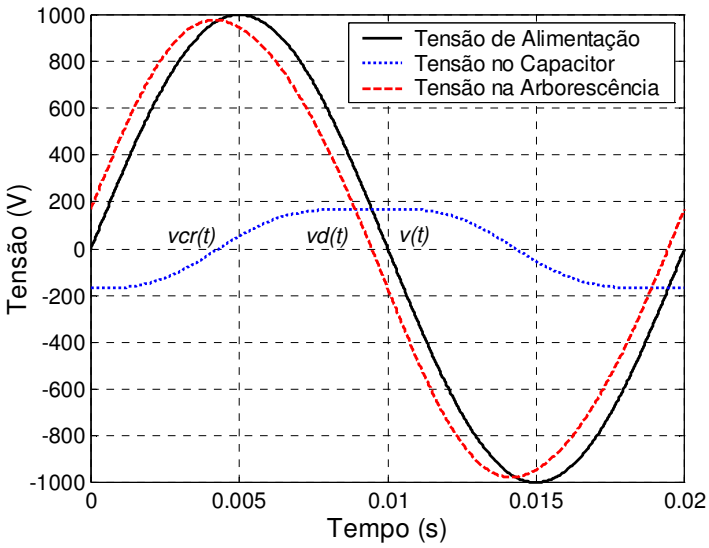


Figura 5.21 - Formas de onda das tensões no ramo representativo do processo da degradação.

Com a redução do nível de degradação, conforme já mencionado, a corrente $i_{arb}(t)$ tende para a corrente nominal em fase com a tensão de entrada, de modo que a característica V-I das arborescências, por sua vez, tende a diminuir a sua não linearidade, como pode ser observado na figura 5.22.

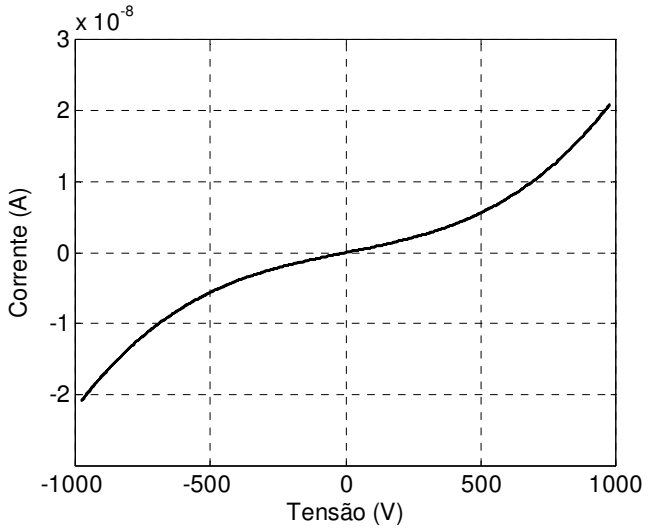
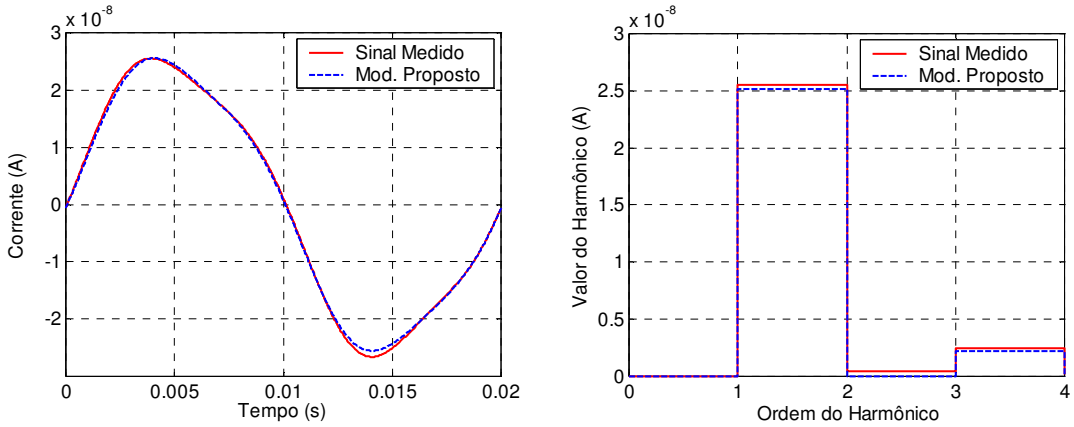


Figura 5.22 - Característica V-I das arborescências – computacional.

- **Caso C: Reprodução computacional da forma de onda indicada na figura 5.4 (b)**

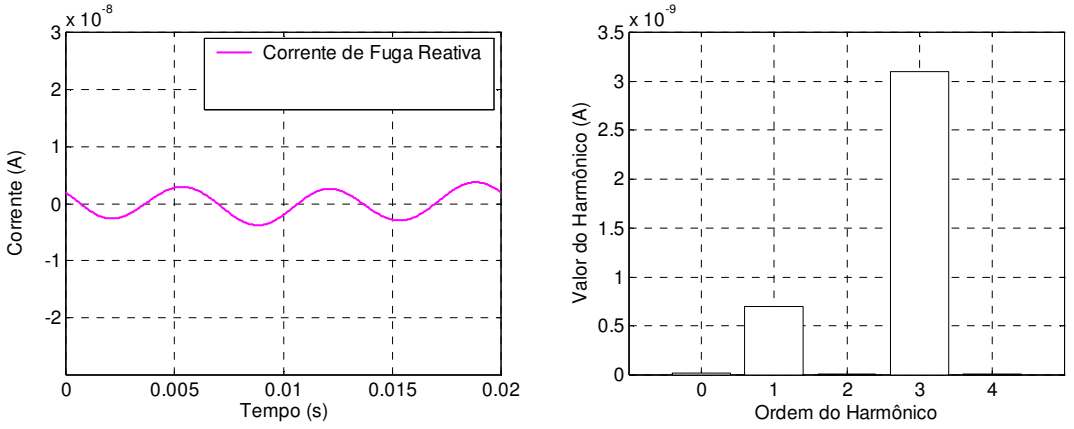
O modelo matemático e a metodologia desenvolvida, também se mostraram eficientes quando da recuperação da forma de onda da corrente de fuga ilustrada na figura 5.4 (b), referente à situação em que a amostra de cabo isolado apresenta menor nível de degradação, conforme pode ser constatado na figura 5.23, situação em que se adotou o valor de 0,002pF para a variação da capacitância devido à degradação e os seguintes valores para os parâmetros do circuito equivalente: $R = 3{,}9*10^{10}\Omega$, $C_r = 0{,}26pF$, $R_{ad} = 5{,}34*10^{10}\Omega$ e $k_{arb} = 116{,}6$, obtidos por meio da metodologia proposta.



(a) (b)

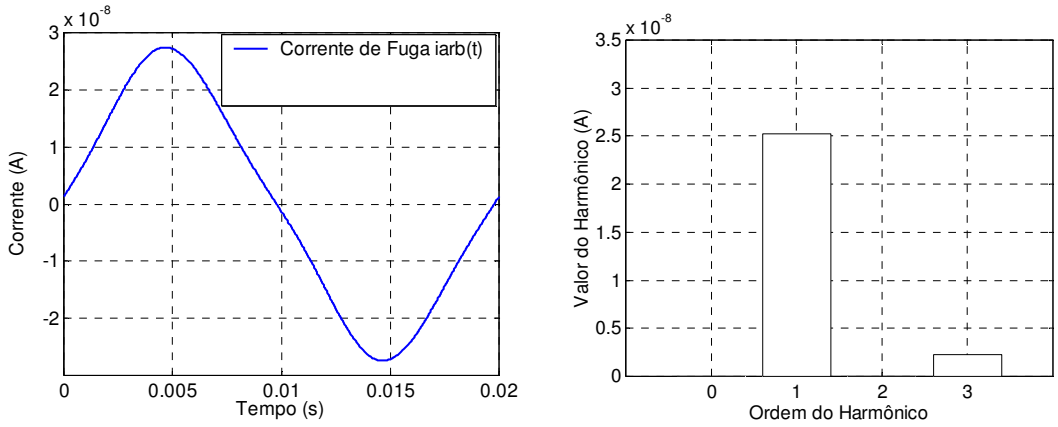
Figura 5.23 – Correntes de fuga ativa medida e calculada: a) Forma de onda b) Espectrograma.

A forma de onda e respectivo espectrograma da corrente de natureza capacitiva estão indicados na figura 5.24. A forma de onda resultante da superposição dessa corrente com a parcela da corrente em fase com a alimentação, assim como o respectivo espectro de freqüências, pode ser observada na figura 5.25.



(a) (b)

Figura 5.24 – Corrente de fuga reativa: a) Forma de onda b) Espectrograma.



(a) (b)

Figura 5.25 – Corrente de fuga total: a) Forma de onda b) Espectrograma.

Pela observação da figura 5.26, é possível notar que a tensão na arborescência é quase senoidal, indicando que, neste caso, ocorre uma significativa redução da degradação, comparativamente aos casos analisados anteriormente, o que corrobora a afirmação já feita a este respeito.

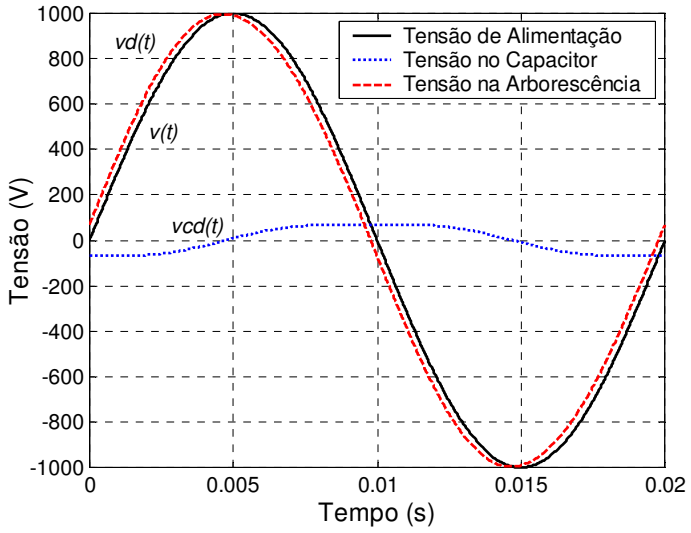


Figura 5.26 - Formas de onda das tensões no ramo representativo do processo da degradação.

A constatação mencionada, também é referendada pela correspondente curva característica V-I da arborescência, figura 5.27, que apresenta uma expressiva redução da não linearidade, mostrando que, com a redução da degradação, a característica V-I aproxima-se de uma reta, cuja inclinação é dada pela relação entre a tensão de entrada e a resistência nominal da amostra. Vale registrar, que estudos mostram que, mesmo no caso de amostras sem degradação, pode existir uma pequena contribuição do terceiro harmônico, devida, sobretudo, à movimentação de cargas elétricas submetidas a campos elétricos elevados [60].

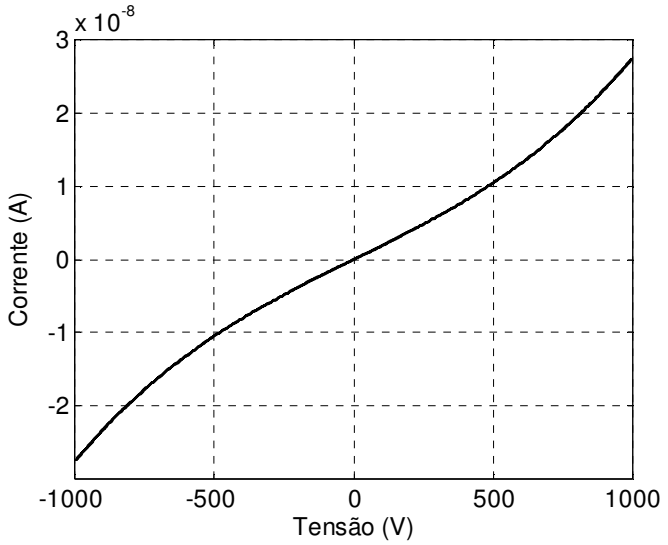


Figura 5.27 - Característica V-I das arborescências – computacional.

5.4 – Considerações finais

Este capítulo foi dedicado à validação do modelo matemático desenvolvido para representar uma camada isolante submetida à ação do fenômeno de arborescência. Inicialmente foram apresentados dois circuitos de medição da parcela ativa da corrente de fuga. Tanto em um caso quanto no outro, é feito uma comparação entre a corrente que flui em uma amostra degradada e a corrente que flui em uma amostra isenta de degradação. Por meio

de ajustes nos parâmetros de cada circuito é possível, em cada caso, com boa aproximação, obter a parcela da corrente de fuga em fase com a tensão de alimentação. O que corresponde a subtrair a parcela capacitiva da corrente de fuga total, que flui na amostra degradada.

Para fins de validação do modelo proposto foram consideradas as formas de ondas correspondentes à corrente de fuga ativa, disponíveis na literatura especializada, obtidas em laboratório a partir de amostras com diferentes níveis de degradação. A metodologia desenvolvida possibilitou, com êxito, a recuperação, via simulação computacional, do experimento realizado para identificar a parcela ativa da corrente de fuga em amostras degradadas por arborescência.

O procedimento adotado utilizou tratamento matemático de processamento digital de sinais, para identificar a contribuição harmônica de natureza capacitiva presente na corrente de fuga, sem a qual seria impossível recuperar as formas de ondas obtidas experimentalmente. Vale salientar que as simulações computacionais identificadas na literatura consultada, desconsideram a contribuição harmônica de natureza capacitiva e, portanto, apresentam resultados insatisfatórios quando confrontados com as curvas experimentais.

No próximo capítulo será desenvolvida uma metodologia que permita a determinação da componente ativa da corrente de fuga, a partir do conhecimento da corrente de fuga total sem a necessidade de utilização de circuitos específicos de medição, nos quais se compara a corrente de uma amostra degradada com a corrente de uma amostra sem degradação. O conhecimento das componentes ortogonais da corrente de fuga possibilitará a determinação de um conjunto de indicadores de estado, com vistas ao diagnóstico da isolação de cabos elétricos.

CAPÍTULO VI

Proposta de metodologia para diagnóstico de cabos isolados

6.1 – Considerações iniciais

A metodologia até aqui adotada permite a identificação das componentes ortogonais da corrente de fuga ativa e reativa, que fluem através da camada isolante, tendo por referência a forma de onda da corrente de fuga ativa. A partir dessas componentes, por meio de decomposição em séries de Fourier, obtêm-se as respectivas componentes fundamentais e harmônicas, de natureza resistiva e capacitiva, respectivamente. Este procedimento possibilita determinar diversos indicadores do nível de degradação do cabo.

Conforme já mencionado anteriormente, a análise da distorção harmônica da componente da corrente de fuga em fase com a tensão e também o módulo e ângulo de fase do terceiro harmônico dessa corrente são indicadores adotados em pesquisas atuais destinadas à avaliação da vida útil de cabos isolados [54], [56]. Registre-se que a obtenção dessa componente da corrente de fuga total, requer circuitos específicos de medição que permitam a separação dessa parcela da corrente. Nesse sentido, a presente etapa desta tese, tem, inicialmente, seu

foco voltado para a realização de estudos que culminam com a determinação da corrente de fuga em fase com a tensão, a partir tão somente da medição da corrente total de fuga. Ou seja, os esforços estão centrados no desenvolvimento de uma metodologia apropriada, de maneira que a componente da corrente de fuga em fase com a tensão possa ser determinada a partir da medição somente da corrente de fuga total. Em seguida, com base nas informações relativas à componente fundamental e aos componentes harmônicos, tanto de natureza capacitiva quanto resistiva, é desenvolvido, no software ATP (*Alternative Transients Program)*, um modelo equivalente para a camada isolante com degradação, a ser utilizado para simular degradações não uniformes, com vistas à avaliação da sensibilidade dos indicadores de estado diante desse tipo de deterioração.

6.2 – Análise da contribuição harmônica presente na corrente de fuga

A metodologia desenvolvida tem como etapa inicial a identificação das contribuições harmônicas correspondentes às componentes ortogonais da corrente total de fuga, com base no conhecimento do módulo e da fase do espectro da corrente de fuga total. A referência adotada é o conhecimento adquirido na etapa de validação do modelo proposto, capítulo V, particularmente no tocante à identificação da contribuição harmônica de natureza capacitiva presente na corrente de fuga. Para tanto, lança-se mão das informações disponibilizadas nas simulações do caso A, referentes à figura 5.4 (d) e que podem ser sumarizadas nos passos a seguir descritos:

a) Identificação do terceiro harmônico da parcela ativa da corrente de fuga total

O primeiro passo da metodologia consiste em confrontar a forma de onda do terceiro harmônico da parcela ativa com o terceiro harmônico da corrente de fuga total, tendo por referência a amostra mais degradada apresentada na figura 5.4 (d). Por meio desse procedimento constata-se que é possível obter o terceiro harmônico de natureza resistiva apenas defasando em 90 graus o terceiro harmônico da corrente total, conforme evidencia a figura 6.1.

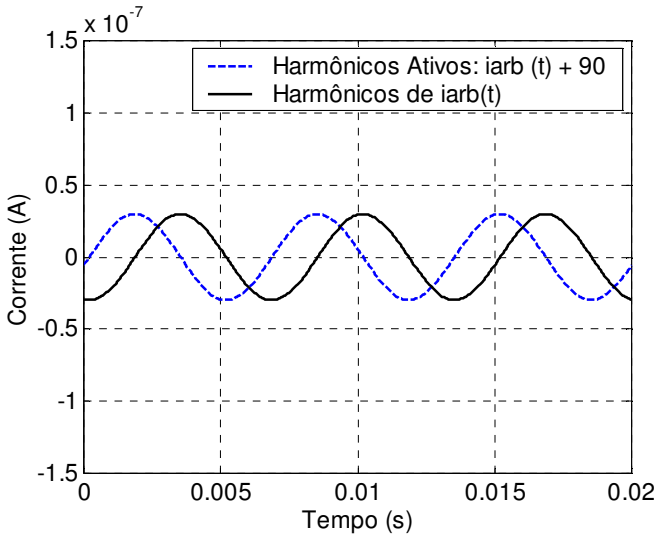


Figura 6.1 – Formas de onda do terceiro harmônico da corrente de fuga: total e da componente em fase com a tensão.

b) Identificação do terceiro harmônico da parcela reativa da corrente de fuga

O passo seguinte consiste em analisar, analogamente à alínea anterior, o terceiro harmônico da parcela reativa comparativamente ao terceiro harmônico da corrente de fuga total. Este procedimento permite constatar que a diferença entre estas correntes corresponde, na verdade, à própria componente de terceira

ordem da corrente de fuga total, porém, defasada de 90 graus e em sentido contrário àquele identificado para a parcela ativa dessa corrente (item a), conforme apresentado na figura 6.2, que disponibiliza a forma de onda das três correntes mencionadas.

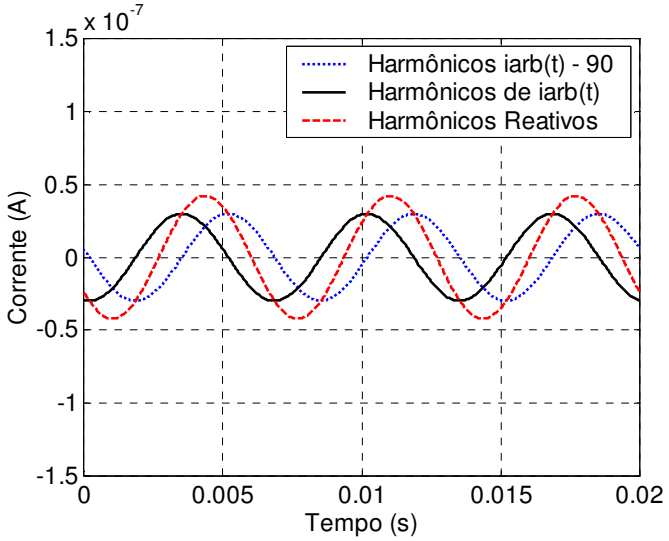


Figura 6.2 – Formas de onda do terceiro harmônico da corrente de fuga: total, componente reativa e a diferença entre estas.

