

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



**Proposta e Avaliação de Desempenho de um
Novo Indicador para o Diagnóstico do
Isolamento de Cabos Elétricos Subterrâneos**

Loana Nunes Velasco

**Uberlândia
2013**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO
DE UM NOVO INDICADOR PARA O
DIAGNÓSTICO DO ISOLAMENTO DE CABOS
ELÉTRICOS SUBTERRÂNEOS**

Tese apresentada por Loana Nunes
Velasco à Universidade Federal de
Uberlândia para a obtenção do título de
Doutor em Ciências.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, PhD – UFU (Orientador)

Paulo Cesar Abreu Leão Dr – UFSJ

Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira Dr - UNB

Antônio de Pádua Finazzi, Dr – UFMT

Luiz Carlos Gomes de Freitas, Dr – UFU

Carlos Eduardo Tavares, Dr - UFU

PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM NOVO INDICADOR PARA O DIAGNÓSTICO DO ISOLAMENTO DE CABOS ELÉTRICOS SUBTERRÂNEOS

LOANA NUNES VELASCO

Tese apresentada por Loana Nunes Velasco à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira
(Orientador) - UFU

Prof. Edgard Afondo Lamounier Junior
Coordenador do Curso de Pós – Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Losonildes Nunes Velasco e Israel Velasco, ao meu noivo Alex Reis e aos meus irmãos Loise e Hebert, pois sem o apoio e a dedicação deles, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **Deus** por iluminar os caminhos da minha vida e pela generosa companhia durante as etapas de realização deste trabalho, auxiliando nas minhas decisões e atitudes.

Em especial, expresso meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof. **José Carlos de Oliveira** por todo incentivo, colaboração, amizade, confiança e constantes ensinamentos, essenciais à concretização desta meta.

À **minha família** pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo ao longo das fases e obstáculos superados em minha vida.

Ao meu noivo **Alex Reis**, agradeço pelo apoio, carinho e amizade que tornam esta conquista ainda mais importante.

Aos amigos do Laboratório de Qualidade da Energia, **Fabricio Parra Santilio, Fernanda Hein e Camila de Souza Chaves** pelo companheirismo, apoio, amizade e agradável convívio proporcionado nos diversos momentos de trabalho em equipe.

Aos professores **Antônio Carlos Delaiba, José Wilson Resende, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, e Kleiber David Rodrigues** pelo auxílio e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas e amigos da Pós-Graduação **Isaque Nogueira Gondin, João Areis Ferreira Barbosa Junior, Paulo Henrique Rezende** pelo apoio e amizade.

Aos professores e co-orientadores deste trabalho, **Antônio de Pádua Finazzi, Fernando Nogueira de Lima e Luiz Carlos Gomes de Freitas**, que estiveram presente em todo o desenvolver do trabalho, pela orientação competente e compreensão nos momentos de dificuldades

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFU, através de seus professores e funcionários, pela oportunidade de crescimento profissional e aprendizado. À **Cinara, José Maria e Kátia** pela presteza nos encaminhamentos dos assuntos vinculados com a secretaria da Pós-Graduação, bem como aqueles envolvidos com projetos de pesquisa.

Ao **CNPQ** por ter concedido suporte financeiro a esta pesquisa.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a viabilização desta tese de doutorado.

*A mente que se abre a uma nova ideia, jamais
voltará ao seu tamanho original.*

Albert Einstein

RESUMO

A busca por suprimentos elétricos com qualidade, segurança e confiabilidade, constitui-se num dos problemas mais relevantes na atualidade. Neste cenário encontra-se a questão das descontinuidades não programadas devido à ocorrência de falhas em dispositivos diversos, dentre os quais os cabos elétricos isolados. Focando tais componentes e reconhecendo que os mesmos constituem-se numa das principais fontes responsáveis pelas interrupções intempestivas nas instalações, esta tese encontra-se direcionada a investigações com vistas ao estabelecimento de estratégias e mecanismos que, de forma preditiva, possam indicar o estado de degradação da isolamento dos cabos. No que tange a natureza dos fenômenos que podem comprometer a vida útil desses componentes ressaltam-se as manifestações das denominadas arborescências (*water trees*), as quais podem causar danos ao material dielétrico e, por conseguinte, a interrupção do suprimento de energia elétrica. Neste contexto, o presente trabalho se propõe a explorar uma técnica de análise do fenômeno da arborescência, a qual tem por meta a extração de um novo indicador do estado operacional dos cabos. Tal parâmetro de desempenho é aqui denominado por Coeficiente de Não Linearidade e, em consonância com o conceito desta grandeza, expressa o grau de correspondência entre as tensões e correntes de fuga determinadas para um dado trecho de cabo. O fundamento da proposição se apoia em que tais variáveis, sob a ação da degradação em foco, caracterizam um elemento não linear.

Palavras-Chave: Arborescência, Cabos Elétricos, Confiabilidade, Interrupções, Instalações Elétricas, Não Linearidade, Qualidade da Energia.

ABSTRACT

The search for electrical supplies, which offer quality, safety and reliability, is a challenging question that is still ever relevant in actuality. It is within this scenario that one finds the question surrounding non-programmed discontinuities, which are in themselves due to failures in numerous electrical devices encountered on the market today, within which isolated electric cables can be found. With the focus on such components, as it is recognized that they are in greater part responsible for the untimely interruptions that occur in installations, this thesis aligns itself towards the investigation with the view of establishing strategies and mechanisms, which in a predictive manner are capable of indicating the state of degradation present in a cable's isolation. Regarding the nature of the phenomena that may affect the useful working life of these components the authors emphasize the manifestations of so-called water- trees, which can cause damage to the dielectric material and as a result therefore cause the interruption of the electricity supply. It is within this context that the present thesis proposes the exploration of a technique for the analysis of such water-tree phenomena, which is aimed at extracting a new indicator concerning the operational status of the cables. Such a performance parameter is denominated as the non-linear coefficient and in line with the concept of such a magnitude, expresses the degree of correspondence between the voltages and leakage currents determined for a given stretch of cable. The underlying foundation of the proposition rests on the idea that such variables, under the action of the type of degradation in focus, characterize a nonlinear element.

Key-words: Water-tree, Electric Cables, Reliability, Interruptions, Electric Installations, Non-linearity, Power Quality.

SUMÁRIO

Capítulo I

Introdução Geral

1.1 Considerações iniciais	14
1.2 O contexto da presente tese	16
1.3 Contribuições de tese	16
1.4 Estrutura de tese	17

Capítulo II

Proposta de Indicador para Avaliação do Estado de degradação de Cabos Elétricos Isolados

2.1 Considerações iniciais	19
2.2 Constituição típica de cabos elétricos de média tensão	20
2.3 O Fenômeno da Arborescência ou “Water-Trees”	22
2.4 Modelagem de cabos elétricos degradados por arborescência	26
2.5 Metodologias Clássicas Para os Indicadores de Estados de Degradação de Cabos Isolados	34
2.6 Nova Proposta de Metodologia para o Indicador de Estado de Degradação de Cabos Isolados	39
2.7 Determinação do coeficiente de não linearidade de um cabo isolado	42
2.8 Filosofia para a estimação dos parâmetros dos elementos lineares do circuito equivalente	45
2.6 Validação da metodologia de determinação dos parâmetros do circuito equivalente	48
2.9 Considerações finais.....	54

Capítulo III

Software para Determinação dos Indicadores de Desempenho

3.1 Considerações iniciais	55
3.2 Software de Análise	56
3.3 Avaliação do Desempenho do Aplicativo – Etapa 1	68
3.4 Avaliação do Desempenho do Aplicativo – Etapa 2	76
3.4.1 – Estrutura Física utilizada.....	76
3.4.2 – Caracterização dos estudos de caso	78
3.4.3 – Resultados dos trabalhos de medição.....	79
3.4.4 – Correlação de Não-Linearidade	82
3.4.5–Avaliação dos indicadores de estado dos isolamentos.....	83
3.5 Considerações finais.....	85

Capítulo IV

Conclusões

Conclusões.....	86
-----------------	----

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas	91
----------------------------------	----

Apêndice

Apêndice.....	97
---------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Constituição Típica de Cabos Elétricos de Média Tensão [10].	21
Figura 2.2 – Ilustração do fenômeno da degradação por arborescência [10].	23
Figura 2.3 – Tipos de Arborescências.....	24
Figura 2.4 – O mecanismo eletrofísico da geração e crescimento das arborescências.	25
Figura 2.5 – (a) Estrutura construtiva de um cabo isolado (b) Vista da seção transversal.	27
Figura 2.6 – Circuito equivalente para um trecho de um cabo isolado não degradado.	28
Figura 2.7 – Concepção física do isolamento de um cabo contendo regiões sãs e degradadas.	28
Figura 2.8 – Circuito equivalente para uma dada extensão de cabo compreendendo partes sãs e outras degradadas.	30
Figura 2.9 – Característica não linear da região degradada por arborescências.	31
Figura 2.10 – Representação de uma relação linear perfeita entre duas variáveis.	41
Figura 2.11 - Representação de uma relação não linear entre duas variáveis.	41
Figura 2.12– Lógica do processo avaliativo para a determinação do Coeficiente de Não Linearidade	44
Figura 2.13 – Comportamento da área da figura de Lissajous durante o processo de busca fixado o capacitor C'_{nd} e variando o capacitor C_{nd}	47
Figura 2.14 – Ilustração do processo de busca até a consolidação dos parâmetros finais para o circuito equivalente que reproduz a tensão e corrente medida.	48
Figura 2.15– Circuito hipotético contendo apenas elementos lineares.....	49
Figura 2.16– Circuito hipotético contendo elementos lineares e um elemento não linear.....	50
Figura 2.17 – Forma de onda da tensão e corrente do circuito linear.....	51
Figura 2.18– Formas de onda da tensão e corrente do circuito não linear	51
Figura 2.19 – Relação Corrente x Tensão – Caso 1: a) Simulador ATP; b) Aplicativo Computacional	53
Figura 2.20 – Relação Corrente x Tensão – Caso 2: a) Simulador ATP; b) Aplicativo Computacional.	53
Figura 3.1- Arquivo de execução do programa.....	57
Figura 3.2 – Tela inicial do programa - colunas 1 e 2.	57
Figura 3.3 – Identificação do Projeto de Pesquisa.....	58
Figura 3.4 – Conceitos físicos sobre a constituição dielétrica de cabos.....	59
Figura 3.5 – Circuito equivalente.....	59
Figura 3.6 – Resistência não linear.	60
Figura 3.7 – Método de cálculo.....	60
Figura 3.8 – Grupo de Pesquisa.	61

Figura 3.9 - Captação e parametrização dos dados.....	62
Figura 3.10 – Seleção do arquivo.....	62
Figura 3.11- Análise de dados.....	63
Figura 3.12- Valores Captados.....	64
Figura 3.13- Configuração.	64
Figura 3.14- Tensão e Correntes totais.	65
Figura 3.15 - Tensão e corrente atreladas com a parte degradada do cabo.	66
Figura 3.16- Correlação entre a tensão e corrente associada com o elemento não linear equivalente à área degradada.....	66
Figura 3.17- Espectro harmônico da tensão e corrente associadas com o componente não linear equivalente.....	67
Figura 3.18 – Área da figura de Lissajous durante o processo de busca, em função das seleções dos parâmetros capacitivos.....	67
Figura 3.19 - Resultados.....	68
Figura 3.20 – Corrente ativa de fuga devido ao stress causado por: (a) 3 kV/500h (b) 3 kV/100h (c) 3 kV/300h – Resultados experimentais apresentados em [19].	69
Figura 3.21 - Corrente total de fuga devido ao stress causado por: (a) 3 kV/500h (b) 3 kV/300h (c) 3 kV/100h.....	71
Figura 3.22- Característica tensão versus corrente nos terminais do elemento não linear: (a) 3 kV/500h (b) 3 kV/300h (c) 3 kV/100h.....	72
Figura 3.23 - Tensão total (v_{total}) contendo distorção harmônica e respectiva corrente total de fuga (i_{total})	74
Figura 3.24 - Característica tensão versus corrente para o elemento não linear resistivo	74
Figura 3.25- Diagrama esquemático do sistema utilizado para medição e análise – Representação Monofásica.	77
Figura 3.26- Instalação onde se localiza o Cabo 1 – Usina de Capim Branco, Uberlândia-MG.	78
Figura 3.27 - Instalação onde se localiza o Cabo 2 – Subestação, Uberlândia-MG.	79
Figura 3.28- Instalação onde se localiza o Cabo 3 – Rede Subterrânea na Av. Floriano Peixoto, Uberlândia-MG.	79
Figura 3.29 - Correntes de fuga medidas em campo: a) Cabo 1; b) Cabo 2 e c) Cabo 3	80
Figura 3.30 - Correntes de fuga medidas: a) Cabo 1; b) Cabo 2 e c) Cabo 3	81
Figura 3.31 - Característica tensão versus corrente: a) Cabo 1; b) Cabo 2 e c) Cabo 3	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Parâmetros adotados para os componentes do circuito 1	50
Tabela 2.2 Parâmetros adotados para os componentes do circuito 2.....	50
Tabela 2.3 -Parâmetros adotados para a simulação	51
Tabela 2.4 Parâmetros calculados para os componentes do circuito 1 – via aplicativo computacional	52
Tabela 2.5 Parâmetros calculados para os componentes do circuito 2 – via aplicativo computacional	52
Tabela 3.1 Resultados computacionais para os parâmetros e indicadores de não linearidade associados com bancos de dados de medições advindas de [19].	73
Tabela 3. 2 Resultados computacionais – amostra de cabo com maior degradação [16] – tensão de suprimento distorcida.....	75
Tabela 3.3 Síntese dos resultados obtidos.....	75
Tabela 3.4- Síntese dos resultados obtidos para os três cabos comerciais	83

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.

Distintos fenômenos podem impactar negativamente sobre o material isolante que compõe um determinado cabo isolado, sendo que, uma das principais causas é definida por um fenômeno conhecido por arborescência (*water tree*) [1]. À luz deste fato, diversos estudos têm sido desenvolvidos para a detecção deste efeito e, por conseguinte, extrair informações sobre o real nível de degradação da camada isolante. As investigações objetivam, portanto, o oferecimento de meios práticos que auxiliem na manutenção preventiva e no acompanhamento do estado operacional dos cabos, possibilitando prever as expectativas de vida útil da isolação. Esses métodos podem ser divididos em

“off-line” e “on-line”. No caso dos métodos “off-line”, o cabo a ser diagnosticado deverá estar sem carregamento e também desenergizado. Ao contrário disso, os métodos “on-line” são aqueles realizados com o cabo sob condições energizadas, à vazio ou em carga. Uma breve descrição dos métodos mencionados, onde são destacadas as vantagens e as desvantagens de cada um deles, pode ser encontrada em [2].

Focando, especificamente, os procedimentos aplicáveis quando da manifestação da arborescência, estudos têm demonstrado que, mesmo quando a tensão de suprimento é puramente senoidal, a corrente de fuga que flui entre a superfície do condutor e a blindagem da isolação de um cabo apresenta um comportamento não linear, com conteúdo harmônico considerável. A predominância da componente de terceira ordem neste tipo de estudo é significativa. Nessa perspectiva, merecem destaque as referências [2-20], que evidenciam uma correlação entre a manifestação das arborescências e o surgimento de correntes de fuga com expressivo conteúdo harmônico, mesmo sob a ação de uma tensão de suprimento senoidal. Todavia, não obstante o reconhecimento destes trabalhos, percebe-se que, até o momento, as investigações feitas e os avanços obtidos não são indicativos da existência de um procedimento de campo com propriedades compatíveis aos desafios aqui postos.

Procurando, pois, avançar nesta direção, a presente tese volta-se para o desenvolvimento de uma nova metodologia destinada ao diagnóstico do nível de degradação de cabos isolados, associando as grandezas factíveis de medição: tensão de suprimento do cabo e respectiva corrente de fuga; com uma grandeza ou indicador de desempenho denominado por Coeficiente de Não Linearidade (ρ).

1.2 O CONTEXTO DA PRESENTE TESE

Visando meios práticos para a avaliação dos efeitos finais do fenômeno da arborescência sobre a degradação precoce dos cabos e, observando, de forma pontual, os estudos sobre as modelagens e métodos de diagnóstico, reconhece-se alguns trabalhos focando especificamente a questão da detecção de falhas por arborescência e extração de informações e parâmetros de desempenho sobre o nível de degradação da camada de isolamento de cabos. Estes, de modo geral, contemplam pesquisas para a obtenção de meios e ferramentas práticas que auxiliem a manutenção preditiva através do acompanhamento do estado operacional dos cabos. Não obstante tais avanços, os quais serão discutidos em maiores detalhes ao longo desta tese, reconhece-se, para o presente estado da arte, lacunas a serem contempladas com vistas a proposição e sistematização de meios eficazes para os fins aqui postos.

Diante deste cenário, esta pesquisa, em relação ao presente estado da arte, avança no sentido de propor um novo indicador para a estimativa do estado de degradação de cabos isolados. Para tanto, somado a fundamentação física do novo parâmetro de desempenho, são ainda estabelecidas as bases matemáticas, a modelagem computacional e a realização de ensaios voltados para a validação da estratégia.

Portanto, ressalta-se que a presente tese tem, essencialmente, o objetivo de contribuir no desenvolvimento de uma ferramenta que permita a realização de diagnósticos específicos e de forma preditiva de cabos isolados com respeito ao fenômeno de degradação por arborescências.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DE TESE

Reconhecendo a importância do tema, as conquistas já obtidas e as perspectivas que se abrem para o emprego da tecnologia aqui referida, há plena concordância que ainda existem lacunas de conhecimento a serem preenchidas

para o avanço da pesquisa no tema enfocado. À luz destes fatos, a presente tese de doutorado visa, pois, contribuir nos seguintes pontos focais:

- Caracterização do fenômeno da arborescência, focando cabos isolados com polietileno reticulado (XLPE);
- Apresentação da modelagem de cabos elétricos, considerando a presença do fenômeno da arborescência;
- Proposta de uma metodologia para determinação dos parâmetros da modelagem de cabos isolados com degradação por arborescências;
- Proposição de um novo indicador para estabelecimento do estado operacional de cabos isolados;

1.4 ESTRUTURA DE TESE

Em consonância com o exposto, além do presente capítulo introdutório, esta tese de doutorado encontra-se estruturada através das seguintes unidades:

Capítulo II PROPOSTA DE INDICADOR PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO DE DEGRADAÇÃO DE CABOS ELÉTRICOS ISOLADOS

Este capítulo discorre sobre os principais fatores que contribuem para a degradação de cabos isolados, com destaque para o fenômeno denominado arborescência; a modelagem do fenômeno e a proposição de um novo indicador para análise e estabelecimento do estado operacional de cabos isolados.

Capítulo III SOFTWARE PARA DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

Esta unidade destina-se à apresentação do aplicativo computacional desenvolvido para o cálculo do indicador proposto, compreendendo validação computacional e experimental.

Capítulo IV TESTES FINAIS DE DESEMPENHO E FORMAÇÃO DE BANCO DE DADOS

Complementando, esta unidade se apresenta imbuída de discussões relacionadas com estudos laboratoriais de desempenho da proposta, em que pese experimentos em ambiente controlado e também em campo.

Capítulo V CONCLUSÕES GERAIS

Por fim, procede-se uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados aos trabalhos realizados até o presente momento, e ainda, são ressaltadas questões vinculadas às principais contribuições deste trabalho, bem como propostas para futuras pesquisas.

Capítulo II

PROPOSTA DE INDICADOR PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO DE DEGRADAÇÃO DE CABOS ELÉTRICAS ISOLADOS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo se propõe a apresentar o novo modelo elétrico desenvolvido para representar um cabo isolado do tipo XLPE que possa contemplar o mesmo sem a presença de degradações ou com diferentes estados de degradação devidos ao fenômeno de arborescência. O principal objetivo é estabelecer uma metodologia que possibilite o diagnóstico das condições operacionais da camada isolante, com base em indicadores de estado.

A fim de que tais metas sejam alcançadas e proporcionando uma sequência didática para os procedimentos e sua compreensão, os trabalhos realizados no decorrer desta unidade da tese compreendem:

- Caracterização do fenômeno da arborescência, focando cabos isolados com polietileno reticulado (XLPE);
- Apresentação da modelagem de cabos elétricos, considerando a presença do fenômeno da arborescência;
- Proposta de uma metodologia para determinação dos parâmetros da modelagem de cabos isolados com degradação por arborescências;

- Avaliação computacional da metodologia apresentada;
- Proposição de um novo indicador para estabelecimento do estado operacional de cabos isolados.

2.2 CONSTITUIÇÃO TÍPICA DE CABOS ELÉTRICOS 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 [8].

A Figura 2.1 mostra uma fotografia de um cabo 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. Para situações em que os cabos ficam expostos a esforços mecânicos superiores aos encontrados normalmente, além dos componentes descritos anteriormente, torna-se necessária a colocação de camadas adicionais, sobre a capa não metálica, denominadas de armações, que conferem maior resistência nas direções axial e radial do cabo. A armadura mais comum é constituída por fitas de aço aplicadas helicoidalmente.

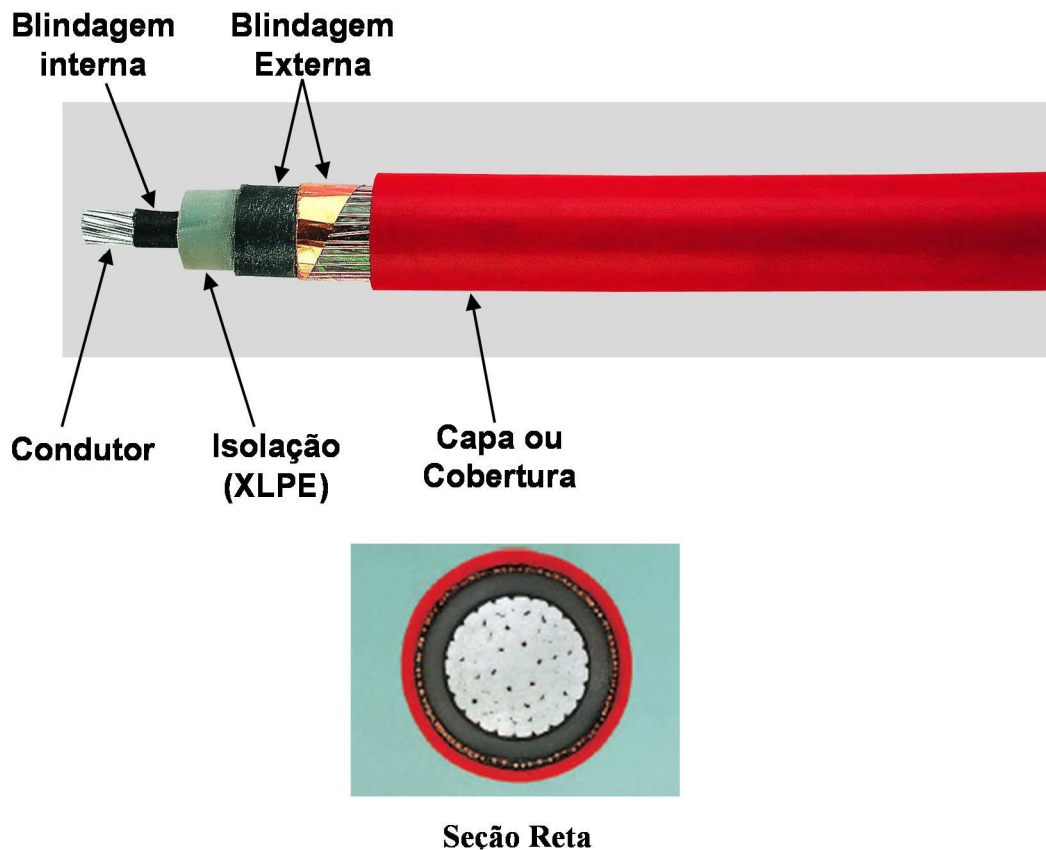


Figura 2.1 – Constituição Típica de Cabos Elétricos de Média Tensão [10].

Diante do exposto, deve-se destacar que a modelagem de cabos isolados a ser apresentada nesta tese primará pela obtenção de um circuito elétrico equivalente ao cabo elétrico ilustrado na Figura 2.1, representando tanto as partes sãs quanto as partes degradadas da camada isolante, pelas quais circulam as correntes de fuga. Para obtenção de tal modelo, é necessário analisar cada mecanismo envolvido no processo da circulação desta corrente em decorrência da Arborescência. Este, conforme evidenciado na próxima seção deste capítulo, provoca a ruptura lenta do material isolante devido ao processo de envelhecimento do cabo utilizado, principalmente, em ambientes com excesso de umidade, situação está comumente encontrada em instalações elétricas subterrâneas.

2.3 O FENÔMENO DA ARBORESCÊNCIA OU “*WATER-TREES*”

A rigor, existem dois tipos de arborescências. Uma delas é denominada de arborescência elétrica e a outra de arborescência em água, sendo que, pelas razões apresentadas a seguir, o diagnóstico aqui pretendido se restringirá às degradações advindas da ocorrência de arborescências em água.

A 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 arvoredor. 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 [8].

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. A arborescência em água consiste de caminhos filamentosos entre pequenas cavidades, paralelos ao campo elétrico, por onde penetra a umidade, devido à ação de um gradiente elétrico. A umidade pode estar tanto no estado líquido quanto no 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. A Figura 2.2

retrata o surgimento de microcavidades (arborescências) formadas no interior da isolamento do polietileno de cabos elétricos de média tensão, devido ao acúmulo de moléculas de água.



Figura 2.2 – Ilustração do fenômeno da degradação por arborescência [10].

É importante registrar que, ao se verificar o surgimento de arborescências na isolamento dos cabos, observa-se 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.

Avanços tecnológicos propiciaram 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 projeto e construção dos cabos, a utilização de polietileno perfilado ou de seção embutida e a 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 [6], [9] e [10]. Vale ressaltar ainda que a presença de arborescências ocorre independentemente da classe de

tensão a que o cabo esteja submetido. Quanto mais severas forem as condições de umidade e do gradiente de tensão aplicado ao cabo, tanto maior serão os riscos de incidência e de crescimento dessas arborescências. Neste cenário, destaca-se que o fenômeno em pauta pode se manifestar de duas maneiras, (a) *vented-tree* e (b) *bow-tie-tree* conforme a Figura 2.3.

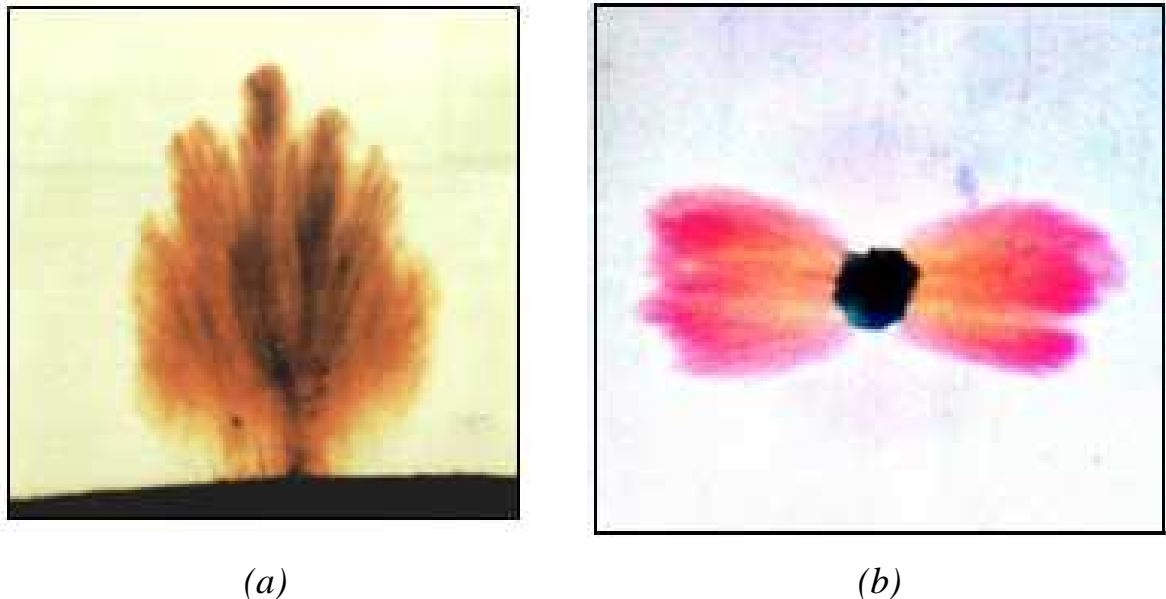


Figura 2.3 – Tipos de Arborescências

- *vented-tree*: surgem a partir das superfícies internas e externas do material isolante que 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 “*stress*” mecânico nesses pontos, e;
- *bow-tie-tree*: crescem do interior da isolação para as superfícies interna e externa, se constituindo na forma mais comum do fenômeno, sendo consequência direta da presença de impurezas no interior do dielétrico ou *stress* mecânico devido ao transporte e/ou manuseio desses cabos. D

A Figura 2.4 sintetiza o mecanismo supra mencionado e que conduz ao processo da formação da arborescência.

