



EFEITOS DE BAIXA TENSÃO EM CABOS DE ENERGIA ELÉTRICA PELA TÉCNICA DA MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X

Marcus Vinicius Santos da Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro

Maio de 2023

EFEITOS DE BAIXA TENSÃO EM CABOS DE ENERGIA ELÉTRICA PELA
TÉCNICA DA MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X

Marcus Vinicius Santos da Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Aprovada por: Prof. Ricardo Tadeu Lopes

Dra. Olga Maria Oliveira de Araújo

Prof. Davi Ferreira de Oliveira

Prof. Cleiton Magalhães Freitas

Prof. Joaquim Teixeira de Assis

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2023

Santos da Silva, Marcus Vinicius

Efeitos de baixa tensão em cabos de energia elétrica pela técnica da microtomografia de raios X/Marcus Vinicius Santos da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XV, 119 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 100 – 110.

1. Introdução. 2. Revisão bibliográfica. 3. Uma breve história dos raios X. 4. Cabos elétricos. I. Tadeu Lopes, Ricardo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Dedico esta Tese de
Doutorado, em especial aos
meus queridos pais, Vander
Rodrigues da Silva (In
memorian) e Maria da
Conceição dos Santos
Pereira (In memorian), que
mesmo nos deixando
precocemente, me tornou um
ser humano capaz de sonhar
e enfrentar a vida
honestamente.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me ajudar em todas essas caminhadas com saúde, tendo em vista que essa pesquisa foi realizada em uma fase muito difícil devido ao período pandêmico, COVID 19, onde foi complicado manter a saúde mental para a realização de todas as etapas da pesquisa.

A minha esposa Tamires Silva, por ser compreensiva, amiga e por ter me aturado nos momentos mais difíceis de toda minha trajetória acadêmica.

A minha querida mãe Maria da Conceição dos Santos Pereira (In memorian), que me ensinou a lutar honestamente na vida.

Ao meu orientador, prof. Ricardo Tadeu Lopes, pelo seu profissionalismo e a todos os ensinamentos acadêmicos e na vida, eternamente grato por tudo.

Aos colegas e amigos do PEN/COPPE/UFRJ/LIN, pelos ensinamentos e conhecimentos compartilhados. Em especial a Dr(a). Olga Maria Oliveira de Araújo.

Ao professor Davi Ferreira de Oliveira, pelo seu profissionalismo e amizade.

A todos os membros da banca por aceitar participar e pelas sugestões.

Ao CNPq, pela bolsa de fomento.

Aos professores e funcionários do PEN

A todos que contribuíram direta e indiretamente neste trabalho.

Nota: Esta tese está inserida no INCT- Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia em instrumentação Nuclear e Aplicações na Indústria e Saúde (INAIS) (projeto 406303/2023-1)

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

EFEITOS DE BAIXA TENSÃO EM CABOS DE ENERGIA ELÉTRICA PELA TÉCNICA DA MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X

Marcus Vinicius Santos da Silva

Maio/2023

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Segurança e qualidade são grandes desafios para a engenharia elétrica e problemas relacionados à interrupção não programada do sistema devido a falhas de dispositivos que podem ser um transtorno, principalmente quando essas falhas são causadas por vazios na isolação dos cabos de energia. Este trabalho avaliou os efeitos causados pelos pulsos de corrente elétrica na proliferação de vazios na camada isolante e o aumento do diâmetro dos cabos. Para isso, um sistema de microtomografia de raios X (microCT) foi utilizado para quantificar vazios em camadas isolantes de cabos elétricos de cobre (Cu) e alumínio (Al) com diferentes seções transversais e a geometria dos núcleos, antes e após pulsos de corrente elétrica. Os resultados mostraram um aumento de volume de vazios nos cabos de cobre com as seções transversais de 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2 , que apresentaram uma diferença dos volumes de vazios na ordem de: 4,49%, 4,34% e 2,45%, respectivamente, após o ensaio elétrico. E para o cabo com o núcleo de Al e área de 25 mm^2 , ocorreu o fenômeno da arborescência elétrica. O programa Comsol Multiphysics, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), foi executado para simular as amostras de cabos de baixa tensão com as mesmas medidas verificadas através da microCT que mostrou que outras grandezas físicas podem ser afetadas como os campos eletromagnéticos e térmicos. Os resultados mostraram que cabos com maiores quantidades de vazios possuem maiores modificações em diversas grandezas relevantes para o eletromagnetismo em cabos de potências, que implicará no funcionamento diário.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