Por meio desses dois procedimentos, torna-se possível a determinação das contribuições harmônicas de naturezas capacitiva e resistiva da corrente de fuga total, com base na contribuição harmônica presente na corrente total que flui através da isolação. Sendo assim, a parcela da corrente de fuga em fase com a tensão pode, então, ser determinada por meio do procedimento apresentado a seguir:

Decompondo-se a corrente de fuga total em série trigonométrica de Fourier, tem-se:

$$\begin{aligned} i_{arb}(t) = {} & c_1 \sin\left(\omega t + \theta_1\right) + c_3 \sin\left(3\omega t + \theta_3\right) \\ & + c_5 \sin\left(5\omega t + \theta_5\right) + c_7 \sin\left(7\omega t + \theta_7\right) \\ & + \ldots \end{aligned} \tag{6.1}$$

A contribuição harmônica dessa corrente, por sua vez, é dada por (6.2)

$$\begin{aligned} i_{h_arb}(t) = {} & c_3 \sin\left(3\omega t + \theta_3\right) + c_5 \sin\left(5\omega t + \theta_5\right) \\ & + c_7 \sin\left(7\omega t + \theta_7\right) + c_9 \sin\left(9\omega t + \theta_9\right) \\ & + \ldots \end{aligned} \tag{6.2}$$

A contribuição harmônica da corrente de fuga total pode também ser expressa por meio de suas componentes ortogonais, de natureza capacitiva e resistiva, conforme mostra a expressão (6.3).

$$i_{h_arb}(t) = i_{h_c}(t) + i_{h_r}(t) \tag{6.3}$$

Onde,

$$\begin{aligned} i_{h_c}(t) = {} & c_3 \sin\left(3\omega t + \theta_3\right) + c_3 \sin[3\omega t + (\theta_3 - 90°)] \\ & + c_5 \sin\left(5\omega t + \theta_5\right) + c_5 \sin[5\omega t + (\theta_5 + 90°)] \\ & + c_7 \sin\left(7\omega t + \theta_7\right) + c_7 \sin[7\omega t + (\theta_7 - 90°)] \\ & + \ldots \end{aligned} \tag{6.4}$$

e

$$\begin{aligned} i_{h_r}(t) = {} & c_3 \sin\left[3\omega t + (\theta_3 + 90°)\right] \\ & + c_5 \sin\left[5\omega t + (\theta_5 - 90°)\right] \\ & + c_7 \sin\left[7\omega t + (\theta_7 + 90°)\right] \\ & + \ldots. \end{aligned} \tag{6.5}$$

A corrente de fuga total pode ser apresentada pela somatória de suas componentes ativa e reativa, conforme (6.6).

$$i_{arb}(t) = i_{fuga_ativa}(t) + i_{\Delta C_0}(t) + i_{h_c}(t) \tag{6.6}$$

Fazendo t=0 em (6.6) identifica-se o valor de pico da parcela capacitiva de 50 Hz dessa corrente de fuga, sendo, então, possível concluir que:

$$i_{\Delta C_0}(t) = \left[i_{arb}(0) - i_{h_c}(0) \right] \cos(\omega t) \tag{6.7}$$

Sendo assim, a parcela da corrente de fuga em fase com a tensão é dada pela subtração, da corrente de fuga total, das parcelas relativas à contribuição harmônica capacitiva e da corrente fundamental capacitiva como mostra a expressão (6.8).

$$i_{fuga_ativa}(t) = i_{arb}(t) - i_{h_c}(t) - i_{\Delta C_0}(t) \tag{6.8}$$

Na seqüência, são mostradas algumas figuras ilustrativas dos resultados que são alcançados com a formulação desenvolvida e que permitem aferir o desempenho das mesmas. Inicia-se com a figura 6.3, que apresenta a obtenção da contribuição harmônica de natureza capacitiva, equação (6.4), a partir da contribuição harmônica da corrente total que flui na isolação, considerando os harmônicos de ordens: 3, 5 e 7.

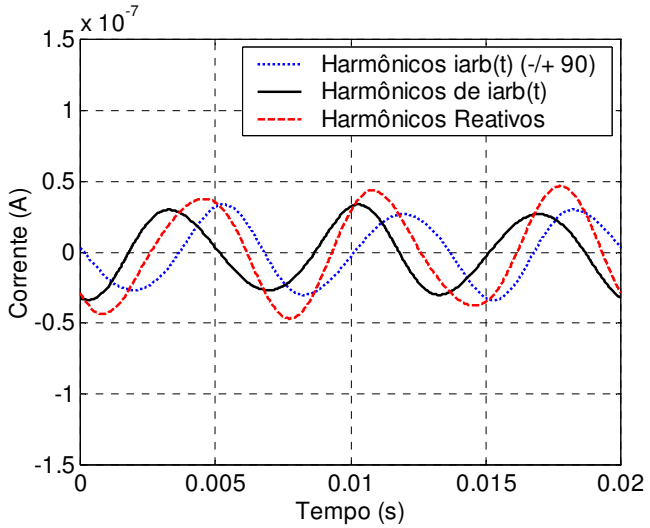


Figura 6.3 – Composição da contribuição harmônica reativa.

A figura 6.4, por sua vez, ilustra a contribuição harmônica de natureza resistiva, equação (6.5), a partir da contribuição harmônica da corrente total de fuga presente na camada isolante. Mais uma vez foram considerados os harmônicos de ordens 3, 5 e 7.

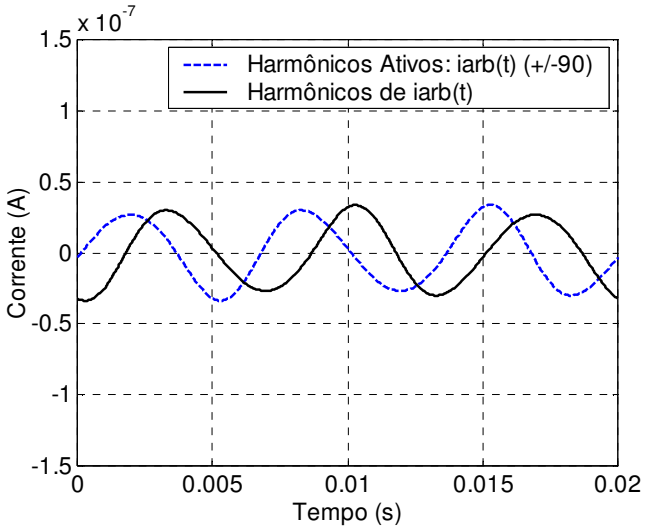


Figura 6.4 – Composição da contribuição harmônica ativa.

A figura 6.5 mostra as correntes representativas das contribuições harmônicas: ativa e reativa, bem como o sinal que congrega os harmônicos totais que fluem na camada isolante, para o caso aqui analisado.

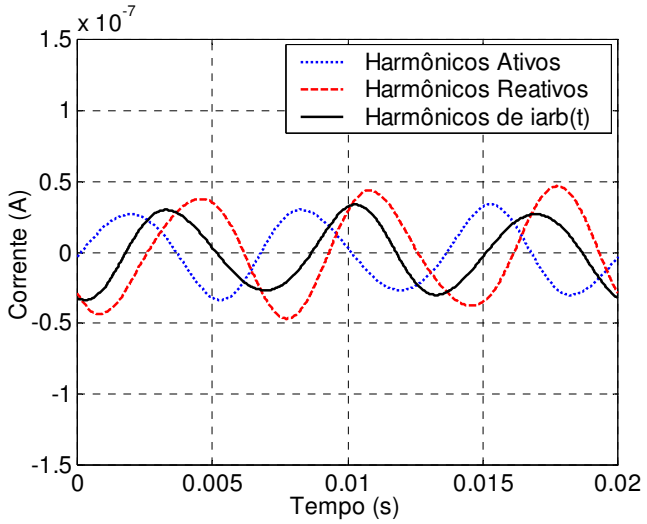


Figura 6.5 – Correntes harmônicas que estão presentes na isolação sob estudo.

Portanto, de acordo com a metodologia apresentada e com auxílio da expressão (6.6) é possível obter-se a parcela da corrente de fuga em fase com a tensão de alimentação. Constata-se dessa forma, que a partir da medição da corrente de fuga total é possível encontrar as componentes ortogonais dessa corrente de fuga, conforme ilustrado na figura 6.6.

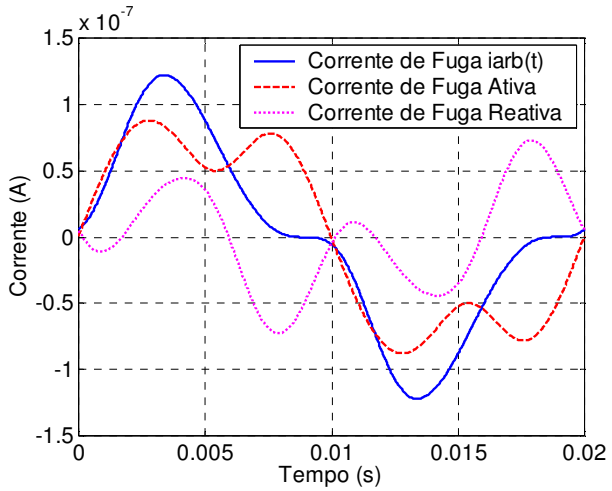
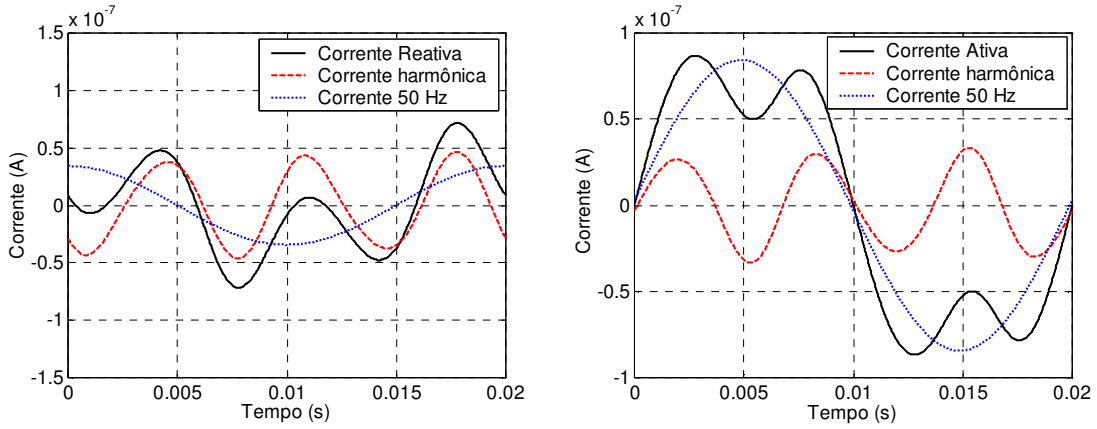


Figura 6.6 – Correntes de fuga presentes na isolação (Nh=7).

As componentes, tanto ativa quanto reativa da corrente de fuga, podem ser decompostas por meio de série de Fourier e cujos resultados encontram-se ilustrados nas figuras 6.7 (a) e 6.7 (b). O procedimento possibilita a identificação das respectivas componentes: fundamental e harmônicas. Essas componentes, conforme já explicitado, são necessárias para a determinação dos indicadores que permitem aferir o estado operacional do material isolante considerado na presente investigação.



(a) b)

Figura 6.7 – Decomposição das correntes de fuga ativa e reativa.

Salienta-se que no presente trabalho não são consideradas os componentes harmônicos de ordens pares pelo fato de apresentarem valores desprezíveis, comparativamente às componentes de ordens ímpares. Todavia, quando da aplicação da defasagem, em +90 e -90 graus, em se considerando, também, os harmônicos pares, tem-se como resultado uma forma de onda que não corresponde à corrente de fuga desejada. Assim sendo, deve-se sublinhar que, quando necessário, esses harmônicos devem ser considerados separadamente, sendo submetidas ao mesmo procedimento, em termos de defasagens, adotado para os harmônicos ímpares.

Outra constatação relevante diz respeito ao fato de que o procedimento em questão pode ser aplicado com sucesso, independentemente do grau de degradação, tendo em vista os resultados obtidos quando da simulação das degradações das quais resultam as figuras 5.4 (c) e 5.4 (b).

6.3 – Uma proposta de modelo equivalente para representar o isolamento de um cabo com arborescência.

Ainda no que tange à modelagem de cabos isolados submetidos à degradação por arborescências, podemos concluir que a presente metodologia permite a adoção do circuito equivalente apresentado na figura 6.8 para representar o isolamento de um cabo, submetido à degradação por arborescências. Nessa modelagem a corrente de fuga total que flui através da camada isolante é representada por dois circuitos distintos: um deles se refere à corrente fundamental, o outro, por sua vez, diz respeito à contribuição harmônica presente na corrente de fuga aqui representada por uma fonte de corrente $i_h(t)$.

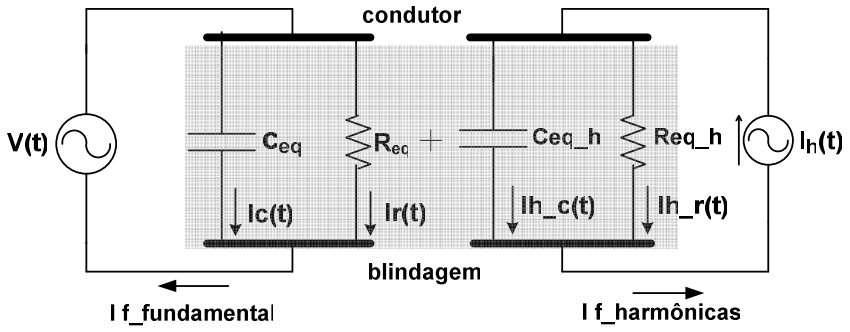


Figura 6.8 - Circuito equivalente do isolamento de um cabo, com arborescências.

Ressalta-se que os valores para a capacitância equivalente C_{eq} e para a resistência equivalente R_{eq} são obtidas pela relação entre o valor de pico da tensão de suprimento e os valores de pico das componentes fundamentais: reativa e ativa, respectivamente. Esses parâmetros também podem ser utilizados como referências para análise do grau de deterioração da isolação. No tocante aos parâmetros C_{eq-h} e R_{eq-h}, estes se referem à corrente residual referente aos harmônicos da corrente de fuga, associadas diretamente à presença de

arborescências, sendo que h representa a ordem de cada harmônico a ser considerado.

6.4 – Desenvolvimento de modelos equivalentes para estudos com degradação não uniforme

As simulações até aqui realizadas tiveram como referência amostras de cabos submetidos a degradações uniformes. Em situações práticas, no entanto, as degradações não se dão, necessariamente, dessa maneira. Sendo assim, se faz necessário proceder à análise do comportamento da corrente de fuga para situações em que as degradações se apresentem diferenciadas quanto à severidade do fenômeno.

Nesse sentido, optou-se pelo desenvolvimento de blocos específicos, no ambiente ATP, representativos de diversos graus de degradação da isolação, que correspondem, portanto, às investigações conduzidas até o momento, tendo por referência o circuito equivalente ilustrado na figura 6.8. A expectativa aponta no sentido de que a associação de blocos com degradações uniformes diferentes deva reproduzir uma forma de onda de corrente de fuga não uniforme, possibilitando, assim, a análise do comportamento da corrente de fuga em uma camada isolante, quando o cabo estiver submetido a degradações não uniformes.

Adotando essa linha de pensamento, foi realizada a configuração apresentada na figura 6.9, que resulta na criação no ATPDraw de um arquivo objeto correspondente a cada degradação considerada. No caso, as degradações relativas às formas de ondas de correntes de fuga, parcela ativa, apresentadas na figura 5.4, que foram utilizadas na validação do modelo matemático proposto neste estudo, para representar a corrente de fuga de um cabo isolado deteriorado

devido à aplicação de uma tensão de alimentação de 3kV, durante 100, 300 e 500h, respectivamente.

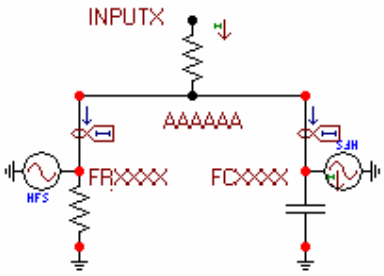


Figura 6.9 – Circuito equivalente representativo de uma amostra degradada.

Os valores para a capacitância C_{eq} e para a resistência R_{eq} são obtidos, conforme já referido, pela relação entre os valores de pico da tensão de suprimento e das componentes fundamentais: reativa e ativa, respectivamente. As fontes de corrente, por sua vez, correspondem às contribuições harmônicas de natureza capacitiva e de natureza resistiva, relativas a cada nível de degradação analisada.

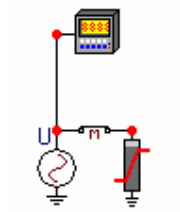
Valendo-se de recursos próprios do simulador ATP, foram construídos blocos representativos de amostras de cabos isolados com diferentes níveis de degradação, variando de um cabo sem degradação até uma degradação severa, com parcela significativa do material degradado, conforme ilustra a figura 6.10, correspondendo às situações utilizadas anteriormente como referência (figura 5.4). Salienta-se que cada bloco contém um circuito do tipo indicado na figura 6.9, com valores dos parâmetros e contribuições harmônicas referentes a cada nível de degradação adotado.

(a) (b) (c) (d)

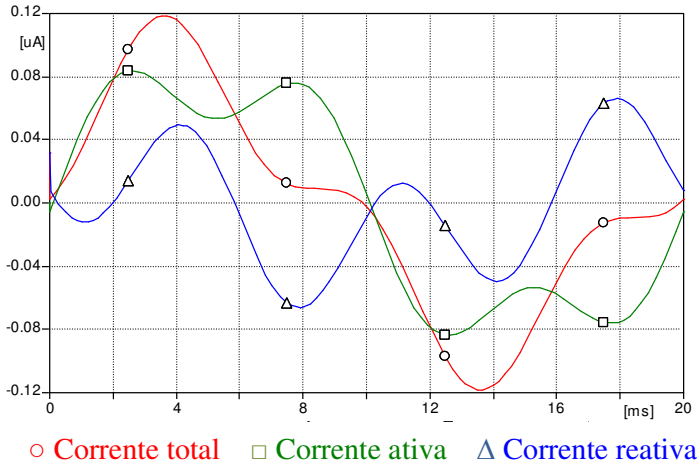
Figura 6.10 – Blocos representativos das amostras de cabos com diferentes graus de degradação: a) sem degradação; b) 3kV/100h; c) 3kV/300h e d) 3kV/500h.

Cada um dos blocos criados possui informações relativas aos parâmetros R_{eq} e C_{eq} que o caracterizam, assim como as informações pertinentes ao harmônico de terceira ordem presente na camada isolante. Vale ressaltar, que a opção por restringir a contribuição apenas ao terceiro harmônico, objetiva facilitar as simulações e análises a serem realizadas para validação da metodologia desenvolvida e aplicada com êxito para o caso de degradações uniformes, desta feita observando seu desempenho para casos em que a degradação é não uniforme. Todavia, a inclusão de harmônicos de outras ordens pode ser facilmente contemplada. Vale salientar, no entanto, que a análise contemplando apenas a componente fundamental e o terceiro harmônico é suficiente para fins de diagnóstico do estado operacional da camada isolante.

A título de exemplificação, serão apresentados apenas os resultados obtidos quando da utilização da situação de maior nível de degradação, submetida a uma tensão de alimentação de 1000V (50Hz), conforme ilustrado na figura 6.11.