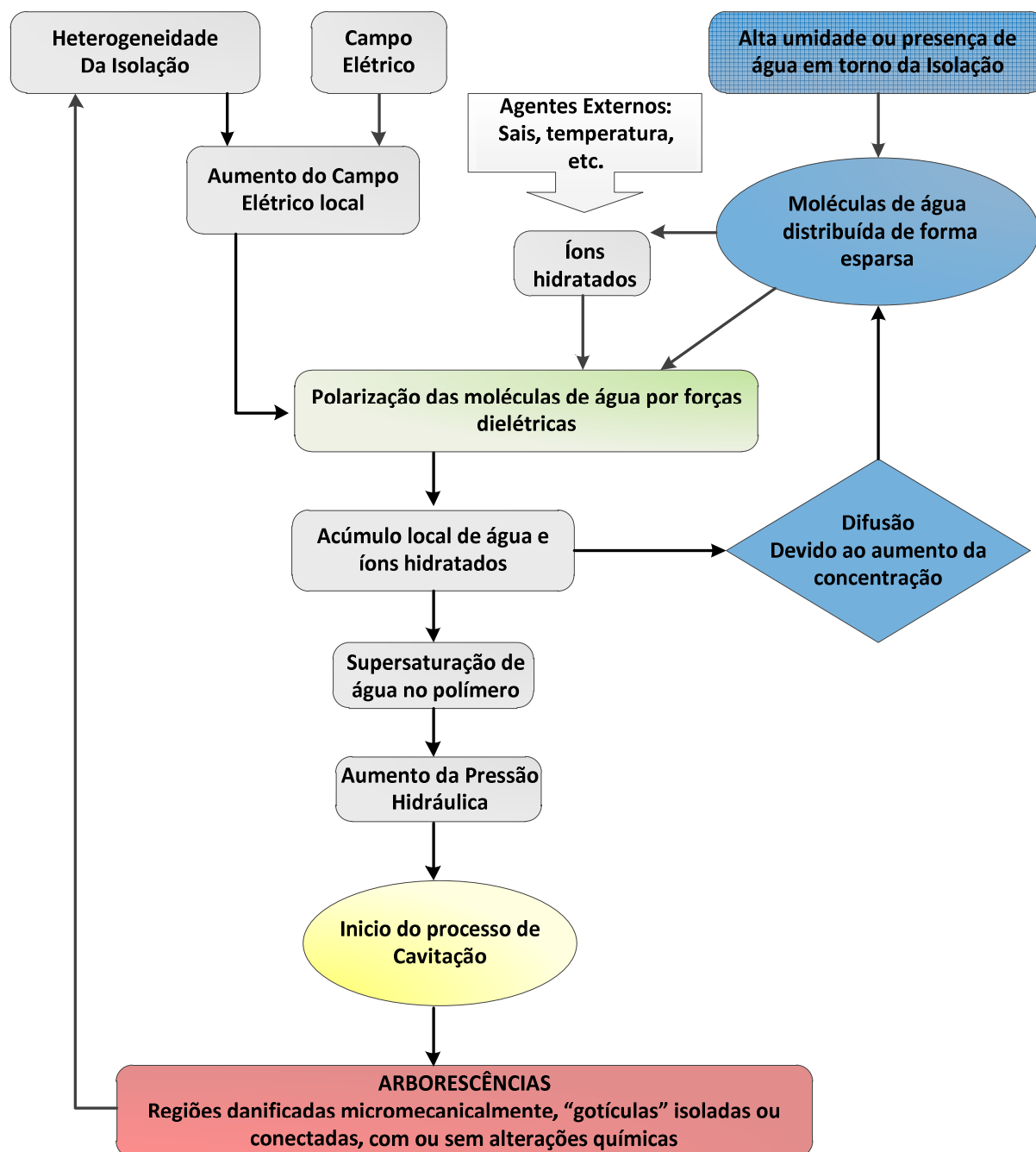


Figura 2.4 – O mecanismo eletrofísico da geração e crescimento das arborescências.

2.4 MODELAGEM DE CABOS ELÉTRICOS DEGRADADOS POR ARBORESCÊNCIA

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 elétricos que reproduzam, de forma adequada, o comportamento de um cabo isolado submetido à degradação por arborescências.

Pesquisas reportadas em [2-10] comprovaram que a deterioração de cabos elétricos pelo fenômeno de arborescência acarreta um aspecto não linear na corrente de fuga, provocando o surgimento de componentes harmônicos na mesma. Nesse sentido, a proposta de representação contemplada neste capítulo prima pela associação de componentes passivos, de natureza linear e não linear, os quais irão compor a modelagem de cabos elétricos no domínio do tempo, contemplando a degradação por arborescência.

Em consonância com as metas supracitadas, para obter a modelagem de cabos isolados degradados, é necessário analisar cada mecanismo envolvido no processo da circulação da corrente de fuga através da camada isolante, que podem ser identificados a partir da estrutura construtiva ilustrada na Figura 2.5. Nesta são destacados: o condutor interno de um cabo, seu isolamento, a blindagem e o aterramento. O material condutor propriamente dito é identificado por (A) e a blindagem do cabo que é externa à área isolada é indicada por (B), sendo que esta superfície metálica oferece proteção e segurança para o cabo por meio de sua conexão a um ou mais pontos de aterramento.

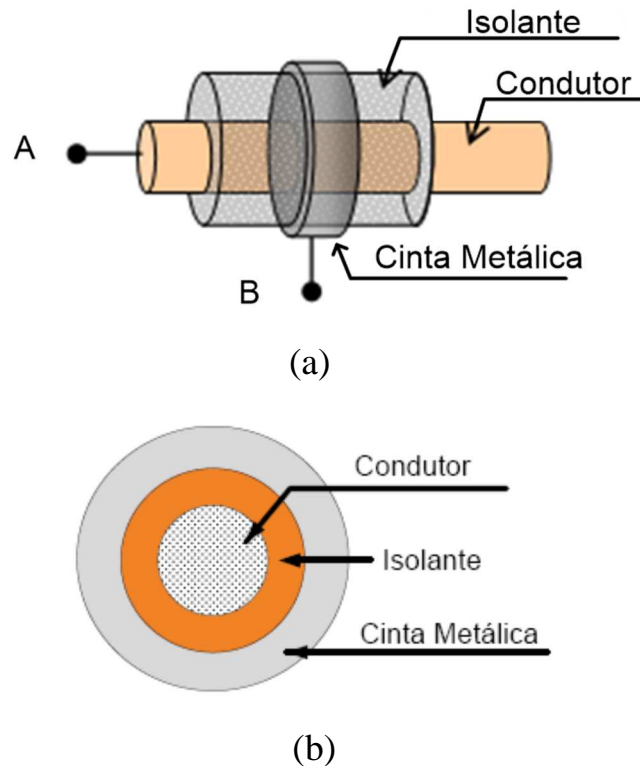


Figura 2.5 – (a) Estrutura construtiva de um cabo isolado (b) Vista da seção transversal.

É fundamental observar que esta estrutura construtiva determina uma configuração geométrica responsável pela existência de um efeito capacitivo similar àqueles obtidos pela associação de dois materiais cilíndricos concêntricos separados por um isolante químico qualquer. Isto implica na existência de um capacitor equivalente, advindo de uma situação idealizada que, para fins práticos, pode ser ainda complementada com uma resistência equivalente e representativa das componentes ativas das correntes de fugas.

Nessa linha de raciocínio, sem a presença de efeitos anômalos devido a degradações que podem se manifestar em situações reais, o cabo pode, então, ser representado como um circuito RC, contendo elementos lineares, como indicado na Figura 2.6.

À luz desta concepção física, fica evidenciado a existência de uma corrente estabelecida entre o condutor e a blindagem que se apresenta com duas componentes, uma ativa e outra reativa, sendo a última dominante no processo.

Destaca-se que, neste trabalho, a componente capacitiva é identificada por i_{C0} e a componente resistiva por i_{R0} , em virtude da necessidade de representação das grandezas das correntes e tensões instantâneas, visto a necessidade do reconhecimento das formas de onda das mesmas no domínio do tempo.

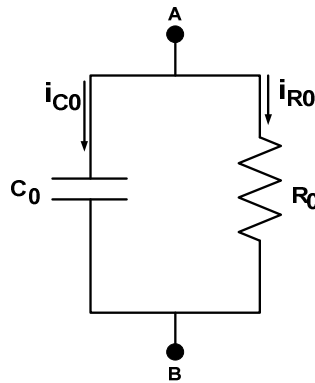


Figura 2.6 – Circuito equivalente para um trecho de um cabo isolado não degradado.

Em se tratando de um determinado cabo que apresente regiões degradadas e outras sãs, conforme indicado simbolicamente na Figura 2.7, o modelo a ser estabelecido deverá necessariamente compreender essas duas regiões.

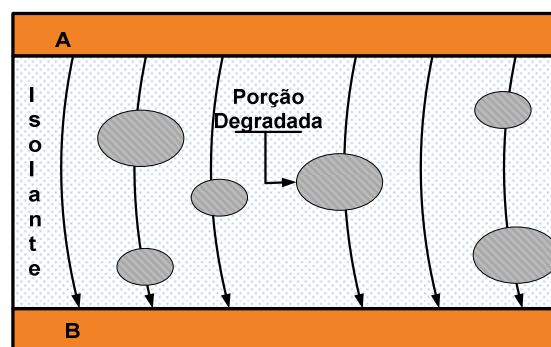


Figura 2.7 – Concepção física do isolamento de um cabo contendo regiões sãs e degradadas.

Para as porções não degradadas, o modelo equivalente consiste na combinação RC anteriormente referida, onde os valores de R e de C se diferenciam dos valores nominais fornecidos pelo fabricante por não representarem a totalidade do material isolante existente. No que tange às seções que apresentam degradação, como já mencionado, estas possuem uma natureza

não linear atrelada ao fenômeno da arborescência. Diante desta conjuntura, a adoção de parâmetros lineares já não consiste numa medida adequada para a representação dos trechos degradados, fato este que orienta para outras estratégias. Por motivos compreensíveis, a busca de modelos que atendam aos requisitos impostos pela relação não linear entre a tensão e a corrente nos terminais das partes danificadas passa, necessariamente, pela utilização de dispositivos compatíveis com tais exigências.

Diante do exposto fica, pois, evidenciado que a modelagem de um trecho de cabo que se apresenta com regiões normais e deterioradas pode ser idealizada através da combinação de circuitos equivalentes compostos por componentes lineares e não lineares. A Figura 2.8 apresenta a concepção física adotada neste estudo. Esta evidencia uma associação de elementos passivos nos termos abaixo identificados:

- Equivalente 1 - circuito RC linear, associado com as regiões sãs das partes longitudinais do cabo;
- Equivalente 2 - circuito RC linear, com parâmetros distintos do anterior e destinado a representar as áreas sãs remanescentes da região atingida pela degradação;
- Equivalente 3 - circuito RC não linear, representando a região degradada do cabo.

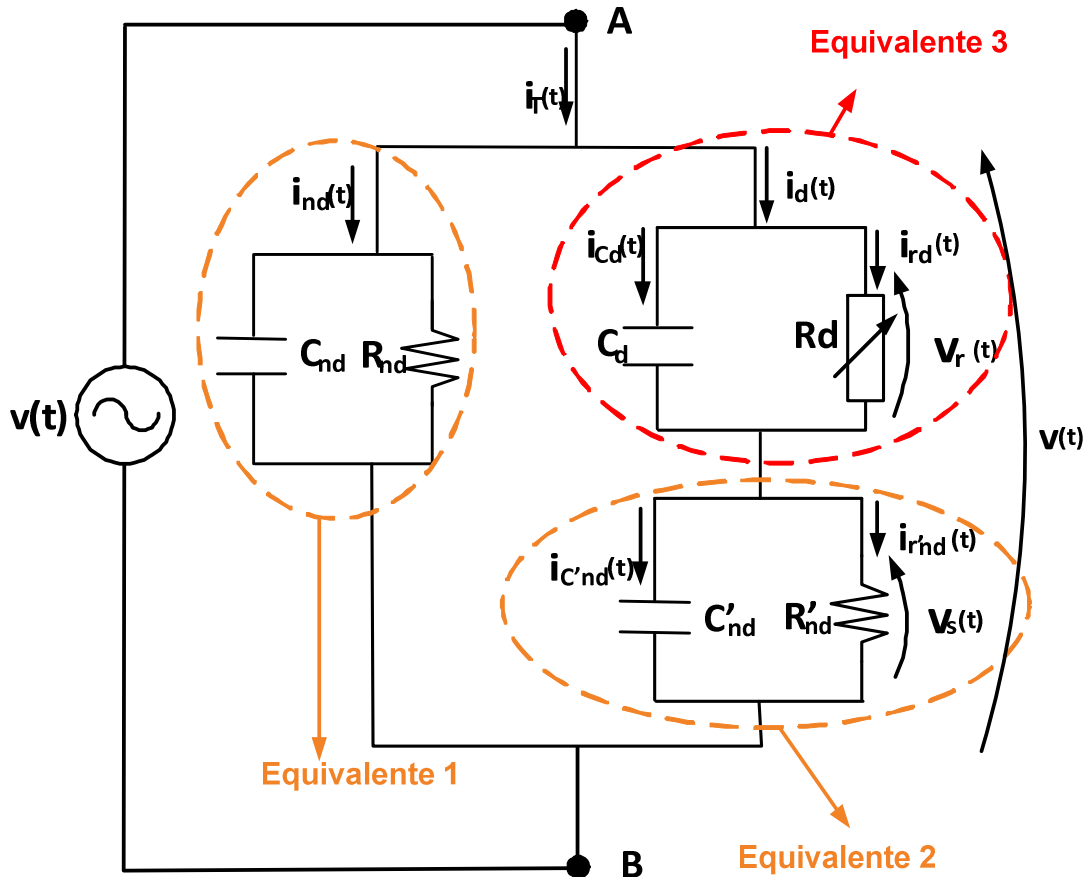


Figura 2.8 – Circuito equivalente para uma dada extensão de cabo compreendendo partes sãs e outras degradadas.

Na figura anterior:

- C_{nd} – Capacitância equivalente do trecho não degradado da extensão longitudinal do cabo;
- R_{nd} – Resistência equivalente do trecho não degradado da extensão do cabo;
- C_d - Capacitância Equivalente da extensão de cabo degradada;
- R_d - Resistência não linear representativa da região danificada do trecho degradado do cabo;
- C'_{nd} - Capacitância equivalente à região não danificada da seção transversal do trecho degradado do cabo;
- R'_{nd} - Resistência equivalente à região não danificada da seção transversal do trecho degradado do cabo.

A presença do elemento resistivo não linear no sistema possibilita correlacionar o estado de degradação por arborescência com a sua característica tensão versus corrente. A título de ilustração, a Figura 2.9 apresenta a

característica não linear correspondente a diferentes níveis de degradação [16]. Vale destacar que, quanto mais não linear for a relação entre as grandezas, maior será a degradação existente no cabo. Sendo assim, para um cabo isento de degradação, essa relação corresponderá praticamente a uma reta.

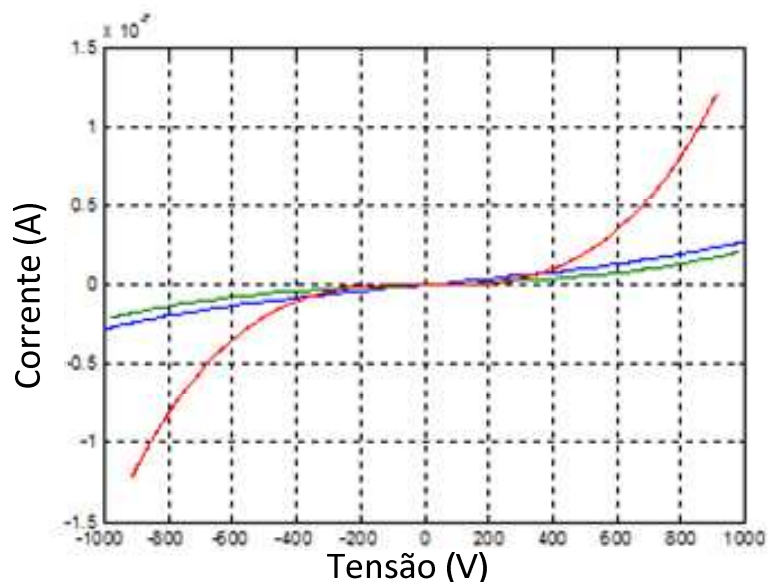


Figura 2.9 – Característica não linear da região degradada por arborescências

Atente-se para o fato de que a tensão e a corrente indicada são aquelas associadas exclusivamente ao elemento não linear (R_d). Destaca-se, preliminarmente, que essa característica não linear será fundamental para determinação do novo indicador para fins de diagnóstico das condições operacionais da isolação de cabos isolados, a ser proposto nesta tese. Mais informações acerca de outros modelos de cabos isolados com degradação por arborescência podem ser encontradas em [5-16].

Para que seja possível identificar a relação entre tensão e corrente no elemento não linear que, conforme já mencionado, está associada ao nível de degradação existente no cabo isolado, é necessário proceder uma análise matemática que contemple o equacionamento das variáveis envolvidas na modelagem com o propósito de definir os valores dos parâmetros do circuito equivalente aqui adotado, visto que esses parâmetros variam em função do nível

de degradação que se deseja conhecer e das características de cada cabo, como comprimento e bitola.

À luz das considerações feitas e a partir do circuito equivalente da Figura 2.8, com vistas a identificar a característica não linear da arborescência, tem-se que a corrente de fuga total que flui na camada isolante e que consiste na composição da corrente linear do trecho não degradado da extensão longitudinal do cabo e da corrente não linear do trecho degradado, pode ser representada por:

$$i_t(t) = i_{nd}(t) + i_d(t) \quad (1)$$

Sendo,

$$i_{nd}(t) = C_{nd} \frac{dv_{total}(t)}{dt} + \frac{v_{total}(t)}{R_{nd}} \quad (2)$$

Conhecendo-se a corrente de fuga total e a tensão total aplicada ao cabo, obtidas via medição direta, e determinando-se a corrente de fuga da região não degradada (2) é possível, a partir de (1), encontrar a corrente que circula na região degradada por meio de (3).

$$i_d(t) = i_{total}(t) - i_{nd}(t) \quad (3)$$

A parcela ativa da corrente que circula na região degradada é determinada por (4).

$$i_{rd}(t) = i_d(t) - i_{cd}(t) \quad (4)$$

A corrente capacitiva que flui na parte remanescente da camada isolante, ainda não atingida pela degradação, por sua vez, pode ser determinada por (5).

$$i_{C'nd}(t) = C'_{nd} \frac{dv_s(t)}{dt} \quad (5)$$

Daí,

$$\frac{dv_s(t)}{dt} = \frac{i_{C'nd}(t)}{C'_{nd}} \quad (6)$$

Sendo,

$$i_{C'nd}(t) = i_d(t) - \frac{[v_{total}(t) - v_{Rd}(t)]}{R'_{nd}} \quad (7)$$

Logo,

$$\frac{dv_s(t)}{dt} = \frac{\{i_d(t) - [v_{total}(t) - v_{Rd}(t)]/R'_{nd}\}}{C'_{nd}} \quad (8)$$

No que concerne à tensão aplicada sobre a região degradada do cabo, esta pode ser determinada pela diferença entre o sinal da tensão medida e a tensão aplicada sobre a parte da isolação não degradada, conforme disposto em (9).

$$v_{Rd}(t) = v_{total}(t) - v_s(t) \quad (9)$$

Derivando-se (9), obtém-se:

$$\frac{dv_{Rd}(t)}{dt} = \frac{dv_{total}(t)}{dt} - \frac{dv_s(t)}{dt} \quad (10)$$

Substituindo-se (8) em (10), obtém-se a equação diferencial relativa à tensão $v_{Rd}(t)$ que representa a tensão sobre a região degradada do cabo, conforme apresentado em (11).

$$\frac{dv_{Rd}(t)}{dt} = \frac{dv_{total}(t)}{dt} - \frac{\{i_d(t) - [v_{total}(t) - v_{Rd}(t)]/R'_{nd}\}}{C'_{nd}} \quad (11)$$

De posse das equações (4) e (11), torna-se possível por meio de procedimentos computacionais, a determinação dos parâmetros do circuito equivalente e da característica não linear do elemento resistivo, representativo do fenômeno da arborescência. Na estratégia computacional adotada, a derivada do sinal de tensão medido $v_{total}(t)$ é obtida iterativamente por (12) e a tensão a que a região degradada está submetida é obtida por meio da solução da equação diferencial apresentada em (11), utilizando-se para tanto o método numérico de EULER, descrito em [20].

$$\frac{dv_{total}}{dt} = \frac{[v_{total}(t-1) - v_{total}(t)]}{dt} \quad (12)$$

$$v_{Rd(k+1)} = v_{Rd(k)} + \left(\frac{dv_{Rd}}{dt} \right)_k \cdot \Delta t \quad (13)$$

A partir das equações que regem o comportamento do circuito proposto, é possível calcular os parâmetros equivalentes e grandezas operacionais (tensões e correntes), como será posteriormente esclarecido através do aplicativo computacional a ser descrito neste documento.

Por fim, retomando a questão dos mecanismos associados com a busca de indicadores que venham a expressar o estado físico do isolamento de um determinado cabo isolado, procede-se, na sequência, a uma síntese dos procedimentos tradicionais e a nova proposição contemplada nesta tese.

2.5 METODOLOGIAS CLÁSSICAS PARA OS INDICADORES DE ESTADOS DE DEGRADAÇÃO DE CABOS ISOLADOS

Diversos métodos para aferir o estado de conservação de cabos elétricos de potência podem ser encontrados na literatura especializada sobre o assunto [3-20]. Algumas metodologias necessitam que o cabo esteja desenergizado e desconectado do sistema, dificultando o processo de diagnóstico do estado operacional dos cabos, enquanto que outras possibilitam que a análise seja realizada com os cabos energizados, porém, sem carga. Nesta tese serão apresentadas apenas as metodologias que possibilitam a análise das condições de degradação dos cabos isolados sem a necessidade de desenergização e desconexão dos mesmos. Salienta-se que, neste estudo será apresentado um conjunto de métodos que podem ser utilizados para a identificação do estado operacional da isolação de cabos elétricos, separados em duas categorias: os indicadores clássicos, ou seja, aqueles que já vêm sendo discutidos e analisados

por diversos grupos de pesquisa e um novo indicador proposto nesta tese de doutorado.

A seguir são apresentados os métodos mais usuais utilizados para o diagnóstico do estado operacional de cabos isolados a partir do conhecimento da corrente de fuga, que flui na camada isolante. Tais métodos apresentam como limitação o fato da distorção na corrente de fuga também estar associada à presença de tensões operacionais distorcidas, o que é muito comum nos sistemas reais e que pode conduzir a interpretação equivocada nos resultados obtidos, para fins de diagnóstico. Entretanto, tal limitação pode ser superada por meio de esforços computacionais adicionais e estratégia específica destinada a eliminar na corrente de fuga as contribuições harmônicas advindas da tensão de suprimento distorcida, conforme pode ser constatado em [9].

a) Método do Fator de Dissipação do Dielétrico ($tg\delta$) [14]

Esta estratégia de avaliação é bastante utilizada, sobretudo, porque não requer que o cabo seja desenergizado, possibilitando, assim, medições em tempo real das condições operacionais da isolação do condutor. O método fundamenta-se no fato de que quando um cabo, neste caso com isolação do tipo XLPE, é submetido a uma tensão alternada, a corrente que circula na isolação é quase que totalmente capacitiva. No caso ideal essa corrente estaria adiantada de 90° da tensão fase-terra, aplicada ao cabo. Todavia, em situações práticas, tal isolante não existe. Assim, uma pequena parcela da corrente tem a mesma fase da tensão, representando as perdas por dissipação na isolação.

A relação da corrente de perda com a corrente capacitiva, representada por $tg\delta$ (fator de perda dielétrica) é um importante indicador para avaliar as perdas na isolação. Isso porque, em geral, o fator de perdas tende a crescer com o aumento da deterioração dielétrica. O aumento nos valores desse indicador é um indicativo de que ocorreu diminuição da resistência dielétrica e, em decorrência disso, se verifica a correspondente redução da tensão de ruptura tolerável pelo

isolante. Ou seja, valores da $\text{tg}\delta$ acima daqueles permitidos pelo fabricante podem, dependendo do tempo de uso do cabo, ser indícios de envelhecimento precoce de sua isolação.

Métodos que utilizam este indicador são particularmente confiáveis nos casos onde a deterioração é uniforme. No caso de ocorrência de diferentes graus de degradação ao longo do cabo, o método não diferencia entre a existência de inúmeras arborescências com pequenas deteriorações e a incidência de poucas arborescências com deteriorações de maior significado. Dentre as limitações associadas a este método, destacam-se:

- Este indicador se apresenta em faixas de valores extremamente pequenas, o que pode trazer dificuldades para os trabalhos de medição e formação de um banco de dados;
- O ângulo medido, (δ), refere-se a um valor médio ao longo de todo o comprimento do cabo. Isso pode conduzir a diagnósticos incorretos, uma vez que níveis da $\text{tg}\delta$ em determinados pontos acima dos valores permitidos podem estar camuflados. Em outras palavras, quando os valores se apresentam dentro da faixa de tolerância não quer dizer, necessariamente, que o cabo esteja em condições operacionais perfeitas.

b) Método da Medição da Resistência de Isolação [10]

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, conforme a Figura 2.8. 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 isolamento 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 isolamento [16-18].

Portanto, trata-se de um método que permite o diagnóstico das condições operacionais dos cabos com o mesmo energizado, por meio de (14), fato que se constitui em um atrativo.

$$R = \frac{V_1^2}{P} \quad (14)$$

Onde:

V_1 – Tensão aplicada ao cabo

P – Potência dissipada

c) Método da Distorção Harmônica da Corrente de Fuga (DHT_I) [9] e [16]

A não linearidade da corrente de fuga que circula pela blindagem da isolamento de cabos pode ser explicada por teorias de descargas parciais ainda pouco exploradas. Está comprovado que, mesmo quando submetido a tensões de alimentação puramente senoidais, a corrente de fuga alternada que flui através da isolamento em cabos que apresentam degradação por arborescência, contém componentes harmônicas, notadamente de terceira ordem. Nesse sentido, quanto maior o nível de degradação tanto maior será a contribuição harmônica presente na corrente de fuga. Daí decorre a pertinência de se utilizar a distorção harmônica total dessa corrente (DHT_I), obtida por (15), como indicador do estado operacional da isolamento de cabos.

O método de medição da distorção da corrente de fuga mostrou-se muito eficiente no diagnóstico de condutores de média tensão. Além disso, esse indicador se mostrou mais sensível ao comprimento médio das arborescências do que o tgδ, sendo, portanto, muito útil em classes de tensões mais elevadas,

onde pequenas arborescências não identificáveis pelos métodos tradicionais possam representar sérios riscos para a isolação, devido ao elevado stress a que o cabo fica submetido.

$$DHT_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} * 100 \quad (15)$$

Sendo,

I_n – Valor máximo da corrente de ordem n ;

I_1 – Valor máximo da corrente fundamental;

n – Ordem da componente harmônica.

d) Componente harmônica individual da corrente de fuga (I3) e Ângulo de fase da componente de terceira harmônica (θ3) [9]

Pesquisas recentes identificaram uma estreita correlação entre o nível de degradação e o módulo e ângulo da terceira harmônica da parcela ativa da corrente de fuga. Os estudos evidenciaram que, juntamente com o aumento no nível de degradação, ocorre uma redução gradativa no valor do ângulo dessa harmônica. Contrariamente, o módulo da terceira harmônica tende a crescer com o aumento da degradação. Assim, estabelecendo-se diversas combinações desses indicadores (módulo e fase da terceira harmônica), para diferentes comprimentos e densidades de arborescências é possível definir uma curva de suportabilidade, que define o estado de conservação do cabo. Dessa forma, se o ponto correspondente ao cruzamento dos valores para o módulo e para a fase do sinal medido se encontrar abaixo dessa curva significa dizer que o cabo encontra-se em adequadas condições de operação. Caso contrário é um indicativo de que o cabo está operando em condições de risco, necessitando, portanto, atenção diferenciada ou até mesmo substituição.

e) Método da potência dissipada [9]

Outro indicador utilizado para analisar e avaliar os danos sofridos pela isolamento de cabos está relacionado à potência dissipada. Quando este parâmetro apresenta valores acima dos limites estabelecidos é um indicativo de que o isolante está perdendo suas características dielétricas, mais especificamente, sua capacidade de isolamento. Para a realização dos testes, este método não impõe a necessidade de desenergização dos cabos.