LOW VOLTAGE EFFECTS ON ELECTRIC POWER CABLES USING THE X RAY MICROTOMOGRAPHY TECHNIQUE

Marcus Vinicius Santos da Silva

May/2023

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

Safety and quality are major challenges for electrical engineering and problems related to unscheduled system interruption due to device failures can be a nuisance, especially when these failures are caused by failures in the insulation of power cables. This work evaluates the effects caused by electric current pulses in front of voids in the insulated layer and the increase in cable diameter. For this, an X-ray microtomography (microCT) system was used to quantify voids in insulating layers of copper (Cu) and aluminum (Al) electrical cables with different cross sections and core geometry, before and after current pulses electric. The results showed an increase in the volume of voids in copper cables with cross sections of 25 mm^2 , 35 mm^2 and 50 mm^2 , which showed a difference in void volumes in the order of : 4.29%, 4.34% and 2.45%, respectively, after the electrical test. And for the cable with an Al core and an area of 25 mm^2 , the phenomenon of electrical arborescence occurred. The Comsol Multiphysics program, which uses the Finite Element Method (FEM), was executed to simulate the demonstration of low voltage cables with the same measurements verified through microCT, which showed that other physical quantities can be confirmed, such as electromagnetic and thermal fields. The astonishing results are that cables with larger dimensions of voids have greater modifications in several magnitudes relevant to electromagnetism in power cables, which will imply in daily operation.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3 FUNDAMENTOS DA MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X	12
3.1 A MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X	12
3.2 PRINCÍPIOS DA microCT	13
3.2.1 Reconstrução de Imagens tomográficas	14
3.2.2 Gerações das Imagens	22
3.2.3 Parâmetros quantificados	23
3.3 PARÂMETROS FÍSICOS DE QUALIDADE DA IMAGEM	24
3.3.1 Determinação do tamanho focal	25
3.3.2 Feixes cônicos	25
4 CABOS ELÉTRICOS	28
4.1 ARBORESCÊNCIAS	28
4.2 PROCESSO DE GERAÇÃO DAS ARBORESCÊNCIAS	29
4.3 FATORES DE INFLUÊNCIA	33
4.3.1 Influência da temperatura	33
4.3.2 Influência de sais e de outros íons	33
4.3.3 Influência do estresse elétrico	34
4.3.4 Influência da frequência da tensão de alimentação	34
4.3.5 Proliferação de arborescência elétrica a partir da arborescência em úmida	35
5 MATERIAIS E MÉTODOS	37
5.1 MATERIAIS E MÉTODOS	38
5.1.1 Ensaio elétrico e a realização da microCT	38

5.2	DESCRIÇÕES DAS AMOSTRAS	39
5.2.1	Descrição das amostras e equipamentos	39
5.2.2	A microtomografia computadorizada de raios X	40
6	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	42
6.1	RESULTADO DA microCT APLICADOS EM CABOS ELÉTRICOS COM O NÚCLEO DE ALUMÍNIO E COBRE	42
6.1.1	Resultados da microCT aplicados em cabos de energia elétrica de alumínio.	42
6.2	RESULTADOS DOS CABOS DE POTÊNCIA COM NÚCLEO DE COBRE	48
6.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS USANDO O PROGRAMA COMSOL MULTIPHYSICS	51
6.3.1	O Método dos Elementos Finitos	51
6.3.2	Determinação da dimensionalidade do modelo	54
6.3.3	Definições dos Domínios	55
6.3.4	Escolhas das condições de fronteira	56
6.3.5	Discretização do Domínio	57
6.3.6	Desenvolvimentos do Sistema de Equações	58
6.3.7	Seleção das Funções Interpoladas	59
6.3.8	Elementos Lineares	60
6.3.9	Construção do modelo virtual e traçado do mesh.	61
6.4	RESULTADOS PARA OS CABOS DE COBRE USANDO O MÉ- TODO DOS ELEMENTOS FINITOS	63
6.4.1	Resultados das simulações computacionais para os cabos de potências com o núcleo de cobre com as áreas das seções trans- versais de 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2	63
6.4.2	Resultados para cabos de alumínio usando métodos dos ele- mentos finitos	87
7	CONCLUSÕES	98
	Referências Bibliográficas	100
A	Anexo	111
B	Trabalho submetido	112
C	Procedimentos da utilização do Comsol Multiphysics	113
C.1	Seção de dimensionalidade do problema.	113
C.2	Seleção dos módulos físicos	114

C.3	Seleção de variáveis	114
C.4	Seleção do regime temporal	114
C.5	Geometria	115
C.6	Entrada de dados dos materiais usados	117
C.7	Discretização do espaço e a mesh	119