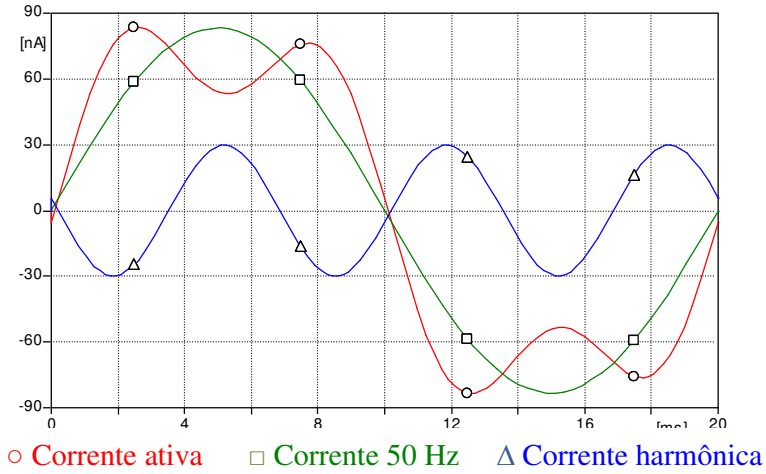
(a)



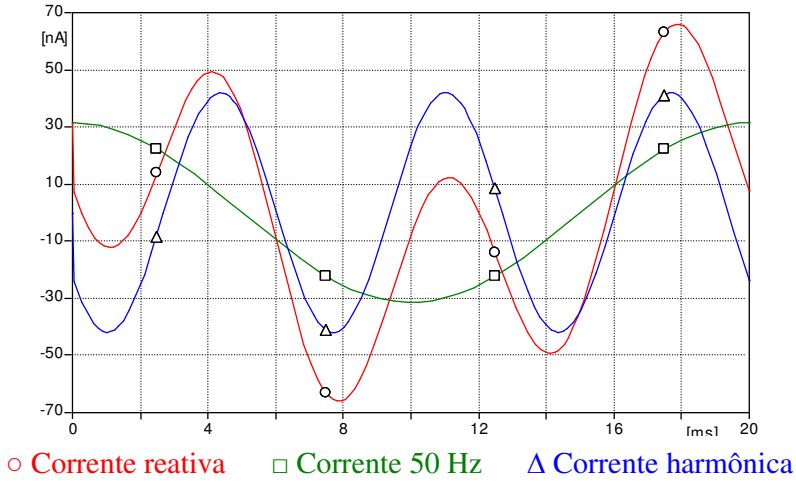
(b)

Figura 6.11 – Determinação da corrente de fuga: a) Circuito utilizado; b) Formas de Onda.

De posse das componentes ortogonais, o procedimento desenvolvido permite a identificação das componentes fundamental e harmônica, tanto da parcela ativa quanto da parcela reativa da corrente de fuga, conforme apresentado nas figuras 6.12 (a) e 6.12 (b), respectivamente.



(a)

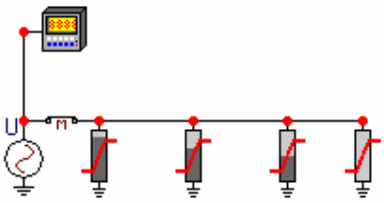


(b)

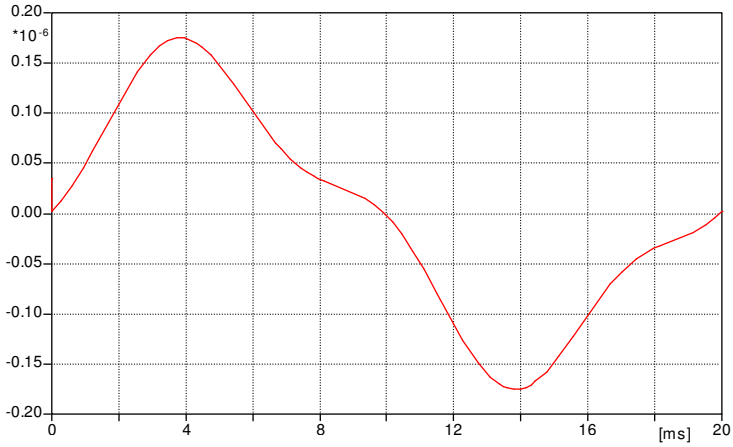
Figura 6.12 – Decomposição da corrente de fuga: a) Ativa e b) Reativa.

A combinação de blocos com diferentes níveis de degradação acarretará uma corrente de fuga resultante que pode, para os fins aqui propostos, ser interpretada como uma corrente de fuga típica em cabos isolados apresentando degradações por arborescências não uniformes. A figura 6.13 (a) ilustra tal situação, associada à imposição de uma região sem degradação e três regiões apresentando degradações, com graus diferentes de gravidade, correspondentes às deteriorações ilustradas na figura 5.4. Os resultados da simulação da situação

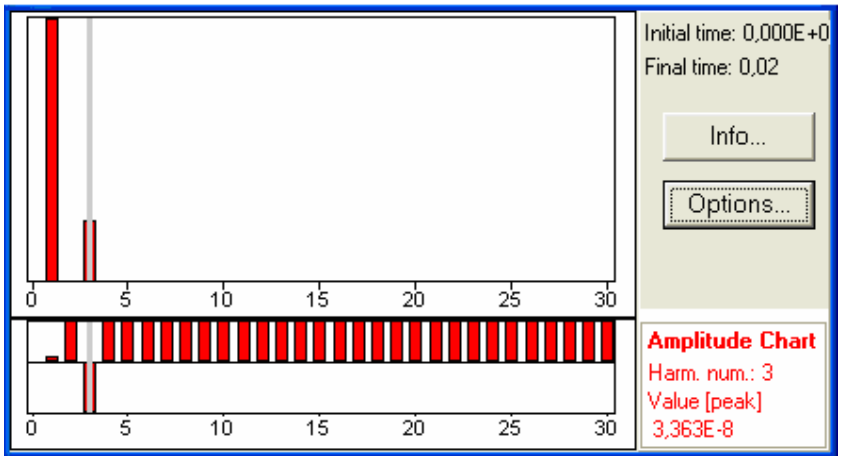
posta podem ser observados na figura 6.13 (b), cujo espectro harmônico esta ilustrado na figura 6.13 (c). Como dito, deste caso, a simulação de uma degradação não uniforme correspondente à somatória das correntes dos quatro blocos equivalentes.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.13 – Degradação não uniforme: a) Circuito utilizado; b) Corrente de fuga e c) Espectrograma da corrente de fuga.

O próximo passo deste estudo consiste na aplicação da metodologia apresentada no item 6.2, com vistas à determinação da parcela da corrente de fuga em fase com a tensão de alimentação, tendo por referência o espectrograma da corrente de fuga devido a uma degradação não uniforme.

6.5 – Simulações de degradações não uniformes

Objetivando ilustrar a aplicação da metodologia desenvolvida, desta vez considerando-se degradações não uniformes, neste item são apresentados três casos simulados, resultantes da associação de blocos representativos com graus distintos de dano por arborescências. No último estudo, Caso C, utiliza-se a representação do clássico modelo "pi", com vistas à representação de cabos apresentando degradação por arborescências.

- **Caso A: Associação de amostras com degradações correspondentes aos blocos representativos "b" e "c", figura 6.10, devido a arborescências.**

A figura 6.14 exibe o diagrama que ilustra a situação enfocada, ou seja, com dois blocos: "b" e "c" representativos de arborescências no material isolante. Assim como nos casos anteriormente mostrados, a tensão de alimentação utilizada neste estudo é de 1000V (50Hz).

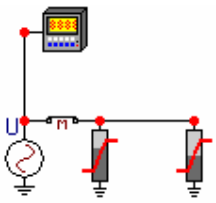


Figura 6.14 – Circuito equivalente para simular degradação não uniforme: "b" e "c".

A figura 6.15 apresenta as formas de onda das correntes de fuga correspondentes a cada um dos blocos utilizados, representativos das diferentes degradações presentes na camada isolante, assim como a corrente de fuga resultante dessas duas contribuições. Neste caso, a corrente resultante ou total, proveniente da soma das parcelas que circulam por cada um dos dois blocos, é a utilizada como referência para a determinação das componentes ativa e reativa da corrente total que flui na isolação. Observa-se, neste caso, que a amostra de cabo cuja corrente apresenta maior distorção harmônica tem amplitude menor do que a amostra cuja corrente apresenta, comparativamente, menor contribuição harmônica. Essa constatação indica que a severidade da degradação deve ser analisada considerando não apenas a quantidade de arborescências, mas também e concomitantemente o comprimento das mesmas.

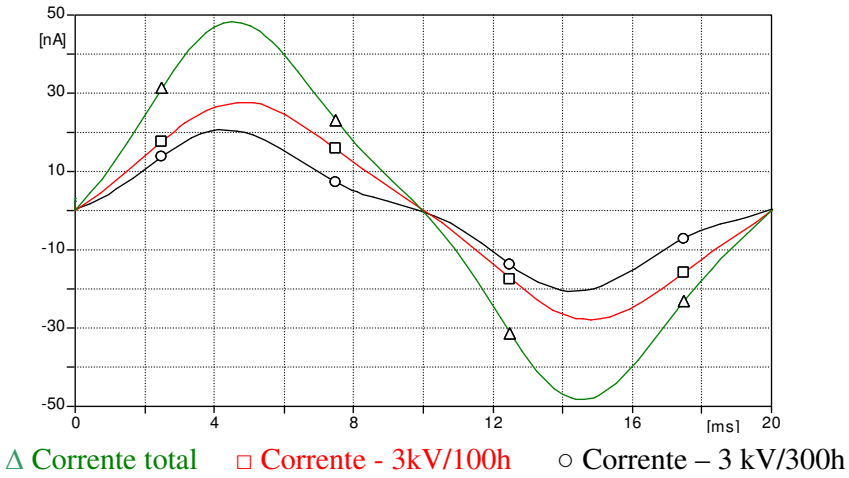


Figura 6.15 – Formas de onda das correntes de fuga – Caso A.

O espectro harmônico da corrente de fuga resultante, mostrada anteriormente, e limitado como já ressaltado anteriormente, à componente fundamental e ao terceiro harmônico, está indicado na figura 6.16. As

informações relativas aos valores dos respectivos módulos e ângulos estão apresentadas na tabela 6.1.

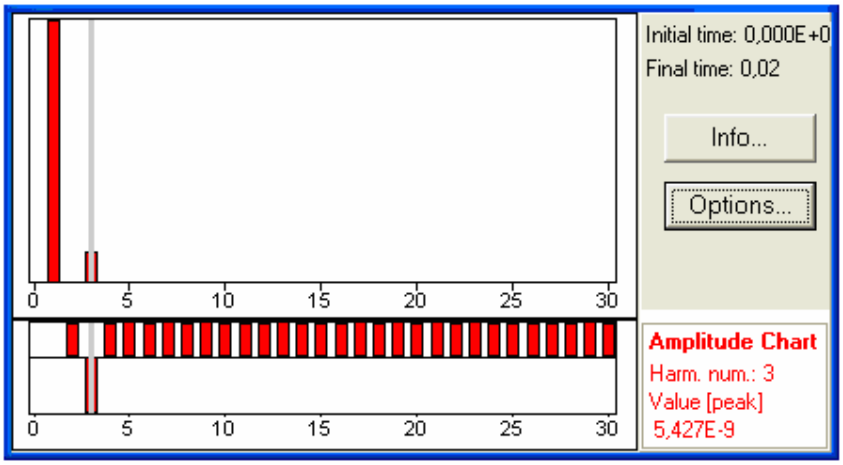


Figura 6.16 – Espectrograma relacionado com a corrente de fuga total da figura 6.15.

Tabela 6.1 – Síntese dos módulos e fases das correntes do Caso A.

Descrição	**Módulo e fase da corrente**		
	Degradação de 3kV/100h	**Degradação de 3kV/300h**	**Degradação Total**
I_1 (nA)	25,65	17,42	43,00
θ_1 (°)	1,5	8,3	4,3
I_3 (nA)	2,19	3,34	5,43
θ_3 (°)	-159,4	-136,7	-145,7

A partir dos módulos e fases obtidos, são determinadas as formas de onda das parcelas ativas da corrente de fuga para cada um dos dois blocos considerados neste caso e que se encontram ilustrados na figura 6.17. Estas correntes, e em particular, a corrente ativa resultante, como estabelecido no estudo em tela, servirá de referência para a validação da metodologia aqui proposta.

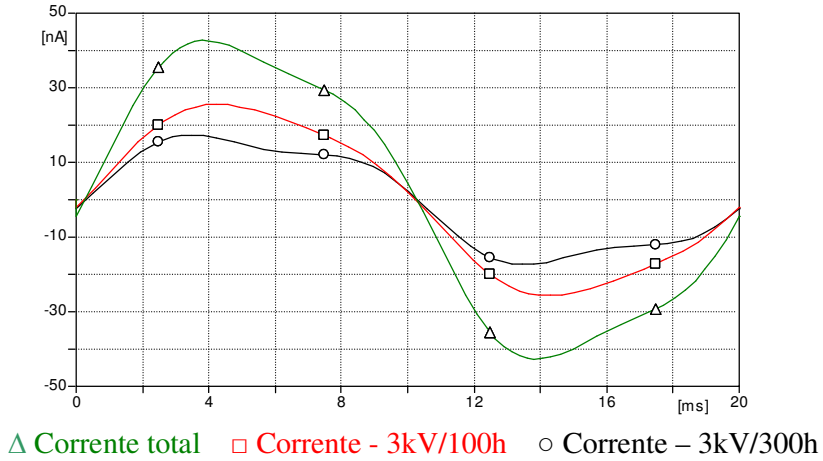
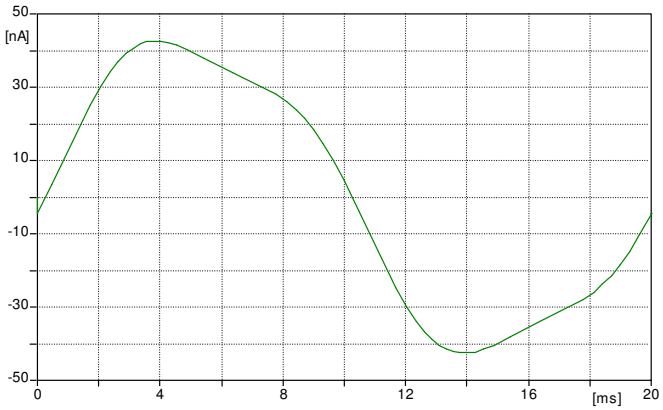
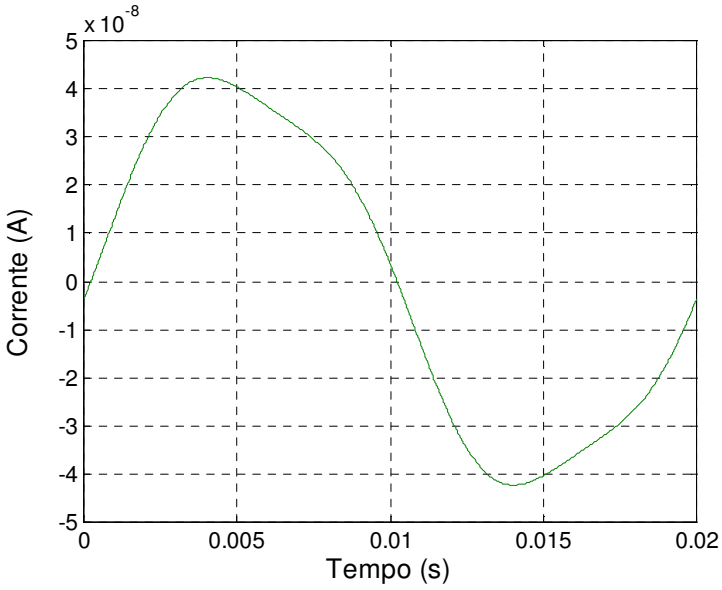


Figura 6.17 – Formas de ondas das correntes ativas – Caso A.

A partir do conhecimento do espectrograma da corrente de fuga total e utilizando o equacionamento (6.1) até (6.8), via simulador MATLAB, é possível identificar com êxito as respectivas correntes de natureza capacitiva e resistiva. Nesse sentido, as figuras 6.18 (a) e 6.18 (b) apresentam as formas de onda da corrente em fase com a tensão, obtidas via software ATP (forma de onda de referência) e via software MATLAB (forma de onda calculada), respectivamente. Nota-se que as formas de onda apresentam uma boa concordância, fato corroborado pelas magnitudes e fases das componentes presentes, apresentadas na tabela 6.2.



(a)



(b)

Figura 6.18 – Formas de ondas da corrente de fuga em fase com a tensão – Caso A: a) Referência; b) Calculado.

Tabela 6.2 – Síntese dos módulos e fases do caso A.

Descrição	**Módulo e fase da corrente**	
	Referência	**Calculado**
I_1 (nA)	42,88	43,00
θ_1 (°)	0,0	0,0
I_3 (nA)	5,43	5,43
θ_3 (°)	-55,68	-55,75

Os indicadores para fins de diagnóstico do estado operacional da isolação estão apresentados na tabela 6.3. Salienta-se que a potência dissipada é calculada por meio do produto da resistência equivalente de isolação vezes o quadrado do valor eficaz verdadeiro da corrente de fuga ativa, que flui na camada isolante, ou seja:

$$P = R_{eq} I_{ef}^2 \tag{6.9}$$

A resistência equivalente, por sua vez, é determinada pela relação entre a tensão de alimentação e o valor de pico da fundamental da corrente ativa

É importante destacar que na análise dos indicadores de estado se faz necessário considerar dois aspectos relativos à degradação, quais sejam: a densidade da degradação e o comprimento da arborescência.

Conforme será visto a seguir, alguns indicadores são mais sensíveis ao comprimento das arborescências, enquanto outros indicam com maior precisão a densidade presente na degradação. Vale lembrar que uma degradação de grande densidade, porém de pequenas arborescências, apresenta menor risco do que uma severa deterioração caracterizada por baixa densidade e longas arborescências, situação essa que acarreta maiores riscos para a camada isolante.

Tabela 6.3 – Indicadores de estado – Caso A.

Amostra	**3kV/100h**	**3kV/300h**	**Total**
DHT_I (%)	8,5	19,4	12,6
P (μw)	12,9	8,9	21,8
I_3/I_1 (%)	8,5	19,4	12,6
θ_3 (°)	-69,3	-46,8	-55,7

Esses resultados confirmam que quanto maior a degradação, o DHT_I cresce com o grau da deterioração. Para a simulação de uma degradação não

uniforme, constata-se que o DHT_I resultante é menor do que aquele correspondente à maior degradação e mais próximo da situação de menor degradação. O indicador θ_3 tende ao zero na medida em que a gravidade da avaria aumenta. Para a degradação não uniforme, esse indicador acusa uma situação menos degradada do que a existente no cabo, porém mais próxima da degradação mais severa. No que se refere a I_3 observa-se uma dispersão na medida em que apresenta menor valor para a situação de menor degradação. Essa dispersão pode ser contornada adotando-se, para fins de análise, a relação entre os módulos do terceiro harmônico e da fundamental, para cada caso analisado. Também para esse indicador, no caso de degradações não uniformes, o mesmo aponta para degradações de menor risco do que a que de fato existe e, neste caso, mais próxima da menor degradação. Quanto a potencia dissipada, trata-se de um indicador que nos casos de degradações uniformes pode apresentar valores menores para degradações mais críticas, comparativamente a situações de menor degradação. Em se tratando da degradação não uniforme apresenta resultado correspondente à somatória das potências devido à contribuição individual de cada arborescência.

- **Caso B: Associação de amostras com degradações correspondentes aos blocos representativos "c" e "d", figura 6.10, devido a arborescências.**

A figura 6.19 mostra o diagrama destinado à simulação de dois blocos representativos de degradação por arborescências, sendo desta vez, os blocos do tipo: "c" e "d". Mais uma vez, a tensão de alimentação utilizada neste estudo é de 1000V (50Hz).

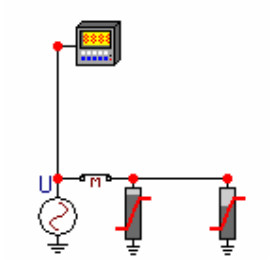


Figura 6.19 – Circuito utilizado para simular degradação não uniforme: "c" e "d".