Portanto, trata-se de um método que permite o diagnóstico das condições operacionais dos cabos com o mesmo energizado, fato que se constitui em um atrativo. Para o cálculo da potência dissipada do cabo, é utilizada a equação (16).

$$P = V_1 I_1 \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (16)$$

Onde:

V_1 – Componente fundamental da tensão aplicada ao cabo;

I_1 – Componente fundamental da corrente de fuga;

θ_v – Ângulo da componente fundamental da tensão;

θ_i – Ângulo da componente fundamental da corrente.

2.6 NOVA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA O INDICADOR DE ESTADO DE DEGRADAÇÃO DE CABOS ISOLADOS

Nesta etapa do estudo é necessário evidenciar que nenhum dos indicadores apresentados anteriormente, apesar de terem como referência e ponto de partida a corrente de fuga, leva em conta a característica não linear do elemento resistivo representativo da região com incidência de arborescência, presente no modelo equivalente proposto nesta tese e detalhado anteriormente. Em virtude disso, sobressai a importância de adotar um novo indicador do estado operacional da camada isolante do cabo degradado, tendo por referência tão somente a característica não linear da arborescência ou conjunto de arborescências presentes no isolante. Vale lembrar, que o grau de não

linearidade dessa característica está associado diretamente ao nível e degradação que se deseja diagnosticar.

O método, aqui proposto, que considera a análise da não linearidade, consiste na determinação de um indicador que correlacione os valores instantâneos das tensões aplicadas à região degradada do cabo e a respectiva parcela da corrente de fuga que se estabelece no componente não linear do circuito, obtendo-se, deste modo, correlações que expressam uma maior ou menor linearidade da relação. Para o cálculo desse novo indicador utiliza-se um tratamento matemático que culmina pela caracterização do denominado Coeficiente de Correlação Linear de Pearson. Este, como esclarecido na sequência, representa uma medida do grau de relacionamento entre duas variáveis [20] e varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis; uma correlação perfeita (-1 ou 1), indica que o valor de uma variável pode ser determinado exatamente ao saber o valor da outra, no outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis.

No coeficiente de Pearson duas correlações podem ser analisadas, a “associação” e a “linearidade”. Em termos estatísticos, duas variáveis estão associadas quando elas guardam semelhança na distribuição dos seus valores; já o modelo linear supõe que o aumento ou decremento de uma unidade em uma das variáveis, gera o mesmo impacto na outra. Em termos gráficos, por relação linear, entende-se que a melhor forma de ilustrar o padrão de relacionamento entre as suas variáveis é através de uma linha reta, conforme retratado na Figura 2.10.

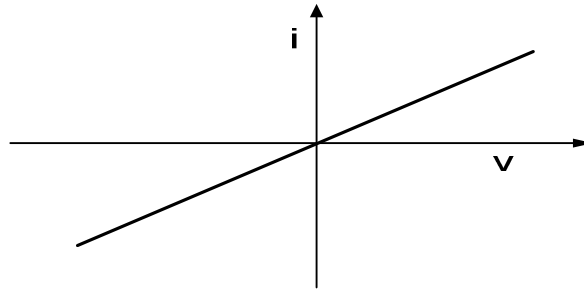


Figura 2.10 – Representação de uma relação linear perfeita entre duas variáveis.

No que diz respeito ao diagnóstico do nível de degradação de cabos isolados por meio desse novo indicador, considera-se que as grandezas a serem correlacionadas são a tensão e a corrente atreladas ao elemento não linear. Nesse sentido, a existência de uma característica não linear entre essas grandezas, retrata o nível de degradação dos cabos. Quanto maior o nível da degradação do cabo, maior a não linearidade, sendo assim, a característica levantada para um cabo em condições nominais de operação será representada por uma relação linear perfeita, onde o coeficiente de correlação linear de Pearson será igual a 1. Por outro lado, com o surgimento da arborescência, a relação entre a tensão e a corrente deixa de ser linear, conforme apresentado em Figura 2.11, e o coeficiente de correlação de Pearson diminui.

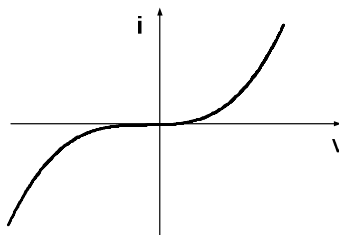


Figura 2.11 - Representação de uma relação não linear entre duas variáveis.

Para o cálculo do coeficiente de Pearson, é aplicada a seguinte equação:

$$r = \frac{\sum (xi - \bar{X})(yi - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (xi - \bar{X})^2 \sum (yi - \bar{Y})^2}} \quad (17)$$

Onde:

r – Indicador de Correlação Linear de Pearson

x_1 – Valores medidos da variável X

\bar{X} – Média aritmética da variável X

y_i – Valores medidos da variável Y

\bar{Y} – Média aritmética da variável Y

Diante do exposto, nesta etapa do trabalho surge um novo indicador que se apresenta de forma promissora para a análise do estado operacional dos cabos isolados. Neste caso, o desafio que se apresenta é a identificação de uma estratégia para determinar, com segurança, a característica não linear do elemento resistivo do modelo equivalente de cabos isolados degradados por arborescência, conhecendo-se, tão-somente, as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente de fuga total e, a partir destas informações, extrair um indicador correlacionado com o Coeficiente de Pearson, o qual será denominado por Coeficiente de Não Linearidade (ρ)

2.7 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE NÃO LINEARIDADE DE UM CABO ISOLADO

O equacionamento do circuito equivalente para um cabo degradado, apresentado no item 2.4, foi desenvolvido requerendo apenas conceitos básicos da teoria de circuitos e equacionamentos usuais de grandezas elétricas no domínio do tempo. Todavia, a determinação, dos valores dos parâmetros do circuito equivalente e da característica não linear da degradação presente na isolamento, representa uma tarefa relativamente complexa quando se dispõe apenas da medição da tensão de suprimento e da corrente de fuga total, como ocorre para as situações reais em campo.

A dificuldade maior reside na identificação de uma variável capaz de direcionar a busca dos parâmetros do circuito equivalente, incluindo a

característica não linear do elemento resistivo, e informar as condições relativas ao critério de parada (associado com o emprego de procedimentos iterativos de cálculo), assegurando assim o êxito no processo. Para contornar essa questão recorreu-se ao conceito de figuras de *Lissajous* que representa a característica tensão versus corrente no elemento. Este recurso matemático, como se sabe, produz uma figura na forma de um círculo quando da correlação entre as tensões e correntes para elementos capacitivos e indutivos. Por outro lado, em se tratando de um elemento resistivo, quando então a tensão e corrente se apresentam em fase, a figura resultante corresponde a uma linha singular, linear ou não, passando pela origem.

Isto posto, surge a ideia de se adotar a construção e avaliação da área da figura de *Lissajous* como a variável de controle do processo até se atingir uma reprodução, via circuito equivalente, dos resultados advindos das medições em campo. Ressalta-se que, com esta escolha, quando os parâmetros lineares do circuito forem estimados diferentes dos valores daqueles que produziram a corrente total medida, a área da característica tensão versus corrente, no elemento não linear será diferente de zero. Quando a área apresentar valor igual à zero, significa que o processo de busca deve ser concluído, uma vez que convergiu para valores que reproduzem a corrente total, considerando o circuito equivalente proposto.

Portanto, conhecendo-se as equações diferenciais que regem o comportamento do circuito equivalente, assim como o critério de parada do processo de busca, o próximo passo consiste em estimar os valores referentes aos componentes lineares do circuito, para então, iniciar o processo de cálculo da característica tensão versus corrente do elemento resistivo não linear e a correspondente área interna.

Para tanto, foram criadas duas rotinas de cálculo. Uma delas destina-se à obtenção das formas de onda da tensão e da corrente no elemento não linear, a

partir dos valores estimados para os parâmetros lineares. A outra se destina ao cálculo da área interna da característica tensão versus corrente em questão.

Conforme já evidenciado, quando os valores atribuídos para os parâmetros lineares R_{nd} , C_{nd} , R'_{nd} , C'_{nd} e C'_d , no processo iterativo de busca, estiverem corretos, o aplicativo computacional apresentará como resultado uma característica tensão versus corrente com área nula, a partir da qual calcula-se o Coeficiente de Pearson ou, como aqui será designado, o Coeficiente de Não Linearidade (ρ).

Em consonância com a proposta acima, o fluxograma ilustrado na Figura 2.12 apresenta, de forma simplificada, as etapas do processo avaliativo a ser realizado pelo aplicativo.

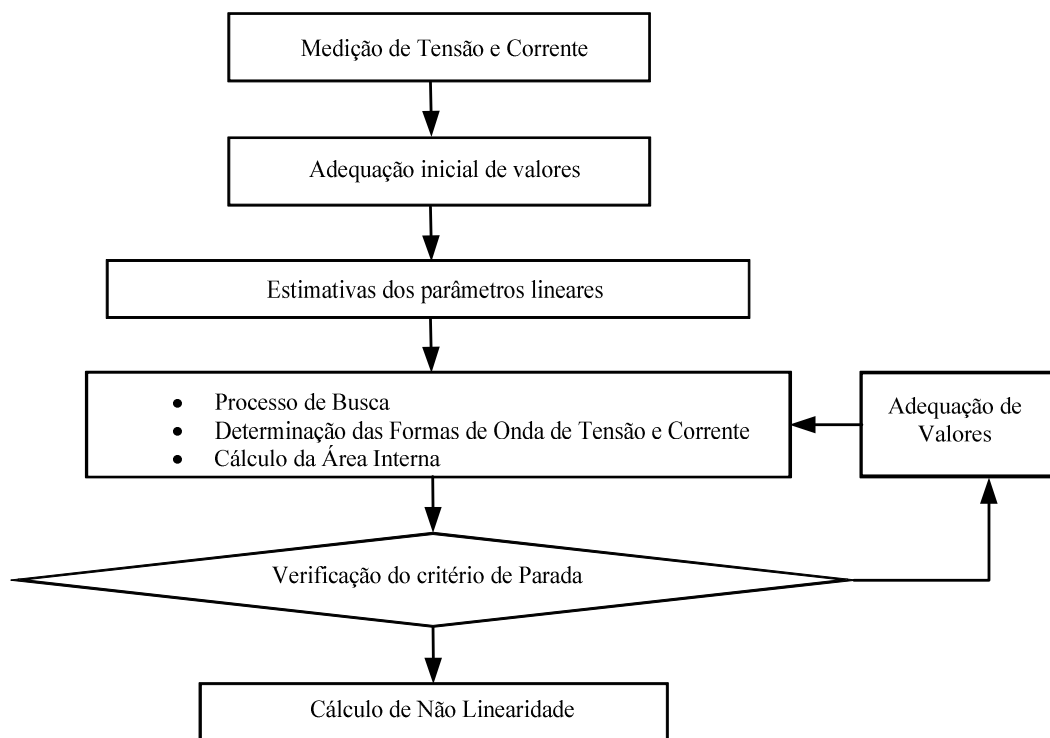


Figura 2.12– Lógica do processo avaliativo para a determinação do Coeficiente de Não Linearidade

É importante reafirmar que a metodologia aqui proposta não requer o conhecimento prévio da característica não linear associada à degradação por arborescências, tampouco da necessidade de informações sobre a parcela da corrente de fuga que circula pela parte degradada da camada isolante, podendo,

portanto, ser aplicada para análise de fenômenos outros de natureza não linear. Deve-se observar que o tratamento matemático adotado nesta proposição se restringe ao domínio do tempo.

Ressalta-se que este aplicativo, apresenta uma interface por meio da qual o usuário terá acesso ao diagnóstico do cabo analisado, via gráficos que contêm informações sobre o indicador de estado no momento requisitado, assim como a respectiva evolução histórica. Dessa forma, este aplicativo permitirá a criação de um banco de dados que disponibilizará o histórico do estado operacional dos cabos isolados de uma determinada rede de distribuição subterrânea.

2.8 FILOSOFIA PARA A ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS ELEMENTOS LINEARES DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Inicialmente optou-se por considerar nulas as correntes associadas com o resistor linear representativo da área não degradada, assim como aquela atrelada com o capacitor de fuga da área degradada. Esta hipótese se mostra apropriada em função dos valores típicos encontrados para as referidas grandezas, fato este que não compromete a qualidade dos resultados obtidos no estudo avaliativo em questão. Portanto, a rigor, o processo de busca se restringe à determinação dos parâmetros C_{nd} e C'_{nd} , enquanto que o elemento resistivo não linear será representado através da correlação entre sua tensão e corrente correspondente. Quando isto ocorrer de forma consistente, então os sinais amostrados de tensão e corrente serão reproduzidos adequadamente pelo circuito equivalente.

Para se atingir tais propósitos, a sequência de cálculos a ser realizada pelo aplicativo computacional desenvolvido compreenderá as seguintes etapas do processo iterativo estabelecido:

Etapas 1- Estimativa inicial:

Os valores iniciais para as capacitâncias C_{nd} e C'_{nd} são obtidos a partir da tensão e da corrente de fuga medidas, considerando-se que estas grandezas

sejam senoidais e se estabelecem tão apenas pelo capacitor C_{nd} . Desta maneira, uma estimativa inicial para este parâmetro é feita de acordo com a equação (18):

$$C_{nd} > \frac{I_{Tmax}}{\omega \cdot V_{Tmax}} \quad (18)$$

Note-se que esta estimativa para C_{nd} é maior do que o valor real, haja vista que a parcela de corrente que realmente circula pela porção representada por esse capacitor é menor do que a corrente total. Na sequência, o mesmo valor de C_{nd} é atribuído para o capacitor C'_{nd} , isto é:

$$C'_{nd1} = C_{nd1} \quad (19)$$

Etapa 2- Processo de Busca

Inicialmente o valor de C'_{nd} é fixado como estabelecido pela equação (19), enquanto que a grandeza C_{nd} é gradativamente diminuída até que a área interna da figura de *Lissajous* seja alterada dos altos valores negativos até valores positivos, passando, pois, necessariamente, por um valor nulo como indicado na Figura 2.13. Através de um método de ajuste fino, calcula-se, então, o valor de C_{nd} até que a área interna tenda a zero. Uma vez atingido este ponto, o valor de C_{nd} passa a ser considerado constante e um novo processo de busca é iniciado variando-se o parâmetro C'_{nd} visando se atingir, mais uma vez, a área nula. O processo é repetido diversas vezes até uma situação tal que haja um conjunto de pares de valores dos parâmetros C_{nd} e C'_{nd} que resultam em área interna praticamente nula.

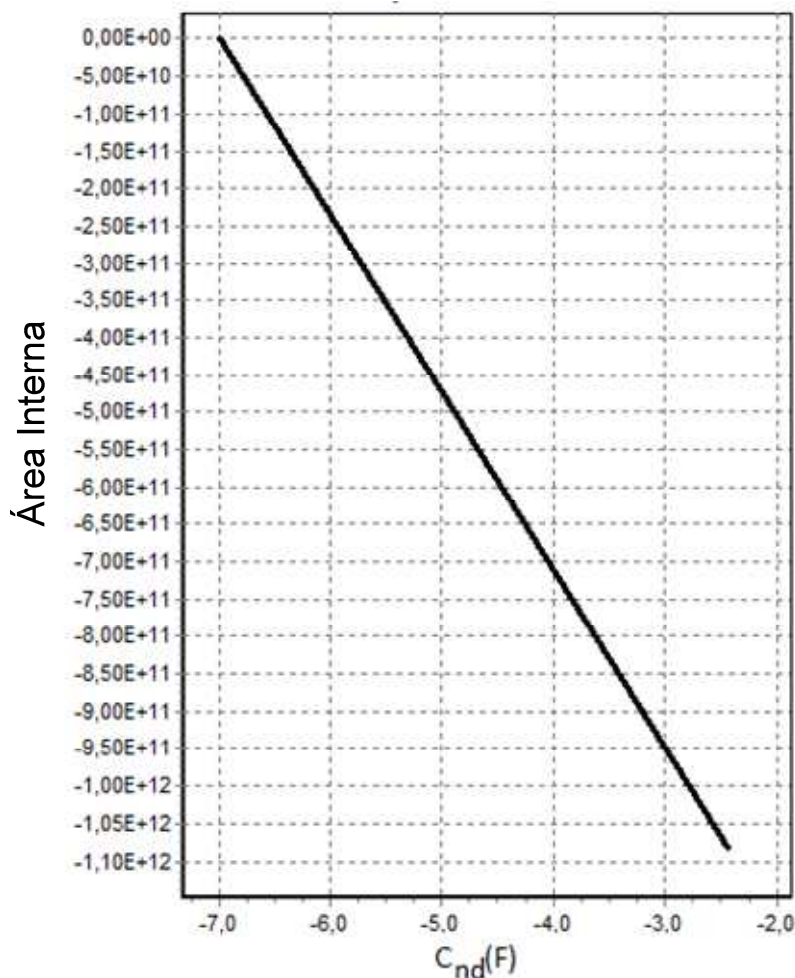


Figura 2.13 – Comportamento da área da figura de Lissajous durante o processo de busca fixado o capacitor C'_{nd} e variando o capacitor C_{nd}

A Figura 2.14 apresenta o comportamento completo do processo de busca, ilustrando situações intermediárias e a final quando se obtém os valores de C'_{nd} e C_{nd} que representam o circuito equivalente que reproduz as grandezas medidas. Para a situação final constata-se que, mesmo fixando um dos parâmetros e variando-se o outro, as áreas serão mantidas nulas.

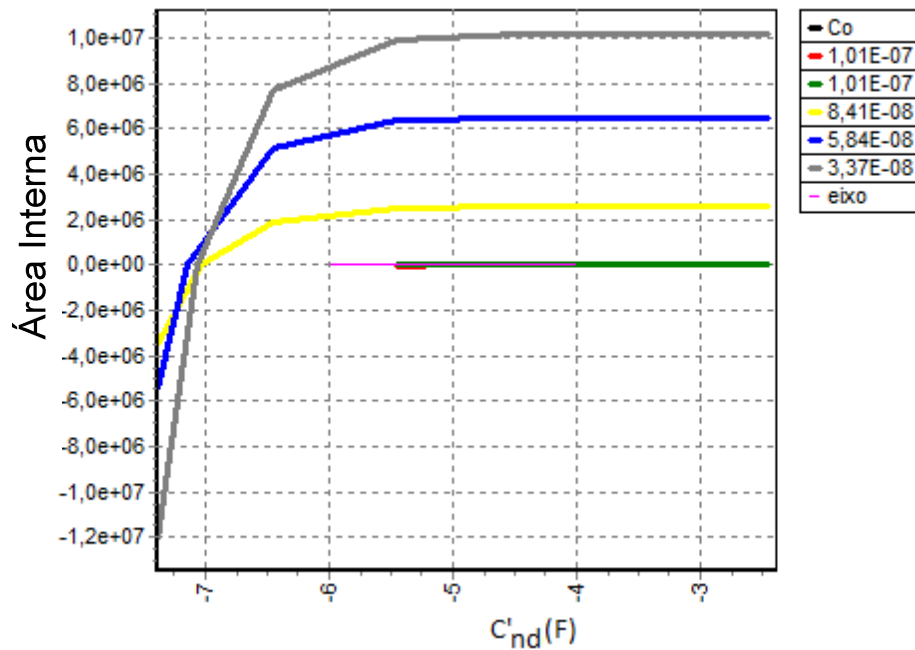


Figura 2.14 – Ilustração do processo de busca até a consolidação dos parâmetros finais para o circuito equivalente que reproduz a tensão e corrente medida.

2.9 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Com o propósito de validar a estratégia concebida, procedeu-se, nesta etapa dos trabalhos, a uma metodologia computacional destinado a representar duas situações hipotéticas e representativas de dois circuitos elétricos, um deles constituído apenas por elementos lineares e outro composto por elementos lineares e um único componente não linear. Estes arranjos foram implementados no programa ATPDraw objetivando ilustrar a aplicabilidade do processo supra descrito.

Sintetizando a estratégia aqui considerada, os trabalhos de validação foram realizados dentro da seguinte sequência:

- Definição e parametrização de dois circuitos para fins da representação de duas situações vinculadas com os objetivos desta

- pesquisa, a saber: um para representação das condições ideais para os cabos e outra com a inserção de trechos degradados;
- ii. Implementação dos circuitos, como já referido, no simulador ATP;
 - iii. Aplicação de tensão de suprimento senoidal e avaliação computacional das correntes correspondentes, em consonância com as informações que seriam extraídas das medições em campo;
 - iv. A partir das formas de onda das tensões e correntes aplicar o processo estabelecido de forma a calcular os parâmetros que compõem os circuitos estabelecidos, para os quais, de antemão, são conhecidos os valores;
 - v. Por fim, objetivando a ilustração dos valores dos indicadores de estado, os distintos métodos são empregados para os respectivos cálculos das suas grandezas correspondentes e responsáveis pelo processo do diagnóstico em questão.

As Figura 2.15 e 2.16 são indicativas dos circuitos utilizados para as simulações computacionais. A primeira associada com um complexo linear e a segunda contendo a mencionada não linearidade.

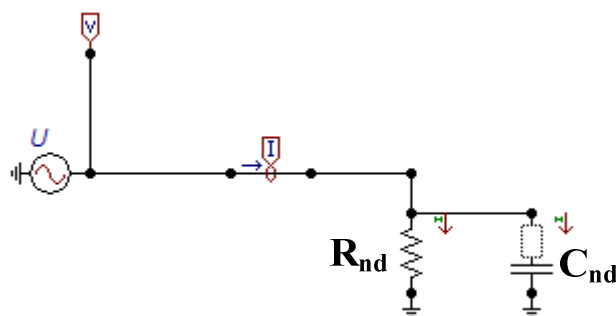


Figura 2.15– Circuito hipotético contendo apenas elementos lineares

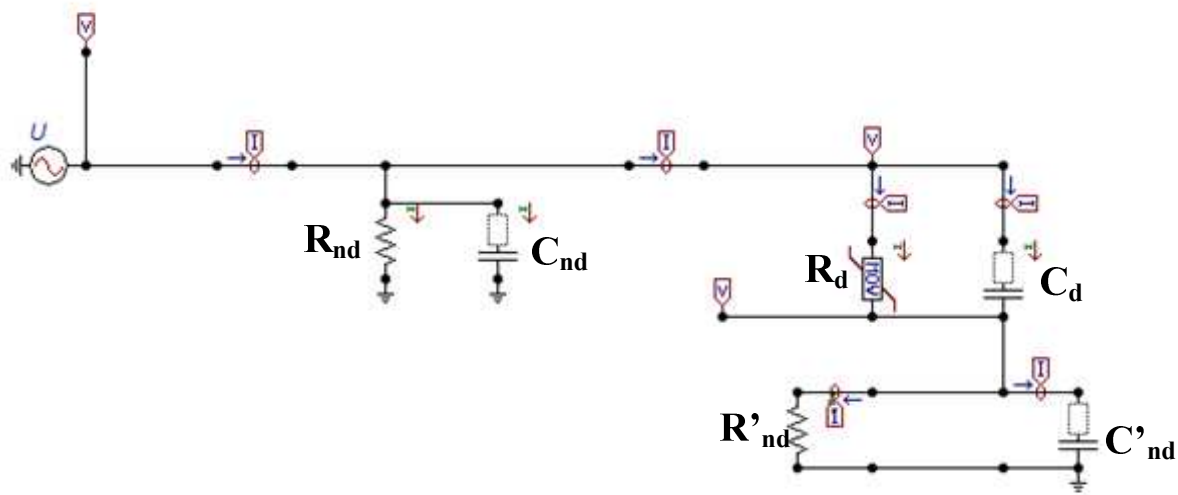


Figura 2.16– Circuito hipotético contendo elementos lineares e um elemento não linear.

Os valores para os parâmetros dos elementos constantes nas figuras encontram-se indicados Tabela 2.1 e Tabela 2.2. A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros de simulação utilizados

Tabela 2.1- Parâmetros adotados para os componentes do circuito 1

Parâmetros	Valores de simulação
C_{nd}	0,075 μF
R_{nd}	22,3 k Ω

Tabela 2.2 Parâmetros adotados para os componentes do circuito 2

Parâmetros	Valores de simulação
C_{nd}	0,075 μF
R_{nd}	22,3 k Ω
C_d	0,035 μF
C'_{nd}	0,035 μF
R'_{nd}	15 k Ω

Tabela 2.3 -Parâmetros adotados para a simulação

Parâmetros	Valores de simulação
Passo de integração	0,13 ms
Amplitude da fonte de tensão (valor de pico, fase-neutro)	11,267 kV
Frequência da fonte de tensão	60 Hz
Ângulo de fase	0°

As formas de ondas da tensão aplicada e da corrente resultantes da simulação para o caso do circuito linear e não linear são apresentadas, respectivamente, nas Figura 2.17 e Figura 2.18.

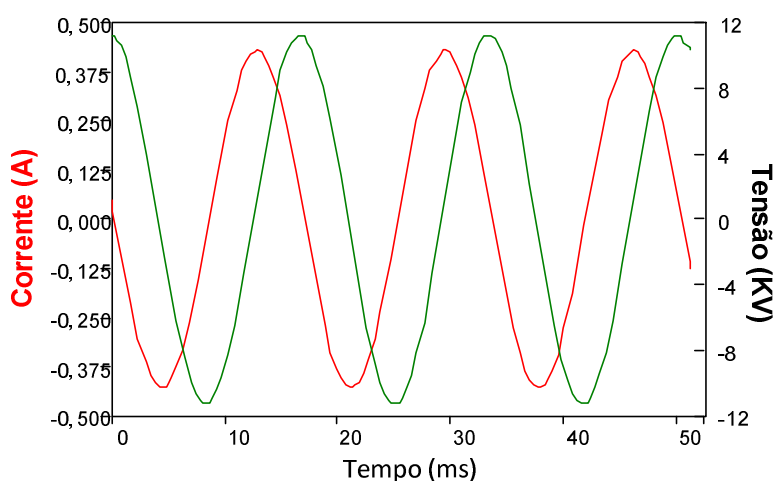


Figura 2.17 – Forma de onda da tensão e corrente do circuito linear.

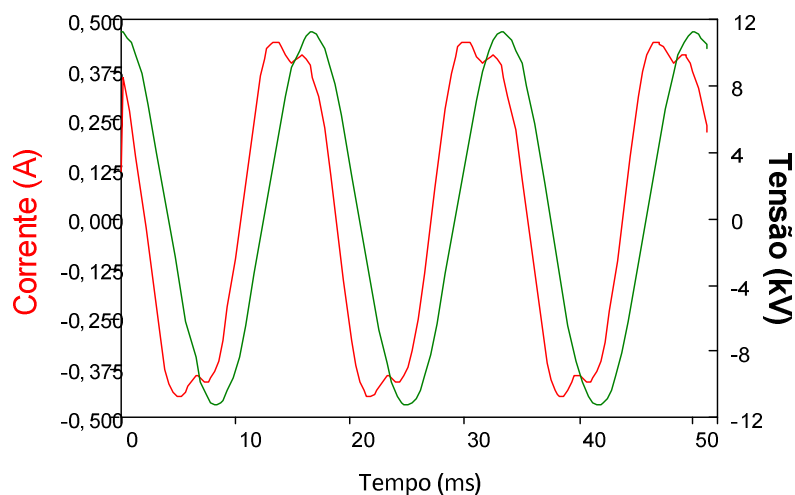


Figura 2.18– Formas de onda da tensão e corrente do circuito não linear

Analizando as formas de ondas de tensão e corrente obtidas para ambos os casos, percebe-se que, para o primeiro caso, elas se apresentam puramente senoidais e defasadas de 90° , caracterizando um desempenho típico de arranjos lineares com predominância do elemento capacitivo. Por outro lado, a forma de onda referente ao segundo caso simulado se apresenta com um comportamento em consonância com as expectativas, visto a presença de um elemento não linear. Esta situação, como já afirmado, busca refletir uma condição associada com a operação de um cabo isolado com degradação.

Utilizando as formas de onda supra apresentadas e aplicando-se a metodologia de busca para a determinação dos parâmetros dos circuitos equivalentes que reproduziriam as mesmas, chega-se aos valores constantes nas Tabela 2.4 e Tabela 2.5. Dentro do estabelecido no princípio do processo de busca, apenas as capacitâncias são consideradas nos cálculos.

Tabela 2.4 Parâmetros calculados para os componentes do circuito 1 – via aplicativo computacional

	ATP	Aplicativo	Erro (%)
C_{nd} (F)	7,5e-8	7,5e-8	0,0

Tabela 2.5 Parâmetros calculados para os componentes do circuito 2 – via aplicativo computacional

	ATP	Aplicativo	Erro (%)
C_{nd}	7,5e-8	7,5e-8	0,0
C'_{nd}	3,5e-8	3,5e-8	0,0

Como pode ser observado, os valores determinados para as capacitâncias são exatamente aqueles estabelecidos na parametrização inicial do circuito, fato este que comprova a eficácia da metodologia proposta.