Lista de Figuras

3.1	(a) Microtomógrafo V tomex xm, à direita, o painel de controle para manipulação do corpo de prova e o monitor de vídeo. (b) Imagem da disposição dos dois tubos de raios X similares ao utilizados no sistema B, na parte superior o tubo microfoco e abaixo o tubo nanofoco (c) Imagem do detector Flat Panel no interior do equipamento (DE PAIVA TELES, 2016).	13
3.2	Um feixe de raios X se propagando por uma seção transversal do objeto (SALES, 2010; WANG e MILLER, 2020).	15
3.3	Exemplo de uma sinograma (FORSBERG, 2008; SALES, 2010).	16
3.4	Representação do pixel (DE RAMÓN BALMASEDA, 2011)	23
3.5	Geometria de formação das projeções(SALES, 2010)	27
4.1	Arborescência do tipo vented-tree (LIMA <i>et al.</i> , 2008b).	31
4.2	Arborescência do tipo bow-tie-tree (LIMA <i>et al.</i> , 2008b).	32
4.3	Falhas na camada de isolamento devido à presença de arborescências (LIMA <i>et al.</i> , 2008b).	36
5.1	Fluxograma da metodologia proposta	37
5.2	Máquina de solda utilizada como fonte de corrente elétrica e tensão de saída da fonte registrada em alicate amperímetro.	40
5.3	Ensaio elétrico realizados nas amostras de cobre e alumínio.	40
6.1	MicroCT do cabo elétrico de Al com seção transversal de 25 mm^2 (A) antes dos ensaios elétricos, (B) após os ensaios elétricos foram observados vazios e os círculos vermelhos destacam essas regiões, (C) medições lineares realizadas nos vazios e (D) destaque do fenômeno de arborescência detectável por microCT.	43
6.2	MicroCT 3D do cabo elétrico de Al com seção transversal de 25 mm^2 após os testes elétricos (A) amostra completa (B) extração dos vazios identificados com código de cores para diâmetro e (C) distribuição 3D do tamanho dos vazios.	44

6.3	Análise 3D de cabos elétricos de cobre, a figura demonstra (A) corte transaxial após o teste elétrico, (B) volume total de vazios antes, (C) volume total de vazios depois, ambos com código de cores para diâmetro, (D) distribuição 3D de volumes vazios, respectivamente para área da seção transversal de: 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2	49
6.4	Fluxograma mostrando a metodologia para a obtenção dos resultados da simulação no programa Comsol Multiphysics.	52
6.5	Simulação do cabo elétrico a partir do modelo bidimensional	55
6.6	Modelo de malha aplicado na simulação de cabos elétricos de Cobre e Alumínio, respectivamente. A figura destaca a geometria das malhas utilizadas para as diferentes condições de vazios e as fases de: condutor, PVC e vazios inseridos.	62
6.7	Cabos com núcleo de cobre visto pela microCT com a seção transversal de 25 mm^2	65
6.8	Cabo trifásico sem defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 25 mm^2	66
6.9	Cabo trifásico com defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 25 mm^2	67
6.10	Cabo trifásico sem defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 35 mm^2	67
6.11	Cabo trifásico com defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 35 mm^2	68
6.12	Cabo trifásico sem defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com área de seção transversal de 50 mm^2	68
6.13	Cabo trifásico com defeitos submetido a corrente alterna no instante de 10ms com a área de seção transversal de 50 mm^2	69
6.14	Distribuições de campo elétrico no modelo de cabo XLPE de três núcleos sem cavidade.	70
6.15	Cabo trifásico submetidos a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 25 mm^2	71
6.16	Cabo trifásico sem defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 35 mm^2	71
6.17	Cabo trifásico com anomalias submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 35 mm^2	72
6.18	Cabo trifásico sem defeitos submetidos a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 50 mm^2	72
6.19	Cabo trifásico com anomalias submetidos a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 50 mm^2	73