A figura 6.20 apresenta as formas de onda das correntes de fuga devido a cada um dos blocos presentes, assim como a corrente de fuga resultante dessas duas contribuições. Neste caso, propositadamente, está sendo considerada uma situação na qual se considera a presença de arborescências que provoquem correntes de fuga com valores bastante diferentes, entre si.

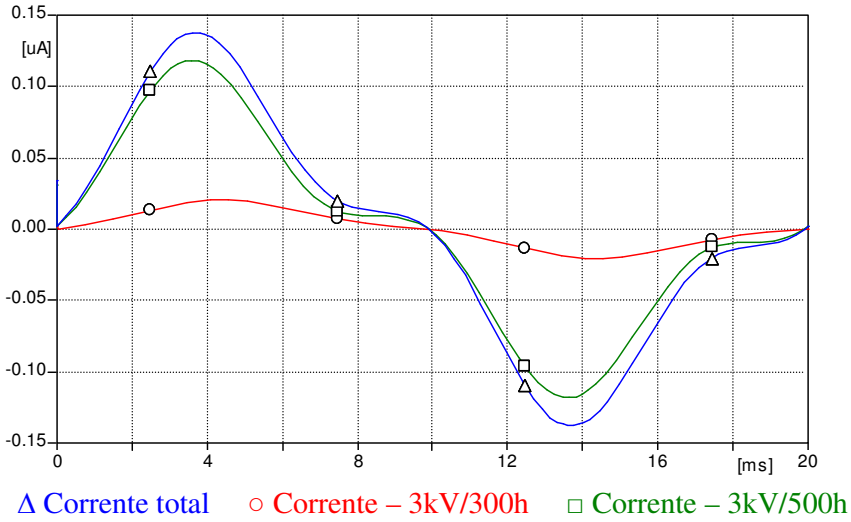


Figura 6.20 – Formas de ondas das correntes de fuga – Caso B.

Adotando o mesmo procedimento anterior, o passo seguinte é, utilizando o programa ATP, determinar o espectro de freqüências da corrente de fuga total, o qual está ilustrado na figura 6.21. Os dados referentes aos respectivos módulos e fases desse espectrograma estão apresentados na tabela 6.4.

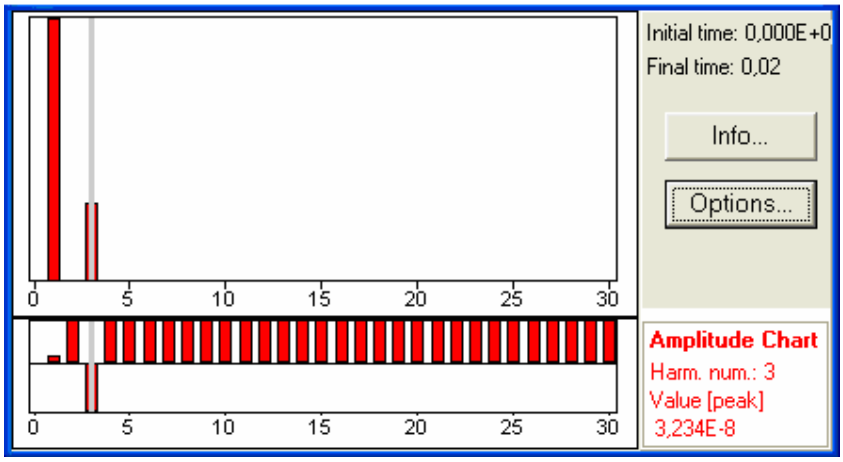


Figura 6.21 – Espectrograma relacionado com a corrente de fuga total da figura 6.20.

Tabela 6.4 – Síntese dos módulos e fases do caso B.

Descrição	Módulo e fase da corrente		
	Degradação de 3kV/300h	**Degradação de 3kV/500h**	**Degradação Total**
I_1 (nA)	17,42	89,06	106,10
θ_1 (°)	8,3	20,6	18,6
I_3 (nA)	3,34	29,58	32,34
θ_3 (°)	-136,7	-100,5	-104,0

Ainda com auxílio do simulador ATP é possível identificar as parcelas da corrente de fuga, em fase com a tensão de alimentação, e que se encontram ilustradas na figura 6.22.

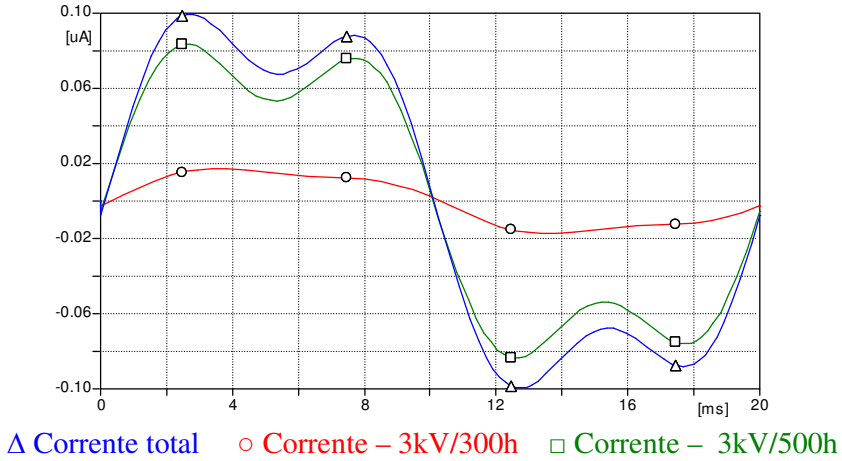
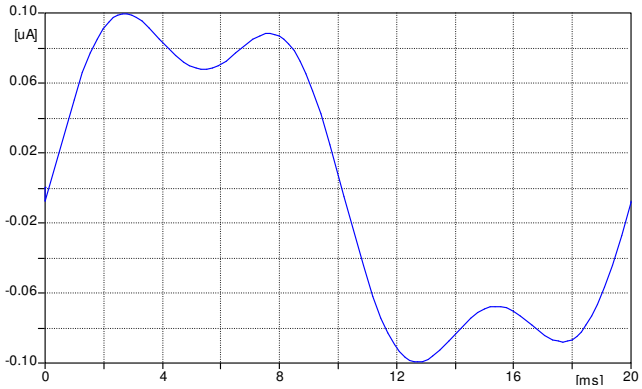
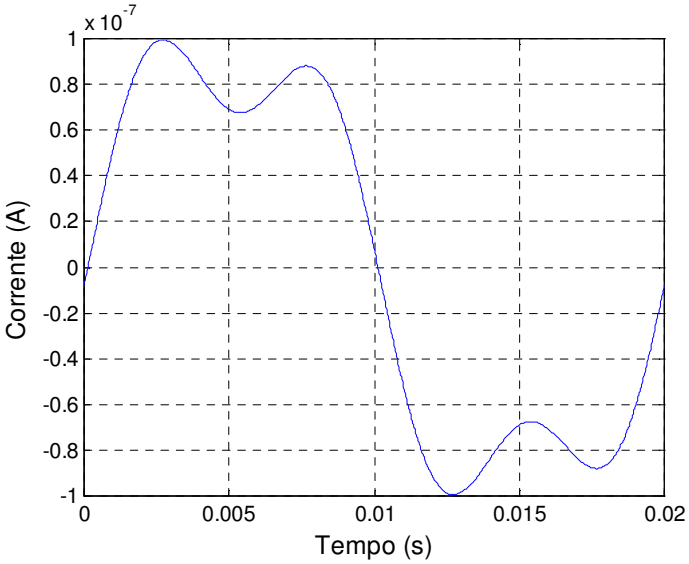


Figura 6.22 – Formas de ondas das correntes ativas – Caso B.

Mais uma vez, tendo por referência as informações relativas aos módulos e as fases do espectro de freqüência da corrente de fuga total e utilizando o procedimento expresso em (6.1) a (6.8), determina-se a corrente de fuga em fase com a tensão. Constata-se, também neste caso, a eficiência da metodologia proposta com vistas à identificação das correntes de fuga ativa e reativa, com base apenas no conhecimento do espectrograma da corrente de fuga total, o que pode ser observado na figura 6.23 e confirmado pelos dados da tabela 6.5.



(a)



(b)

Figura 6.23 – Formas de ondas da corrente de fuga em fase com a tensão – Caso B: a) Referência; b) Calculado.

Tabela 6.5 – Síntese dos módulos e fases do caso B.

Descrição	**Módulo e fase da corrente**	
	Referência	**Calculado**
I_1 (nA)	100,60	100,50
θ_1 (°)	0,0	0,0
I_3 (nA)	32,45	32,34
θ_3 (°)	-14,0	-14,0

A tabela 6.6 apresenta os indicadores para fins de diagnóstico do estado operacional da isolação, para o presente caso.

Tabela 6.6 – Indicadores de estado – Caso B.

Amostra	3kV/300h	3kV/500h	Total
DHT_I (%)	19,4	35,6	32,1
P (μw)	8,9	46,9	55,4
I_3/I_1 (%)	19,4	35,6	32,1
θ_3 (°)	-46,8	-10,5	-14,0

Tais resultados confirmam que quanto maior a degradação, o DHT_I cresce com o grau da deterioração. Para a simulação de uma degradação não uniforme, constata-se que o DHT_I resultante é menor do que aquele correspondente à maior degradação e mais próximo da situação de maior degradação. O indicador θ3 tende a zero na medida em que a gravidade da avaria aumenta. Para a degradação não uniforme, esse indicador acusa uma situação menos degradada do que a existente no cabo, porém mais próxima da degradação mais severa. No que se refere a I_3 observa-se uma tendência de crescimento com o aumento da degradação, comportamento esse acompanhado pela relação entre os módulos do terceiro harmônico e da fundamental, para cada caso analisado. Para a degradação não uniforme, essa relação aponta para uma degradação menor, porém mais próxima à degradação de maior risco. Quanto à potência dissipada, no caso das degradações uniformes aqui analisadas, apresenta valor maior para a situação de maior degradação. Em se tratando da degradação não uniforme apresenta resultado correspondente à somatória das potências devido à contribuição individual de cada arborescência.

O conjunto de informações contidas nas tabelas 6.3 e 6.6 possibilitam as seguintes conclusões em relação aos indicadores de estado:

- O DHT_I cresce com o grau da deterioração. Para casos de degradações não uniformes este indicador diagnosticará uma situação não necessariamente mais próxima da situação mais severa existente na isolação. Esse resultado dependerá das densidades e comprimentos das degradações localizadas ao longo do cabo;

- A potência dissipada P é um indicador de estado que está diretamente associado à densidade da deterioração, podendo, portanto, indicar valores menores para situações mais severas caracterizadas por baixa densidade e longas arborescências, comparativamente a situações de degradações com elevada densidade, porém com pequenas arborescências;

- O módulo I_3 tende a crescer com o aumento da degradação. Trata-se de um indicador de estado que é utilizado, para fins de diagnósticos, na relação I_3/I_1 que tem comportamento semelhante ao DHT_I, considerando apenas a contribuição do terceiro harmônico ou para traçar uma curva de suportabilidade I_3-θ_3 acima da qual o cabo encontra-se em situação de risco;

- O ângulo de fase do terceiro harmônico θ_3 é um indicador de estado que tende a zero com o aumento do grau de deterioração da camada isolante. Para casos onde a degradação se dá de maneira não uniforme, este indicador de estado apresenta um diagnóstico que aponta para uma situação média de degradação, tal valor será sempre mais próximo da degradação de maior severidade, presente na isolação do cabo.

Do exposto, e tendo em vista a complexidade do fenômeno aqui enfocado, mostra-se desejável e necessário proceder à análise conjunta de vários indicadores para possibilitar um diagnóstico mais próximo da realidade.

- **Caso C: Associação de amostras com degradações correspondentes aos blocos representativos "b" e "d", figura 6.10, devido a arborescências.**

No presente caso, o propósito é estabelecer a representação de um cabo degradado por arborescência, utilizando o modelo tradicional "pi" em lugar de apenas amostras do material, como feito nos dois casos anteriores. Salienta-se, contudo, que se trata apenas de um exemplo ilustrativo, na medida em que as degradações aqui consideradas se referem às amostras de cabos utilizadas na etapa de validação do modelo proposto para cabos degradados, não sendo, portanto, referentes aos valores de um cabo propriamente dito.

Nesse sentido, a figura 6.24 mostra o diagrama destinado à representação do cabo degradado por arborescências, utilizando os blocos "b" e "d" e considerando, em cada bloco, uma capacitância shunt de C=10pF representativa do cabo isento de degradação. A tensão de alimentação utilizada neste caso continua sendo de 1000V (50Hz).

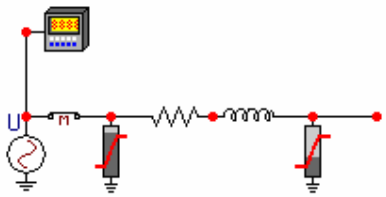


Figura 6.24 – Circuito equivalente de um cabo degradado não uniformemente.

A figura 6.25 apresenta a forma de onda da corrente de fuga total devido às correntes presentes no circuito equivalente, considerando tão-somente a parcela de corrente de fuga devido à degradação. O respectivo espectro de freqüência está ilustrado na figura 6.26.

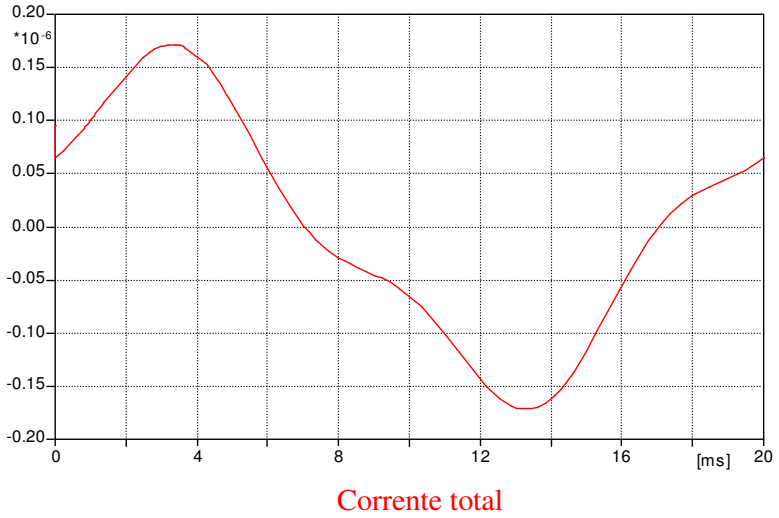


Figura 6.25 – Forma de onda da corrente de fuga total – Caso C.

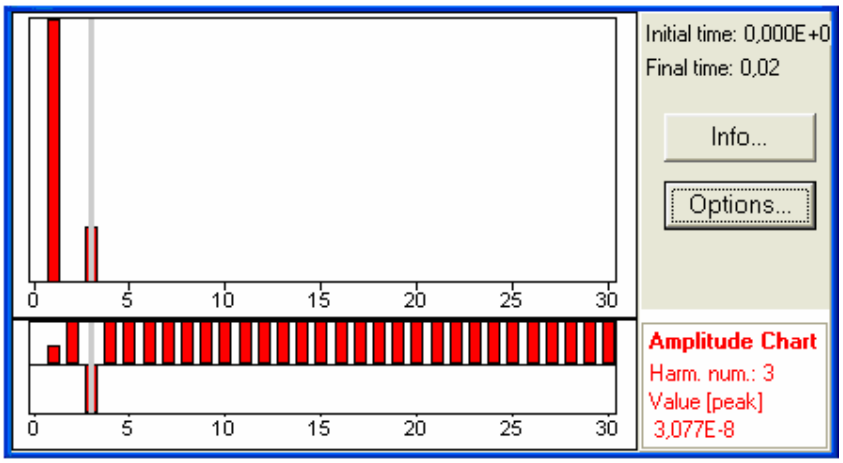


Figura 6.26 – Espectrograma da corrente de fuga total – Caso C.

A tabela 6.7 apresenta os dados referentes aos módulos e fases desse espectrograma, a partir dos quais serão determinadas as parcelas ativas e reativas da corrente de fuga que flui através da isolação, cujas formas de onda estão apresentadas na figura 6.27.

Tabela 6.7 – Síntese dos módulos e fases do Caso C.

Descrição	**Módulo e fase da corrente de fuga total**
I_1 (nA)	144,5
θ_1 (°)	41,1°
I_3 (nA)	30,8
θ_3 (°)	-104,0°

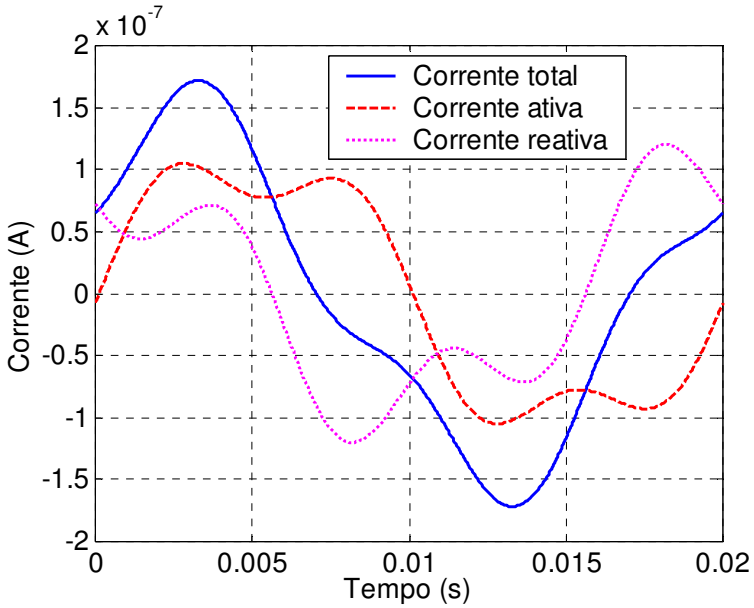


Figura 6.27 – Formas de onda das correntes de fuga – Caso C.

6.6 – Proposta de metodologia para identificar o nível de degradação de cabos isolados submetidos a sinais de alimentação com harmônicos.

Este item tem por objetivo introduzir nos estudos até aqui realizados, uma situação que é comumente encontrada nas redes elétricas. Trata-se da distorção da forma de onda da tensão de alimentação, em decorrência da operação de cargas com características não lineares. Os dispositivos geradores de harmônicos são apresentados em todos os setores industriais, comerciais e domésticos. Eles são cada vez mais numerosos e sua contribuição no consumo de energia cresce sem cessar, sendo, portanto, um motivo de preocupação para o funcionamento dos sistemas elétricos.

Em decorrência das distorções no sinal de alimentação, surgem distorções harmônicas inclusive na corrente de fuga. Com relação a presente pesquisa, o foco das investigações se direciona, justamente, em torno do espectro harmônico da componente ativa da corrente de fuga, pelo fato do mesmo estar associado à degradação devido ao fenômeno de arborescência. Sendo assim, na situação aqui considerada, para evitar diagnósticos imprecisos quanto à integridade física da isolação dos cabos, torna-se necessário identificar, na corrente de fuga, a contribuição harmônica devido à tensão de alimentação distorcida e a contribuição harmônica devido exclusivamente à presença de arborescências na camada isolante.