Somado às constatações anteriores e avançando na direção da determinação do novo indicador de estado, as características associadas com a

relação $V=f(I)$ que oferecem meios para a definição do Coeficiente de Não Linearidade (ρ) através da relação tensão versus corrente no elemento resistivo, para cada caso, estão ilustradas nas Figura 2.19 e Figura 2.20. Os gráficos identificados por (a) são derivados diretamente dos resultados das tensões e correntes fornecidas pelo ATP, enquanto que os caracterizados por (b) são proporcionados pelo aplicativo de análise aqui desenvolvido.

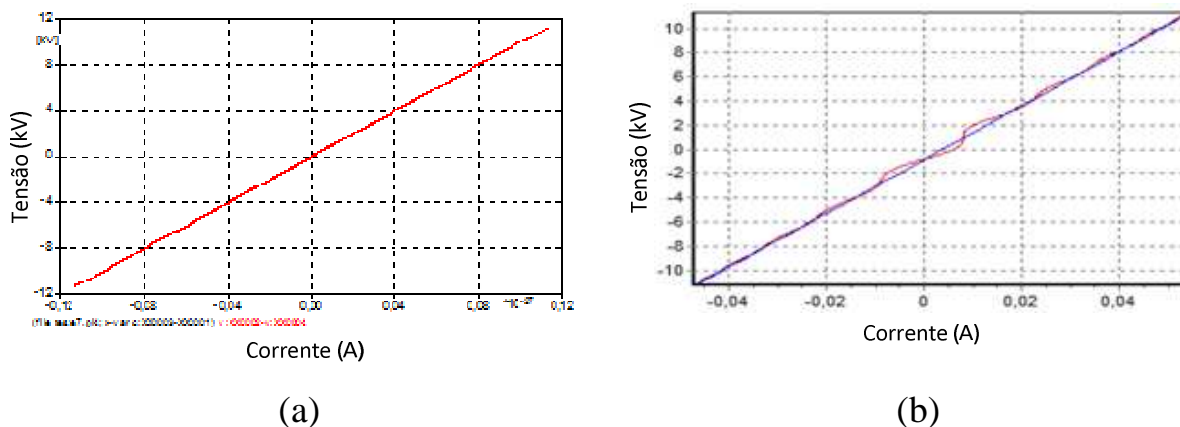


Figura 2.19 – Relação Corrente x Tensão – Caso 1: a) Simulador ATP; b) Aplicativo Computacional

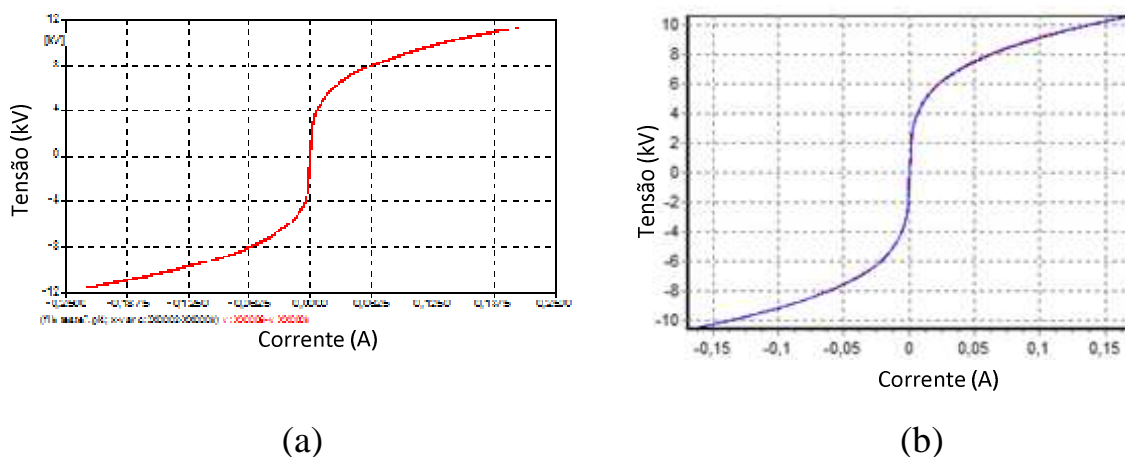


Figura 2.20 – Relação Corrente x Tensão – Caso 2: a) Simulador ATP; b) Aplicativo Computacional.

Conforme pode ser verificado, tais resultados validam a metodologia proposta e ainda evidenciam, com clareza, a não linearidade presente para o circuito 2.

2.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou a modelagem dos cabos elétricos isolados, um novo indicador para a análise do estado operacional dos mesmos e a metodologia para determinação dos parâmetros almejados. Nessa perspectiva, destacam-se as principais tarefas executadas até o presente momento:

- Definição e equacionamento do modelo elétrico representativo de cabos isolados do tipo XLPE, tanto para a condição ideal, ou seja, sem degradação, como também o modelo elétrico representativo de cabos isolados com a presença de degradações provenientes da arborescência.
- Apresentação dos indicadores de estado clássicos que serão utilizados na análise do estado de degradação dos cabos isolados.
- Proposição de um novo indicador de estado que expressa o nível de degradação da camada isolante por meio da correlação entre a tensão aplicada e a corrente de fuga que circula na região deteriorada do cabo isolado.
- Estabelecimento de uma estratégia para determinação dos parâmetros do circuito equivalente de cabos degradados pelo fenômeno da arborescência;
- Validação computacional do processo proposto.

Capítulo III

SOFTWARE PARA DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Focando, especificamente, os procedimentos aplicáveis quando da manifestação da arborescência, os estudos têm demonstrado que, mesmo quando a tensão de suprimento é puramente senoidal, a corrente de fuga que flui entre a superfície do condutor e a blindagem da isolação de um cabo apresenta um comportamento não linear, com conteúdo harmônico considerável e característico. Nesse sentido, a predominância da componente harmônica de terceira ordem na corrente de fuga, em virtude deste fenômeno, é significativa, como ressaltado no capítulo anterior ao presente.

Tendo em mente que uma das propriedades físicas consideradas anteriormente, a qual remete para o fato que a degradação por arborescência, via de regra, encontra-se atrelada com a área do isolante atingida, e ainda, se apresenta com um expressivo nível de não linearidade, disto desprende ser recomendável que, adicionalmente aos indicadores clássicos, o diagnóstico também utilize grandezas representativas desta correlação entre as tensões aplicadas aos cabos e suas respectivas correntes de fuga. Nesse contexto, o Coeficiente de Não Linearidade se apresenta como um fator avaliativo que

complementa o processo de análise, oferecendo, assim, meios mais confiáveis e seguros para o diagnóstico aqui requerido.

O presente capítulo contempla as seguintes atividades:

- Apresentação do software de análise para cálculo do Coeficiente de Não Linearidade;
- Diagnóstico de amostras de cabos apresentando diferentes níveis de degradação, a partir da corrente de fuga obtida em laboratório;
- Diagnóstico de cabos com diferentes tempos de utilização, a partir da corrente de fuga obtida em campo.

3.2 SOFTWARE DE ANÁLISE

A metodologia definida anteriormente foi materializada num aplicativo computacional através do qual pode-se reconhecer uma interface que propicia ao usuário acesso ao processo de análise via gráficos e tabelas, representando formas de onda, espectros de frequência de correntes e tensões, parâmetros equivalentes, figuras de *Lissajous*, processo de busca, etc.. Essas serão contempladas nas seções subsequentes, que ilustram as etapas do processo, a utilização do programa, as telas de resultados, etc. Assim sendo, além do aspecto didático, as descrições se apresentam centradas na lógica de uso do programa, tal como um tutorial para a aplicação do mesmo ao processo de análise.

3.2.1 – EXECUÇÃO DO PROGRAMA

Para a execução do programa é necessário que seja dado dois cliques no arquivo de instalação (“Análise de Degradação de Cabos.exe”), o qual é indicado na figura a seguir.

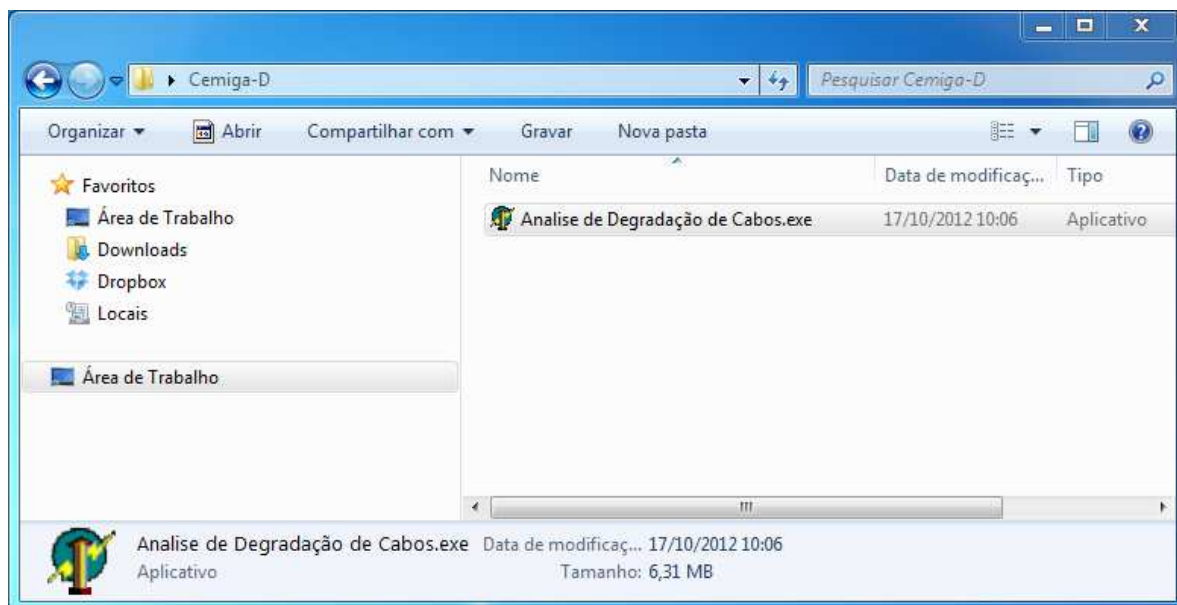


Figura 3.1- Arquivo de execução do programa.

3.2.2 – TELAS DE IDENTIFICAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao executar o programa, a tela inicial se apresenta na forma indicada na Figura 3.1 Como se constata, as primeiras informações se apresentam na forma de duas colunas, as quais serão pormenorizadas a seguir.

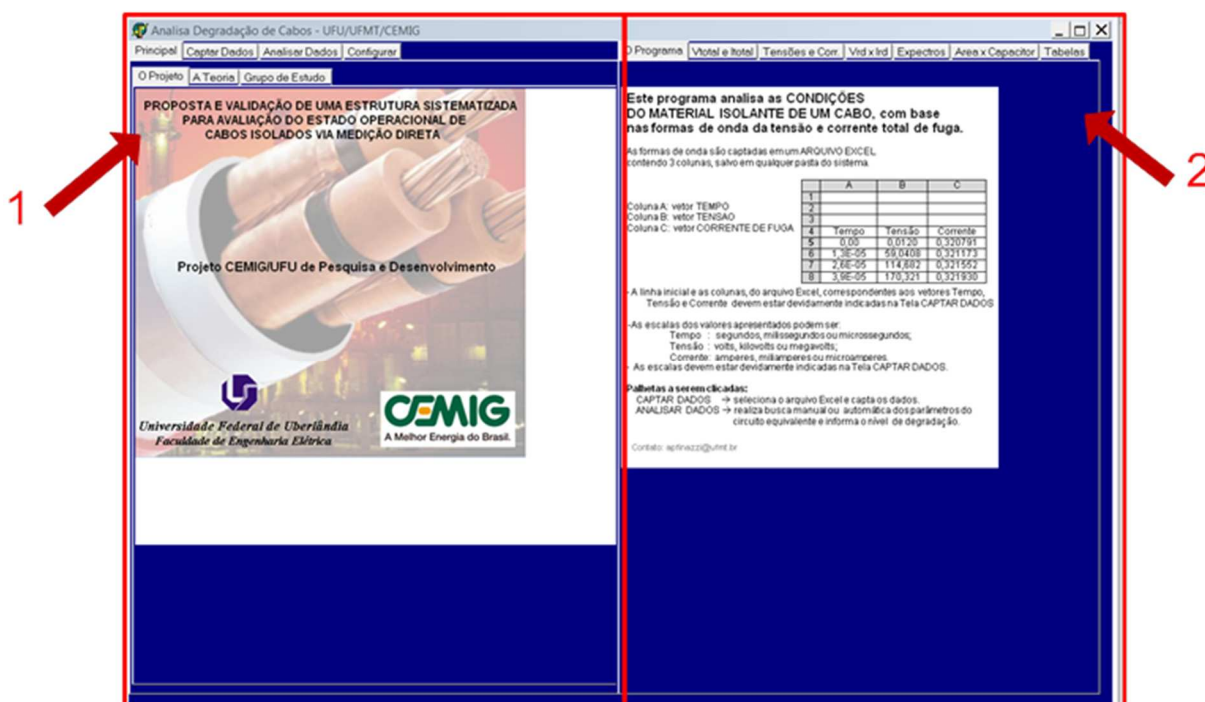


Figura 3.2 – Tela inicial do programa - colunas 1 e 2.

Ao selecionar a aba **Principal** e a subaba **O Projeto**, tem-se a identificação do projeto de pesquisa firmado entre a CEMIG e a Universidade Federal de Uberlândia, conforme Figura 3.2



Figura 3.3 – Identificação do Projeto de Pesquisa.

Também na aba **Principal**, encontra-se a subaba **Teoria**, onde são apresentados os principais conceitos atrelados com o tema focado. A motivação que originou a inserção de uma síntese dos principais conceitos ora apresentados se apoia na busca de meios para que o usuário possa melhor compreender o tema, o fenômeno, a estratégia utilizada, os resultados obtidos, etc.. Todos estes pontos foram detalhadamente explorados em capítulos anteriores ao presente, desta forma, apenas um resumo é apresentado para contextualização do usuário do programa.

As telas subsequentes contemplam:

- **Conceitos físicos sobre a constituição dielétrica de cabos**, Figura 3.4;
- **Circuito Equivalente**, Figura 3.5;
- **Resistência Não Linear**, Figura 3.6;

- *Método de Cálculo*, Figura 3.7.

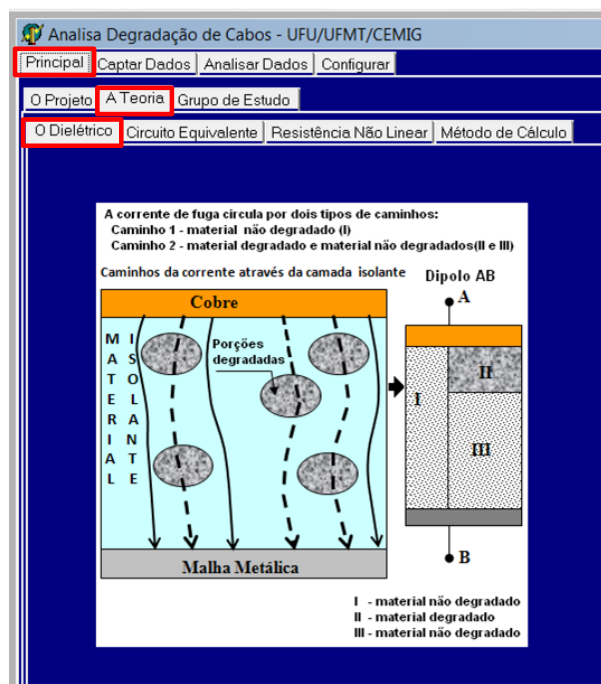


Figura 3.4 – Conceitos físicos sobre a constituição dielétrica de cabos.

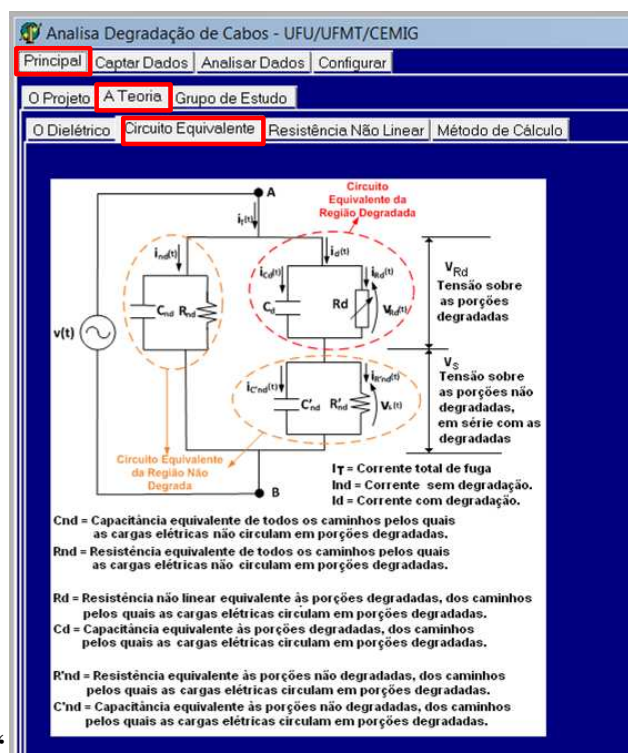


Figura 3.5 – Circuito equivalente.

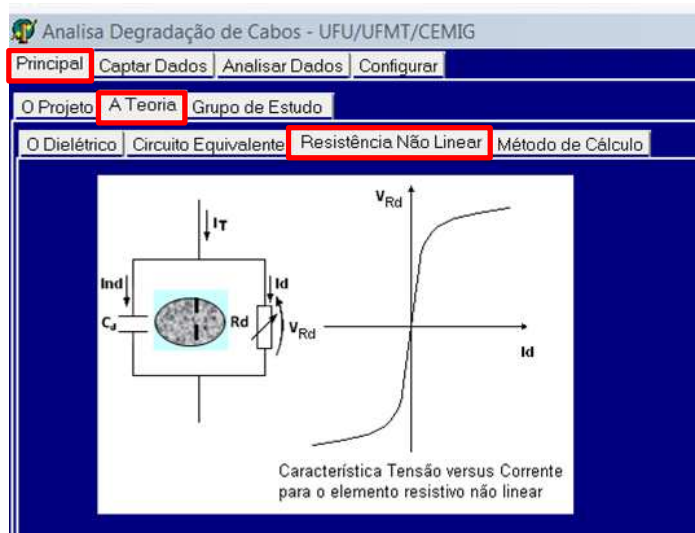


Figura 3.6 – Resistência não linear.

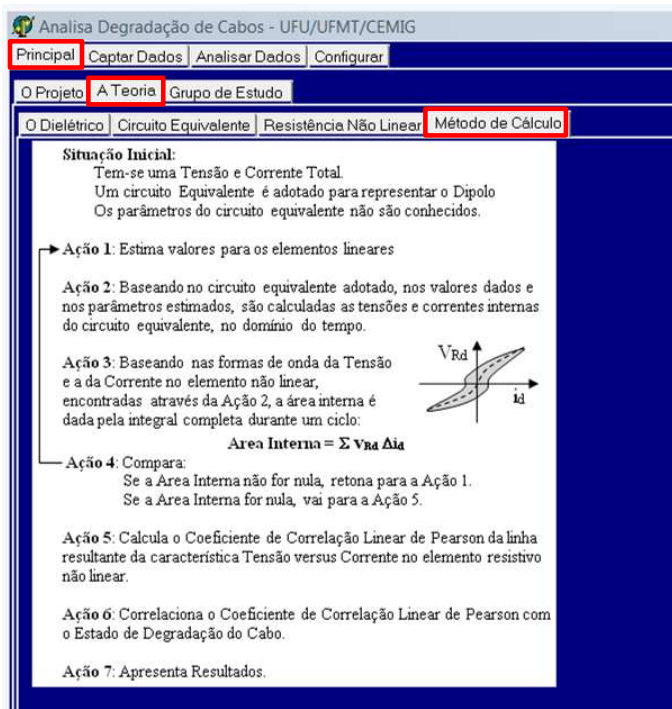


Figura 3.7 – Método de cálculo.

Complementarmente, ainda na aba **Principal**, encontra-se a subaba **Grupo de Estudo**, a qual identifica o grupo de trabalho.



Figura 3.8 – Grupo de Pesquisa.

3.2.3 – TELAS DE EXECUÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO

A partir da Figura 3.9 são apresentadas as abas atreladas ao processo de análise dos vetores de dados referente a tensão aplicada e corrente de fuga obtidos através de medições.

Iniciando pela Figura 3.10, esta apresenta a tela ***Captar Dados***. Esta função consiste no processo de seleção do arquivo a ser analisado, o qual, como acima referido, se apresenta na forma de vetores de tensão e correntes advindos de registros laboratoriais ou em campo. Clicando no botão “***Capta Arquivo Excel***”, abre-se uma janela onde é possível selecionar o arquivo desejado.

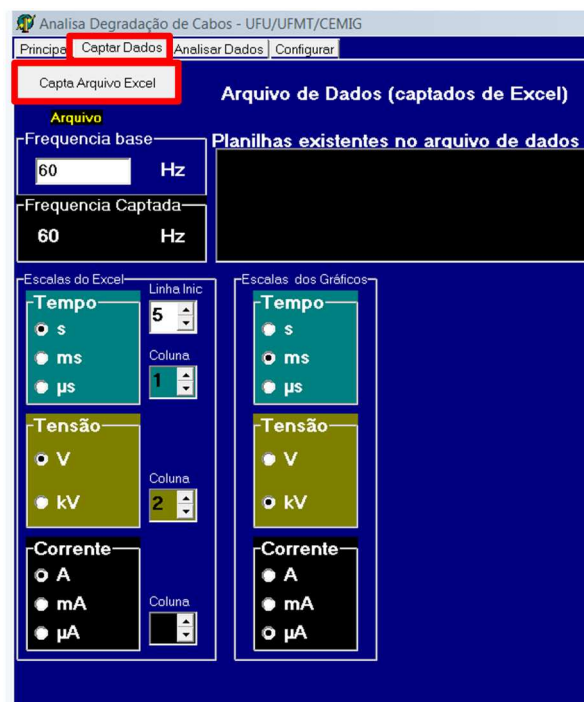


Figura 3.9 - Captação e parametrização dos dados.

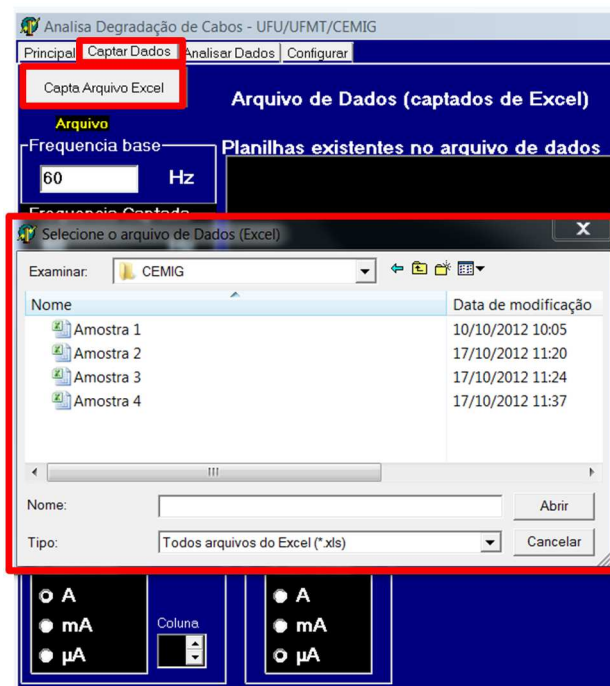


Figura 3.10 – Seleção do arquivo.

Após a seleção do arquivo que se deseja analisar, procede-se ao carregamento das informações provenientes do arquivo selecionado e, sequencialmente, é iniciado o processo de cálculo.

Visando atender aos procedimentos para se obter o resultado final esperado, qual seja, o Coeficiente de Não Linearidade, o usuário deverá seguir os seguintes passos:

- Acessar a aba *Analisar Dados*;
- Acessar a subaba *Buscas*;
- Clicar no botão *Pesquisar*;
- Resultado do Coeficiente de Não Linearidade.

Após clicar no botão “*Pesquisar*” o programa carregará a tela indicada na Figura 3.11

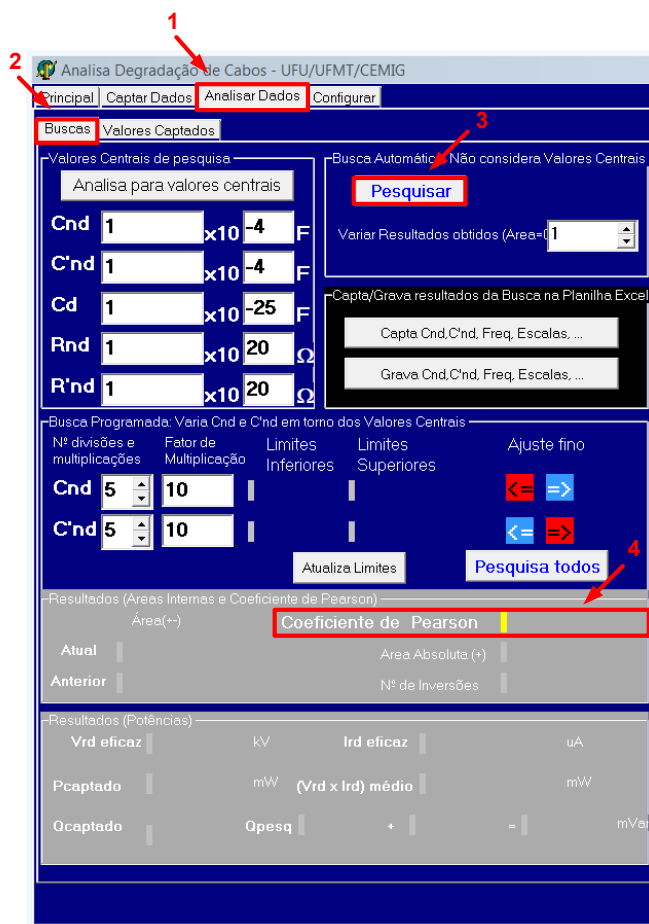


Figura 3.11- Análise de dados.

A subaba *Valores Captados*, apresenta as informações referentes à medição analisada, com os valores eficazes de tensão e corrente, assim como os

valores dos parâmetros do circuito elétrico equivalente nos termos estabelecidos pela teoria desenvolvida para o método da avaliação do estado de degradação do cabo através do Coeficiente de Não Linearidade.

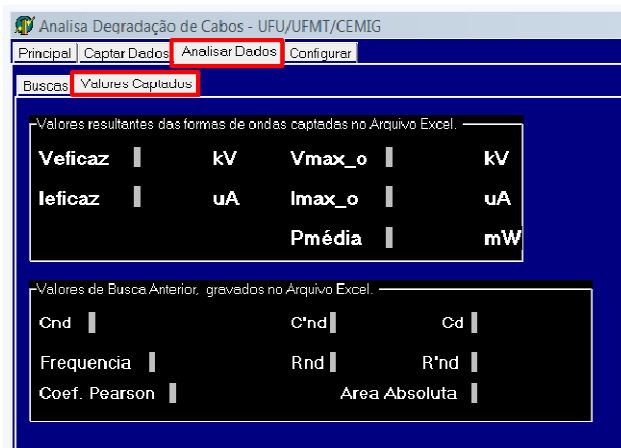


Figura 3.12- Valores Captados.

Na aba **Configurar**, Figura 3.13, encontram-se as opções de programação para condições quando houver necessidade de alteração dos valores dos parâmetros calculados, fato este que se justifica para as situações em que ocorre falha no processo de convergência do método. Nessa aba encontram-se parâmetros pré-definidos de simulação, podendo os mesmos ser alterados quando houver necessidade.

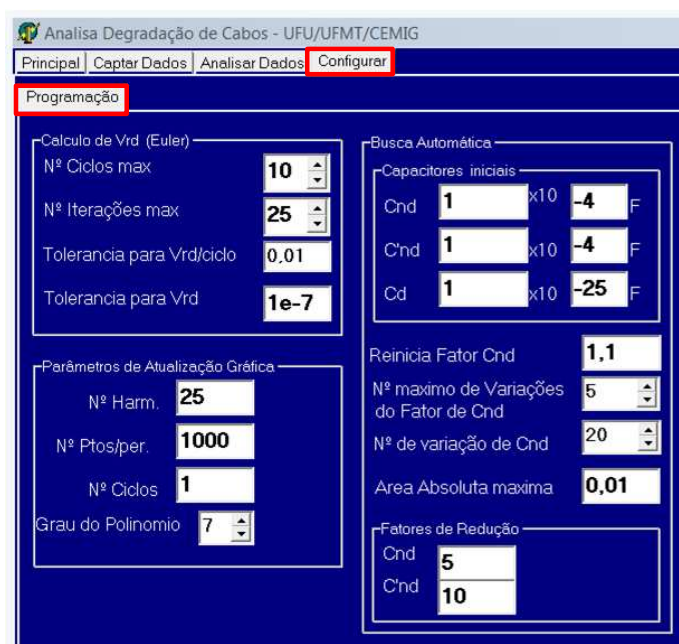


Figura 3.13- Configuração.