6.20	Cabos de potência sem defeitos com o condutor de cobre e área de seção transversal 25 mm^2 representado os valores da potência térmica.	75
6.21	Cabos de potência com defeitos e o condutor de cobre e a área de seção transversal 25 mm^2 .	76
6.22	Cabo trifásico sem defeitos com o condutor de cobre e área de seção transversal representado a densidade de potência volumétrica do sistema trifásico com a seção transversal de 35 mm^2 em 10ms.	76
6.23	Cabos de potência com defeitos e o condutor de cobre e a área de seção transversal 35 mm^2 representando os valores da potência térmica.	77
6.24	Cabo de potência trifásico sem defeitos com o condutor de cobre e área de seção transversal de 50 mm^2 .	77
6.25	Cabo de potência com defeitos e o condutor de cobre e a área de seção transversal 50 mm^2 representando os valores da potência térmica.	78
6.26	Cabos de potências sem defeitos com o condutor de cobre e a área de seção transversal 25 mm^2 apresentando os valores da densidade de corrente elétrica.	81
6.27	Cabos de potências com defeitos com núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 25 mm^2 apresentando os valores da norma da densidade de corrente elétrica.	82
6.28	Cabo de potência trifásico sem defeitos com núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 35 mm^2 .	82
6.29	Cabos de potências com defeitos com núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 35 mm^2 .	83
6.30	Cabos de potências sem defeitos com núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 50 mm^2 .	83
6.31	Cabo de potência com defeitos e núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 50 mm^2 .	84
6.32	O gráfico que expressa a densidade de campo magnético sem defeitos em 10ms, com a área de 25 mm^2 .	86
6.33	O gráfico que expressa a densidade de campo magnético com defeitos em 10ms, com a área de 25 mm^2 .	87
6.34	Modelo de cabo trifásico com núcleo de alumínio com 25 mm^2 .	88
6.35	Cabo trifásico com o condutor de alumínio sem defeitos na isolação.	89
6.36	Cabo trifásico de alumínio com defeitos na isolação.	89
6.37	Cabo elétrico de alumínio sendo exibindo a norma do campo elétrico.	90
6.38	Cabo elétrico trifásico com núcleo de alumínio com anomalias na isolação exibindo a norma do campo elétrico.	91
6.39	Cabo elétrico de alumínio sem defeitos na isolação exibindo a densidade volumétrica de potência.	92

6.40	Cabo elétrico de alumínio com defeitos na isolação exibindo a densidade volumétrica de potência.	92
6.41	Cabo trifásico com núcleo multiplexados de alumínio sem defeitos na isolação com a área de seção transversal de 25 mm^2	93
6.42	Modelo de uma única fase com núcleo multiplexados de alumínio com defeitos na isolação com a área de seção transversal de 25 mm^2	94
6.43	O gráfico que expressa a densidade de campo magnético com defeitos em 10ms, com a seção transversal de 25 mm^2	95
6.44	O gráfico que expressa a densidade de campo magnético com defeitos em 10ms, com a área de 25 mm^2	96
C.1	Selecionando dimensionalidade do problema a ser simulado.	113
C.2	Seleção dos módulos físicos a serem utilizados na simulação.	114
C.3	Seleção das variáveis.	114
C.4	Seleção do tipo de estudo.	115
C.5	As janelas para a definição das geometrias no COMSOL.	116
C.6	O desenho das regiões a serem simuladas na aba GRAPHICS.	117
C.7	Caixa de diálogo SETTINGS PARAMETERS..	117
C.8	Telas de atribuições das regiões cobre.	118
C.9	Telas de atribuições das regiões PVC.	118
C.10	Detalhe da entrada de dados na janela fornecida pelo COMSOL.	119
C.11	Aba mostrando o sistema com 3 cabos recebendo a discretização do espaço com a construção da malha (mesh) com os elementos finitos triangulares.	119

Lista de Tabelas

6.1	Resultados quantitativos do cabo de potência de cobre.	50
6.2	Parâmetros usados nos resultados dos cabos trifásicos apresentados usando o programa Comsol Multiphysics.	64
6.3	Densidade de campo magnético.	79
6.4	Resultados quantitativos do cabo de potência de cobre.	79
6.5	Resultados quantitativos do cabo de potência de cobre.	80
6.6	Densidade de corrente elétrica de cobre.	85
6.7	Resultados dos cabos de cobre a alumínio sem defeitos.	97

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

No início do século XIX as ciências exatas e percebidamente a matemática experimentaram um extraordinário desenvolvimento. Os franceses Laplace, Cauchy, e Euler, o inglês Hamilton e o alemão Gauss criaram as bases matemáticas para a compreensão da mecânica, hidrodinâmica, eletricidade, magnetismo e outros ramos que a Física pesquisa. Com base nisto, a sistematização do uso da balança por Lavoisier contribuiu para a geração da Química como uma ciência quantitativa dos dias de hoje. No primeiro semestre do século dezenove, o conceito de energia ganhava uma clara definição graças a Mayer e Joule, enquanto Clausius havia estabelecido as bases da teoria da Termodinâmica e Faraday estudava a noção de campos eletromagnéticos, interpretados formalmente por Maxwell. Foi nessa mesma época que Nicholas Callan, professor de Dublin, inventou a bobina de indução. Em 1850 o "inductorium", como era conhecido, foi extensivamente utilizado nos trabalhos de Plucker sobre a produção de espectros de gases rarefeitos e de Hittof e Crokes sobre pesquisas na área sobre descargas elétricas em gases, contribuindo com a descoberta por esses últimos famosos raios catódicos em 1878, cuja natureza foi explicada por Thomson. Foi com utilização de bobinas de indução que Hertz descobriu a transmissão das ondas eletromagnéticas no espaço e, em Wurzburg, Röntgen elucidou os raios X (WILDENSCHILD e SHEPPARD, 2013).