A seguir serão apresentados dois procedimentos com vistas a superar essa dificuldade. Nessa perspectiva, no primeiro procedimento, considera-se o circuito equivalente apresentado na figura 5.5, referente a um cabo apresentando degradação por arborescência, cujo modelo matemático utilizado para a corrente

de fuga, relativa ao ramo representativo das arborescências presentes na isolação do cabo é dado pela equação (5.3), reapresentada em (6.11).

$$i_{arb}(t) = \frac{1}{R^2}\left[k_{arb}^2 \, v_d^{\,3}(t) - v_d(t)\right] + \frac{v_d(t)}{R_{ad}} \tag{6.11}$$

a) Procedimento 1

Para a determinação dos parâmetros do modelo matemático, a estratégia a ser utilizada compreende as seguintes etapas:

- Identificação das formas de ondas da tensão de alimentação distorcida e da respectiva corrente de fuga;

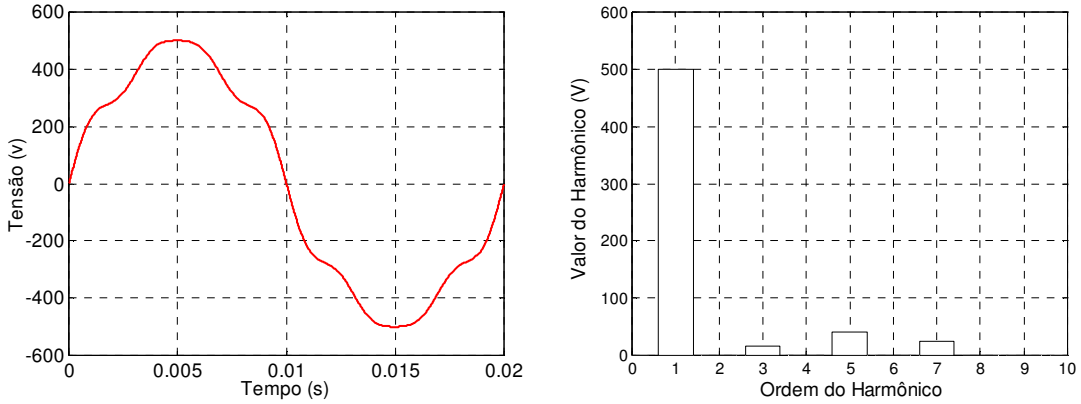
- Determinação do espectro de freqüência e do valor eficaz verdadeiro da corrente de fuga;

- Estabelecimento do valor do parâmetro R pela relação entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente de fuga;

- Utilização de um programa computacional, no ambiente MATLAB, que considera a tensão de alimentação distorcida e varia continuamente os parâmetros k_{arb}, R_{ad} e C_r do modelo matemático, tendo como entradas e referências de buscas iterativas, o valor eficaz verdadeiro da corrente de fuga e o ângulo de fase θ_3 dessa corrente;

- De posse dos valores dos parâmetros R, R_{ad}, k_{arb}, C_r e considerando um sinal de alimentação puramente senoidal é determinada, via simulação computacional, a corrente de fuga, (6.11), contendo apenas a contribuição harmônica devido à degradação por arborescências.

De maneira a simplificar os estudos, nas simulações o cabo foi considerado com elevada deterioração, permitindo, dessa forma, tornar desprezível a reatância capacitiva referente à parte não degradada da isolação. Como ponto de partida foi considerado um cabo com degradação submetido a um sinal de alimentação do tipo indicado na figura 6.28.



(a) (b)

Figura 6.28 – Tensão de Alimentação: a) Forma de onda; b) Espectro de freqüência.

Para a tensão de alimentação apresentada na figura 6.28 a respectiva corrente de fuga que flui na isolação está ilustrada na figura 6.29. O valor do parâmetro R, conforme já mencionado, é calculado pela relação entre a componente fundamental da tensão de alimentação e a componente fundamental da corrente de fuga. Neste caso:

$R = 34{,}12 M\Omega$

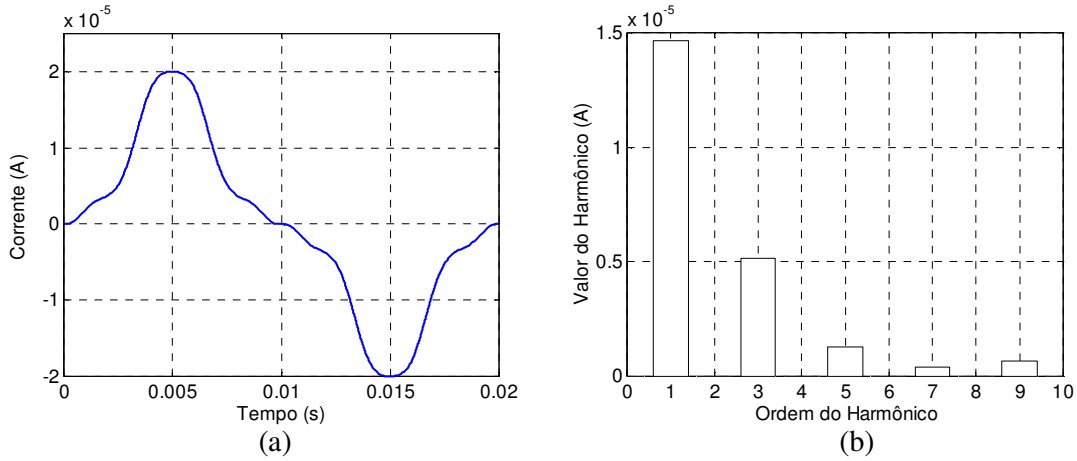


Figura 6.29 – Corrente de fuga: a) Forma de onda; b) Espectro de freqüência considerando a contribuição harmônica da tensão de alimentação e das arborescências.

O valor do parâmetro k_{arb}, por sua vez, será tal que o valor eficaz verdadeiro da corrente obtida iterativamente no ambiente MATLAB, via equação (6.11), corresponda ao valor eficaz verdadeiro da corrente de fuga indicada na figura 6.29. Neste caso:

$k_{arb} = 13{,}7$

Com esses valores de R e de k_{arb}, e considerando uma tensão de alimentação puramente senoidal é possível obter, via equação (6.11), a corrente correspondente à contribuição, na corrente de fuga, da degradação do cabo elétrico, conforme apresentado na figura 6.30. Salienta-se que, por se tratar de um caso com elevada deterioração, não se fez necessário levar em consideração a influência do parâmetro R_{ad}.

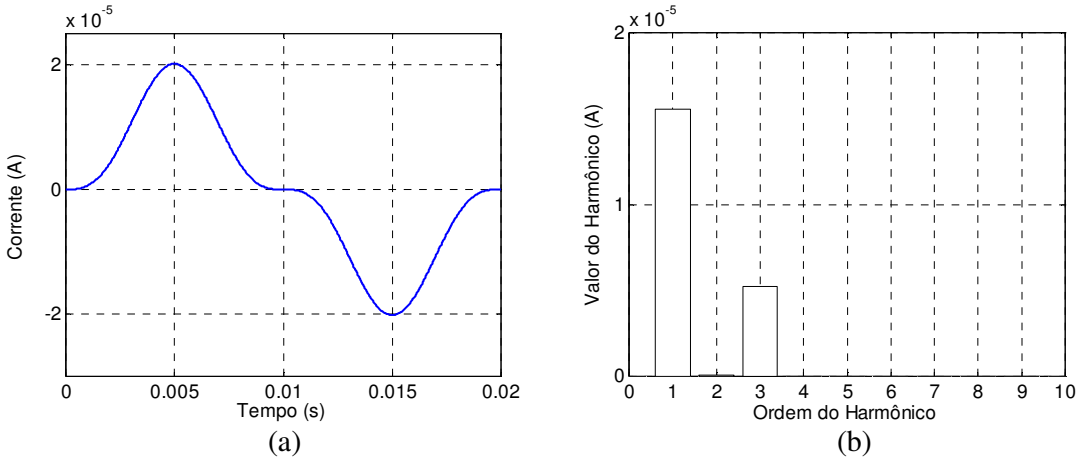


Figura 6.30 – Corrente de fuga: a) Forma de onda; b) Espectro de freqüência considerando exclusivamente a contribuição harmônica devido às arborescências.

Este procedimento possibilita, portanto, determinar o espectro de freqüência da corrente de fuga devido somente à degradação quando o sinal de alimentação apresenta distorção na sua forma de onda. Dessa forma, é possível assegurar diagnósticos a partir de indicadores de estado determinados, considerando-se, tão-somente, a parcela de correntes harmônicas relacionada exclusivamente ao fenômeno de arborescências.

b) Procedimento 2

Outra possibilidade a ser considerada para identificar, na corrente de fuga, a contribuição harmônica devido exclusivamente ao fenômeno de degradação em situações em que o sinal de alimentação é distorcido, tendo por referência o modelo equivalente ilustrado na figura 6.27, está apresentada a seguir:

- Identificação das formas de ondas da tensão de alimentação distorcida e da respectiva corrente de fuga;

- Decomposição da corrente de fuga nas parcelas ativa e reativa;

- Determinação do espectro de freqüência da corrente de fuga: componente ativa e componente reativa;

- Estabelecimento do valor do parâmetro R_{eq} pela relação entre a tensão e a corrente fundamental da corrente fuga ativa;

- Estabelecimento do valor do parâmetro C_{eq} pela relação entre a tensão e a corrente fundamental da corrente fuga reativa;

- Identificação da contribuição harmônica quando da aplicação do sinal distorcido em um circuito R_{eq} em paralelo com C_{eq};

- Subtração das contribuições harmônicas calculadas no item anterior das contribuições harmônicas do sinal original da corrente de fuga.

- Recuperação da corrente de fuga total devido exclusivamente ao fenômeno de arborescência.

6.7 – Validação dos processos propostos através de ensaios laboratoriais

Nesta etapa da tese, com vistas a viabilizar meios para a validação dos procedimentos e processos estabelecidos, são apresentados e discutidos, resultados de trabalhos de medição conduzidos para as correntes de fuga em três amostras de cabos isolados. Estes correspondem a componentes de sistemas

comercialmente empregados em instalações subterrâneas de energia elétrica, na classe de 15kV.

A estratégia empregada, como não poderia ser diferente, consiste em aplicar tensões nos cabos, registrar as correntes de fuga e compará-las com aquelas atreladas com a proposta feita por esta tese.

6.7.1 – Estrutura física utilizada

As medições apresentadas no item a seguir, foram realizadas no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. As formas de onda de tensão são adquiridas com auxílio de um divisor de tensão capacitivo, com tensão nominal de 5 KV, 50/60Hz, e com relação de transformação de 462:1.

Para servir como fonte de tensão a ser aplicada às amostras de cabo, optou-se por utilizar um sistema constituído por um transformador de potência. Neste, tensões variáveis, proporcionadas por um variador de tensão, são aplicadas no lado de baixa tensão, enquanto que o cabo é conectado no lado de alta, conforme esquema apresentado na seqüência através da figura 6.31. O transformador utilizado é de 150KVA, 380/13800V, conexão Y/Δ. A tensão é aplicada entre o condutor e a blindagem, portanto sobre a isolação. A corrente de fuga total é medida com auxílio de um resistor, o qual, para o presente caso foi de 100Ω ±1%.

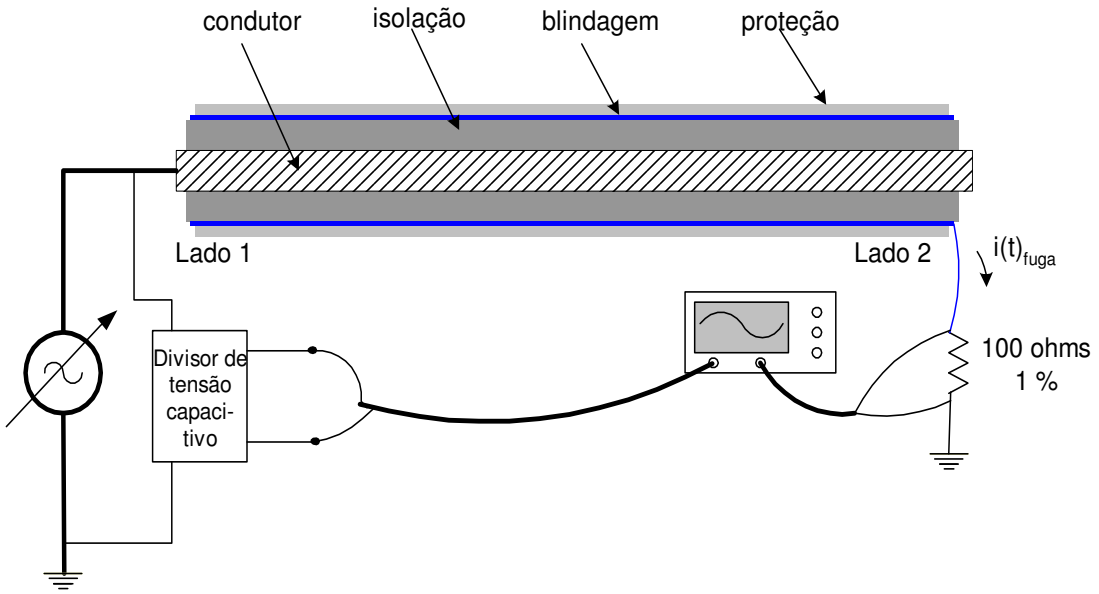


Figura 6.31 – Arranjo experimental utilizado para as medições das correntes de fuga.

Para as aquisições, um ponto do lado de alta tensão do transformador é conectado ao sistema de terra do laboratório, visando fixar a referência de tensão. Por questões de segurança, os equipamentos de medida e aquisição dos sinais de tensão e corrente são portáteis e operam com baterias. A figura 6.32 mostra o esquema utilizado para aplicação de tensão nas amostras de cabo. As figuras 6.33 a 6.35 são fotografias da montagem feita para realização dos ensaios.

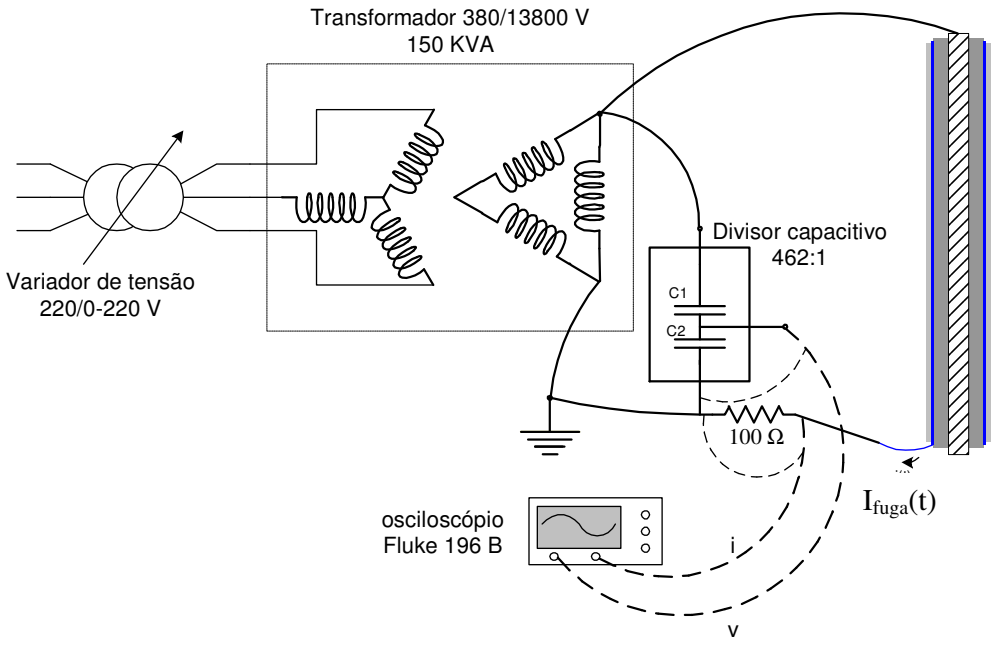


Figura 6.32 – Esquema utilizado para aplicação de tensão nas amostras de cabo para amostragem da corrente de fuga.

Figura 6.33 – Fotografia do arranjo laboratorial utilizado para as medições.

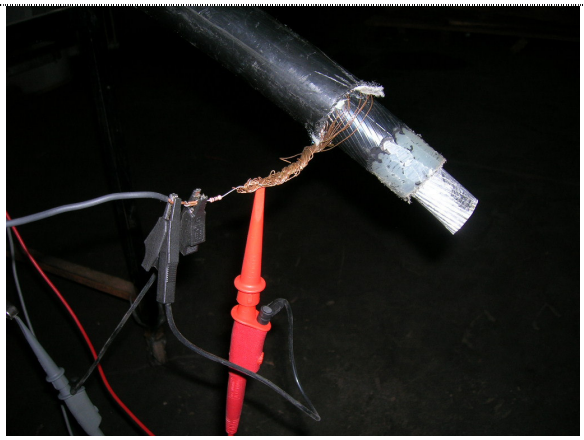


Figura 6.34 – Detalhe da conexão para medida da corrente de fuga.

Figura 6.35 – Detalhe de uma medição de corrente de fuga e tensão aplicada.

6.7.2 - Caracterização das amostras de cabo utilizadas

Foram realizadas medições em três amostras de cabos isolados de classe de tensão 8,7/15kV, com isolação XLPE. As amostras são de mesma bitola (1x95 mm^2) e de diferentes comprimentos, conforme se vê na tabela 6.8. Para todas as situações foi aplicado um nível de tensão de 8kV, correspondente à tensão nominal a que a isolação fica sujeita, quando os cabos operam com tensão nominal de 13.800V entre linhas.

Tabela 6.8 - Características das amostras de cabo utilizadas nos ensaios.

Amostra	Bitola (mm^2)	Comprimento (m)
A	1x95	1,27
B	1x95	1,20
C	1x95	1,12

Não obstante a similaridade física entre as amostras testadas ressalta-se que, as mesmas, foram fornecidas sem quaisquer informações que permitissem identificar: tempo de uso, condições operacionais, ambiente físico de instalação

e outros aspectos que conduzissem ao prévio reconhecimento de seu estado operacional.

6.7.3 - Resultados obtidos

Apresenta-se a seguir as formas de onda resultantes dos ensaios realizados. Em cada figura o primeiro conjunto de formas de onda corresponde à corrente de fuga e à tensão aplicada. Em seguida é apresentada a forma de onda da corrente e o seu respectivo espectro harmônico, e na seqüência, a forma de onda da tensão com o respectivo espectro harmônico.

Medição 01

- Referência: Amostra A
- Bitola do cabo: 1x95mm^2
- Comprimento da amostra: 1,27m
- Tensão aplicada: 8kV

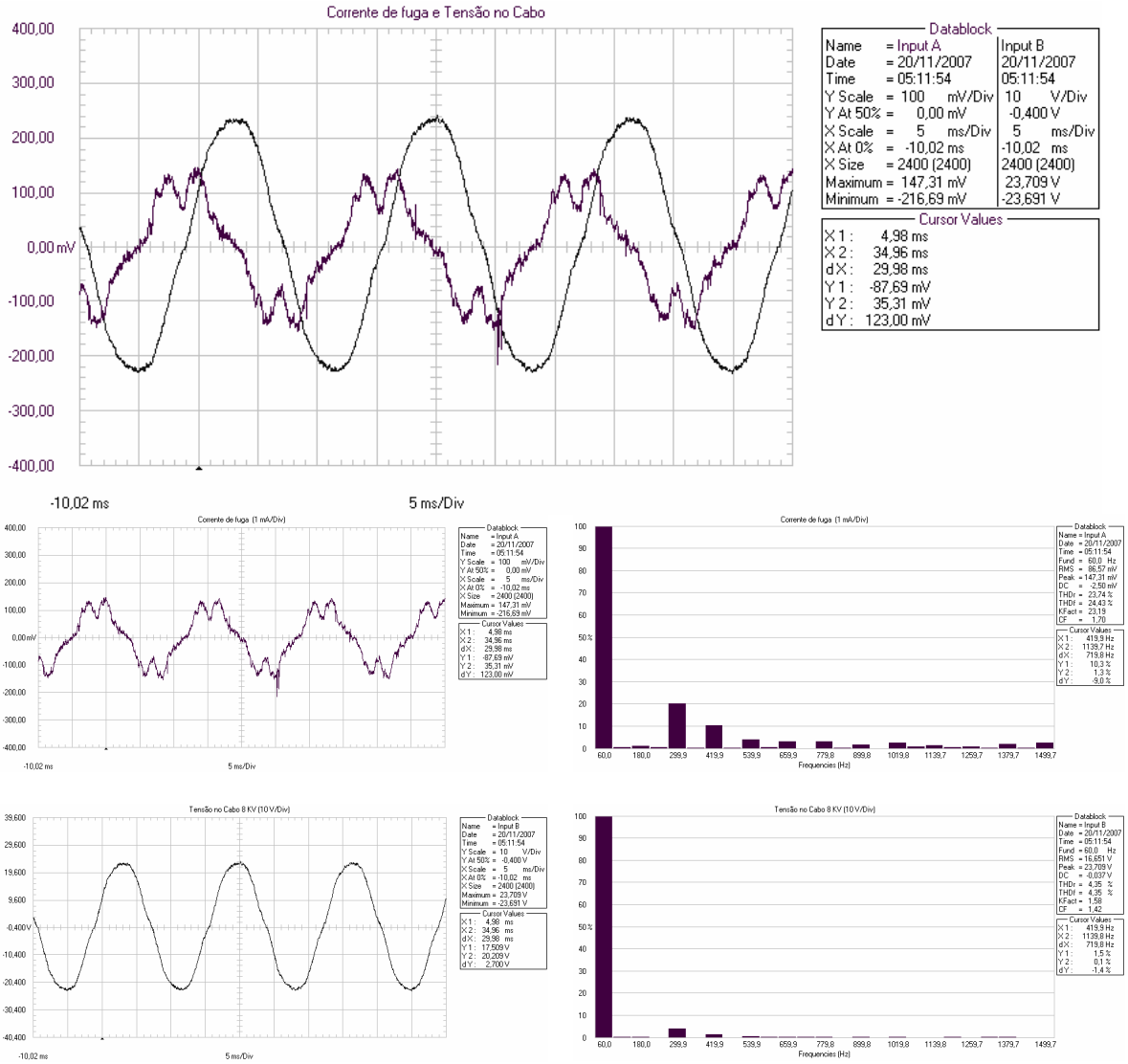


Figura 6.36 – Corrente de fuga e respectivo conteúdo harmônico - Amostra A – Tensão aplicada de 8kV.