3.2.4 – TELAS DE RESULTADO

Quanto ao conjunto de resultados oferecidos pelo software desenvolvido este compreende:

- V_{total} e I_{total} - tensão e corrente totais - Figura 3.14;
- *Tensões e Corr.* - tensão e corrente atreladas com a parte degradada do cabo - Figura 3.15;
- $V_{rd} \times I_{rd}$ – correlação entre a tensão e a corrente associada com o elemento não linear equivalente à área degradada - Figura 3.15;
- *Espectros* – espectro harmônico da tensão e da corrente associadas com o componente não linear equivalente - Figura 3.16;
- *Area x Capacitor* - área da figura de *Lissajous* durante o processo de busca, em função das seleções dos parâmetros capacitivos - Figura 3.17;
- *Tabelas* - resultados obtidos para o arquivo da tensão e corrente selecionado - Figura 3.18.

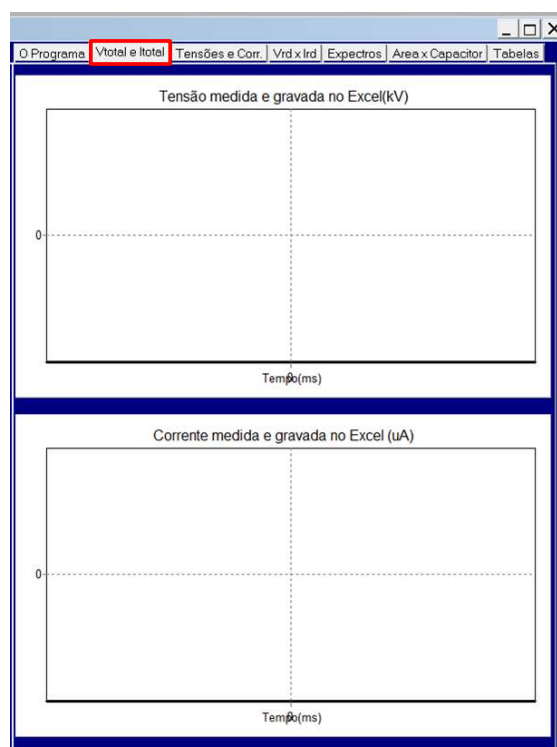


Figura 3.14- Tensão e Correntes totais.



Figura 3.15 - Tensão e corrente atreladas com a parte degradada do cabo.

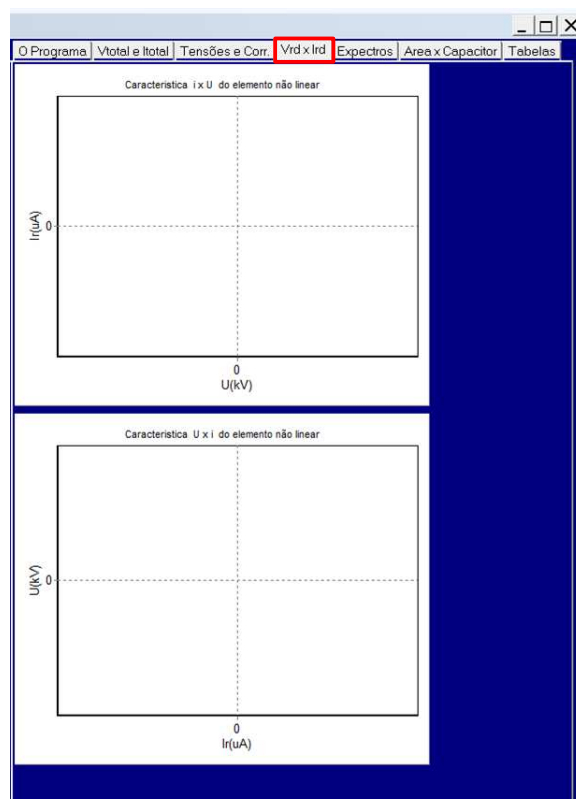


Figura 3.16- Correlação entre a tensão e corrente associada com o elemento não linear equivalente à área degradada.

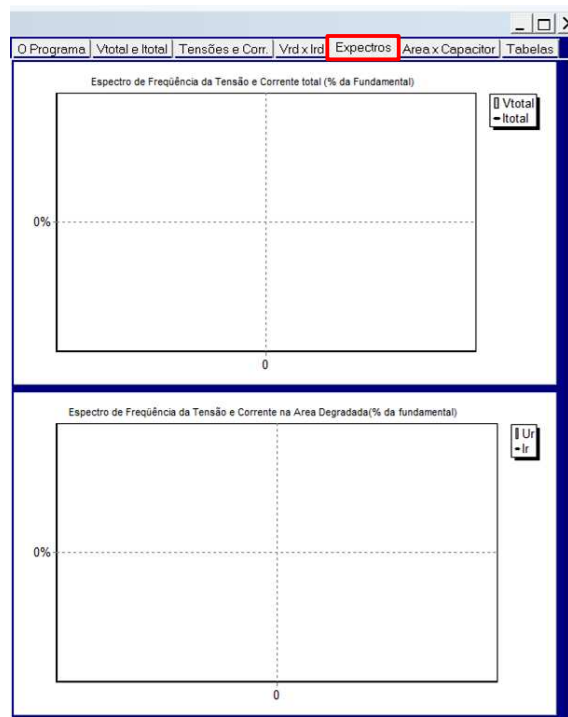


Figura 3.17- Espectro harmônico da tensão e corrente associadas com o componente não linear equivalente.

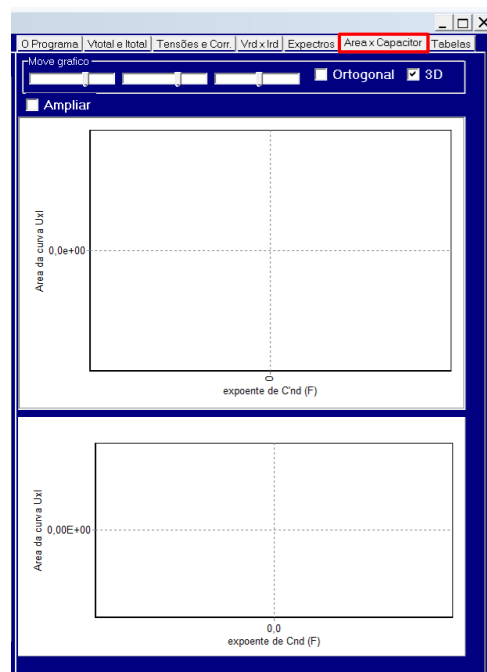


Figura 3.18 – Área da figura de Lissajous durante o processo de busca, em função das seleções dos parâmetros capacitivos.

No que tange a aba **Tabelas**, ilustrada na Figura 3.19, esta apresenta os resultados do arquivo captado através das seguintes informações:

- *Dados captados;*
- *Valores Instantâneos;*
- *Coeficientes Harmônicos;*
- *Resultados da Busca.*

The screenshot displays a software window with a menu bar at the top containing: 'O Programa', 'Vtotal e Itotal', 'Tensões e Corr.', 'Vrd x Ird', 'Expectros', 'Area x Capacitor', and 'Tabelas'. Below the menu bar is a tabbed interface with four tabs: 'Dados Captados', 'Valores Instantâneos', 'Coef. Harmonicas', and 'Resultados da Busca'. The 'Resultados da Busca' tab is active. The main area of the window contains input fields for parameters: 'Limites de um Período captado' with 'T0=' and 'Tf=' (both followed by 'ms' and empty boxes), 'N0=' and 'N2=' (both followed by empty boxes); and another 'Limites de um Período captado' section with 'PerMed=' (followed by an empty box and 'ms') and 'Npt=' (followed by an empty box). Below these fields is a large table with a blue header row and several empty rows, indicating it is ready to display search results.

Figura 3.19 - Resultados

3.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO APLICATIVO – ETAPA 1

Objetivando estabelecer uma base de referência para investigações voltadas para o processo avaliativo do desempenho do software elaborado, assim como também oferecer meios para uma primeira etapa do processo de validação da ferramenta e do método como um todo, optou-se, pelo emprego de um conjunto de dados apresentados em [16]. Estes refletem pesquisas realizadas por um grupo de trabalhos envolvido com o tema central desta pesquisa e, através de levantamentos experimentais, fornecem correntes de fuga obtidas para distintas amostras de cabos, controladamente submetidas a situações de agressão física aos seus dielétricos, visando, sobretudo, a extração de correntes

de fuga correlatas aos diferentes níveis de degradação impostos. A Figura 3.20 sintetiza os resultados finais atrelados com amostras da isolamento de cabos à base de XLPE, de 0,5 mm, submetidos a uma tensão de 1 kV, com frequência de 50 Hz, como dito, sob reconhecidas condições de deterioração de seus dielétricos. Ressalta-se que, para provocar o surgimento das arborescências, parte do material amostrado foi mantido imerso em uma solução de 1 mol/l de NaCl e submetida a uma tensão de 3 kV, por um período de 100, 300 e 500 horas, respectivamente.

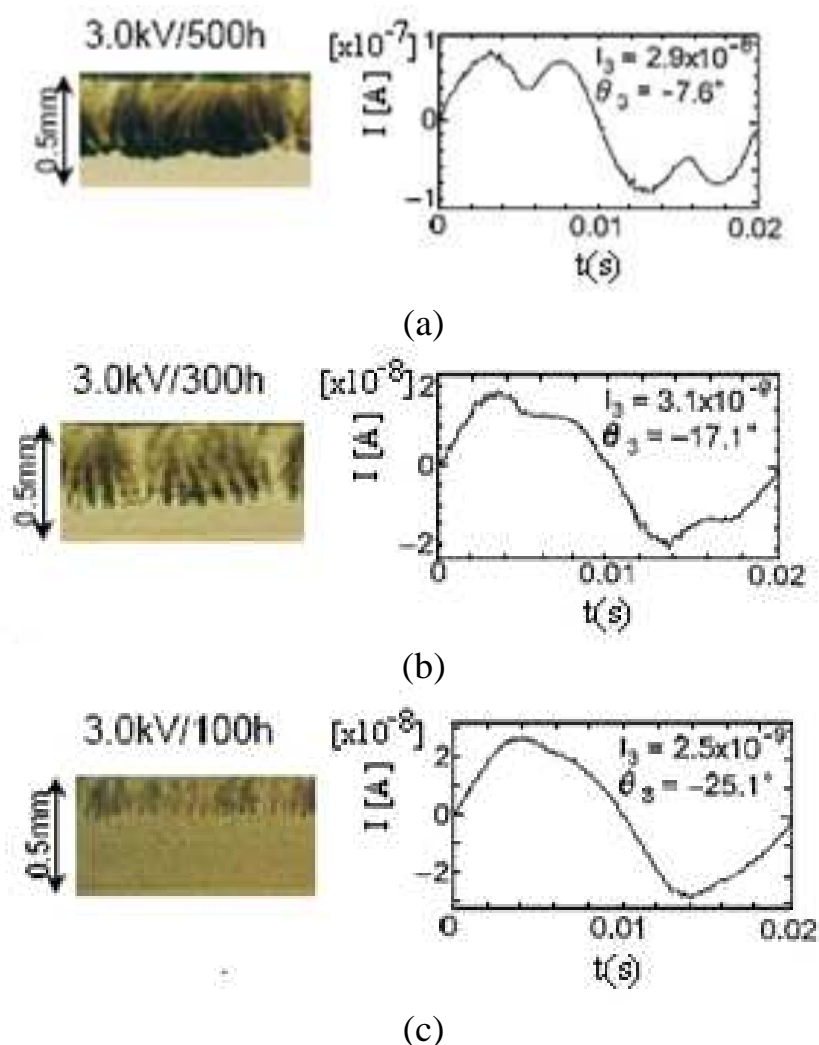
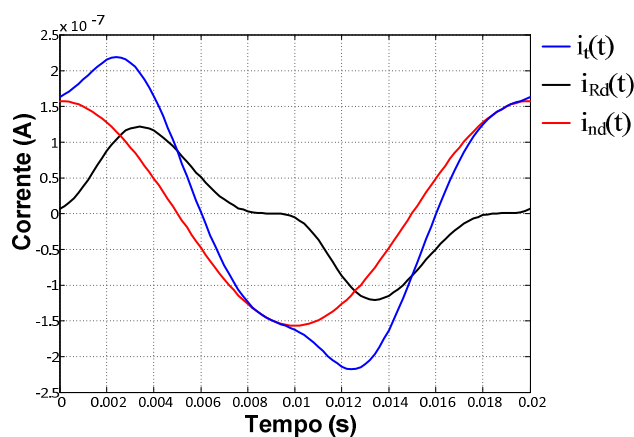


Figura 3.20 – Corrente ativa de fuga devido ao stress causado por:
(a) 3 kV/500h (b) 3 kV/100h (c) 3 kV/300h – Resultados experimentais
apresentados em [19].

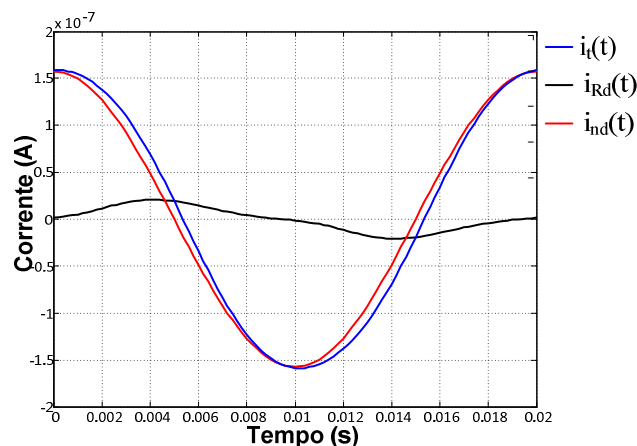
Deve-se ressaltar que os resultados apresentados em [19] evidenciam tão somente as formas de onda da corrente de fuga. Nesse sentido, para os propósitos desta tese, foi necessário o desenvolvimento de um aplicativo computacional que, a partir das formas de onda apresentadas em [19], possibilitasse a aquisição dos respectivos dados, os quais se constituem por vetores de tempo, tensão e corrente. Basicamente, tal aplicativo realiza a varredura das figuras fornecidas, obtendo os pontos necessários para a reprodução da forma de onda em um intervalo pré-definido.

Tendo em vista que os trabalhos acima reportados se fundamentaram num método que utilizou tão apenas as parcela ativa das correntes de fuga, para que houvesse consonância com os procedimentos estabelecidos pela presente pesquisa, isto impôs a necessidade de uma recomposição das correntes de fuga anteriormente mostradas de forma tal a compreender tanto a parcela capacitiva como a ativa destas grandezas, como realizados em [9].

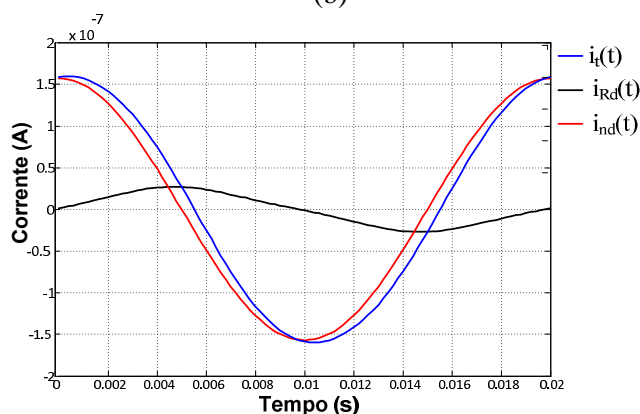
Nestes termos, a Figura 3.21 é indicativa das correspondentes correntes associadas com as amostras de cabos utilizadas em [19], em que pese as adequações para que as mesmas viessem a contemplar a corrente total de fuga.



(a)



(b)

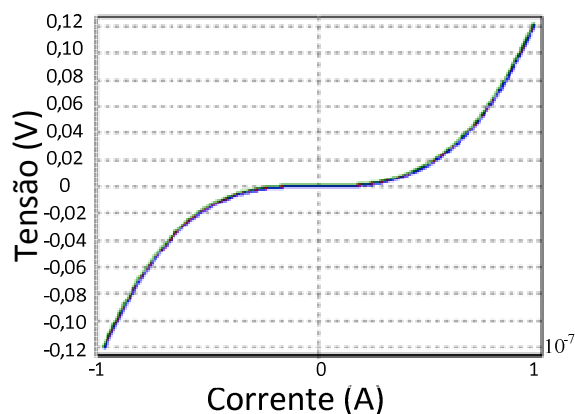


(c)

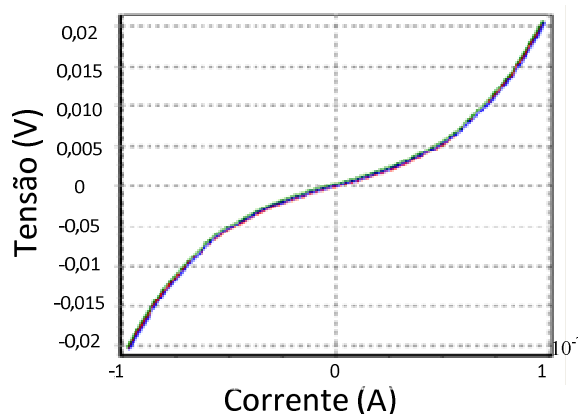
Figura 3.21 - Corrente total de fuga devido ao stress causado por:

(a) 3 kV/500h (b) 3 kV/300h (c) 3 kV/100h.

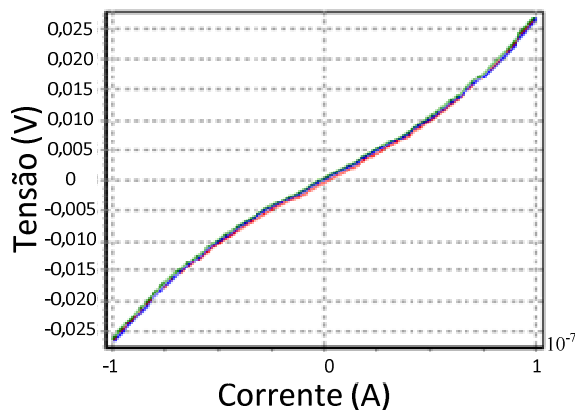
As respectivas características $v_{Rd}(t) \times i_{Rb}(t)$ para os valores finais de C'_{nd} e de C_{nd} para cada caso estão apresentadas na Figura 3.22. Destaca-se, conforme esperado, que a característica do caso (a) é indicativa de cabos com forte degradação por arborescência, fato este evidenciado no elevado grau de não linearidade observado. Ainda, observando-se os resultados apresentados constata-se que as amostras relativas aos casos (b) e (c) apresentam menores níveis de degradação da camada isolante, comparativamente ao caso (a). Este comportamento se apresenta consistente com as expectativas físicas confirmando, numa primeira instância, a eficácia do método de análise proposto.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.22- Característica tensão versus corrente nos terminais do elemento não linear: (a) 3 kV/500h (b) 3 kV/300h (c) 3 kV/100h.

A Tabela 3.1 sintetiza os resultados numéricos fornecidos pelo aplicativo computacional desenvolvido, com destaque ao Coeficiente de Não Linearidade (ρ) e respectivo indicador porcentual. Os valores são apresentados com consistência e adesão dos coeficientes de não linearidade aos estados físicos em que se

encontram as amostras. De fato, a total linearidade impõe um coeficiente unitário e, à medida que a degradação aumenta, este parâmetro se afasta deste valor de referência.

Tabela 3.1 Resultados computacionais para os parâmetros e indicadores de não linearidade associados com bancos de dados de medições advindas de [19].

Caso	C'nd (F)	Cnd (F)	ρ	$\Delta\rho$ (%)	Situação
(a)	$8,00 \times 10^{-13}$	$5,0 \times 10^{-13}$	0,9490	5,1	Muito degradado
(b)	$2,70 \times 10^{-13}$	$5,0 \times 10^{-13}$	0,9812	1,88	Com média de degradação
(c)	$9,93 \times 10^{-13}$	$5,0 \times 10^{-13}$	0,9963	0,37	Pouco degradado

Tendo em vista que os estudos anteriores compreenderam uma hipótese simplificadora na forma de uma tensão de suprimento puramente senoidal, avaliações adicionais foram então conduzidas com o objetivo de se constatar o desempenho do método para situações associadas com um suprimento contendo distorções harmônicas. Esta medida, como se sabe, se apoia no fato que, para situações reais, as tensões de alimentação dos cabos irão, certamente, se apresentar com formas de onda possuindo componentes harmônicas sobrepostas à fundamental. Dentro deste contexto as simulações foram refeitas utilizando-se dos mesmos valores para os parâmetros representativos do circuito equivalente obtido anteriormente. Os níveis de distorções harmônicas assumidas para as investigações computacionais foram: 3ª (7%), 5ª (5%) e 7ª (3%).

A partir das tensões aplicadas ao circuito equivalente representativo das amostras de cabos anteriormente utilizadas e cujas informações foram extraídas de [16], obtêm-se os resultados ilustrados na Figura 3.23. Esses mostram as formas de onda da tensão e da corrente de fuga correspondentes à situação identificada por (a) na Tabela 3.1, isto é, para o pior caso no que tange ao nível de degradação imposto.

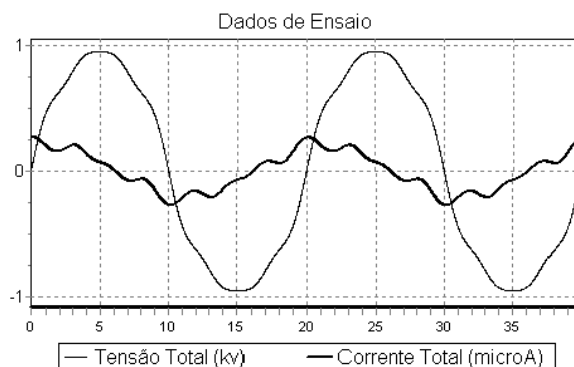


Figura 3.23 - Tensão total (v_{total}) contendo distorção harmônica e respectiva corrente total de fuga (i_{total})

As formas de ondas apresentadas, uma vez correlacionadas entre si, conduzem à curva tensão versus corrente da Figura 3.24.

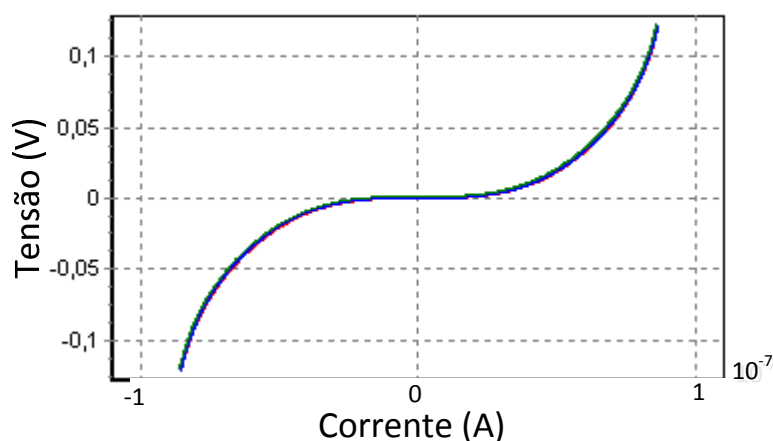


Figura 3.24 - Característica tensão versus corrente para o elemento não linear resistivo

Os novos resultados obtidos, através dos mesmos procedimentos já empregados para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente e Coeficiente de Não Linearidade determinação as grandezas constantes na Tabela 3.2. Comparando-se os novos resultados com aqueles correspondentes obtidos anteriormente pode-se constatar uma grande proximidade entre as grandezas, fato este que permite afirmar, nesta etapa dos trabalhos, que o método de análise proposta se apresenta imune às condições normalmente encontradas na rede.

Tabela 3. 2 Resultados computacionais – amostra de cabo com maior degradação [16] – tensão de suprimento distorcida.

Caso	Tensão de suprimento senoidal	Distorção da rede de suprimento	Tensão de suprimento com distorção
C'nd (F)	$8,00 \times 10^{-13}$	3ª (7%), 5ª (5%) e 7ª (3%)	$8,0 \times 10^{-13} \text{F}$
Cnd (F)	$5,0 \times 10^{-13}$	3ª (7%), 5ª (5%) e 7ª (3%)	$5,0 \times 10^{-13} \text{F}$
Δp (%)	0,9490	-	0,9463

Por fim, foram realizadas avaliações comparativas entre os indicativos ora obtidos com aqueles atrelados com os métodos tradicionalmente empregados aos objetivos em questão. A Tabela 3.3 permite uma pronta comparação entre as grandezas utilizadas, e aqui proposta, para a identificação do grau de degradação das amostras de cabos utilizadas para os trabalhos anteriores.

Tabela 3.3 Síntese dos resultados obtidos.

Indicadores de Estado	Caso a 3 kV/500h	Caso b 3 kV/300h	Caso c 3 kV/100h
$\tan \delta$	2,62	6,84	39,99
THDI (%)	35,60	19,40	8,50
P (W)	46,90	8,90	12,90
θ_3 (°)	-10,52	-46,81	-69,28
I_3 (nA)	29,70	3,34	2,19
R_{eq} (Ω)	$1,18 \times 10^{10}$	$5,82 \times 10^{10}$	$3,98 \times 10^{10}$
Δp (%)	5,1	1,88	0,37

De uma maneira geral os resultados apresentados pelos diferentes indicadores de desempenho ratificam que, em termos de severidade da deterioração, a amostra referente ao caso (a) é a mais degradada, a (b) menos severa que a anterior e, a (c) a que se apresenta com seu dielétrico em melhores condições físicas. Não obstante a isto, pode-se perceber que, as grandezas indicativas do estado do isolamento nem sempre se mostram com uma tendência

homogênea. Isto se faz presente quando se avalia a consistência, para os estudos aqui feitos visto que, algumas de mostram condizentes com as expectativas (THDI (%), θ_3 (°) e I_3 (nA)) e outras se comportam de forma aparentemente inadequadas ($\tan\delta$, P (W) e R_{eq} (Ω)). Esta análise comparativa, todavia, compreende uma área de estudos não focada nesta pesquisa e as fragilidades dos procedimentos clássicos já foram consideradas em trabalhos anteriores, a exemplo de [29].

3.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO APLICATIVO – ETAPA 2

3.4.1 – ESTRUTURA FÍSICA UTILIZADA

A estrutura geral a ser obedecida para a medição do estado operacional dos cabos compreende o arranjo indicado na Figura 3.25. Esta evidencia que a tensão entre o condutor e a blindagem, portanto, sobre a isolação, corresponde aquela encontrada nos terminais do sensor de tensão, o qual se apresenta, em média tensão, constituído por um transformador de potencial indutivo. No que tange a corrente de fuga, esta é adquirida de forma direta através de um *clamp* de corrente. Estas grandezas, como ilustrado, são então obtidas utilizando-se do complexo formado pelo registrador indicado, o qual, por sua vez, deve possuir recursos necessários à comunicação com uma unidade de processamento, a exemplo de um computador portátil. Este computador corresponde a unidade de processamento à qual se encontra inserido o já destacado aplicativo computacional apresentado no capítulo anterior ao presente

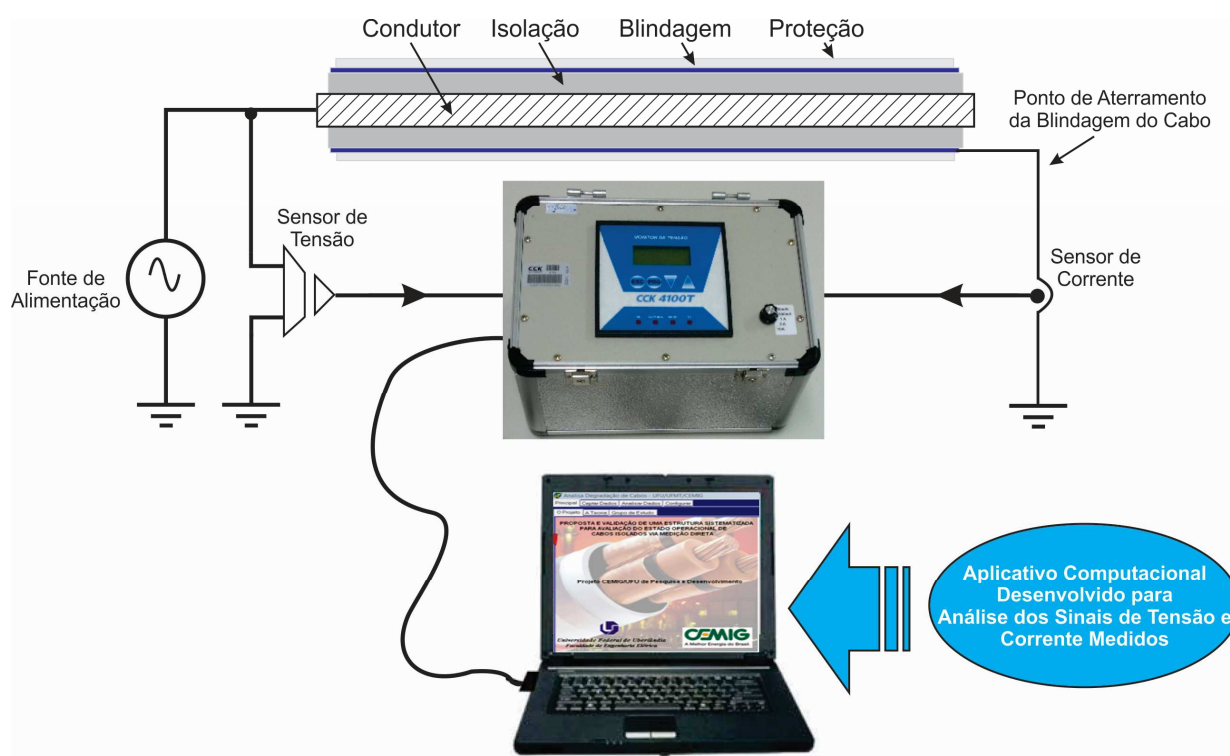


Figura 3.25- Diagrama esquemático do sistema utilizado para medição e análise – Representação Monofásica.