Os raios X foram descobertos em 1895 por Wilhelm Conrad Röntgen¹ e a natureza de onda eletromagnética foi reconhecida somente em 1912, por Laue² (DE PAIVA TELES, 2016), Enquanto investigava os fenômenos de descarga em gases. Usando um tubo de raios catódicos com algumas dezenas de kV, foi observado pelo físico e engenheiro mecânico que sais de Bário (Ba) apresentavam fluorescência quando colocados próximos ao tubo, embora nada visível tivesse sido emitido pelo

¹Por essa descoberta recebeu seu prêmio Nobel da Física em 1901 e em 2004, em reconhecimento a seus efeitos científicos, a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) nomeou o elemento químico 111 de Roentgênio

²Suas contribuições deram à luz a espectroscopia de raios X, a exploração de estruturas de elementos químicos e a determinação do comprimento de onda de raios X.

mesmo. Esse efeito persistia quando o tubo era envolvido com uma camada de cartolina preta. Roentgen logo constatou que o agente responsável pela fluorescência tinha origem no ponto em que a corrente de elétrons acelerados atingia a parede de vidro do tubo. Por ser de natureza desconhecida, deu-se o nome de raios X a esse fenômeno. Ele observou que os raios X podiam manifestar-se escurecendo placas fotográficas, descarregando eletroscópios carregados, assim como produzindo fluorescência em diversas substâncias. Observou também que os raios X podem atravessar espessuras consideráveis de materiais com pequeno número atômico, ao passo que substâncias com grande número atômico são relativamente opacas (WILDENSCHILD e SHEPPARD, 2013).

A população mundial beneficiada pela ciência e tecnologia vem a cada dia mais investigando, pesquisando e estudando. A evolução computacional e a tecnologia de novos detectores que permitiram o processamento e a reconstrução de uma gama de informações a partir de várias projeções radiográficas. E em curto período, na década de 70, passou-se do universo bidimensional (radiografia) para o tridimensional conhecido atualmente como Tomografia Computadorizada (CT).

A microtomografia computadorizada (microCT) de raios X adquiriu um interesse significativo na procura quando o assunto é controle de qualidade, segurança e confiabilidade no setor industrial nessas últimas décadas (ARAÚJO *et al.*, 2002). A metodologia aplicada em Ensaio Não Destrutivo (END) vem ganhando uma enorme visibilidade no mundo acadêmico e industrial nas pesquisas de diferentes tipos de amostras, sejam elas: biológicas, materiais compósitos, detecção de imperfeições, trincas, fendas, porosidades, dentre várias outras possibilidades (ARAÚJO *et al.*, 2002; NOGUEIRA, 2011).

A microCT é conhecida por suas altas resoluções que permitem investigações de milhares de planos/seções microtomográficas e observações tridimensionais internas de materiais, além de quantificações automatizadas de áreas e/ou volumes. Um comentário importante, os corpos de provas que estão em evidências nas pesquisas não necessitam de preparações, tais como impregnações, desgastes ou polimentos (REMEYSEN e SWENNEN, 2008).

A representação de objetos em 3D para detalhamento de pequenas estruturas e imperfeições internas é necessária em muitas aplicações na engenharia e na física (FREETH *et al.*, 2006; MAIRE e WITHERS, 2014; SITTNER *et al.*, 2020). Neste caso, pode-se destacar a microCT com um dos principais métodos de mapeamento tridimensional, com aplicações em áreas diversas como ciência médica, segurança, inspeção industrial ou geologia (CLAUSSEN *et al.*, 1989; CNUDDÉ e BOONE, 2013; SITTNER *et al.*, 2020).

O cabo elétrico revestido de polietileno reticulado (XLPE), também conhecido como cabo XLPE, é bastante usado em aplicações de transmissão e distribuição de

energia elétrica. As principais características dos cabos XLPE são os baixos valores de permissividade no material dielétrico e perda, a alta resistência mecânica, a excelente resistência a solventes os elevados níveis de condutividade termomecânica (SHAHSAVARIAN e SHAHRTASH, 2015).