Medição 02

- Referência: Amostra B
- Bitola do cabo: 1x95mm^2
- Comprimento da amostra: 1,20m
- Tensão aplicada: 8kV

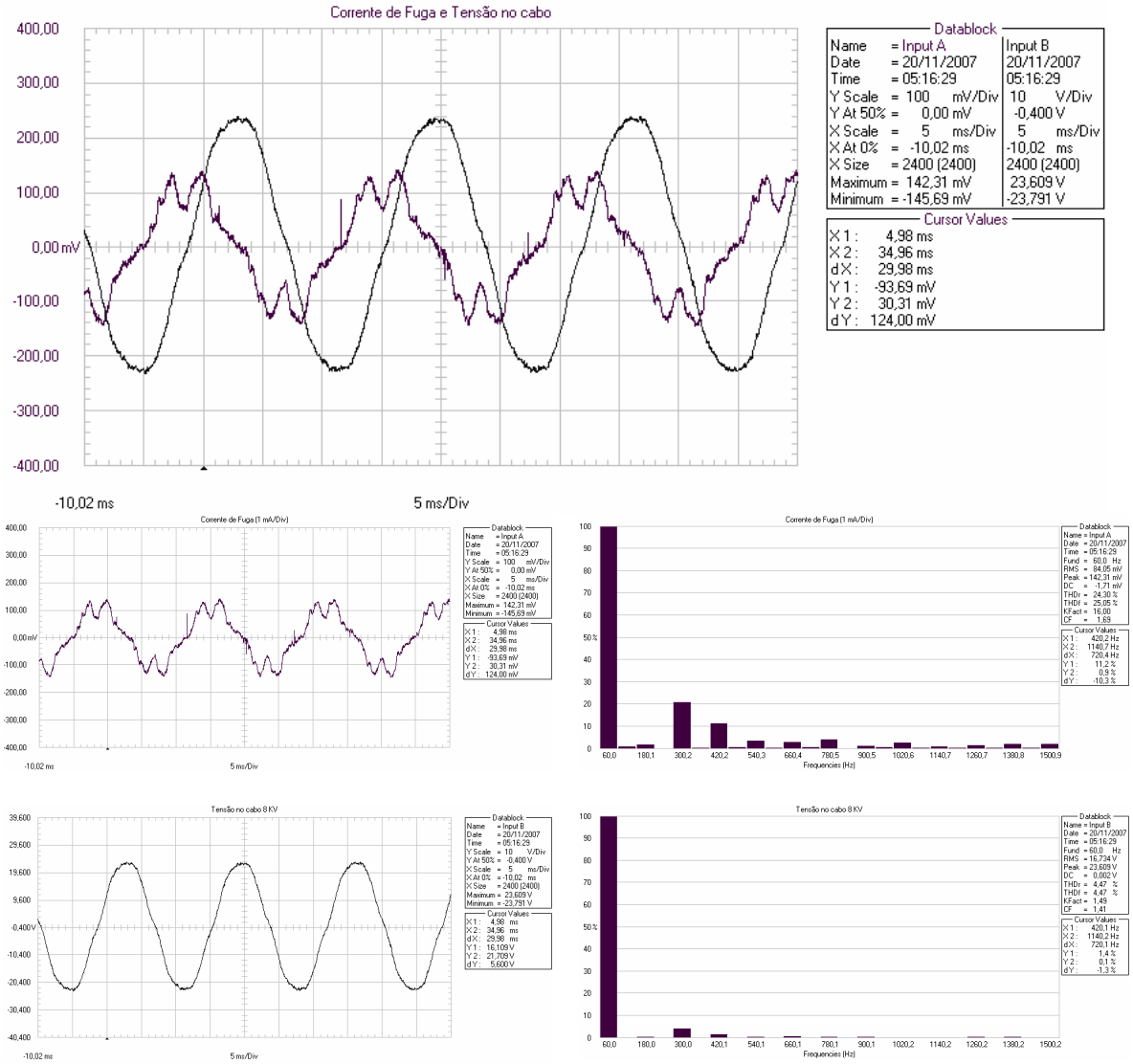


Figura 6.37 – Corrente de fuga e respectivo conteúdo harmônico - Amostra B – Tensão aplicada de 8kV.

Medição 3

- Referência: Amostra C
- Bitola do cabo: 1x95mm^2
- Comprimento da amostra: 1,00m
- Tensão aplicada: 8kV

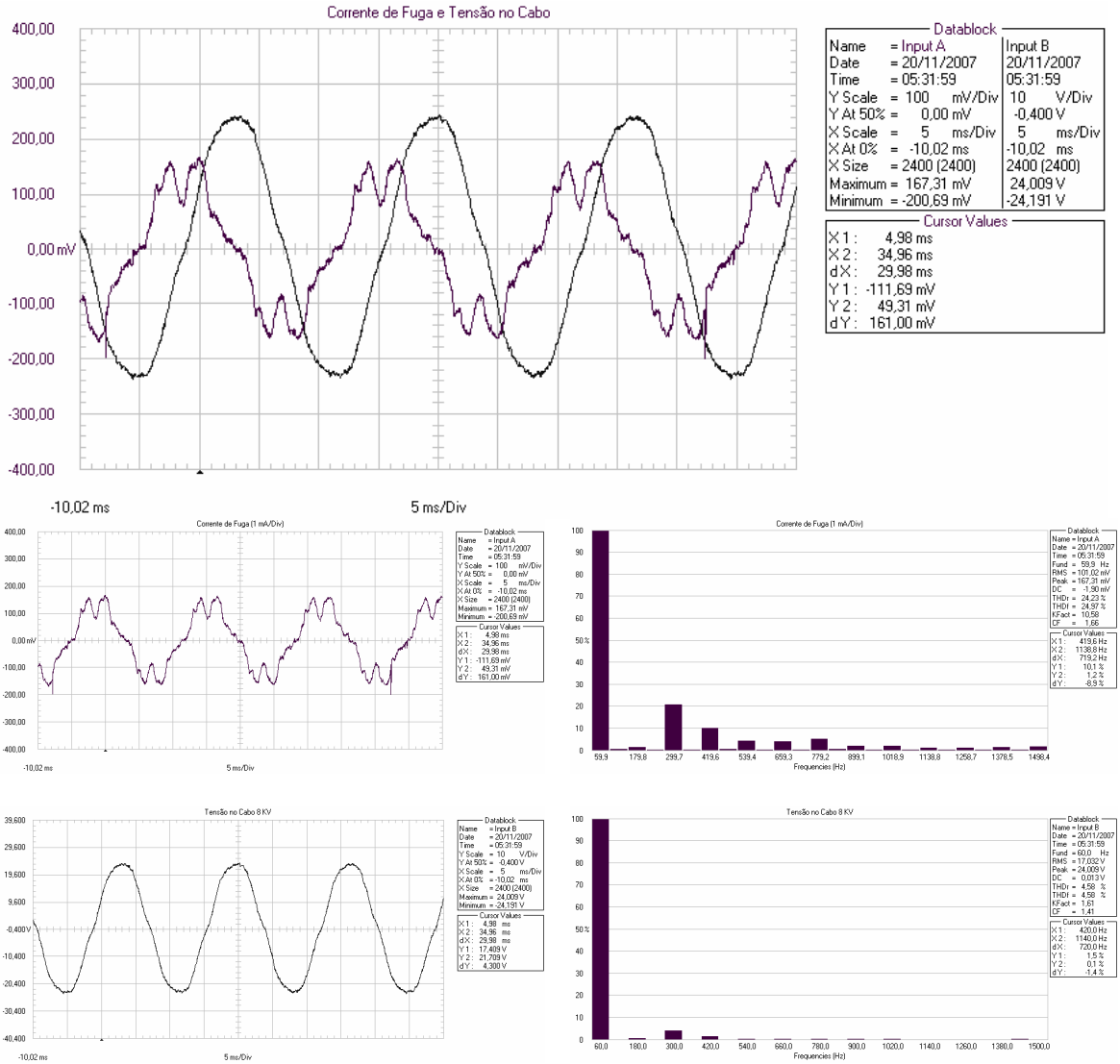


Figura 6.38 – Corrente de fuga e respectivo conteúdo harmônico - Amostra C – Tensão aplicada de 8kV.

6.7.4 - Avaliação dos resultados das medições

As seguintes observações podem ser feitas acerca dos resultados apresentados nas medições:

- Todas as medições indicam forte conteúdo harmônico entre o 5º e o 13º harmônico, com forte predominância do 5º e 7º harmônicos, devido, sobretudo, à contribuição harmônica presente na fonte de suprimento;

- Quando da obtenção das amostras não foram fornecidos elementos adicionais que permitissem afirmar se as amostras se encontravam com algum problema associado com degradação física. Não obstante a isso, os resultados revelaram similaridades bastante acentuadas entre os cabos analisados, fato este que permite concluir que todas as amostras se encontram em situações semelhantes no que se refere às condições operacionais da isolação.

6.7.5 - Indicadores de desempenho do estado operacional para as amostras de cabos

De posse das medições realizadas e tendo em vista a necessidade de se avaliar o desempenho da metodologia proposta neste estudo, este item tem por finalidade realizar o diagnóstico do nível de degradação dessas amostras, a partir da determinação dos indicadores de estado. Nesse sentido, foram escolhidas amostras de cabos com a mesma seção transversal para o condutor elétrico e comprimentos semelhantes. Essa similaridade entre as características proporciona meios para uma comparação consistente dos resultados.

- **Resultados para a amostra A**

A figura 6.39 apresenta as formas de onda da corrente de fuga total e as respectivas componentes ortogonais: ativa e reativa, obtidas da experimentação com a amostra A. Salienta-se que apenas a componente fundamental e o terceiro harmônico são considerados. Observa-se que a corrente total apresenta-se com característica predominantemente capacitiva, fato este indicativo que se trata de uma amostra de cabo cuja camada isolante está com muito baixo nível de degradação.

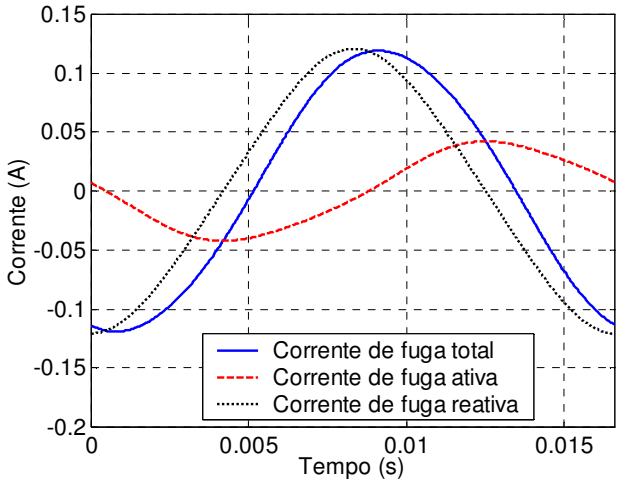
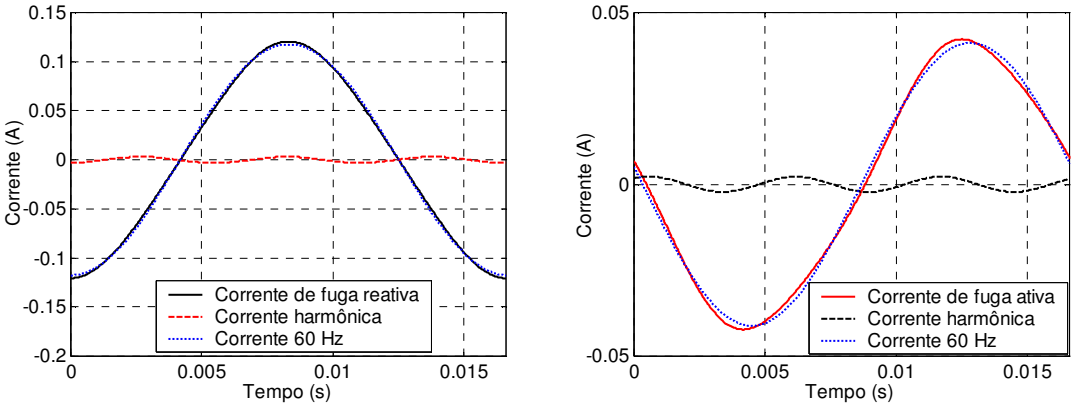


Figura 6.39 – Formas de onda das correntes de fuga da amostra A.

A figura 6.40 ilustra as formas de onda das componentes das correntes de fuga ativa e reativa, respectivamente, assim como a decomposição em séries de Fourier de cada uma dessas correntes. O comportamento destas correntes ratifica a constatação de que se trata de uma amostra de cabo em bom estado operacional. Como justificativa para tal argumenta-se, novamente, que a corrente capacitiva possui pouca contribuição harmônica, e ainda, que a componente ativa se mostra praticamente senoidal.



(a) (b)

Figura 6.40 – Forma de onda da corrente de fuga e: a) componente reativa; b) componente ativa.

- **Resultados para a amostra B**

A figura 6.41 ilustra as formas de onda da corrente de fuga para a amostra B. Assim como para o caso anterior, mais uma vez se observa a natureza dominantemente capacitiva da corrente total. Este fato, como já dito, é um forte indício que se trata de amostra de cabo apresentando boas condições operacionais no que diz respeito à camada isolante.

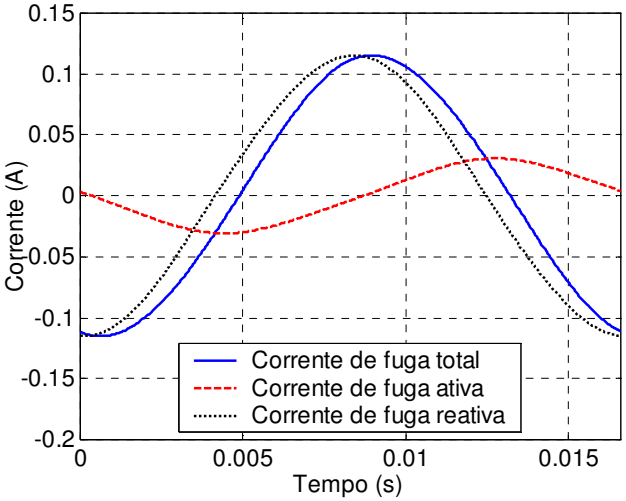
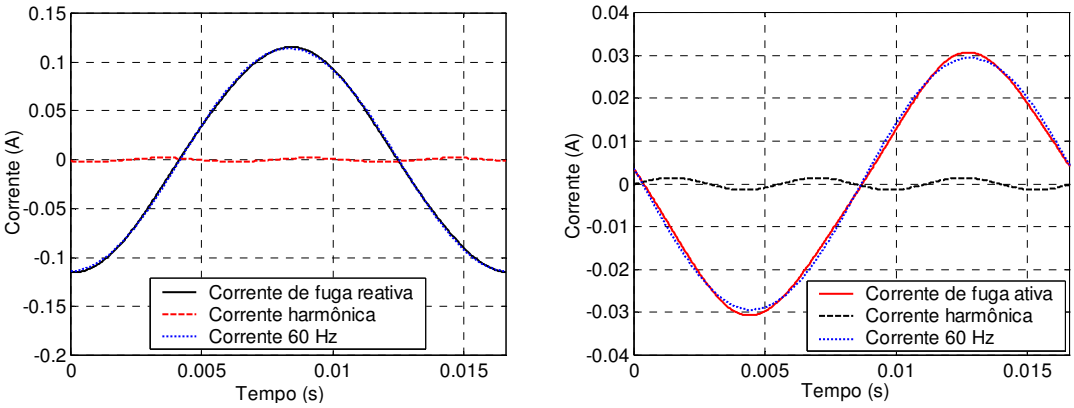


Figura 6.41 – Formas de onda das correntes de fuga da amostra B.

A figura 6.42 exibe as formas de onda das correntes ativa e reativa presentes na camada isolante, assim como a respectiva decomposição em séries de Fourier. Constata-se, pela análise visual das formas de onda, que esta amostra evidencia um melhor estado de conservação do que a amostra A. Essa afirmativa encontra sustentação no fato de apresentar uma menor distorção harmônica para a corrente capacitiva. Outro motivo para tal afirmativa está no fato de que a componente ativa da corrente de fuga, neste caso, mostra-se, comparativamente ao caso anterior, mais próxima da forma senoidal. Além disso, a componente de corrente ativa da amostra B apresenta menor amplitude do que a da amostra A.



(a) (b)

Figura 6.42 – Forma de onda da corrente de fuga e: a) componente reativa; b) componente ativa.

- **Resultados para a amostra C**

Prosseguindo com a metodologia adotada, a figura 6.43 apresenta as formas de onda total, ativa e reativa da corrente de fuga obtidas dos ensaios realizados com a amostra C. Mais uma vez, constata-se a natureza predominantemente capacitiva da corrente total, indicando que se trata, novamente, de uma amostra com boas condições operacionais.

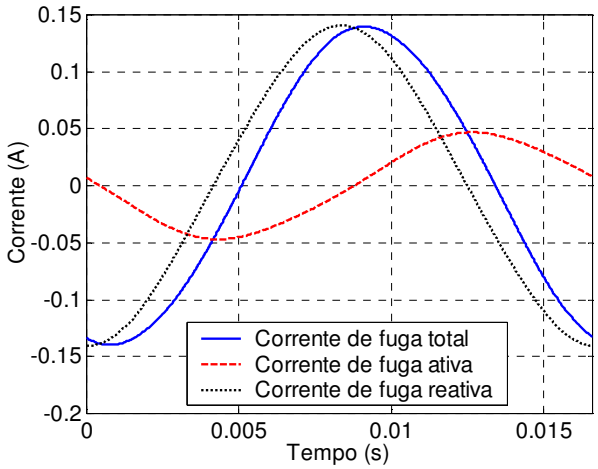
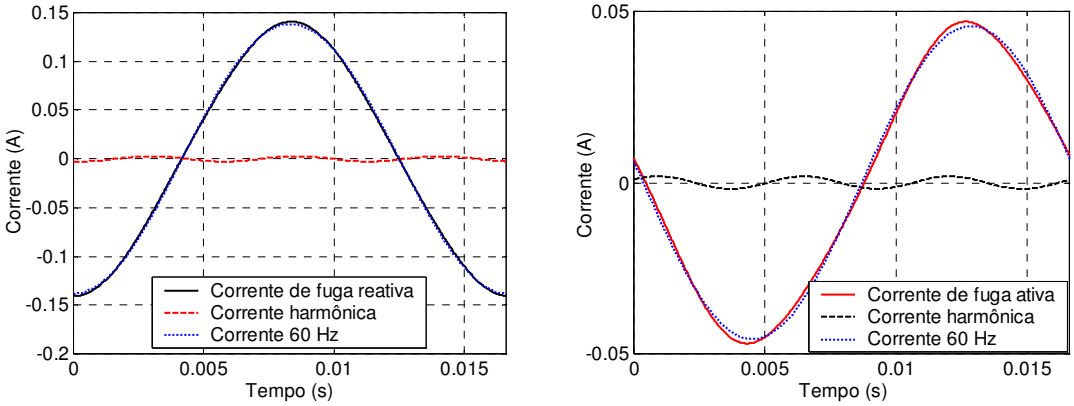


Figura 6.43 - Formas de onda das correntes de fuga da amostra C.