Para o atendimento aos fins almejados nessa pesquisa, a estrutura de medição e análise é constituída das seguintes unidades:

- Registrador de formas de onda de tensão e corrente;
- Alicates amperímetro para aquisição dos sinais de corrente de fuga, com capacidade de medição de sinais de corrente de 1 mA a 10A-C.A.;
- Ponteira de baixa tensão para aquisição dos sinais de tensão provenientes dos TPs;
- Software para geração de arquivos do tipo PQDIF (*Power Quality Data Interchange Format*) para posterior análise dos sinais registrados;
- Aplicativo computacional desenvolvido para análise dos sinais registrados, a saber, a tensão aplicada ao cabo e a respectiva corrente de fuga.

3.4.2 – CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

Em complementação aos trabalhos de avaliação do desempenho e validação preliminar do produto desta pesquisa foram realizados testes em cabos comerciais em operação na rede subterrânea da CEMIG na cidade de Uberlândia. Estes são identificados a seguir:

✓ **Cabo 1 - Usina de Capim Branco**

Esta instalação encontra-se constituída por um cabo de 400mm², com extensão aproximada de 3 km e classe de tensão de 8,7/15 KV, com isolamento XLPE. De acordo com informações da equipe técnica da CEMIG, muito embora o mesmo se encontre instalado por aproximadamente 12 anos é importante esclarecer que este foi pouco utilizado até a realização dos testes.

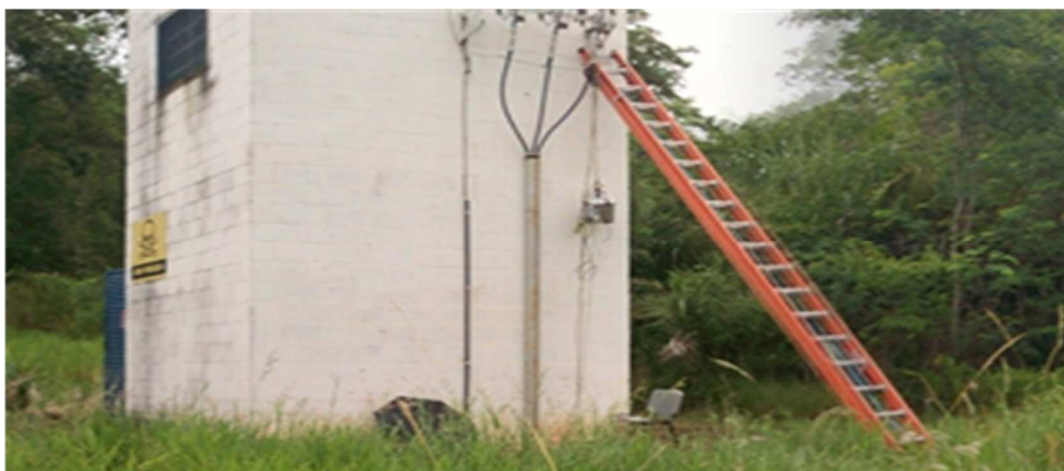


Figura 3.26- Cabo 1 – Usina de Capim Branco, Uberlândia-MG.

✓ **Cabo 2 - Subestação CEMIG Uberlândia**

Nesta instalação os trabalhos foram conduzidos através de medições conduzidas, também, para um cabo de 400mm², com extensão aproximada de 60 m e classe de tensão de 8,7/15 KV, com isolamento XLPE. Este se encontra em operação há mais de 25 anos.



Figura 3.27 - Cabo 2 – Subestação, Uberlândia-MG.

✓ Cabo 3 – Rede subterrânea na Av. Floriano Peixoto

Este terceiro caso estudo compreende registros feitos, mais uma vez, para um cabo de 400mm², com extensão aproximada de 145 me classe de tensão de 8,7/15 KV, com isolamento XLPE. Este componente se encontra em operação por apenas 6 meses.



Figura 3.28- Cabo 3 – Rede Subterrânea na Av. Floriano Peixoto, Uberlândia-MG.

3.4.3 – RESULTADOS DOS TRABALHOS DE MEDIÇÃO

As formas de onda das correntes de fuga medidas para cada uma das situações acima identificadas, considerando o suprimento dos cabos com tensão nominal e sem carga, estão apresentadas na Figura 3.29.

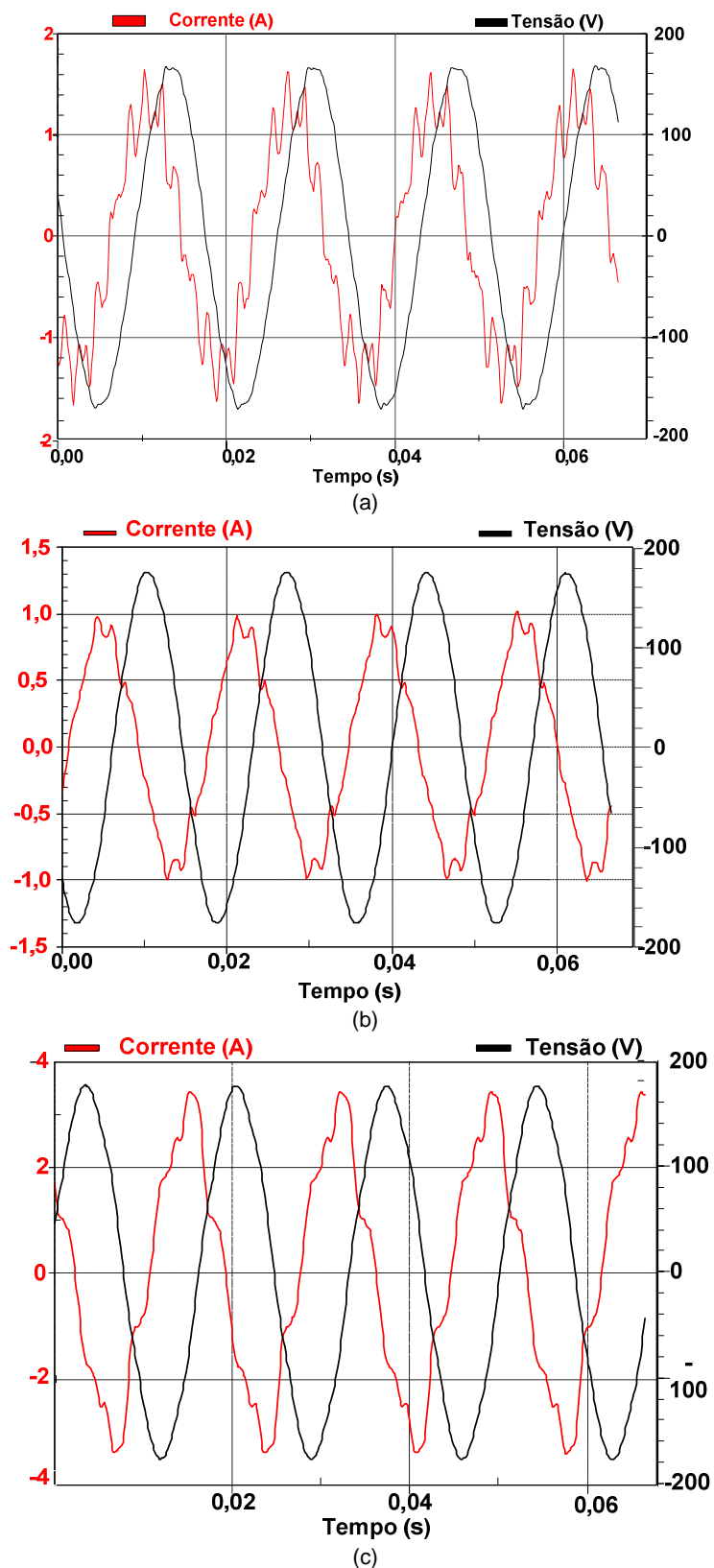
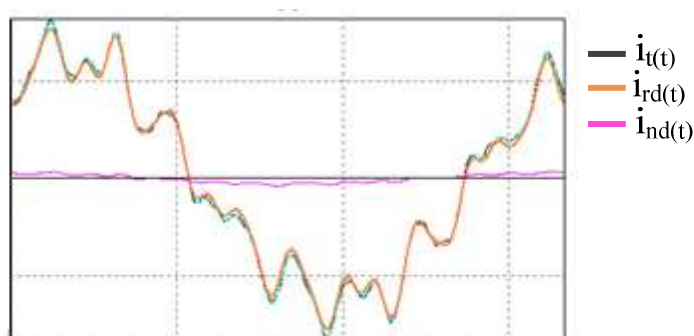


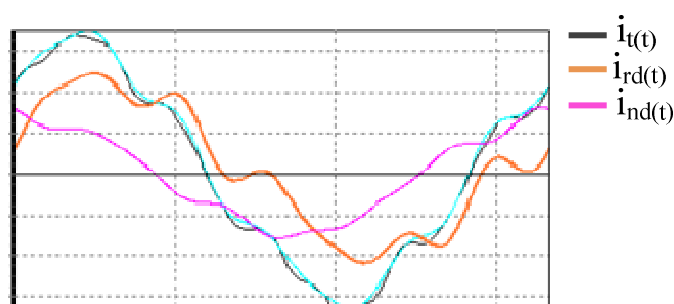
Figura 3.29 - Correntes de fuga medidas em campo: a) Cabo 1; b) Cabo 2 e c) Cabo 3

Considerando que o fenômeno de arborescência acarreta, predominantemente, na corrente de fuga, harmônicos de terceira ordem, decidiu-se, por simplificação da análise, considerar na simulação apenas os harmônicos de corrente até a nona ordem.

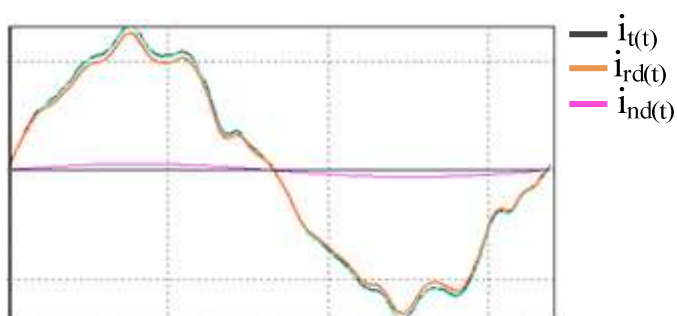
Uma vez eliminadas as componentes harmônicas de ordem superior à nona, as formas de onda das correntes de fuga consideradas nas simulações passam a se apresentar com os aspectos indicados nas figuras subsequentes.



(a)



(b)

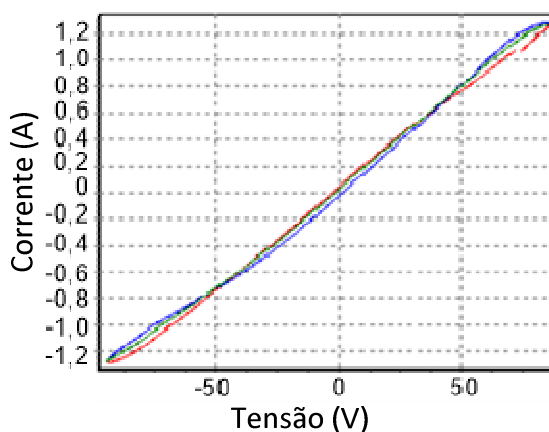


(c)

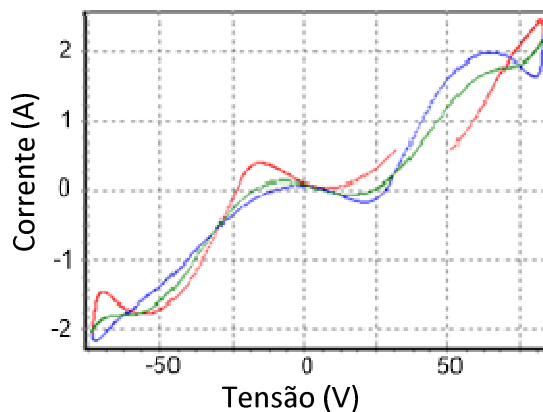
Figura 3.30 - Correntes de fuga medidas: a) Cabo 1; b) Cabo 2 e c) Cabo 3

3.4.4 – CORRELAÇÃO DE NÃO-LINEARIDADE

As correspondentes correlações entre as tensões medidas e as correntes supra caracterizadas conduzem aos resultados indicados na Figura 3.31 ressaltando-se que cada uma das figuras encontra-se identificada aos respectivos cabos avaliados. Vale lembrar que estes desempenhos gráficos são fornecidos pelo aplicativo computacional desenvolvido neste trabalho.



(a)



(b)

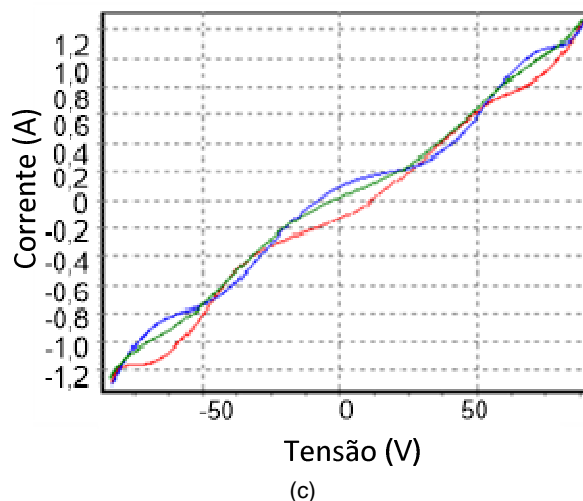


Figura 3.31 - Característica tensão versus corrente: a) Cabo 1; b) Cabo 2 e c) Cabo 3

3.4.5–AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE ESTADO DOS ISOLAMENTOS

A Tabela 3.4 sintetiza os valores encontrados para as capacitâncias do modelo equivalente e para o Coeficiente de Não Linearidade para os três cabos testados.

Tabela 3.4- Síntese dos resultados obtidos para os três cabos comerciais

Caso	C'nd (F)	Cnd (F)	ρ	$\Delta\rho$ (%)	Situação
Cabo 1	$0,239 \times 10^{-7}$	$0,546 \times 10^{-10}$	0,9987	0,13	Cabo conservado
Cabo 2	$0,635 \times 10^{-7}$	$0,218 \times 10^{-7}$	0,9682	3,18	Cabo degradado
Cabo 3	$0,108 \times 10^{-6}$	$0,257 \times 10^{-10}$	0,9955	0,45	Cabo conservado

Com base nesses resultados é possível inferir que os cabos 1 e 3 estão em bom estado de conservação, ao passo que o cabo 2 está degradado, possivelmente em nível que mereça ser monitorado e receber atenção diferenciada por parte do setor de manutenção. Cabe ressaltar que, conforme evidenciado anteriormente, os resultados obtidos estão em consonância com as características das instalações contempladas nas investigações, fato este que, numa primeira análise, evidencia a eficácia da nova metodologia desenvolvida

para diagnóstico do estado operacional da camada isolante de cabos elétricos a partir do Coeficiente de Não Linearidade.

Por fim, foram realizadas avaliações comparativas entre os indicativos ora obtidos com aqueles atrelados com os métodos tradicionalmente empregados aos objetivos em questão. A Tabela 3.5 permite uma pronta comparação entre as grandezas utilizadas, e aqui proposta, para a identificação do grau de degradação das amostras de cabos utilizadas para os trabalhos anteriores.

Tabela 3.5 Síntese dos resultados obtidos

Indicadores de Estado	Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3
$\tan\delta$	0.54	0.574	0,966
THDI (%)	3.18	3.36	1.86
P (W/m)	4,56	25,52	6,97
θ_3 (°)	262.18	193.11	160.14
I₃(%)	2.31	1.80	0.53
R_{eq} (KΩ)	0.141	0.30	0.07

De uma maneira geral, os resultados associados aos indicadores convencionais do estado de degradação de cabos isolados ratificam uma não coerência com os valores esperados, os quais são apresentados em [9 – 11]. Nesse sentido, em função dos indicadores $\tan\delta$ e θ_3 (°), verifica-se que o Cabo 3 se apresenta com os maiores níveis de degradação. Por outro lado, os resultados obtidos para a THDI e o I₃ implicam que o Cabo 1 seria o mais degradado dentro todos os analisados. No que se refere aos valores da Resistência Equivalente, estes não são compatíveis com o estado das amostras. Frente a essas análises, observa-se que apenas o indicador de Potência Dissipada refletiu uma condição coerente com o grau de degradação dos cabos em estudo. Esta análise comparativa, todavia, compreende uma área de estudos não focada nesta pesquisa e as fragilidades dos procedimentos clássicos já foram consideradas em trabalhos anteriores, a exemplo de [10].

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta fase dos trabalhos, em consonância com a metodologia proposta, encontra-se direcionada à avaliação dos Indicadores de Desempenho, particularmente do indicador de estado ora proposto (Coeficiente de Não Linearidade), e ainda a apresentação do software, que foi desenvolvido para determinação dos parâmetros do circuito equivalente e da característica não linear do elemento resistivo representativo do estado físico do isolamento de cabos elétricos.

Nessa perspectiva, destacam-se os principais objetivos alcançados:

- Desenvolvimento do software de análise de forma a contemplar a determinação do indicador de desempenho proposto pela pesquisa, nos termos estabelecidos ao longo do Capítulo 03;
- Realização de uma etapa de trabalhos voltada para a avaliação do desempenho do software e validação da metodologia empregando-se um banco de dados extraídos de uma publicação científica internacional, a qual contemplou amostras de cabos que foram degradadas em ambiente laboratorial controlado;
- Aplicação do processo como um todo para três cabos comercialmente em uso nas instalações da CEMIG;
- Avaliação da metodologia e do produto parcial desta pesquisa ratificando-se, a consistência, coerência e aplicabilidade dos resultados obtidos aos fins aqui almejados.

Capítulo IV

CONCLUSÕES

Muito embora ao longo de cada capítulo tenha-se explorado aspectos relacionados com as constatações próprias aos desenvolvimentos feitos, é conveniente, neste momento, sintetizar os aspectos mais gerais e conclusivos acerca dos trabalhos até então realizados. Dentro deste enfoque, evidencia significativas contribuições quanto ao processo de análise do estado operacional dos cabos isolados.

Diante do exposto, pode ser destacado que as atividades realizadas representaram os seguintes avanços:

a) Quanto à proposta de indicador para avaliação do estado de degradação de cabos elétricos isolados

- ✓ Inicialmente foram tecidos comentários sobre a natureza física dos fenômenos em foco e estabelecido o equacionamento do modelo elétrico representativo de cabos isolados do tipo XLPE, tanto para a condição ideal, ou seja, sem degradação, como também o modelo elétrico representativo de cabos isolados com a presença de degradações provenientes da arborescência.
- ✓ Na sequência foram sintetizados os meios clássicos utilizados

para a caracterização de indicadores de estado do isolamento de cabos elétricos, em consonância com os processos utilizados e materializados em equipamentos comerciais e procedimentos de análise empregados pelas distribuidoras de energia elétrica, indústrias e outros setores;

- ✓ Reconhecendo-se as fragilidades atreladas com vários processos de análise, nos termos clássicos, os trabalhos de pesquisa foram então voltados para a apresentação de um novo conceito para avaliação do estado físico dos isolamentos, fato este que culminou por uma nova proposta de indicador de estado para a estimativa do nível de degradação da camada isolante por meio da correlação entre a tensão aplicada e a corrente de fuga que circula na região deteriorada do cabo isolado;
- ✓ A partir dos fundamentos que nortearam a nova proposição, foram então conduzidos esforços visando à formalização da estratégia para determinação dos parâmetros do circuito equivalente de cabos degradados pelo fenômeno da arborescência, nos termos definidos pelo processo de identificação via coeficientes de não linearidades entre as respostas das correntes frente às tensões impostas aos cabos;
- ✓ Por fim, o processo como um todo foi de uma primeira avaliação de desempenho diante de estudos computacionais que evidenciaram a factibilidade da proposta.

b) Quanto ao “software” para determinação dos indicadores de desempenho

- ✓ Avançando na pesquisa, nesta fase dos trabalhos, em sintonia com a metodologia proposta, particularmente envolvendo o novo indicador de estado (Coeficiente de Não Linearidade),

foram apresentadas as bases que nortearam o aplicativo computacional responsável pela sistematização do processo de cálculo das grandezas representativas do estado físico atual de cabos, iniciando-se por um diagrama de blocos que esclareceu sobre a estratégia e lógica seguida para se atingir aos propósitos almejados;

- ✓ Uma vez definido o processo como um todo, foram então apresentadas as telas ilustrativas do programa desenvolvido, numa sequência natural compreendendo desde a aquisição dos sinais das tensões e correntes, parametrização do estudo, e outros aspectos relevantes ao aplicativo voltado para a determinação do novo indicador aqui proposto;
- ✓ A partir do “software” desenvolvido e relatado, foram então realizados trabalhos de validação, iniciando por uma avaliação de desempenho do programa utilizando-se como base de referência um banco de dados extraídos de publicação científica internacional, a qual contemplou amostras de cabos que foram degradadas em ambiente laboratorial controlado;
- ✓ Visto a consistência física entre os resultados até então obtidos através de amostras de cabos e formas de onda fornecidas pela publicação supramencionada, procedeu-se a uma nova etapa de testes, desta feita através de medições conduzidas em instalações reais pertencentes à rede subterrânea da CEMIG;
- ✓ Por fim, no que tange a esta etapa dos trabalhos, as avaliações realizadas através das estratégias mencionadas anteriormente, revelaram uma boa aderência de desempenhos do indicador às condições físicas conhecidas para as amostras utilizadas.

c) Quanto às investigações futuras sobre o tema

Os assuntos contemplados nesta tese podem ainda, em trabalhos futuros, merecer pesquisas nas seguintes direções:

- ✓ Formação de bancos de dados e testes de desempenho: Os circuitos equivalentes tratados nesta pesquisa se fundamentaram, dentre outros, em parâmetros representativos das condições originais associadas com cabos novos. Este é o caso das resistências e capacitâncias de fuga, as quais, conjuntamente, se apresentam como informações relevantes à caracterização dos indicadores atrelados com o que se denomina por cabos novos. Tais dados se apresentam como extremamente relevantes às necessidades futuras quando da realização de novas medições e comparações de desempenho operacional visando à caracterização das expectativas de vida dos cabos. De fato, a partir de parâmetros representativos de cabos novos, tornar-se-á possível obter registros ao longo do tempo que irão orientar os operadores para a necessidade ou não de trabalhos de manutenção e/ou substituição dos componentes em funcionamento. Além do mais, evidencia-se a necessidade de realização de atividades experimentais que ofereçam informações importantes e indicativa para as condições operacionais de cabos novos ou com diferentes níveis de degradação.

- ✓ Análise da degradação em circuitos com carga: a metodologia proposta nesta tese se destina a avaliar o estado de degradação de cabos isolados quando em sua operação a vazio. Nesse sentido, torna-se relevante um aperfeiçoamento de tal metodologia com

vistas à realização de diagnósticos do estado operacional destes equipamentos em circuitos com carga;

- ✓ Definição de uma estrutura sistematizada de “software/hardware” para avaliação em tempo real das condições operacionais de cabos isolados

Referências Bibliográficas

- [1] M. BAO; S. TANG; J. HE; X. YIN; Q. WANG; G. WU; Y. YANG, "The initiation phenomena of electrical treeing in XLPE cable insulation," in Proc. of International Conference on High Voltage Engineering and Application, pp.431-434, 2012.
- [2] L. N. VELASCO, L. C. G. FREITAS, J. C. OLIVEIRA, F. L. NOGUEIRA, A. P. FINAZZI,, H.C. MARTINS, W. J. ARAÚJO, J. M. BORGES, "An Approach To Improve Power Supply Continuity Throughout The Estimation Of Insulated Power Cable Life Expectance Indexes" in Proc. of Brazilian Power Electronics Conference, pp. 508-512, 2011.
- [3] J. J. GUO; S. A. BOGGS, "High Frequency Signal Propagation in Solid Dielectric Tape Shielded Power Cables," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol.26, no.3, pp.1793-1802, Jul. 2011.
- [4] RUAY-NAN WU; CHIEN-KUO CHANG; "The Use of Partial Discharges as an Online Monitoring System for Underground Cable Joints," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol.26, no.3, pp.1585-1591, Jul. 2011.

Referências Bibliográficas

- [5] M. SUZUKI, N. YOSHIMURA, "Three-dimensional equivalent circuit analysis of water tree," in Proc. of International Conference on Power and Energy Systems., pp.1-4, 2011.
- [6] W. SHU, S. A. BOGGS, "Effect of Cable Restoration Fluid on Inhibiting Water Tree Initiation" in IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 1, Jan. 2011.
- [7] K. TOHYAMA,; T. OSADA,; T. IMAI,; K ABE, "Dissipation current waveforms monitoring in LDPE sheet under water tree deterioration test (Part 2)," in Proc. of Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.1-4, 2010.
- [8] C. H. NEVES, "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.
- [9] F. PIAZZA, at all, "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.
- [10] F. N. LIMA, "Uma contribuição à estimativa de indicadores de desempenho do estado operacional de cabos isolados sob a ação das arborescências", Tese, Universidade Federal de Uberlândia, Setembro 2008.
- [11] M. I. QURESHI,; N. H. MALIK,; A. A. AL-ARAINY,; M. N. SAATI,; O. A. AL-NATHER,; S. ANAM, "Investigation of resistance toward water

Referências Bibliográficas

- tree growth in XLPE insulated MV cables produced in the Arabian Gulf region," in Proc. of International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp.1195-1198, 2008.
- [12] F. N. LIMA, J. C. OLIVEIRA, D. A. ANDRADE, ET. ALL, "Modeling Water Tree Phenomenon for Insulated Cable Loss Current Estimation", in Proc. of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp. 1-6, 2008.
- [13] A. AL-ARAINY, N. H. MALIK, M. I. QURESHI, M. N. AL-SAATI "The Performance of Strippable and Bonded Screened Medium-Voltage XLPE-Insulated Cables Under Long-Term Accelerated Aging" in IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 744-751, Apr. 2007.
- [14] T. FURUHASHI, K. TOHYAMA, T. IMAI, Y. MURATA, "Dissipation Current Waveform and its spectrum of Water Tree Deteriorated Low Density Polyethylene Sheet", in Proc. of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp 73-76, 2007.
- [15] Y. TIAN , P. L. LEWIN , J. S. WILKINSON , G. SCHROEDER , S. J. SUTTON AND S. G. SWINGLER, "An improved optically based PD detection system for continuous on-line monitoring of HV cables," in IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., vol. 12, no. 6, pp.1222 -1234, Dec.2005.
- [16] A. DAKKA, A. BULINSKI, S. BAMJI, "Correlation between DC polarization and failure characteristics of XLPE and EPR aged with AC voltage in a wet environment", in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, n. 4, pp. 700 – 708, Aug. 2005.