A norma NBR IEC 60270 / 2017³ estabelece como descargas parciais descargas elétricas localizadas em união entre dois condutores, por meio do isolamento, que pode ou não acontecer próximo de um condutor. A descarga parcial é, em geral, a consequência de uma aglomeração de estresses elétricos em isolamentos ou em superfícies de isolamentos.

A Descarga Parcial (DP) é uma descarga elétrica que acontece numa determinada região do espaço sujeito a um campo elétrico (DIELÉTRICOS, 2005). As descargas parciais podem ser conhecidas em três categorias de acordo com sua origem. Descarga Superficial (DS), Descarga Corona (DC) e Descarga interna (DI)(DIELÉTRICOS, 2005; MASON, 1951).

Descargas superficiais ocorrem em gases ou líquidos na superfície material dielétrico, habitualmente partindo do eletrodo para a superfície (DIELÉTRICOS, 2005). Quando a componente do vetor campo elétrico que tangencia a superfície alcança uma certa quantidade crítica, o processo de descarga superficial é iniciado (DIELÉTRICOS, 2005; GULSKI, 1995). Descargas superficiais provocam alterações na superfície do dielétrico, originando caminhos condutores que se proliferam ao longo da direção do vetor campo elétrico. Este ocorrido, conhecido pelo nome de trilhamento, pode levar à ruptura completa da isolação (DIELÉTRICOS, 2005; MASON, 1951). Este tipo de descarga acontece normalmente em cabos de alívio de barras de geradores (DIELÉTRICOS, 2005; KREUGER, 1989).

Descargas coronas ocorrem em gases a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos. Estes pontos estabelecem regiões de elevado campo elétrico nas vizinhanças do condutor. As descargas parciais aparecem quando este campo ultrapassa o valor de ruptura do gás(KREUGER, 1989). Descargas coronas no ar produzem ozônio, o qual pode causar o fissuramento da isolação polimérica.

Descargas parciais internas podem aparecer em inclusões gasosas totalmente circundada por um material dielétrico, na junção entre dois diferentes, ou ainda, na interface entre um material dielétrico e um condutor energizado. (KREUGER, 1989). A presença de vazios na estrutura de materiais poliméricos pode ser devida a causas distintas conforme a natureza do material e do processo de fabricação. No caso dos materiais termoplásticos como, por exemplo, o polietileno, as falhas podem acontecer durante o processo de injeção do polímero conforme a infiltração do ar atmosférico (DIELÉTRICOS, 2005). Para polímeros termofixos, tais como as resinas epóxi, o desenvolvimento dos vazios podem acontecer durante o processo de

³Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão Medição de descargas Parciais

cura devido à infiltração do ar atmosférico ou até mesmo formação de gases residuais oriundo de reações químicas (BOGGS, 1990; DIELÉTRICOS, 2005). Além dos fatores referentes ao processo de fabricação, os numerosos estresses a que a isolação é submetida ao longo de sua vida útil também podem causar o aparecimento de defeitos na isolação (GJAERDE, 1997). As descargas internas podem em regiões do material dielétrico contendo defeitos ou na interface entre o dielétrico e o eletrodo (KREUGER, 1989). Um tipo específico de descargas internas são as descargas que ocorrem em arborescências elétricas.

Os maiores causadores de rompimento do dielétrico são as ocorrências de arborescências, dilatações dos condutores, descargas parciais e outros (DENSLEY, 2001a; YESSI *et al.*, 2018). A arborescência é um fenômeno de pré-ruptura dielétrica que evidencia um modelo de degradação que avança no dielétrico por ação de um campo elétrico, sendo o mecanismo mais provável de falha elétrica em dielétricos extrudados (DENSLEY, 2001a; EICHHORN, 1983; HVIDSTEN *et al.*, 2002).

Os objetivos desta tese foi estudar dois modelos de cabos de energia elétrica de baixa tensão através da microCT. Uma das etapas desta pesquisa foi verificar os efeitos provocados pelos picos de corrente nos cabos elétricos com os núcleos de alumínio e cobre. Além disso, foi avaliado o comportamento das estruturas internas das amostras de cabos de energia através da técnica da microCT, antes e depois dos ensaios elétricos.

Outro objetivo, é investigar a correlação entre o fenômeno da arborescência elétrica e o aumento dos volumes de vazios utilizando a técnica da microCT. Além disso, foi pesquisado e utilizado através do programa Comsol Multiphysics, para a melhor visualização do que acontece quando há defeitos nas isolações e núcleos e comparar as medidas eletromagnéticas usando o método dos elementos finitos, simulações com defeitos e sem anomalias.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas algumas referências bibliográficas que mostram os efeitos da corrente elétrica em cabos de energia e diferentes fenômenos causado pela mesma. Geralmente, os estudos são realizados pelo método dos elementos finitos e equipamentos que podem analisar e gerar imagens por radiação. Dessa forma foram pesquisados trabalhos relevantes com técnicas relacionadas a detecção de vazios e outros defeitos na isolação e no material condutor. Com isso, foram pesquisados trabalhos publicados que mostram a detecção de vazios e outros defeitos na camada isolante ou até mesmo na parte condutora de cabos elétricos.