A figura 6.44 ilustra as componentes ortogonais da corrente de fuga que fluem através da isolação. A análise dessas componentes de corrente de fuga, ativa e reativa, permite concluir que esta amostra evidencia um nível de degradação superior às situações anteriores. Esta afirmação se deve ao fato de que a contribuição de corrente ativa, neste caso, apresenta-se com amplitude maior que a anterior.



(a) (b)

Figura 6.44 – Forma de onda da corrente de fuga e: a) componente reativa; b) componente ativa.

6.7.6 - Síntese e análise dos indicadores

A tabela 6.9 apresenta, de forma consolidada, os resultados obtidos para os distintos indicadores de estado utilizados para diagnosticar o estado físico dos três cabos contemplados anteriormente. Na determinação dos indicadores de estado foram considerados a componente fundamental e o terceiro harmônico. Do ponto de vista prático, as três amostras apresentaram condições operacionais equivalentes, todavia, optou-se por analisar os resultados dos indicadores, com vistas a identificar, comparativamente, os níveis de degradação de cada amostra. Vale ressaltar, que a contribuição harmônica de ordem 3, da tensão de suprimento, em todos os casos, apresenta-se com valores inferiores a 0,5 % da fundamental, sendo, portanto, desprezível. Destaca-se que o indicador de estado θ_3 foi calculado considerando-se o ângulo de fase da componente fundamental da tensão de alimentação igual a zero.

Tabela 6.9 - Indicadores de estado.

Indicadores de Estado	**Amostra A**	**Amostra B**	**Amostra C**
tgδ	0,35	0,26	0,33
DHT (%)	5,44	4,79	4,13
P (w)	165,06	117,79	182,96
I_3 (mA)	2,21	1,38	1,85
θ_3 (°)	-98,92	-162,88	-123,86

As formas de onda e os valores determinados para os indicadores de estado são sinalizadores de que se trata de amostras em boas condições de operação, ou seja, não apresentam níveis de degradação comprometedores. Também, constata-se que os indicadores de estado (à exceção da potência

dissipada para as amostra A e C, e da distorção harmônica total para as amostras B e C), indicam que a amostra A, embora sem aparentes fatores graves e comprometedores, é a mais fraca. O cabo C é, na seqüência, o melhor, e finalmente, a amostra B revela as melhores condições operativas. Nesse sentido, é possível concluir que, possivelmente, a amostra C apresenta uma densidade de pequenas arborescências maior do que as demais amostras. Isso justifica a potência dissipada superior à da amostra A, assim como explica uma DHT_I menor do que a da amostra B, isso porque, a existência de uma grande densidade de pequenas arborescências, além de assegurar maior dissipação pode diminuir a contribuição não linear de uma pequena densidade de longas arborescências.

Os resultados alcançados e relatados evidenciam que a metodologia desenvolvida se mostrou, nesses casos, consistente aos propósitos desejados, qual seja ao diagnóstico do estado operacional de cabos isolados. Está conclusão deriva da coerência apresentada pelos resultados obtidos, tanto quando da análise dos indicadores de forma individualizada, quanto da análise conjunta, considerando-se a correlação de tais parâmetros. Todavia, esses resultados não podem ainda ser considerados como definitivos, no que se refere à validade da metodologia proposta, devendo, essa metodologia, ser objeto de análises outras, tendo por referência formas de onda de correntes de fuga, obtidas em laboratório, a partir de amostras de cabos apresentando níveis acentuados de degradação.

Salienta-se, também, que na sua essência, os estudos não objetivam a comparação de um cabo em relação a outro, mas sim do estabelecimento de termos relativos em relação às características operacionais apresentadas por um determinado cabo em relação a uma amostra correspondente isenta de degradação.

6.8 – Proposta de metodologia para diagnóstico de cabos isolados

Objetivando uma visualização do método de análise desejado, a figura 6.45 expressa, por meio do gráfico, para cada indicador, regiões distintas que caracterizam o estado do isolamento presente num dado cabo. Na região A o cabo está isento de sinais de deterioração, ou seja, a isolação encontra-se em condições operacionais plenas. Na região B o material isolante apresenta sinais de degradação, indicando que o referido dispositivo necessita de um acompanhamento mais próximo, sendo que o limite superior dessa região é o valor máximo de cada indicador. Na região C o cabo encontra-se com a vida útil comprometida devendo ser vistoriado e eventualmente substituído.

A análise dos resultados deve contemplar, pela correlação entre os valores identificados para cada indicador, informações relativas tanto à densidade da degradação, caracterizada pela quantidade de arborescências, quanto ao comprimento das arborescências presentes na isolação. Com base nessa leitura conjunta de informações acredita-se ser possível estabelecer, com maior segurança, o grau de severidade a que estiver submetida a camada isolante, do cabo analisado.

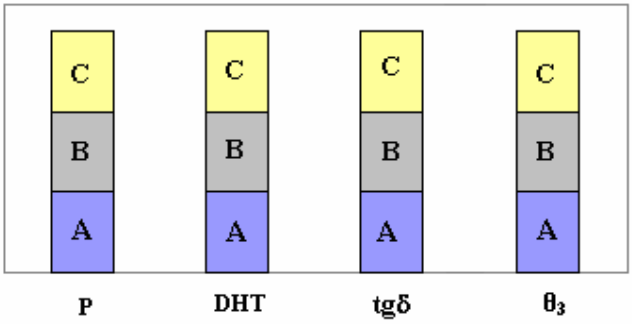


Figura 6.45 - Avaliação do isolamento por indicador e classe.

A princípio a expectativa é de que os valores das faixas, para cada indicador, possam ser estabelecidos com base no valor máximo admissível pelo fabricante para o fator de perdas dielétricas, valor esse disponível no catálogo dos fabricantes. Ou seja, o propósito é correlacionar tanto a potência quanto a distorção harmônica total com o $tg\delta_{max}$, utilizando os parâmetros, assim como a tensão e corrente nominais do cabo elétrico. No que tange ao ângulo de fase do terceiro harmônico, tendo em vista o desconhecimento de padrões utilizados até o momento para este indicador de estado, a estratégia é estabelecer os limites com base nos valores identificados nas formas de ondas experimentais utilizadas neste estudo.

6.8.1 – Limite máximo para o fator de perdas dielétricas (tgδ):

O limite máximo para o fator de perdas dielétricas (tgδ) pode ser encontrado no catálogo do fabricante e varia em função da classe do sistema elétrico de potência;

6.8.2 – Limite máximo para a potência dissipada (P):

Neste caso, o limite máximo pode ser obtido por meio da equação (3.5) utilizando-se o máximo valor permissível para o fator de perdas dielétricas, conforme (4.9).

$$P_{\max} = \frac{V_1^2 * tg\delta_{\max}}{X_c} \tag{6.12}$$

6.8.3 – Limite máximo para a distorção harmônica total (DHT_I):

Para a identificação do limite máximo para a Distorção Harmônica Total (DHT_I), considera-se que a máxima potência dissipada pode ser dada por:

$$P_{\max} = V_{ef} . I_{ef} . \cos\left(90° - \delta_{\max}\right) \tag{6.13}$$

Assim, é possível determinar a corrente eficaz:

$$I_{ef} = \frac{P_{\max}}{V_{ef} \cos\left(90° - \delta_{\max}\right)} \tag{6.14}$$

Onde, a máxima potência dissipada é obtida pela equação (6.12) e a tensão eficaz, por sua vez, é obtida via tensão máxima de alimentação, ou seja:

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \tag{6.15}$$

Considerando

$$I_{1ef} = \frac{V_{ef}}{X_c} \tag{6.16}$$

Substituindo (6.14) e (6.16) em (6.17) tem-se a DHT_I presente na corrente de fuga, correspondente à máxima potência dissipada permissível, na forma que segue:

$$DHT_{I_{\max}} = \left[\left(\frac{I_{ef}}{I_{1ef}}\right)^2 - 1\right]^{1/2} \tag{6.17}$$

6.8.4 – Limite máximo para o ângulo de fase (θ3):

O limite máximo para este indicador será, conforme mencionado anteriormente, adotado em função dos resultados identificados neste estudo, particularmente nos valores apresentados na figura 5.4, referentes a amostras de cabos apresentando diferentes níveis de degradação. A priori, considerar-se-ão os ângulos de 60 ° e de 30 ° como limites para as regiões A e B, respectivamente. Nessa perspectiva, quando o ângulo de fase do terceiro harmônico for inferior a 30° significa que o cabo encontra-se em condição de risco.

Ressalta-se, contudo, que esse conjunto de limites deve servir, tão-somente, de referência inicial. A validação dos mesmos fica condicionada a estudos específicos a serem realizados, futuramente, em outros trabalhos a serem desenvolvidos nesta área de conhecimento.

6.8.5 – Metodologia para determinação dos indicadores de estado:

A figura 6.46 apresenta um fluxograma destacando os principais passos da metodologia proposta para a realização do diagnóstico das condições operacionais de cabos de energia. Salienta-se que neste procedimento, optou-se por adotar a modelagem que permite identificar os indicadores de estado a partir, tão-somente, das formas de onda da tensão de suprimento e da corrente de fuga total que flui na camada isolante, sem a necessidade de adoção de modelo matemático específico para a reprodução da corrente de fuga medida.

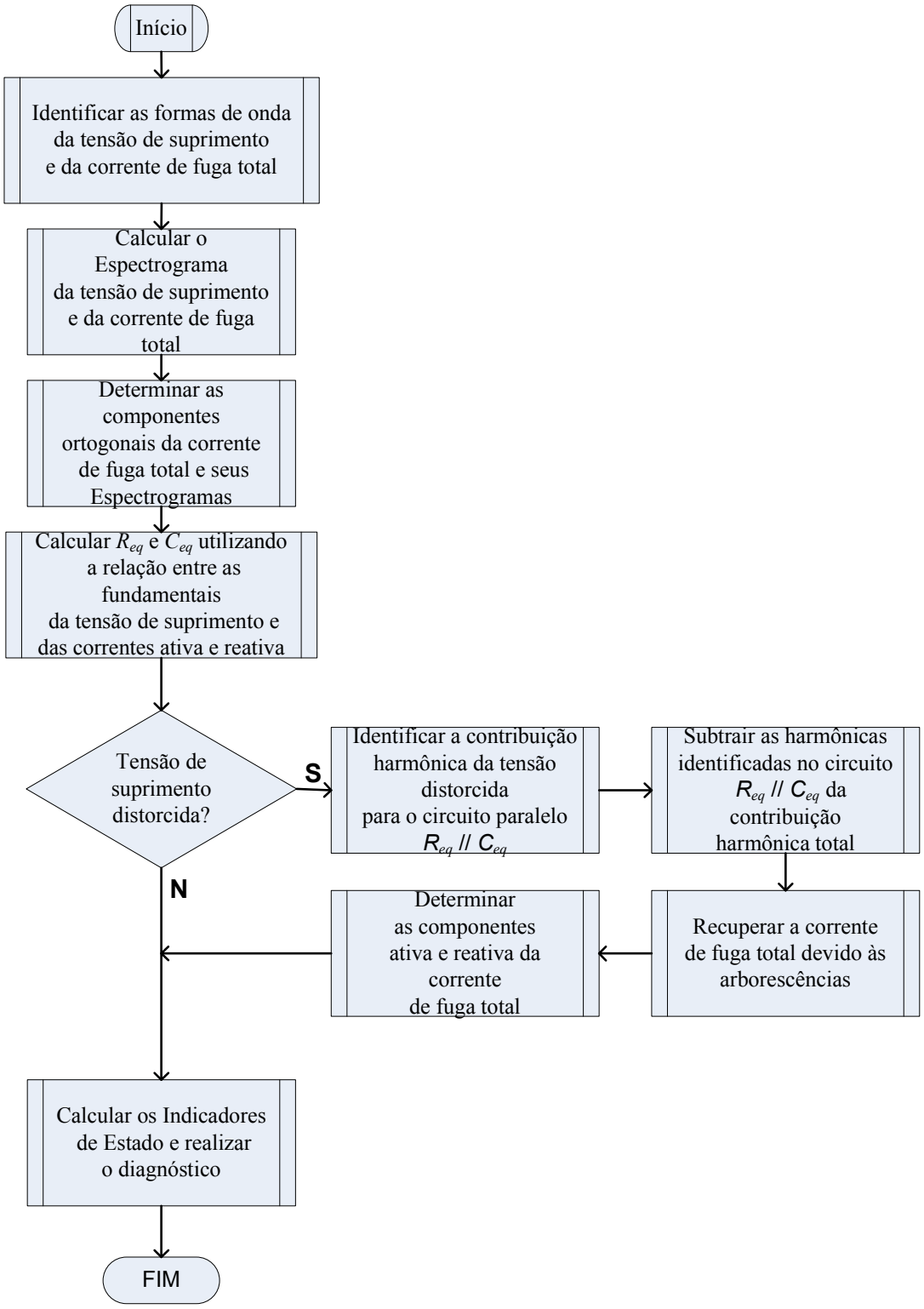


Figura 6.46 – Metodologia para determinação dos indicadores de estado.

6.9 – Considerações finais

O presente capítulo foi iniciado pelo desenvolvimento de um procedimento matemático específico, envolvendo o defasamento, de forma adequada, da contribuição harmônica presente na corrente de fuga total de modo a identificar, por meio desse procedimento matemático as componentes ortogonais: ativa e reativa da corrente de fuga. A consistência dessa metodologia tomou por referência as formas de ondas das correntes de fuga utilizadas no capítulo V, para fins de validação do modelo proposto para representação de cabos isolados, submetidos à ação das arborescências.

Com o objetivo de analisar a validade dessa metodologia para degradações não uniformes, com vistas a representar o que de fato ocorre ao longo de cabos degradados, em casos reais foi desenvolvido no ambiente MODEL do software ATP blocos específicos representativos das degradações uniformes obtidas em laboratório. A combinação desses blocos foi utilizada para simular degradações não uniformes. Também para esses casos a metodologia desenvolvida se mostrou eficiente, podendo ser utilizada tanto para degradações uniformes quanto para degradações não uniformes.

Tendo por base as simulações de degradações não uniformes foram determinados diversos indicadores de estado para identificar o comportamento de cada um deles diante de níveis distintos de degradação. Esse procedimento possibilitou concluir que determinados indicadores de estado são mais sensíveis à densidade em que ocorre a deterioração enquanto que outros são mais adequados para identificar o comprimento das arborescências. Essas constatações permitem, portanto, subsídios para analisar a severidade da degradação levando em conta a análise conjunta de diversos indicadores, cada um representando um aspecto específico da deterioração.

Em seguida, e tendo em vista que nos sistemas reais podem ocorrer distorções na tensão de suprimento foram apresentados dois procedimentos que permitem a identificação na corrente de fuga das parcelas referentes à degradação por arborescência e aquela associada com os harmônicos da tensão de suprimento. Dessa forma, é possível aplicar a metodologia apresentada nesta tese, para fins de diagnóstico da camada isolante, com boa margem de segurança quanto aos resultados a serem obtidos, em sistemas reais.

Nessa etapa do estudo a metodologia proposta foi aplicada às formas de onda das correntes de fuga obtidas em laboratório, a partir de três amostras de cabos isolados. Os resultados dos indicadores de estado possibilitaram, de forma consistente, o diagnóstico das condições operacionais da isolação das amostras analisadas.

Por fim, é apresentada uma proposta de diagnóstico levando-se em conta quatro indicadores de estado: Potência dissipada na isolação, distorção harmônica da corrente de fuga ativa, ângulo de fator de perdas dielétricas e fase do terceiro harmônico, indicadores esses, que serão avaliados em três regiões específicas: a) cabo está isento de degradação; b) O cabo apresenta degradação devendo merecer atenção diferenciada do setor de manutenção e c) O cabo está extensamente degradado devendo ser substituído.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES GERAIS

Ao final de cada capítulo foi feito uma série de comentários conclusivos acerca das contribuições relativas a cada etapa do estudo. Não obstante essas observações, nesta etapa conclusiva do trabalho apresentam-se, por meio de uma abordagem global, as principais contribuições e os avanços concretizados nesta tese.

Os capítulos II e III focaram aspectos básicos relacionados com o tema da pesquisa, procurando oferecer uma síntese do estado da arte relacionado com a degradação de cabos isolados e métodos diagnósticos para identificação do nível de degradação em que se encontra a camada isolante.

No capítulo II, foi dada ênfase na degradação por arborescência devido ao fato de se tratar de uma das principais causas de ruptura de cabos isolados em sistemas de distribuição de energia elétrica, destacando: a morfologia, os tipos, o processo de geração, os fatores de influência para o surgimento de arborescências e a fase final caracterizada pela ruptura da isolação. No que tange ao capítulo III o conteúdo sintetizou os métodos diagnósticos identificados na literatura especializada utilizados para analisar o nível de degradação em cabos isolados devido ao fenômeno de arborescência. Foram apresentados diferentes métodos a partir da medição de distintos indicadores de estado. Alguns desses métodos podem ser realizados com o cabo em operação, outros,

diversamente disso, requerem a desenergização do cabo. Nesse sentido, tendo em vista as dificuldades intrínsecas para suspender o fornecimento de energia os métodos de diagnósticos *on-line* merecem destaque em relação aos métodos de diagnósticos *off-line*.

O capítulo IV teve como propósito central o desenvolvimento de modelagem de cabos isolados contemplando a degradação por arborescência. Inicialmente foram apresentadas algumas técnicas disponíveis na literatura para avaliar, por meio de modelos equivalentes, o grau de degradação de um cabo isolado. Merece destaque, a modelagem que contempla a característica não linear do fenômeno de arborescência. Fato esse constatado pela medição da distorção harmônica presente na parcela ativa da corrente de fuga. A partir da similaridade dessa característica não linear com a característica V-I do diodo semicondutor, foi desenvolvido um modelo matemático para representar a corrente de fuga que flui em uma camada isolante deteriorada, levando em conta a característica não linear das arborescências. O modelo matemático foi utilizado para recuperar características V-I de arborescências, assim como formas de ondas da corrente de fuga ativa disponível na literatura, obtidas por meio de simulações computacionais, considerando para os parâmetros do modelo utilizado, valores correspondentes aos medidos em laboratório. Nesses casos o modelo proposto apresentou resultados satisfatórios. Ressalta-se que nessa etapa do estudo as correntes de fuga ativa foram obtidas subtraindo-se, da corrente de fuga total, apenas uma parcela de corrente capacitiva de 50 Hz, o que significa dizer que não foram consideradas contribuições harmônicas de natureza capacitiva na corrente de fuga total.

O capítulo V ficou voltado para a validação do modelo matemático desenvolvido, desta feita tendo por referência as formas de onda das correntes de fuga ativa obtidas experimentalmente a partir de amostras de cabos, apresentando diferentes níveis de degradação, que foram identificadas na

literatura especializada. As simulações iniciais considerando apenas a presença de corrente capacitiva de 50 Hz não possibilitou o resultado desejado, ensejando a necessidade de considerar a presença de correntes harmônicas de natureza capacitiva na corrente de fuga. Nessa perspectiva, utilizando técnicas matemáticas inerentes à área de processamento digital, mais precisamente a técnica OFDM (Multiplexação por Divisão Ortogonal de Freqüência) foi possível recuperar, computacionalmente, a corrente de fuga ativa medida em laboratório, reproduzindo, com êxito, via simulação computacional, o experimento realizado com vistas à medição da parcela ativa da corrente de fuga. Vale salientar que essa validação representa uma efetiva contribuição nesta área de estudo, vez que apresenta um procedimento capaz de considerar e identificar a contribuição harmônica de natureza capacitiva presente na corrente de fuga. A metodologia e o modelo desenvolvido apresentaram boa concordância com as formas de ondas medidas, independentemente do nível de degradação presente na amostra considerada.