Referências Bibliográficas

- [17] K. CARLOS, W. MICHAEL AND F. BOGDAN “Comparative Laboratory Evaluation of TR-XLPE and XLPE Cables With Super-Smooth Conductor Shields” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1532-1537, Oct. 2004.
- [18] F. GUASTAVINO AND B. CERUTTI, "Tree growth monitoring by means of digital partial discharge measurements," in IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., vol. 10, no. 1, pp. 65 -72, Feb. 2003.
- [19] T. TSUJIMOTO, M. NAKADE, Y. YAGI, K. ADACHI, ET. AL., “Development of ON-SITE Diagnostic for XLPE Cable by Harmonics in AC Loss Current,” in Proc. of 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp 73-76, 2003.
- [20] J. DEVORE, R. PECK, “Statistics – The Exploration and Analysis of Data,” West Publishing Company, San Francisco, 1986
- [21] T. OSADA, K. TOHYAMA, et al, “Dissipation Current Waveforms Monitoring in LDPE Sheet under Water Tree Deterioration Test”, in Proc. Of Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 486-489, 2009.
- [22] M. SUZUKI, A. ITOH, N. YOSHIMURA, at. al, “Three-dimensional Equivalent Circuit Analysis of Water tree”, Proceedings Of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp 396-399, 2008.
- [23] T. FURUHASHI, K. TOHYAMA, T. IMAI, Y. MURATA, “Dissipation Current Waveform of Water Tree Deteriorated Low Density Polyethylene Sheet”. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on, Oct. 15-18, pp 529-532, 2006.

Referências Bibliográficas

- [24] A. T. BULINSKI, E. SO, S. S. BAMJI, “Measurement of the Harmonic Distortion of the Insulation Loss Current as a Diagnostic Tool for High Voltage Cable Insulation,” 0-7803-5935-6/00/\$10.00 © 2000 IEEE, pp 1615-1620, 2000.
- [25] A. NAKAJIMA, N. KASHIWAGI, T. MURATA, S. TAKASHI, O. FUKUDA, S. KITAHARA, K. TOKUMARU, and K. HIROTAU “Development of a hot-line diagnostic method for XLPE cables and the measurement results,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, No. 2, April, pp. 857-862, 1989.
- [26] S. YAMAGUCHI, S. SODA, N. TAKADA, “Development of a New Type Insulation Diagnostic Method for Hot-Line XLPE Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery, July, vol. 4 no. 3, pp. 1513-1520, 1989.
- [27] L.H. TRACEY, R.P. BURFORD, R.J. FLEMING, K.W. BARBER, “A general review of polymer insulation for use in HVDC cables”. IEEE Elect. Ins. Mag. vol.19, pp.13-24, 2003.
- [28] E. L.LEGUENZA, “Influência do Negro de Carbono (carbonblack) nas Propriedades Dielétricas do Polietileno Envelhecido sob Radiação UV”, 97 f., Dissertação, Universidade Federal do Paraná – PR, 1999.
- [29] T. TANAKA, and A. GREENWOOD, “Advances Power Cable Technology, Vol. I – Basic Concepts and Testing”, CRC Press, Boca Raton, Flórida, USA, 1983.
- [30] P. LORINGAN, “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.

Referências Bibliográficas

- [31] B. OYEGOKE, P. HYVONEN, M. ARO, N. GAO, "Application of dielectric response measurement on power cable systems," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, n. 5, pp. 862 – 873, Oct. 2003.
- [32] P. WERELIUS, P. THARNING, R. ERIKSSON, B. HOLMGREN, U. GAFVERT, "Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 8, n. 1, pp. 27 – 42, Mar. 2001.
- [33] R. PATSCH; J. JUNG, "Water trees in cables - generation and detection," in Proc. of Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp.469-474, 1998.
- [34] K. SOMA, M. AIHORA, Y. KATAOKA, "Diagnostic Method for Power Cable Insulation", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI – 21, no. 26, December-1986.
- [35] T. NAKAYAMA, "On-Line Cable Monitor Developed in Japan", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, N° 4, Oct., pp. 1359-1365, 1991. On-Line Cable Monitor Developed in Japan.
- [36] Y. YAGI, H. TANAKA, H. KIMURA, "Study on Diagnostic Method for Water Treed XLPE Cable by Loss Current Measurement", v. 2, p. 653-656, 0-7803-53035-9/98/\$10.00© 1998 IEEE.

Apêndice

Tabela 1 – Vetores de tempo, tensão e corrente para os Casos (a), (b) e (c)

Tempo	Tensão	Caso (a)			Caso (b)			Caso (c)		
		$I_{rd}(t)$	$i_{nd}(t)$	$i_t(t)$	$I_{rd}(t)$	$i_{nd}(t)$	$i_t(t)$	$I_{rd}(t)$	$i_{nd}(t)$	$i_t(t)$
0	0	1,27E-09	1,57E-07	1,58E-07	1,42E-09	1,57E-07	1,59E-07	5,77E-09	1,57E-07	1,63E-07
0,0002	62,79052	2,46E-09	1,57E-07	1,59E-07	2,02E-09	1,57E-07	1,59E-07	9,64E-09	1,57E-07	1,66E-07
0,0004	125,3332	3,67E-09	1,56E-07	1,6E-07	2,68E-09	1,56E-07	1,59E-07	1,48E-08	1,56E-07	1,71E-07
0,0006	187,3813	4,91E-09	1,54E-07	1,59E-07	3,44E-09	1,54E-07	1,58E-07	2,12E-08	1,54E-07	1,75E-07
0,0008	248,6899	6,18E-09	1,52E-07	1,58E-07	4,3E-09	1,52E-07	1,56E-07	2,88E-08	1,52E-07	1,81E-07
0,001	309,017	7,49E-09	1,49E-07	1,57E-07	5,26E-09	1,49E-07	1,55E-07	3,75E-08	1,49E-07	1,87E-07
0,0012	368,1246	8,83E-09	1,46E-07	1,55E-07	6,32E-09	1,46E-07	1,52E-07	4,7E-08	1,46E-07	1,93E-07
0,0014	425,7793	1,02E-08	1,42E-07	1,52E-07	7,48E-09	1,42E-07	1,5E-07	5,71E-08	1,42E-07	1,99E-07
0,0016	481,7537	1,16E-08	1,38E-07	1,49E-07	8,73E-09	1,38E-07	1,46E-07	6,74E-08	1,38E-07	2,05E-07
0,0018	535,8268	1,31E-08	1,33E-07	1,46E-07	1E-08	1,33E-07	1,43E-07	7,76E-08	1,33E-07	2,1E-07
0,002	587,7853	1,45E-08	1,27E-07	1,42E-07	1,14E-08	1,27E-07	1,38E-07	8,72E-08	1,27E-07	2,14E-07
0,0022	637,424	1,59E-08	1,21E-07	1,37E-07	1,27E-08	1,21E-07	1,34E-07	9,6E-08	1,21E-07	2,17E-07
0,0024	684,5471	1,74E-08	1,15E-07	1,32E-07	1,41E-08	1,15E-07	1,29E-07	1,04E-07	1,15E-07	2,18E-07

Apêndice

0,0026	728,9686	1,88E-08	1,08E-07	1,26E-07	1,54E-08	1,08E-07	1,23E-07	1,1E-07	1,08E-07	2,18E-07
0,0028	770,5132	2,01E-08	1E-07	1,2E-07	1,66E-08	1E-07	1,17E-07	1,15E-07	1E-07	2,15E-07
0,003	809,017	2,14E-08	9,23E-08	1,14E-07	1,77E-08	9,23E-08	1,1E-07	1,19E-07	9,23E-08	2,11E-07
0,0032	844,3279	2,26E-08	8,42E-08	1,07E-07	1,86E-08	8,42E-08	1,03E-07	1,21E-07	8,42E-08	2,05E-07
0,0034	876,3067	2,37E-08	7,57E-08	9,93E-08	1,94E-08	7,57E-08	9,51E-08	1,21E-07	7,57E-08	1,97E-07
0,0036	904,8271	2,46E-08	6,69E-08	9,15E-08	2E-08	6,69E-08	8,69E-08	1,2E-07	6,69E-08	1,87E-07
0,0038	929,7765	2,54E-08	5,78E-08	8,32E-08	2,05E-08	5,78E-08	7,83E-08	1,18E-07	5,78E-08	1,76E-07
0,004	951,0565	2,61E-08	4,85E-08	7,46E-08	2,07E-08	4,85E-08	6,93E-08	1,15E-07	4,85E-08	1,64E-07
0,0042	968,5832	2,66E-08	3,91E-08	6,56E-08	2,08E-08	3,91E-08	5,98E-08	1,11E-07	3,91E-08	1,5E-07
0,0044	982,2873	2,69E-08	2,94E-08	5,63E-08	2,06E-08	2,94E-08	5,01E-08	1,06E-07	2,94E-08	1,35E-07
0,0046	992,1147	2,71E-08	1,97E-08	4,68E-08	2,03E-08	1,97E-08	4E-08	1E-07	1,97E-08	1,2E-07
0,0048	998,0267	2,7E-08	9,86E-09	3,69E-08	1,99E-08	9,86E-09	2,97E-08	9,36E-08	9,86E-09	1,04E-07
0,005	1000	2,69E-08	1,92E-23	2,69E-08	1,93E-08	1,92E-23	1,93E-08	8,68E-08	1,92E-23	8,68E-08
0,0052	998,0267	2,65E-08	-9,9E-09	1,66E-08	1,85E-08	-9,9E-09	8,66E-09	7,96E-08	-9,9E-09	6,98E-08
0,0054	992,1147	2,6E-08	-2E-08	6,3E-09	1,77E-08	-2E-08	-2E-09	7,23E-08	-2E-08	5,26E-08
0,0056	982,2873	2,53E-08	-2,9E-08	-4,1E-09	1,67E-08	-2,9E-08	-1,3E-08	6,48E-08	-2,9E-08	3,54E-08
0,0058	968,5832	2,45E-08	-3,9E-08	-1,5E-08	1,57E-08	-3,9E-08	-2,3E-08	5,74E-08	-3,9E-08	1,83E-08
0,006	951,0565	2,36E-08	-4,9E-08	-2,5E-08	1,46E-08	-4,9E-08	-3,4E-08	5,01E-08	-4,9E-08	1,56E-09
0,0062	929,7765	2,26E-08	-5,8E-08	-3,5E-08	1,35E-08	-5,8E-08	-4,4E-08	4,31E-08	-5,8E-08	-1,5E-08
0,0064	904,8271	2,15E-08	-6,7E-08	-4,5E-08	1,23E-08	-6,7E-08	-5,5E-08	3,64E-08	-6,7E-08	-3E-08
0,0066	876,3067	2,03E-08	-7,6E-08	-5,5E-08	1,12E-08	-7,6E-08	-6,5E-08	3,02E-08	-7,6E-08	-4,6E-08
0,0068	844,3279	1,9E-08	-8,4E-08	-6,5E-08	1E-08	-8,4E-08	-7,4E-08	2,44E-08	-8,4E-08	-6E-08
0,007	809,017	1,77E-08	-9,2E-08	-7,5E-08	8,93E-09	-9,2E-08	-8,3E-08	1,93E-08	-9,2E-08	-7,3E-08
0,0072	770,5132	1,64E-08	-1E-07	-8,4E-08	7,86E-09	-1E-07	-9,2E-08	1,47E-08	-1E-07	-8,5E-08
0,0074	728,9686	1,5E-08	-1,1E-07	-9,2E-08	6,85E-09	-1,1E-07	-1E-07	1,07E-08	-1,1E-07	-9,7E-08
0,0076	684,5471	1,37E-08	-1,1E-07	-1E-07	5,89E-09	-1,1E-07	-1,1E-07	7,44E-09	-1,1E-07	-1,1E-07
0,0078	637,424	1,23E-08	-1,2E-07	-1,1E-07	5,01E-09	-1,2E-07	-1,2E-07	4,8E-09	-1,2E-07	-1,2E-07

Apêndice

0,008	587,7853	1,1E-08	-1,3E-07	-1,2E-07	4,19E-09	-1,3E-07	-1,2E-07	2,79E-09	-1,3E-07	-1,2E-07
0,0082	535,8268	9,68E-09	-1,3E-07	-1,2E-07	3,44E-09	-1,3E-07	-1,3E-07	1,39E-09	-1,3E-07	-1,3E-07
0,0084	481,7537	8,38E-09	-1,4E-07	-1,3E-07	2,76E-09	-1,4E-07	-1,3E-07	5,3E-10	-1,4E-07	-1,4E-07
0,0086	425,7793	7,11E-09	-1,4E-07	-1,4E-07	2,14E-09	-1,4E-07	-1,4E-07	1,05E-10	-1,4E-07	-1,4E-07
0,0088	368,1246	5,86E-09	-1,5E-07	-1,4E-07	1,57E-09	-1,5E-07	-1,4E-07	-1,6E-11	-1,5E-07	-1,5E-07
0,009	309,017	4,64E-09	-1,5E-07	-1,4E-07	1,05E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-6,6E-12	-1,5E-07	-1,5E-07
0,0092	248,6899	3,44E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	5,61E-10	-1,5E-07	-1,5E-07	-7,2E-11	-1,5E-07	-1,5E-07
0,0094	187,3813	2,26E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	8,69E-11	-1,5E-07	-1,5E-07	-4,4E-10	-1,5E-07	-1,5E-07
0,0096	125,3332	1,08E-09	-1,6E-07	-1,5E-07	-3,9E-10	-1,6E-07	-1,6E-07	-1,4E-09	-1,6E-07	-1,6E-07
0,0098	62,79052	-9,4E-11	-1,6E-07	-1,6E-07	-8,9E-10	-1,6E-07	-1,6E-07	-3,1E-09	-1,6E-07	-1,6E-07
0,01	0	-1,3E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-1,4E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-5,8E-09	-1,6E-07	-1,6E-07
0,0102	-62,7905	-2,5E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-2E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-9,6E-09	-1,6E-07	-1,7E-07
0,0104	-125,333	-3,7E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-2,7E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-1,5E-08	-1,6E-07	-1,7E-07
0,0106	-187,381	-4,9E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-3,4E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-2,1E-08	-1,5E-07	-1,8E-07
0,0108	-248,69	-6,2E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-4,3E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-2,9E-08	-1,5E-07	-1,8E-07
0,011	-309,017	-7,5E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-5,3E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-3,8E-08	-1,5E-07	-1,9E-07
0,0112	-368,125	-8,8E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-6,3E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-4,7E-08	-1,5E-07	-1,9E-07
0,0114	-425,779	-1E-08	-1,4E-07	-1,5E-07	-7,5E-09	-1,4E-07	-1,5E-07	-5,7E-08	-1,4E-07	-2E-07
0,0116	-481,754	-1,2E-08	-1,4E-07	-1,5E-07	-8,7E-09	-1,4E-07	-1,5E-07	-6,7E-08	-1,4E-07	-2,1E-07
0,0118	-535,827	-1,3E-08	-1,3E-07	-1,5E-07	-1E-08	-1,3E-07	-1,4E-07	-7,8E-08	-1,3E-07	-2,1E-07
0,012	-587,785	-1,4E-08	-1,3E-07	-1,4E-07	-1,1E-08	-1,3E-07	-1,4E-07	-8,7E-08	-1,3E-07	-2,1E-07
0,0122	-637,424	-1,6E-08	-1,2E-07	-1,4E-07	-1,3E-08	-1,2E-07	-1,3E-07	-9,6E-08	-1,2E-07	-2,2E-07
0,0124	-684,547	-1,7E-08	-1,1E-07	-1,3E-07	-1,4E-08	-1,1E-07	-1,3E-07	-1E-07	-1,1E-07	-2,2E-07
0,0126	-728,969	-1,9E-08	-1,1E-07	-1,3E-07	-1,5E-08	-1,1E-07	-1,2E-07	-1,1E-07	-1,1E-07	-2,2E-07
0,0128	-770,513	-2E-08	-1E-07	-1,2E-07	-1,7E-08	-1E-07	-1,2E-07	-1,2E-07	-1E-07	-2,2E-07
0,013	-809,017	-2,1E-08	-9,2E-08	-1,1E-07	-1,8E-08	-9,2E-08	-1,1E-07	-1,2E-07	-9,2E-08	-2,1E-07
0,0132	-844,328	-2,3E-08	-8,4E-08	-1,1E-07	-1,9E-08	-8,4E-08	-1E-07	-1,2E-07	-8,4E-08	-2E-07

Apêndice

0,0134	-876,307	-2,4E-08	-7,6E-08	-9,9E-08	-1,9E-08	-7,6E-08	-9,5E-08	-1,2E-07	-7,6E-08	-2E-07
0,0136	-904,827	-2,5E-08	-6,7E-08	-9,1E-08	-2E-08	-6,7E-08	-8,7E-08	-1,2E-07	-6,7E-08	-1,9E-07
0,0138	-929,776	-2,5E-08	-5,8E-08	-8,3E-08	-2E-08	-5,8E-08	-7,8E-08	-1,2E-07	-5,8E-08	-1,8E-07
0,014	-951,057	-2,6E-08	-4,9E-08	-7,5E-08	-2,1E-08	-4,9E-08	-6,9E-08	-1,2E-07	-4,9E-08	-1,6E-07
0,0142	-968,583	-2,7E-08	-3,9E-08	-6,6E-08	-2,1E-08	-3,9E-08	-6E-08	-1,1E-07	-3,9E-08	-1,5E-07
0,0144	-982,287	-2,7E-08	-2,9E-08	-5,6E-08	-2,1E-08	-2,9E-08	-5E-08	-1,1E-07	-2,9E-08	-1,4E-07
0,0146	-992,115	-2,7E-08	-2E-08	-4,7E-08	-2E-08	-2E-08	-4E-08	-1E-07	-2E-08	-1,2E-07
0,0148	-998,027	-2,7E-08	-9,9E-09	-3,7E-08	-2E-08	-9,9E-09	-3E-08	-9,4E-08	-9,9E-09	-1E-07
0,015	-1000	-2,7E-08	6,59E-22	-2,7E-08	-1,9E-08	6,59E-22	-1,9E-08	-8,7E-08	6,59E-22	-8,7E-08
0,0152	-998,027	-2,7E-08	9,86E-09	-1,7E-08	-1,9E-08	9,86E-09	-8,7E-09	-8E-08	9,86E-09	-7E-08
0,0154	-992,115	-2,6E-08	1,97E-08	-6,3E-09	-1,8E-08	1,97E-08	2,02E-09	-7,2E-08	1,97E-08	-5,3E-08
0,0156	-982,287	-2,5E-08	2,94E-08	4,11E-09	-1,7E-08	2,94E-08	1,27E-08	-6,5E-08	2,94E-08	-3,5E-08
0,0158	-968,583	-2,5E-08	3,91E-08	1,45E-08	-1,6E-08	3,91E-08	2,34E-08	-5,7E-08	3,91E-08	-1,8E-08
0,016	-951,057	-2,4E-08	4,85E-08	2,49E-08	-1,5E-08	4,85E-08	3,4E-08	-5E-08	4,85E-08	-1,6E-09
0,0162	-929,776	-2,3E-08	5,78E-08	3,52E-08	-1,3E-08	5,78E-08	4,44E-08	-4,3E-08	5,78E-08	1,47E-08
0,0164	-904,827	-2,1E-08	6,69E-08	4,54E-08	-1,2E-08	6,69E-08	5,46E-08	-3,6E-08	6,69E-08	3,05E-08
0,0166	-876,307	-2E-08	7,57E-08	5,54E-08	-1,1E-08	7,57E-08	6,45E-08	-3E-08	7,57E-08	4,55E-08
0,0168	-844,328	-1,9E-08	8,42E-08	6,52E-08	-1E-08	8,42E-08	7,41E-08	-2,4E-08	8,42E-08	5,97E-08
0,017	-809,017	-1,8E-08	9,23E-08	7,46E-08	-8,9E-09	9,23E-08	8,34E-08	-1,9E-08	9,23E-08	7,31E-08
0,0172	-770,513	-1,6E-08	1E-07	8,37E-08	-7,9E-09	1E-07	9,23E-08	-1,5E-08	1E-07	8,54E-08
0,0174	-728,969	-1,5E-08	1,08E-07	9,25E-08	-6,8E-09	1,08E-07	1,01E-07	-1,1E-08	1,08E-07	9,68E-08
0,0176	-684,547	-1,4E-08	1,15E-07	1,01E-07	-5,9E-09	1,15E-07	1,09E-07	-7,4E-09	1,15E-07	1,07E-07
0,0178	-637,424	-1,2E-08	1,21E-07	1,09E-07	-5E-09	1,21E-07	1,16E-07	-4,8E-09	1,21E-07	1,16E-07
0,018	-587,785	-1,1E-08	1,27E-07	1,16E-07	-4,2E-09	1,27E-07	1,23E-07	-2,8E-09	1,27E-07	1,24E-07
0,0182	-535,827	-9,7E-09	1,33E-07	1,23E-07	-3,4E-09	1,33E-07	1,29E-07	-1,4E-09	1,33E-07	1,31E-07
0,0184	-481,754	-8,4E-09	1,38E-07	1,29E-07	-2,8E-09	1,38E-07	1,35E-07	-5,3E-10	1,38E-07	1,37E-07
0,0186	-425,779	-7,1E-09	1,42E-07	1,35E-07	-2,1E-09	1,42E-07	1,4E-07	-1,1E-10	1,42E-07	1,42E-07

Apêndice

0,0188	-368,125	-5,9E-09	1,46E-07	1,4E-07	-1,6E-09	1,46E-07	1,44E-07	1,61E-11	1,46E-07	1,46E-07
0,019	-309,017	-4,6E-09	1,49E-07	1,45E-07	-1,1E-09	1,49E-07	1,48E-07	6,63E-12	1,49E-07	1,49E-07
0,0192	-248,69	-3,4E-09	1,52E-07	1,49E-07	-5,6E-10	1,52E-07	1,52E-07	7,23E-11	1,52E-07	1,52E-07
0,0194	-187,381	-2,3E-09	1,54E-07	1,52E-07	-8,7E-11	1,54E-07	1,54E-07	4,44E-10	1,54E-07	1,55E-07
0,0196	-125,333	-1,1E-09	1,56E-07	1,55E-07	3,9E-10	1,56E-07	1,56E-07	1,36E-09	1,56E-07	1,57E-07
0,0198	-62,7905	9,38E-11	1,57E-07	1,57E-07	8,86E-10	1,57E-07	1,58E-07	3,07E-09	1,57E-07	1,6E-07
0,02	0	1,27E-09	1,57E-07	1,58E-07	1,42E-09	1,57E-07	1,59E-07	5,77E-09	1,57E-07	1,63E-07
0,0202	62,79052	2,46E-09	1,57E-07	1,59E-07	2,02E-09	1,57E-07	1,59E-07	9,64E-09	1,57E-07	1,66E-07
0,0204	125,3332	3,67E-09	1,56E-07	1,6E-07	2,68E-09	1,56E-07	1,59E-07	1,48E-08	1,56E-07	1,71E-07
0,0206	187,3813	4,91E-09	1,54E-07	1,59E-07	3,44E-09	1,54E-07	1,58E-07	2,12E-08	1,54E-07	1,75E-07
0,0208	248,6899	6,18E-09	1,52E-07	1,58E-07	4,3E-09	1,52E-07	1,56E-07	2,88E-08	1,52E-07	1,81E-07
0,021	309,017	7,49E-09	1,49E-07	1,57E-07	5,26E-09	1,49E-07	1,55E-07	3,75E-08	1,49E-07	1,87E-07
0,0212	368,1246	8,83E-09	1,46E-07	1,55E-07	6,32E-09	1,46E-07	1,52E-07	4,7E-08	1,46E-07	1,93E-07
0,0214	425,7793	1,02E-08	1,42E-07	1,52E-07	7,48E-09	1,42E-07	1,5E-07	5,71E-08	1,42E-07	1,99E-07
0,0216	481,7537	1,16E-08	1,38E-07	1,49E-07	8,73E-09	1,38E-07	1,46E-07	6,74E-08	1,38E-07	2,05E-07
0,0218	535,8268	1,31E-08	1,33E-07	1,46E-07	1E-08	1,33E-07	1,43E-07	7,76E-08	1,33E-07	2,1E-07
0,022	587,7853	1,45E-08	1,27E-07	1,42E-07	1,14E-08	1,27E-07	1,38E-07	8,72E-08	1,27E-07	2,14E-07
0,0222	637,424	1,59E-08	1,21E-07	1,37E-07	1,27E-08	1,21E-07	1,34E-07	9,6E-08	1,21E-07	2,17E-07
0,0224	684,5471	1,74E-08	1,15E-07	1,32E-07	1,41E-08	1,15E-07	1,29E-07	1,04E-07	1,15E-07	2,18E-07
0,0226	728,9686	1,88E-08	1,08E-07	1,26E-07	1,54E-08	1,08E-07	1,23E-07	1,1E-07	1,08E-07	2,18E-07
0,0228	770,5132	2,01E-08	1E-07	1,2E-07	1,66E-08	1E-07	1,17E-07	1,15E-07	1E-07	2,15E-07
0,023	809,017	2,14E-08	9,23E-08	1,14E-07	1,77E-08	9,23E-08	1,1E-07	1,19E-07	9,23E-08	2,11E-07
0,0232	844,3279	2,26E-08	8,42E-08	1,07E-07	1,86E-08	8,42E-08	1,03E-07	1,21E-07	8,42E-08	2,05E-07
0,0234	876,3067	2,37E-08	7,57E-08	9,93E-08	1,94E-08	7,57E-08	9,51E-08	1,21E-07	7,57E-08	1,97E-07
0,0236	904,8271	2,46E-08	6,69E-08	9,15E-08	2E-08	6,69E-08	8,69E-08	1,2E-07	6,69E-08	1,87E-07
0,0238	929,7765	2,54E-08	5,78E-08	8,32E-08	2,05E-08	5,78E-08	7,83E-08	1,18E-07	5,78E-08	1,76E-07
0,024	951,0565	2,61E-08	4,85E-08	7,46E-08	2,07E-08	4,85E-08	6,93E-08	1,15E-07	4,85E-08	1,64E-07

Apêndice

0,0242	968,5832	2,66E-08	3,91E-08	6,56E-08	2,08E-08	3,91E-08	5,98E-08	1,11E-07	3,91E-08	1,5E-07
0,0244	982,2873	2,69E-08	2,94E-08	5,63E-08	2,06E-08	2,94E-08	5,01E-08	1,06E-07	2,94E-08	1,35E-07
0,0246	992,1147	2,71E-08	1,97E-08	4,68E-08	2,03E-08	1,97E-08	4E-08	1E-07	1,97E-08	1,2E-07
0,0248	998,0267	2,7E-08	9,86E-09	3,69E-08	1,99E-08	9,86E-09	2,97E-08	9,36E-08	9,86E-09	1,04E-07
0,025	1000	2,69E-08	2,01E-21	2,69E-08	1,93E-08	2,01E-21	1,93E-08	8,68E-08	2,01E-21	8,68E-08
0,0252	998,0267	2,65E-08	-9,9E-09	1,66E-08	1,85E-08	-9,9E-09	8,66E-09	7,96E-08	-9,9E-09	6,98E-08
0,0254	992,1147	2,6E-08	-2E-08	6,3E-09	1,77E-08	-2E-08	-2E-09	7,23E-08	-2E-08	5,26E-08
0,0256	982,2873	2,53E-08	-2,9E-08	-4,1E-09	1,67E-08	-2,9E-08	-1,3E-08	6,48E-08	-2,9E-08	3,54E-08
0,0258	968,5832	2,45E-08	-3,9E-08	-1,5E-08	1,57E-08	-3,9E-08	-2,3E-08	5,74E-08	-3,9E-08	1,83E-08
0,026	951,0565	2,36E-08	-4,9E-08	-2,5E-08	1,46E-08	-4,9E-08	-3,4E-08	5,01E-08	-4,9E-08	1,56E-09
0,0262	929,7765	2,26E-08	-5,8E-08	-3,5E-08	1,35E-08	-5,8E-08	-4,4E-08	4,31E-08	-5,8E-08	-1,5E-08
0,0264	904,8271	2,15E-08	-6,7E-08	-4,5E-08	1,23E-08	-6,7E-08	-5,5E-08	3,64E-08	-6,7E-08	-3E-08
0,0266	876,3067	2,03E-08	-7,6E-08	-5,5E-08	1,12E-08	-7,6E-08	-6,5E-08	3,02E-08	-7,6E-08	-4,6E-08
0,0268	844,3279	1,9E-08	-8,4E-08	-6,5E-08	1E-08	-8,4E-08	-7,4E-08	2,44E-08	-8,4E-08	-6E-08
0,027	809,017	1,77E-08	-9,2E-08	-7,5E-08	8,93E-09	-9,2E-08	-8,3E-08	1,93E-08	-9,2E-08	-7,3E-08
0,0272	770,5132	1,64E-08	-1E-07	-8,4E-08	7,86E-09	-1E-07	-9,2E-08	1,47E-08	-1E-07	-8,5E-08
0,0274	728,9686	1,5E-08	-1,1E-07	-9,2E-08	6,85E-09	-1,1E-07	-1E-07	1,07E-08	-1,1E-07	-9,7E-08
0,0276	684,5471	1,37E-08	-1,1E-07	-1E-07	5,89E-09	-1,1E-07	-1,1E-07	7,44E-09	-1,1E-07	-1,1E-07
0,0278	637,424	1,23E-08	-1,2E-07	-1,1E-07	5,01E-09	-1,2E-07	-1,2E-07	4,8E-09	-1,2E-07	-1,2E-07
0,028	587,7853	1,1E-08	-1,3E-07	-1,2E-07	4,19E-09	-1,3E-07	-1,2E-07	2,79E-09	-1,3E-07	-1,2E-07
0,0282	535,8268	9,68E-09	-1,3E-07	-1,2E-07	3,44E-09	-1,3E-07	-1,3E-07	1,39E-09	-1,3E-07	-1,3E-07
0,0284	481,7537	8,38E-09	-1,4E-07	-1,3E-07	2,76E-09	-1,4E-07	-1,3E-07	5,3E-10	-1,4E-07	-1,4E-07
0,0286	425,7793	7,11E-09	-1,4E-07	-1,4E-07	2,14E-09	-1,4E-07	-1,4E-07	1,05E-10	-1,4E-07	-1,4E-07
0,0288	368,1246	5,86E-09	-1,5E-07	-1,4E-07	1,57E-09	-1,5E-07	-1,4E-07	-1,6E-11	-1,5E-07	-1,5E-07
0,029	309,017	4,64E-09	-1,5E-07	-1,4E-07	1,05E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-6,6E-12	-1,5E-07	-1,5E-07
0,0292	248,6899	3,44E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	5,61E-10	-1,5E-07	-1,5E-07	-7,2E-11	-1,5E-07	-1,5E-07
0,0294	187,3813	2,26E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	8,69E-11	-1,5E-07	-1,5E-07	-4,4E-10	-1,5E-07	-1,5E-07