Foi usando equipamento que emite radiação que (YESSI *et al.*, 2018) pesquisou imagens com resolução de $50 \mu\text{m}$ / pixel, com o objetivo de observar a dilatação do condutor metálico adquiridas pela técnica da microrradiografia de raios X em cabos de energia elétrica de baixa tensão com áreas de seções transversais de $1,5 \text{ mm}^2$ e $2,5 \text{ mm}^2$. Neste caso, a temperatura foi monitorada usando um sensor DS 18B20 compilando em um microcontrolador. Para analisar as imagens dos cabos, foi usando o software ImageJ.

A arborescência elétrica, é o principal mecanismos de degradação do isolamento polimérico do cabo de energia, nesse caso para sistemas de potência de alta tensão. A arborescência elétrica foram previamente fotografadas principalmente usando técnicas de imagens bidimensional (SCHURCH *et al.*, 2014). Esta técnica não destrutiva é capaz de revelar a arborescência elétricas, proporcionando uma visão tridimensional (3D) e, portanto, pode-se obter uma representação mais completa do fenômeno. Além disso, tirar fatias virtuais através do modelo 3D assim criada traz a possibilidade de exploração interna do fenômeno da arborescência elétrica, sem a destruição da amostra. Ainda no mesmo trabalho realizou uma microscopia eletrônica de varredura Serial Block-Face (SBFSEM) para investigar o interior de cabos. E também foi usado a tomografia computadorizada para a quantificação das características da arborescência elétrica que antes não estava disponível, ou seja, investigações foram feitas em diâmetros e a tortuosidade dos canais do fenômeno da arborescência, bem

como volume total, pode ser calculado na arborescência. Por meio da análise de corte transversal, pode-se estudar a progressão do número de canais de arborização (SCHURCH *et al.*, 2014).

As imagens do fenômeno da arborescência tem sido uma importante ferramenta para investigar esses eventos intrigantes que acontecem em cabos de energia. Os estudos mostram que a arborescência elétrica pode ser fotografadas tridimensionalmente (3D) e réplicas virtuais geradas usando tomografia computadorizada de raios X ou microscopia eletrônica de varredura da face em bloco. Essas técnicas são avaliadas e comparadas para análise 3D da arborescência elétricas juntamente com métodos ópticos convencionais. Segundo o autor, (SCHURCH *et al.*, 2015) existem inúmeros tipos de arborescências criadas em laboratório, onde foi mostrado uma variedade de morfologias, foram cultivadas e examinadas para delinear as capacidades de cada técnica. Imagens transversais e réplicas virtuais das árvores elétricas das técnicas de tomografia de raios-X.

O tempo de iniciação do fenômeno da arborescência, foi avaliado por um sistema de detecção de pulso desenvolvido pelos autores para detectar um pequeno sinal da descarga parcial (DP), que pode ocorrer logo após a formação da arborização. Seis tipos de materiais foram preparados para avaliação, ou seja, resina epóxi base, microcompósito, dois tipos de nanocompósitos e dois tipos de nano-microcompósitos mistos (CHEN *et al.*, 2009).

De acordo com diversos fabricantes, a vida útil média de condutores elétricos trabalhando em condições normais de operação é de 25 anos. Suas características construtivas apresentam diversas formas e tipos de fabricação, com características específicas. Este é um processo que requer cuidados para manter um nível de qualidade que satisfaça as normas em vigor. Sua isolação não é diferente. As isolações sólidas são fabricadas a partir de materiais como os termoplásticos (PVC) e os termofixos (polietileno reticulado XLPE e borracha etileno-propileno EPR), sendo este último com alta resistência ao surgimento do treeing (GROSSI *et al.*, 2014).

O comprimento da arborescência detectada foi de cerca de 100 mm. Foi confirmado que existe uma boa correlação entre o tempo de iniciação da arborescência e a resistência à descarga parcial (CHEN *et al.*, 2009).

Os cabos de energia elétrica foram envelhecidos sob condições aceleradas utilizando diversas condições de estresse de tensão para observações do ciclo de carga térmica. Neste artigo o autor induziu envelhecimento do cabo mediante aplicações de tensão no condutor, comprometendo assim sua vida útil. E a verificação do fenômeno da arborescência foram estudados usando a micrografia eletrônica, que mostraram os detalhes das arborescências em água (LORIGAN, 1999).