Como última contribuição, o capítulo VI contemplou, com base nos conhecimentos sedimentados na etapa de validação do modelo proposto, o desenvolvimento de uma metodologia para determinação das componentes ortogonais: ativa e reativa da corrente de fuga, a partir, tão-somente do conhecimento da corrente de fuga total que flui na amostra degradada, caracterizando uma contribuição inédita na área de diagnóstico de cabos degradados, na medida em que, doravante, não se faz necessário a utilização de circuitos específicos de medição para identificar a corrente de fuga ativa, a qual é utilizada para a determinação de indicadores de estado para fins de avaliação do estado de conservação da camada isolante de cabos elétricos. É importante destacar que o desenvolvimento adotado nessa metodologia possibilita a identificação das correntes ativas e reativas, tanto no que se refere às respectivas componentes fundamentais, quanto às contribuições harmônicas. Uma vez

conhecidas as componentes ortogonais da corrente de fuga foi desenvolvido, no ambiente ATPdraw, blocos representativos de modelos equivalentes para a camada isolante com degradação, tendo por referência as componentes ortogonais das correntes de fuga obtidas na etapa de validação do modelo proposto, a partir de amostras de cabos com diferentes graus de degradação. A combinação desses blocos representativos possibilitou a simulação de degradações não uniformes do tipo que se espera encontrar em situações reais. Também para esses casos a metodologia desenvolvida para determinar as componentes ativa e reativa da corrente de fuga apresentou excelentes resultados, podendo, portanto, ser aplicada indistintamente para situações que envolvam degradações uniformes ou não uniformes.

Em seguida, utilizando-se as situações de degradações não uniformes simuladas, foi calculado um conjunto de indicadores de estado com vistas à identificação de como se comportam os mesmos diante de diferentes níveis de degradação. Nessa etapa do estudo foi possível estabelecer a sensibilidade desses indicadores, possibilitando a realização do diagnóstico desejado, levando-se em conta especificidades do fenômeno de arborescências, particularmente no que se refere à densidade em que se dá a deterioração e no que diz respeito ao comprimento das arborescências. Com base nessas informações, advindas de diferentes indicadores de estado, é possível realizar um diagnóstico sobre a severidade da degradação existente na isolação, de maneira a refletir com boa precisão o que de fato ocorre na camada isolante analisada. Essas considerações ratificam constatações identificadas na literatura, que dão conta de que a análise isolada de indicadores pode conduzir a diagnósticos com resultados imprecisos quanto à severidade do problema e riscos de ruptura da camada isolante, sendo, pois, recomendável que os diagnósticos levem em conta, de forma simultânea, diferentes indicadores de estado, cada um refletindo um determinado aspecto do fenômeno de degradação por arborescências.

Reconhecendo que nos sistemas elétricos reais, condições não ideais se manifestam na tensão de suprimento, podendo apresentar distorções cuja contribuição harmônica terá influência na corrente de fuga, foram apresentadas duas possibilidades de como se identificar, na corrente de fuga, qual é a parcela devido às distorções na tensão de suprimento e qual é a parcela devido, exclusivamente, ao fenômeno de arborescência, possibilitando, assim, a aplicação da metodologia apresentada nesta tese, em diagnósticos do estado de conservação da camada isolante, com boa margem de segurança quanto aos resultados a serem obtidos, em sistemas reais.

Em seguida, a metodologia proposta foi aplicada para estabelecer as condições operacionais de três amostras de cabos isolados, apresentando bom desempenho quanto à consistência do diagnóstico obtido via análise dos resultados de diferentes indicadores de estado. Finalizando este capítulo é apresentada uma proposta de diagnóstico que considera a análise conjunta de quatro indicadores de estado: Distorção harmônica da corrente de fuga ativa, potência dissipada na isolação, ângulo de fator de perdas dielétricas e fase do terceiro harmônico, indicadores esses, que serão avaliados em três regiões específicas: a) O cabo está isento de degradação; b) O cabo apresenta degradação devendo merecer atenção diferenciada do setor de manutenção e c) O cabo está extensamente degradado, devendo ser substituído. Muito embora se reconheça que este capítulo ficou centrado em uma proposta, salienta-se, que se trata de um trabalho inicial nesta área de estudo, devendo ensejar a realização de estudos com vistas à implementação, na prática, dos estudos aqui realizados. Nesse sentido, espera-se que os assuntos contemplados nesta tese possam ainda, em trabalhos futuros, merecer pesquisas nas seguintes direções:

- Validação tanto do modelo proposto quanto da metodologia apresentada para a reprodução de formas de ondas das componentes ativa e reativa da corrente

de fuga, obtidas em laboratório com amostras de cabos apresentando diferentes níveis de deterioração;

- Estabelecimento de diagnósticos das condições operacionais de amostras de cabos de comprimentos variados, apresentando degradações diferenciadas, tendo por referência, para fins de análise, as formas de ondas de cabos, nas mesmas dimensões, isentos de degradação;

- Desenvolvimento de um protótipo de equipamento para fins de diagnóstico de cabos isolados, utilizando a metodologia e os indicadores de estado propostos;

- Validação do desempenho do protótipo de equipamento em laboratório e em medições de campo em sistema reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BERTLING L., ERIKSSON R., ALLAN R., gustafsson l., AND AHLÉN M., "Survey of Causes of Failures Based on Statistics and Practice for improvements of Preventive Maintenance Plans," *in Proc. Of 14th Power Systems Computation Conf,* PSCC, 2002.

[2] MIYASHITA T., "Deterioration of Water-immersed Polyethylene Coated Wire by Treeing," Proceedings 1969, IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference, Boston, pp.131-135, Sept. 1969.

[3] DUGAN R. C., MCGRANAGHAN M. F., SANTOSO S., BEATY H. W., "Electrical power systems quality", 2nd ed., McGraw-Hill, Nova York, 2003.

[4] BOLLEN M. H. J., "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions", Piscataway, IEEE Press, 2000.

[5] IEEE Standarts P1159, "*Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality*", April, 1995.

[6] OLIVEIRA H. R. P. M., JESUS N. C., MARTINEZ M. L. B., "Avaliação do Desempenho de Equipamentos Eletrodomésticos Durante Ensaios de Sobretensões", XVIII SNPTEE, Curitiba/PR, Outubro de 2005.

[7] TEIXEIRA M. D., ARAÚJO R. L., ARDJOMAND L. M., AOKI A. R., QUOIRIN N. S. R., WUNDERLICH I., "Acceptable Power Quality Limits to Avoid Damages in Appliances", WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 5, vol. 4, Maio, 2005.

[8] ERMELER K., PFEIFFER W., SCHOEN D., SCHOCKE M., "Surge Immunity of Electronic Equipment", IEEE - Electrical Insulation Magazine, vol. 14, 1998.

[9] JUCÁ A. S., "Avaliação do Relacionamento entre Consumidores e Concessionárias na Solução de Conflitos por Danos Elétricos: Proposta de adequação", Tese de Doutorado

em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo/SP, 2003.

[10] TANURE J. E. P. S., "Análise Comparativa de Empresas de Distribuição para o Estabelecimento de Metas de Desempenho para Indicadores de Continuidade do Serviço de Distribuição", Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, Itajubá, MG, 2000.

[11] BARLOW, A., "The Chemistry of Polyethylene Insulation", IEEE Elect. Ins. Mag., vol. 7, pp.8-19, 1991

[12] TRACEY, L.H., BURFORD, R.P., FLEMING, R.J., BARBER, K.W., "A general review of polymer insulation for use in HVDC cables". IEEE Elect. Ins. Mag. vol.19, pp.13-24, 2003.

[13] LEGUENZA, E. L., "Influência do Negro de Carbono (carbon black) nas Propriedades Dielétricas do Polietileno Envelhecido sob Radiação UV", 97 f., Dissertação (Mestrado em física), Universidade Federal do Paraná – PR, 1999.

[14] NEVES C. H., "Estudo do Processo Produtivo do Polistireno Utilizando Água como Agente de Expansão Física: Controle da Granulometria e Morfologia do Polímero", 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2002.

[15] GULMINE, J. V., "Processos de Envelhecimento e Correlações Estrutura - Propriedades do XLPE", 90 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2004.

[16] PACHECO, C. R., "Uma Contribuição a Análise de Desempenho de Cabos Isolados no Contexto da Qualidade da Energia", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia – MG, Maio de 2002.

[17] PIAZZA, F., at al, "Avaliação de Cabos Isolados em Polietileno utilizados em Redes Subterrâneas Utilizando Ensaios de Retorno", XIV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, PR, Novembro, 2002.

[18] EICHHOM, R. M., "Treeing in Solid Organic Dielectric Material", Engineering Dielectrics – Volume IIA – Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Molecular structure and electrical behavior. Baltimore, pp. 355-444, 1983.

[19] DISSADO, L. A. and FOTHERGILL, J.C., "Electrical Degradation and Breakdown in Polymers", The Redwood Press, Wilshire, England, 1992.

[20] BULINSKI, A.T., CRINE, J.P., NOIRHOMME, B., DENSLEY, R.J. and BAMJI, S., "Polymer Oxidation and Water Treeing", IEEE Trans. Diel. Electr. Insul, vol. 5 nº 4, pp. 558-556, 1998.

[21] STEENNIS, E. F. and KREUGER, F. H., "Water Treeing in Polyethylene Cables", IEE Trans. Electr. Insul., vol. 25, nº 5,pp. 989-1028, October, 1990.

[22] ROSS, R., "Inception and Propagation Mechanism of Water Treeing", IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., vol. 5, nº 5, pp. 660-680, October, 1998.

[23] PATSCH, R., JUNG, J. "Water Trees in Cables: Generation and Detection", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., vol. 146, nº 5, September 1999.

[24] DUARTE, P. V. J., "Danos à Camada Isolante de Cabos em Redes Não Blindadas Devido a Distorções do Campo Elétrico na Proximidade de Objetos Enterrados", Trabalho da disciplina Teoria Eletromagnética, 1º semestre de 2001, PPGE, UFMG.

[25] TANAKA, T. and GREENWOOD, A., "Advances Power Cable Technology, Vol. I – Basic Concepts and Testing", CRC Press, Boca Raton, Flórida, USA, 1983.

[26] LORINGAN, P. "A New Generation Tree Retardant Insulation Compound for Medium Voltage Power Cables", Rural Electric Power Conference, 05/02 - 05/04., Indianapolis, IN, USA., pp. D2/1-D2/10, 1999.

[27] HVIDSTEN, S., FAREMO, H., ERIKSSON, R., MIN, W., "Water Treeing and Condition Assessment of High Voltage XLPE Cables", Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 112-115, Boston, MA USA, April, 2002.

[28] FAN, Z.H., YOSHIMURA, N., YANAGIWARA, M., "The research on microstructure of water trees in polyethylene". Proceedings of the 4 th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, vol. 1; 3–8 July, pp. 440–443, 1994.

[29] CRINE, J. P., "Electrical, Chemical and Mechanical Process in Water Treeing", IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., vol. 5, nº 5, pp. 681-694, October, 1998

[30] JUNG, J. and PATSCH, R., "Selective Detection on Water Trees in Cables", Dielectric Materials, Measurements and Applications, Conference Publication nº 473, © IEE 2000.

[31] HOSSAM-ELDIN, A.A., AL HASAWI, W., ALI, M.M., "Study and Modeling of Water Treeing in Solid Insulation of Power Cables", 0-7803-4237-2/97/$10.00 © 1997 IEEE.

[32] DUBICKAS, V., "On-line Time Domain Reflectometry Diagnostic of Medium Voltage XLPE Power Cables", Licenciate Tesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Swedem, April, 2006.

[33] SARMA, H., "Accelerated Aging of TRXLPE Insulated Cables Using Water-Filled Tanks", 0-7803-5515-6/99/$10.00, © 1999 IEEE.

[34] PATSCH, R., "Water Treeing in Cables Insulation – are Laboratory tests meaningful ?", Proceedings of DMMA '88, Cantebury, UK, pp. 242-245, 1988.

[35] BULINSKI, A.T., BAMJI, S.S., DENSLEY, R.J., "Factors Affecting the Transition from a Water Tree to an Electrical Tree", Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA, June 5-8, 1988.

[36] HOBDELL, S. B., MAINWARINGT, S. P., HAMPTON, R. N., "An investigation of Factors Affecting the Growth of Bow Tie Water Trees in XLPE Insulation Systems", Dielectric Materials, Measurements and Applications, Conference Publication nº 473, © IEE 2000.

[37] MORITA, M., WU, K., KOMORI, F. at al, "Investigation of Electrical Tree Propagation from Water Tree by utilizing Partial Discharge and Optical Observations",

Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5, Nagoya, 2003.

[38] SUZUOKI, Y., at al, "Inception and Propagation of Electrical Tree from Water Tree Degradation", IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena", pp. 302-305, 2004.

[39] SAITO, T., "Inception of Electrical Tree from Water Tree Degradation – Effect of Impulse Tree from Water Tree Degradation", IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena", pp. 540-543, 2005.

[40] BOLARIN, O., PETRI, H., MARTTI, A., NING, G. "Dielectric response measurements as diagnostic tool of power cable systems. Literature review", Helsinki University of Technology, High Voltage Institute, Report TKK-SJT-47, Espoo, Finland, March, 24 p, 2001.

[41] YAMAGUCHI, S., SODA, S., TAKADA, N., "Development of a New Type Insulation Diagnostic Method for Hot-Line XLPE Cables", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4 n°. 3, p. 1513-1520, July-1989.

[42] SOMA, K., AIHORA, M., KATAOKA, Y., "Diagnostic Method for Power Cable Insulation", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI – 21, n°. 26, December-1986.

[43] PATSCH, R. and JUNG, J., "Improvement of the return voltage method for water tree detection in XLPE cables", presented at Electrical Insulation, IEEE International Symposium on, pp. 133-136, Anaheim, CA, USA, 2000.

[44] BIRTWHISTLE, D. at al, "An accelerated wet ageing test on medium voltage XLPE cables", Australasian Universities Power Engineering Conference, Brisbane, Australia, 2004.

[45] OYEGOKE, B., HYVONEN, P., ARO, M., NING GAO, "Application of Dielectric Response Measurement on Power Cable Systems" Dielectric and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 10, pp. 862-873, Oct, 2003.

[46] GIVEN, M. J. at al, "Dielectric Spectroscopy- A diagnostic tool applied to water-treed cable", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1998. Annual Report. Conference on, vol. 2, October, Atlanta, GA, USA, pp. 665-668, 1998.

[47] WERELIUS, P. at al, "Dielectric Spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 8, nº 1, February, pp. 27-42, 2001.

[48] YAMAGUSHI, S., KASHIWAGI, N., TOKUMANU, K., "Improvement of the XLPE Insulated Distribution Cables and Development of the Hot Line Cable Monitoring Systems", CIRED, pp. 284-291, Brighton, UK, 1989.

[49] TEIXEIRA, M. D., OLIVEIRA, J. C. at al, "Avaliação do Estado Operacional de Cabos Isolados sob Condições Adversas: Estratégias e Proposta de Diagnóstico", V SBQE, Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia, Aracajú, Brasil, Agosto, 2003.

[50] NAKAYAMA, T., "On-Line Cable Monitor Developed in Japan", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, Nº 4, Oct., pp. 1359-13.65, 1991. On-Line Cable Monitor Developed in Japan.

[51] WEI, Z., YUTÃO, Z, BAITUN, Y., YAONAN, L., "Study on DC Component Method for Hot-Line XLPE Cable Diagnosis", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh – PA USA, pp. 95-99, June, 1994.

[52] ZHANG, W., ZHAU, Y., YANG, B., LIU, Y., "A Study on DC Component Method of On-Line Diagnosis for XLPE cables", Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, pp. 375-378, July, 1974.

[53] Yazaki Electric Wire Co. Ltd., Musashi Institute of Technology, "A Consideration of Mechanism of DC Leakage Current Peak in XLPE Cables", Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Seoul, Korea, pp.402-405, May, 1977.

[54] TSUJIMOTO, T. at al, "Development of on-site Diagnostic for XLPE Cable by Harmonics in AC Loss Current", Proceedings of the 7 th International Conference on

Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, pp. 73-76, June, 2003.

[55] YAGI, Y., TANAKA, H., KIMURA, H., "Study on Diagnostic Method for Water Treed XLPE Cable by Loss Current Measurement", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1998. Annual Report. Conference on, Atlanta, GA, USA, vol. 2, pp.653-656, Oct, 1998.

[56] BULINSKI, A. T., SO, E., BAMJI, S. S., "Measurement of the Harmonic Distortion of the Insulation Loss Current as a Diagnostic Toll for High Voltage Cable Insulation", Power Engineering Society Meeting, 2000, IEEE, vol.3, pp. 1615-1620, Jan, 2000.

[57] BULINSKI, A. T., SO, E., BAMJI, S. S., "A Current-Comparator Technique for Measuring Harmonic Distortion of the Loss Current in High Voltage Cable Insulation", IEEE Precision Electromagnetic Measurements, 2002. Conference Digest 2002 Conference on, pp. 10-11, 2002.

[58] FURUHASHI, T. at al, "Dissipation Current Waveform and its Spectrum of Water-Tree Deteriorated Low Density Polyethylene Sheet", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007. CEIDP 2007. Annual Report - Conference on, pp. 73-76, Oct, 2007.

[59] FURUHASHI, T. at al, "Dissipation Current Waveform of Water Tree Deteriorated Low Density Polyethylene Sheet", 2006 IEEE Annual Report CEIDP, pp. 529-532, Kansas City, USA, 2006.

[60] MASUDA, S. at al "Dissipation Current Waveform Observation of Water Tree Deteriorated LDPE", 2005 IEEE Annual Report CEIDP, pp. 233-236, Oct, 2005.

[61] TOHYAMA, K., BAMJI, S. S., BULINSKI, A. T., "Simultaneous Measurement of Electroluminescence and Dissipation Current in Cable Insulation", Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7 th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, vol. 3, pp. 1051-1054, June, 2003

[62] TANAKA, A. at al, "High Field Dissipation Current Waveform of Polyethylene Film Obtained by New Method", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002 Annual Report Conference on, pp. 610-613, Oct, 2002.

[63] TANAKA, A. at al "High Field Dissipation Current Waveform of XLPE Film Obtained by New Method", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001 Annual Report Conference on, pp. 145-148, Oct, 2001.

[64] OZAKI, T. at al, "Changes of Capacitance and Dielectric Dissipation Factor of Water-Treed XLPE with Voltage", Electrical Insulating Material, 2001. (ISEIM 2001). Proceedings of 2001 International Symposium, pp. 459-462, Himeji, Japan.

[65] ITO, N., "Relation Between the AC Loss Current Method and the PEA Method for Water-Treed Length", IEEE Electrical Insulating Materials, 2001. (ISEIM 2001). Proceedings of 2001 International Symposium on, Himeji, Japan, pp. 524-527, Nov, 2001.

[66] OZAKI, T., at al "AC Loss Current of a Penetrated Water-Treed XLPE", Proceedings of the 7 th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, pp. 443-446, June, 2003.

[67] BOYLESTAD, R. L., NASHELSKY, L., "Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos", LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., sexta edição, 1998.

[68] ZHANG, W., ZHAU, Y., YANG, B., LIU, Y., "A Study on DC Component Method for Hot-Line XLPE Cable Diagnosis", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh – PA USA, p. 95-98, June, 1994.

[69] NAGAO, M., at al, "New Approach to Diagnostic Method of Water Tees", Conference Record of the 1990 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada, pp. 296-299, June, 1990.

[70] PINTO, E. L., ALBUQUERQUE, C. P., "A Técnica de Transmissão OFDM", Revista Científica Periódica – Telecomunicações, vol.5, nº 1, 2002.