Apêndice

0,0296	125,3332	1,08E-09	-1,6E-07	-1,5E-07	-3,9E-10	-1,6E-07	-1,6E-07	-1,4E-09	-1,6E-07	-1,6E-07
0,0298	62,79052	-9,4E-11	-1,6E-07	-1,6E-07	-8,9E-10	-1,6E-07	-1,6E-07	-3,1E-09	-1,6E-07	-1,6E-07
0,03	2,17E-11	-1,3E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-1,4E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-5,8E-09	-1,6E-07	-1,6E-07
0,0302	-62,7905	-2,5E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-2E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-9,6E-09	-1,6E-07	-1,7E-07
0,0304	-125,333	-3,7E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-2,7E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-1,5E-08	-1,6E-07	-1,7E-07
0,0306	-187,381	-4,9E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-3,4E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-2,1E-08	-1,5E-07	-1,8E-07
0,0308	-248,69	-6,2E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-4,3E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-2,9E-08	-1,5E-07	-1,8E-07
0,031	-309,017	-7,5E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-5,3E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-3,8E-08	-1,5E-07	-1,9E-07
0,0312	-368,125	-8,8E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-6,3E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-4,7E-08	-1,5E-07	-1,9E-07
0,0314	-425,779	-1E-08	-1,4E-07	-1,5E-07	-7,5E-09	-1,4E-07	-1,5E-07	-5,7E-08	-1,4E-07	-2E-07
0,0316	-481,754	-1,2E-08	-1,4E-07	-1,5E-07	-8,7E-09	-1,4E-07	-1,5E-07	-6,7E-08	-1,4E-07	-2,1E-07
0,0318	-535,827	-1,3E-08	-1,3E-07	-1,5E-07	-1E-08	-1,3E-07	-1,4E-07	-7,8E-08	-1,3E-07	-2,1E-07
0,032	-587,785	-1,4E-08	-1,3E-07	-1,4E-07	-1,1E-08	-1,3E-07	-1,4E-07	-8,7E-08	-1,3E-07	-2,1E-07
0,0322	-637,424	-1,6E-08	-1,2E-07	-1,4E-07	-1,3E-08	-1,2E-07	-1,3E-07	-9,6E-08	-1,2E-07	-2,2E-07
0,0324	-684,547	-1,7E-08	-1,1E-07	-1,3E-07	-1,4E-08	-1,1E-07	-1,3E-07	-1E-07	-1,1E-07	-2,2E-07
0,0326	-728,969	-1,9E-08	-1,1E-07	-1,3E-07	-1,5E-08	-1,1E-07	-1,2E-07	-1,1E-07	-1,1E-07	-2,2E-07
0,0328	-770,513	-2E-08	-1E-07	-1,2E-07	-1,7E-08	-1E-07	-1,2E-07	-1,2E-07	-1E-07	-2,2E-07
0,033	-809,017	-2,1E-08	-9,2E-08	-1,1E-07	-1,8E-08	-9,2E-08	-1,1E-07	-1,2E-07	-9,2E-08	-2,1E-07
0,0332	-844,328	-2,3E-08	-8,4E-08	-1,1E-07	-1,9E-08	-8,4E-08	-1E-07	-1,2E-07	-8,4E-08	-2E-07
0,0334	-876,307	-2,4E-08	-7,6E-08	-9,9E-08	-1,9E-08	-7,6E-08	-9,5E-08	-1,2E-07	-7,6E-08	-2E-07
0,0336	-904,827	-2,5E-08	-6,7E-08	-9,1E-08	-2E-08	-6,7E-08	-8,7E-08	-1,2E-07	-6,7E-08	-1,9E-07
0,0338	-929,776	-2,5E-08	-5,8E-08	-8,3E-08	-2E-08	-5,8E-08	-7,8E-08	-1,2E-07	-5,8E-08	-1,8E-07
0,034	-951,057	-2,6E-08	-4,9E-08	-7,5E-08	-2,1E-08	-4,9E-08	-6,9E-08	-1,2E-07	-4,9E-08	-1,6E-07
0,0342	-968,583	-2,7E-08	-3,9E-08	-6,6E-08	-2,1E-08	-3,9E-08	-6E-08	-1,1E-07	-3,9E-08	-1,5E-07
0,0344	-982,287	-2,7E-08	-2,9E-08	-5,6E-08	-2,1E-08	-2,9E-08	-5E-08	-1,1E-07	-2,9E-08	-1,4E-07
0,0346	-992,115	-2,7E-08	-2E-08	-4,7E-08	-2E-08	-2E-08	-4E-08	-1E-07	-2E-08	-1,2E-07
0,0348	-998,027	-2,7E-08	-9,9E-09	-3,7E-08	-2E-08	-9,9E-09	-3E-08	-9,4E-08	-9,9E-09	-1E-07

Apêndice

0,035	-1000	-2,7E-08	-5,1E-21	-2,7E-08	-1,9E-08	-5,1E-21	-1,9E-08	-8,7E-08	-5,1E-21	-8,7E-08
0,0352	-998,027	-2,7E-08	9,86E-09	-1,7E-08	-1,9E-08	9,86E-09	-8,7E-09	-8E-08	9,86E-09	-7E-08
0,0354	-992,115	-2,6E-08	1,97E-08	-6,3E-09	-1,8E-08	1,97E-08	2,02E-09	-7,2E-08	1,97E-08	-5,3E-08
0,0356	-982,287	-2,5E-08	2,94E-08	4,11E-09	-1,7E-08	2,94E-08	1,27E-08	-6,5E-08	2,94E-08	-3,5E-08
0,0358	-968,583	-2,5E-08	3,91E-08	1,45E-08	-1,6E-08	3,91E-08	2,34E-08	-5,7E-08	3,91E-08	-1,8E-08
0,036	-951,057	-2,4E-08	4,85E-08	2,49E-08	-1,5E-08	4,85E-08	3,4E-08	-5E-08	4,85E-08	-1,6E-09
0,0362	-929,776	-2,3E-08	5,78E-08	3,52E-08	-1,3E-08	5,78E-08	4,44E-08	-4,3E-08	5,78E-08	1,47E-08
0,0364	-904,827	-2,1E-08	6,69E-08	4,54E-08	-1,2E-08	6,69E-08	5,46E-08	-3,6E-08	6,69E-08	3,05E-08
0,0366	-876,307	-2E-08	7,57E-08	5,54E-08	-1,1E-08	7,57E-08	6,45E-08	-3E-08	7,57E-08	4,55E-08
0,0368	-844,328	-1,9E-08	8,42E-08	6,52E-08	-1E-08	8,42E-08	7,41E-08	-2,4E-08	8,42E-08	5,97E-08
0,037	-809,017	-1,8E-08	9,23E-08	7,46E-08	-8,9E-09	9,23E-08	8,34E-08	-1,9E-08	9,23E-08	7,31E-08
0,0372	-770,513	-1,6E-08	1E-07	8,37E-08	-7,9E-09	1E-07	9,23E-08	-1,5E-08	1E-07	8,54E-08
0,0374	-728,969	-1,5E-08	1,08E-07	9,25E-08	-6,8E-09	1,08E-07	1,01E-07	-1,1E-08	1,08E-07	9,68E-08
0,0376	-684,547	-1,4E-08	1,15E-07	1,01E-07	-5,9E-09	1,15E-07	1,09E-07	-7,4E-09	1,15E-07	1,07E-07
0,0378	-637,424	-1,2E-08	1,21E-07	1,09E-07	-5E-09	1,21E-07	1,16E-07	-4,8E-09	1,21E-07	1,16E-07
0,038	-587,785	-1,1E-08	1,27E-07	1,16E-07	-4,2E-09	1,27E-07	1,23E-07	-2,8E-09	1,27E-07	1,24E-07
0,0382	-535,827	-9,7E-09	1,33E-07	1,23E-07	-3,4E-09	1,33E-07	1,29E-07	-1,4E-09	1,33E-07	1,31E-07
0,0384	-481,754	-8,4E-09	1,38E-07	1,29E-07	-2,8E-09	1,38E-07	1,35E-07	-5,3E-10	1,38E-07	1,37E-07
0,0386	-425,779	-7,1E-09	1,42E-07	1,35E-07	-2,1E-09	1,42E-07	1,4E-07	-1,1E-10	1,42E-07	1,42E-07
0,0388	-368,125	-5,9E-09	1,46E-07	1,4E-07	-1,6E-09	1,46E-07	1,44E-07	1,61E-11	1,46E-07	1,46E-07
0,039	-309,017	-4,6E-09	1,49E-07	1,45E-07	-1,1E-09	1,49E-07	1,48E-07	6,63E-12	1,49E-07	1,49E-07
0,0392	-248,69	-3,4E-09	1,52E-07	1,49E-07	-5,6E-10	1,52E-07	1,52E-07	7,23E-11	1,52E-07	1,52E-07
0,0394	-187,381	-2,3E-09	1,54E-07	1,52E-07	-8,7E-11	1,54E-07	1,54E-07	4,44E-10	1,54E-07	1,55E-07
0,0396	-125,333	-1,1E-09	1,56E-07	1,55E-07	3,9E-10	1,56E-07	1,56E-07	1,36E-09	1,56E-07	1,57E-07
0,0398	-62,7905	9,38E-11	1,57E-07	1,57E-07	8,86E-10	1,57E-07	1,58E-07	3,07E-09	1,57E-07	1,6E-07
0,04	-4,1E-11	1,27E-09	1,57E-07	1,58E-07	1,42E-09	1,57E-07	1,59E-07	5,77E-09	1,57E-07	1,63E-07
0,0402	62,79052	2,46E-09	1,57E-07	1,59E-07	2,02E-09	1,57E-07	1,59E-07	9,64E-09	1,57E-07	1,66E-07

Apêndice

0,0404	125,3332	3,67E-09	1,56E-07	1,6E-07	2,68E-09	1,56E-07	1,59E-07	1,48E-08	1,56E-07	1,71E-07
0,0406	187,3813	4,91E-09	1,54E-07	1,59E-07	3,44E-09	1,54E-07	1,58E-07	2,12E-08	1,54E-07	1,75E-07
0,0408	248,6899	6,18E-09	1,52E-07	1,58E-07	4,3E-09	1,52E-07	1,56E-07	2,88E-08	1,52E-07	1,81E-07
0,041	309,017	7,49E-09	1,49E-07	1,57E-07	5,26E-09	1,49E-07	1,55E-07	3,75E-08	1,49E-07	1,87E-07
0,0412	368,1246	8,83E-09	1,46E-07	1,55E-07	6,32E-09	1,46E-07	1,52E-07	4,7E-08	1,46E-07	1,93E-07
0,0414	425,7793	1,02E-08	1,42E-07	1,52E-07	7,48E-09	1,42E-07	1,5E-07	5,71E-08	1,42E-07	1,99E-07
0,0416	481,7537	1,16E-08	1,38E-07	1,49E-07	8,73E-09	1,38E-07	1,46E-07	6,74E-08	1,38E-07	2,05E-07
0,0418	535,8268	1,31E-08	1,33E-07	1,46E-07	1E-08	1,33E-07	1,43E-07	7,76E-08	1,33E-07	2,1E-07
0,042	587,7853	1,45E-08	1,27E-07	1,42E-07	1,14E-08	1,27E-07	1,38E-07	8,72E-08	1,27E-07	2,14E-07
0,0422	637,424	1,59E-08	1,21E-07	1,37E-07	1,27E-08	1,21E-07	1,34E-07	9,6E-08	1,21E-07	2,17E-07
0,0424	684,5471	1,74E-08	1,15E-07	1,32E-07	1,41E-08	1,15E-07	1,29E-07	1,04E-07	1,15E-07	2,18E-07
0,0426	728,9686	1,88E-08	1,08E-07	1,26E-07	1,54E-08	1,08E-07	1,23E-07	1,1E-07	1,08E-07	2,18E-07
0,0428	770,5132	2,01E-08	1E-07	1,2E-07	1,66E-08	1E-07	1,17E-07	1,15E-07	1E-07	2,15E-07
0,043	809,017	2,14E-08	9,23E-08	1,14E-07	1,77E-08	9,23E-08	1,1E-07	1,19E-07	9,23E-08	2,11E-07
0,0432	844,3279	2,26E-08	8,42E-08	1,07E-07	1,86E-08	8,42E-08	1,03E-07	1,21E-07	8,42E-08	2,05E-07
0,0434	876,3067	2,37E-08	7,57E-08	9,93E-08	1,94E-08	7,57E-08	9,51E-08	1,21E-07	7,57E-08	1,97E-07
0,0436	904,8271	2,46E-08	6,69E-08	9,15E-08	2E-08	6,69E-08	8,69E-08	1,2E-07	6,69E-08	1,87E-07
0,0438	929,7765	2,54E-08	5,78E-08	8,32E-08	2,05E-08	5,78E-08	7,83E-08	1,18E-07	5,78E-08	1,76E-07
0,044	951,0565	2,61E-08	4,85E-08	7,46E-08	2,07E-08	4,85E-08	6,93E-08	1,15E-07	4,85E-08	1,64E-07
0,0442	968,5832	2,66E-08	3,91E-08	6,56E-08	2,08E-08	3,91E-08	5,98E-08	1,11E-07	3,91E-08	1,5E-07
0,0444	982,2873	2,69E-08	2,94E-08	5,63E-08	2,06E-08	2,94E-08	5,01E-08	1,06E-07	2,94E-08	1,35E-07
0,0446	992,1147	2,71E-08	1,97E-08	4,68E-08	2,03E-08	1,97E-08	4E-08	1E-07	1,97E-08	1,2E-07
0,0448	998,0267	2,7E-08	9,86E-09	3,69E-08	1,99E-08	9,86E-09	2,97E-08	9,36E-08	9,86E-09	1,04E-07
0,045	1000	2,69E-08	7,91E-21	2,69E-08	1,93E-08	7,91E-21	1,93E-08	8,68E-08	7,91E-21	8,68E-08
0,0452	998,0267	2,65E-08	-9,9E-09	1,66E-08	1,85E-08	-9,9E-09	8,66E-09	7,96E-08	-9,9E-09	6,98E-08
0,0454	992,1147	2,6E-08	-2E-08	6,3E-09	1,77E-08	-2E-08	-2E-09	7,23E-08	-2E-08	5,26E-08
0,0456	982,2873	2,53E-08	-2,9E-08	-4,1E-09	1,67E-08	-2,9E-08	-1,3E-08	6,48E-08	-2,9E-08	3,54E-08

Apêndice

0,0458	968,5832	2,45E-08	-3,9E-08	-1,5E-08	1,57E-08	-3,9E-08	-2,3E-08	5,74E-08	-3,9E-08	1,83E-08
0,046	951,0565	2,36E-08	-4,9E-08	-2,5E-08	1,46E-08	-4,9E-08	-3,4E-08	5,01E-08	-4,9E-08	1,56E-09
0,0462	929,7765	2,26E-08	-5,8E-08	-3,5E-08	1,35E-08	-5,8E-08	-4,4E-08	4,31E-08	-5,8E-08	-1,5E-08
0,0464	904,8271	2,15E-08	-6,7E-08	-4,5E-08	1,23E-08	-6,7E-08	-5,5E-08	3,64E-08	-6,7E-08	-3E-08
0,0466	876,3067	2,03E-08	-7,6E-08	-5,5E-08	1,12E-08	-7,6E-08	-6,5E-08	3,02E-08	-7,6E-08	-4,6E-08
0,0468	844,3279	1,9E-08	-8,4E-08	-6,5E-08	1E-08	-8,4E-08	-7,4E-08	2,44E-08	-8,4E-08	-6E-08
0,047	809,017	1,77E-08	-9,2E-08	-7,5E-08	8,93E-09	-9,2E-08	-8,3E-08	1,93E-08	-9,2E-08	-7,3E-08
0,0472	770,5132	1,64E-08	-1E-07	-8,4E-08	7,86E-09	-1E-07	-9,2E-08	1,47E-08	-1E-07	-8,5E-08
0,0474	728,9686	1,5E-08	-1,1E-07	-9,2E-08	6,85E-09	-1,1E-07	-1E-07	1,07E-08	-1,1E-07	-9,7E-08
0,0476	684,5471	1,37E-08	-1,1E-07	-1E-07	5,89E-09	-1,1E-07	-1,1E-07	7,44E-09	-1,1E-07	-1,1E-07
0,0478	637,424	1,23E-08	-1,2E-07	-1,1E-07	5,01E-09	-1,2E-07	-1,2E-07	4,8E-09	-1,2E-07	-1,2E-07
0,048	587,7853	1,1E-08	-1,3E-07	-1,2E-07	4,19E-09	-1,3E-07	-1,2E-07	2,79E-09	-1,3E-07	-1,2E-07
0,0482	535,8268	9,68E-09	-1,3E-07	-1,2E-07	3,44E-09	-1,3E-07	-1,3E-07	1,39E-09	-1,3E-07	-1,3E-07
0,0484	481,7537	8,38E-09	-1,4E-07	-1,3E-07	2,76E-09	-1,4E-07	-1,3E-07	5,3E-10	-1,4E-07	-1,4E-07
0,0486	425,7793	7,11E-09	-1,4E-07	-1,4E-07	2,14E-09	-1,4E-07	-1,4E-07	1,05E-10	-1,4E-07	-1,4E-07
0,0488	368,1246	5,86E-09	-1,5E-07	-1,4E-07	1,57E-09	-1,5E-07	-1,4E-07	-1,6E-11	-1,5E-07	-1,5E-07
0,049	309,017	4,64E-09	-1,5E-07	-1,4E-07	1,05E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-6,6E-12	-1,5E-07	-1,5E-07
0,0492	248,6899	3,44E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	5,61E-10	-1,5E-07	-1,5E-07	-7,2E-11	-1,5E-07	-1,5E-07
0,0494	187,3813	2,26E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	8,69E-11	-1,5E-07	-1,5E-07	-4,4E-10	-1,5E-07	-1,5E-07
0,0496	125,3332	1,08E-09	-1,6E-07	-1,5E-07	-3,9E-10	-1,6E-07	-1,6E-07	-1,4E-09	-1,6E-07	-1,6E-07
0,0498	62,79052	-9,4E-11	-1,6E-07	-1,6E-07	-8,9E-10	-1,6E-07	-1,6E-07	-3,1E-09	-1,6E-07	-1,6E-07
0,05	5,92E-11	-1,3E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-1,4E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-5,8E-09	-1,6E-07	-1,6E-07
0,0502	-62,7905	-2,5E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-2E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-9,6E-09	-1,6E-07	-1,7E-07
0,0504	-125,333	-3,7E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-2,7E-09	-1,6E-07	-1,6E-07	-1,5E-08	-1,6E-07	-1,7E-07
0,0506	-187,381	-4,9E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-3,4E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-2,1E-08	-1,5E-07	-1,8E-07
0,0508	-248,69	-6,2E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-4,3E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-2,9E-08	-1,5E-07	-1,8E-07
0,051	-309,017	-7,5E-09	-1,5E-07	-1,6E-07	-5,3E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-3,8E-08	-1,5E-07	-1,9E-07

Apêndice

0,0512	-368,125	-8,8E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-6,3E-09	-1,5E-07	-1,5E-07	-4,7E-08	-1,5E-07	-1,9E-07
0,0514	-425,779	-1E-08	-1,4E-07	-1,5E-07	-7,5E-09	-1,4E-07	-1,5E-07	-5,7E-08	-1,4E-07	-2E-07
0,0516	-481,754	-1,2E-08	-1,4E-07	-1,5E-07	-8,7E-09	-1,4E-07	-1,5E-07	-6,7E-08	-1,4E-07	-2,1E-07
0,0518	-535,827	-1,3E-08	-1,3E-07	-1,5E-07	-1E-08	-1,3E-07	-1,4E-07	-7,8E-08	-1,3E-07	-2,1E-07
0,052	-587,785	-1,4E-08	-1,3E-07	-1,4E-07	-1,1E-08	-1,3E-07	-1,4E-07	-8,7E-08	-1,3E-07	-2,1E-07
0,0522	-637,424	-1,6E-08	-1,2E-07	-1,4E-07	-1,3E-08	-1,2E-07	-1,3E-07	-9,6E-08	-1,2E-07	-2,2E-07
0,0524	-684,547	-1,7E-08	-1,1E-07	-1,3E-07	-1,4E-08	-1,1E-07	-1,3E-07	-1E-07	-1,1E-07	-2,2E-07
0,0526	-728,969	-1,9E-08	-1,1E-07	-1,3E-07	-1,5E-08	-1,1E-07	-1,2E-07	-1,1E-07	-1,1E-07	-2,2E-07
0,0528	-770,513	-2E-08	-1E-07	-1,2E-07	-1,7E-08	-1E-07	-1,2E-07	-1,2E-07	-1E-07	-2,2E-07
0,053	-809,017	-2,1E-08	-9,2E-08	-1,1E-07	-1,8E-08	-9,2E-08	-1,1E-07	-1,2E-07	-9,2E-08	-2,1E-07
0,0532	-844,328	-2,3E-08	-8,4E-08	-1,1E-07	-1,9E-08	-8,4E-08	-1E-07	-1,2E-07	-8,4E-08	-2E-07
0,0534	-876,307	-2,4E-08	-7,6E-08	-9,9E-08	-1,9E-08	-7,6E-08	-9,5E-08	-1,2E-07	-7,6E-08	-2E-07
0,0536	-904,827	-2,5E-08	-6,7E-08	-9,1E-08	-2E-08	-6,7E-08	-8,7E-08	-1,2E-07	-6,7E-08	-1,9E-07
0,0538	-929,776	-2,5E-08	-5,8E-08	-8,3E-08	-2E-08	-5,8E-08	-7,8E-08	-1,2E-07	-5,8E-08	-1,8E-07
0,054	-951,057	-2,6E-08	-4,9E-08	-7,5E-08	-2,1E-08	-4,9E-08	-6,9E-08	-1,2E-07	-4,9E-08	-1,6E-07
0,0542	-968,583	-2,7E-08	-3,9E-08	-6,6E-08	-2,1E-08	-3,9E-08	-6E-08	-1,1E-07	-3,9E-08	-1,5E-07
0,0544	-982,287	-2,7E-08	-2,9E-08	-5,6E-08	-2,1E-08	-2,9E-08	-5E-08	-1,1E-07	-2,9E-08	-1,4E-07
0,0546	-992,115	-2,7E-08	-2E-08	-4,7E-08	-2E-08	-2E-08	-4E-08	-1E-07	-2E-08	-1,2E-07
0,0548	-998,027	-2,7E-08	-9,9E-09	-3,7E-08	-2E-08	-9,9E-09	-3E-08	-9,4E-08	-9,9E-09	-1E-07
0,055	-1000	-2,7E-08	-1,1E-20	-2,7E-08	-1,9E-08	-1,1E-20	-1,9E-08	-8,7E-08	-1,1E-20	-8,7E-08
0,0552	-998,027	-2,7E-08	9,86E-09	-1,7E-08	-1,9E-08	9,86E-09	-8,7E-09	-8E-08	9,86E-09	-7E-08
0,0554	-992,115	-2,6E-08	1,97E-08	-6,3E-09	-1,8E-08	1,97E-08	2,02E-09	-7,2E-08	1,97E-08	-5,3E-08
0,0556	-982,287	-2,5E-08	2,94E-08	4,11E-09	-1,7E-08	2,94E-08	1,27E-08	-6,5E-08	2,94E-08	-3,5E-08
0,0558	-968,583	-2,5E-08	3,91E-08	1,45E-08	-1,6E-08	3,91E-08	2,34E-08	-5,7E-08	3,91E-08	-1,8E-08
0,056	-951,057	-2,4E-08	4,85E-08	2,49E-08	-1,5E-08	4,85E-08	3,4E-08	-5E-08	4,85E-08	-1,6E-09
0,0562	-929,776	-2,3E-08	5,78E-08	3,52E-08	-1,3E-08	5,78E-08	4,44E-08	-4,3E-08	5,78E-08	1,47E-08
0,0564	-904,827	-2,1E-08	6,69E-08	4,54E-08	-1,2E-08	6,69E-08	5,46E-08	-3,6E-08	6,69E-08	3,05E-08

Apêndice

0,0566	-876,307	-2E-08	7,57E-08	5,54E-08	-1,1E-08	7,57E-08	6,45E-08	-3E-08	7,57E-08	4,55E-08
0,0568	-844,328	-1,9E-08	8,42E-08	6,52E-08	-1E-08	8,42E-08	7,41E-08	-2,4E-08	8,42E-08	5,97E-08
0,057	-809,017	-1,8E-08	9,23E-08	7,46E-08	-8,9E-09	9,23E-08	8,34E-08	-1,9E-08	9,23E-08	7,31E-08
0,0572	-770,513	-1,6E-08	1E-07	8,37E-08	-7,9E-09	1E-07	9,23E-08	-1,5E-08	1E-07	8,54E-08
0,0574	-728,969	-1,5E-08	1,08E-07	9,25E-08	-6,8E-09	1,08E-07	1,01E-07	-1,1E-08	1,08E-07	9,68E-08
0,0576	-684,547	-1,4E-08	1,15E-07	1,01E-07	-5,9E-09	1,15E-07	1,09E-07	-7,4E-09	1,15E-07	1,07E-07
0,0578	-637,424	-1,2E-08	1,21E-07	1,09E-07	-5E-09	1,21E-07	1,16E-07	-4,8E-09	1,21E-07	1,16E-07
0,058	-587,785	-1,1E-08	1,27E-07	1,16E-07	-4,2E-09	1,27E-07	1,23E-07	-2,8E-09	1,27E-07	1,24E-07
0,0582	-535,827	-9,7E-09	1,33E-07	1,23E-07	-3,4E-09	1,33E-07	1,29E-07	-1,4E-09	1,33E-07	1,31E-07
0,0584	-481,754	-8,4E-09	1,38E-07	1,29E-07	-2,8E-09	1,38E-07	1,35E-07	-5,3E-10	1,38E-07	1,37E-07
0,0586	-425,779	-7,1E-09	1,42E-07	1,35E-07	-2,1E-09	1,42E-07	1,4E-07	-1,1E-10	1,42E-07	1,42E-07
0,0588	-368,125	-5,9E-09	1,46E-07	1,4E-07	-1,6E-09	1,46E-07	1,44E-07	1,61E-11	1,46E-07	1,46E-07
0,059	-309,017	-4,6E-09	1,49E-07	1,45E-07	-1,1E-09	1,49E-07	1,48E-07	6,63E-12	1,49E-07	1,49E-07
0,0592	-248,69	-3,4E-09	1,52E-07	1,49E-07	-5,6E-10	1,52E-07	1,52E-07	7,23E-11	1,52E-07	1,52E-07
0,0594	-187,381	-2,3E-09	1,54E-07	1,52E-07	-8,7E-11	1,54E-07	1,54E-07	4,44E-10	1,54E-07	1,55E-07
0,0596	-125,333	-1,1E-09	1,56E-07	1,55E-07	3,9E-10	1,56E-07	1,56E-07	1,36E-09	1,56E-07	1,57E-07
0,0598	-62,7905	9,38E-11	1,57E-07	1,57E-07	8,86E-10	1,57E-07	1,58E-07	3,07E-09	1,57E-07	1,6E-07
0,06	-7,9E-11	1,27E-09	1,57E-07	1,58E-07	1,42E-09	1,57E-07	1,59E-07	5,77E-09	1,57E-07	1,63E-07