Conclui-se que a tensão e a frequência são as principais causas de envelhecimento, de cabos elétricos e o papel da oxidação pode ter menor importância. A

energia de redução de íons é responsável como um fator que há uma grande probabilidade de influenciar no surgimento e crescimento de arborescências aquáticas. O parâmetro de solubilidade de aditivos e soluções é outro fator que merece alguma atenção. Finalmente, a morfologia do polímero parece afetar significativamente a arborização da água através de modificações de suas propriedades mecânicas. Antes que um modelo detalhado possa ser proposto, diversas pesquisas ainda precisam ser realizadas e investigadas minuciosas dedicadas à fase de iniciação e aos efeitos sinérgicos necessários (CRINE, 1998).

O crescimento da arborescência no isolamento de cabos de polietileno é discutido, pelo autor. As características das arborescências, o efeito dos parâmetros de envelhecimento no crescimento do fenômeno e os possíveis mecanismos de crescimento são considerados, enfatizando o desenvolvimento das arborescências ventiladas em materiais isolantes de polietileno. A morfologia das arborescências em água, as características do cabo dielétrico infestado de arborização e métodos de teste e medidas para reduzir a arborização da água são discutidos neste artigo (STEENNIS e KREUGER, 1990).

Dentre os mecanismos de envelhecimento sob ação do vetor campo elétrico, no interior dos cabos, destaca-se a arborescência como um dos principais motivadores de defeitos em materiais poliméricos utilizados como isolantes. De acordo com materiais dielétricos, são aqueles que possibilitam a passagem do vetor campo elétrico ou fluxo elétrico, mas não de partículas (incluindo elétrons). Esta nitidez implica que os dielétricos não devem conduzir corrente elétrica, em vista disto, são geralmente considerados materiais não condutores ou isolantes (SCHMIDT, 2019).

Este defeito reduz consideravelmente a rigidez ou suportabilidade do material conduzindo à ruptura dielétrica. O fenômeno ocorre em todos os polímeros, sendo sua visualização muitas vezes mascarada pela presença de cargas nos compostos isolantes que impedem a sua visualização, como nos caso das borrachas, como as de etileno propileno (EPR) utilizadas como isolantes. Em dielétricos sólidos a arborescência é reconhecida como sendo principal mecanismo de falha elétrica em cabos (SCHMIDT, 2019).

"A presença de descargas parciais é um problema sério na manutenção e monitoramento de condições de cabos de energia. Sob o efeito do excesso de campo elétrico, os vazios presentes na isolação podem sofrer ruptura, dando origem ao fenômeno de descargas parciais. A ocorrência repetida de descargas parciais por um longo período pode levar à falha completa do isolamento. A atividade de descarga parcial depende da tensão aplicada, forma, tamanho e localização dos vazios e presença de pequenas saliências na superfície do condutor. A localização dos vazios também foi variada no estudo de simulação. A partir deste trabalho, pode-se obter uma melhor compreensão da descarga parcial no isolamento de cabos de energia, bem como sua

relação com a geometria e localização dos vazios" (HORE 2017).

Assim, um material dielétrico perfeito seria aquele que não apresenta cargas livres, entretanto, todos os materiais são compostos de moléculas, que, por sua vez, se constituem de partículas carregadas (núcleos atômicos e elétrons), e são certamente afetadas pela presença de campo elétrico externo (REITZ *et al.*, 1982). O instrumento de polarização em materiais dielétricos podem ser caracterizados por possuírem dipolos intrínsecos ou não (neste caso com o aparecimento de dipolos induzidos) (GRIFFITHS, 2012).

Quando submetidos a um campo elétrico, os materiais dielétricos apresentam propriedades fundamental de estarem polarizados. A ação do campo elétrico desempenha uma força sobre uma partícula com carga q , sendo as partículas positivas movimentadas no sentido do campo e as negativas no sentido contrário, de modo que as partículas positivas e negativas de cada molécula sejam deslocadas das suas posições iniciais em sentidos diferentes. Uma observação importante é a mudança de posição no dielétrico de toda a carga positiva em relação á negativa, limitado pelas forças das partículas contrárias as variações em suas configurações, que coincide à polarização do material. Desta forma pode-se discorrer que a polarização de um dielétrico é uma forma de organização espacial das partículas eletricamente carregadas presentes no interior do material em função de um vetor campo elétrico externo aplicado (DIELÉTRICOS, 2005; SCHURCH *et al.*, 2015).

O cabo elétrico revestido de polietileno reticulado, também conhecido como cabo XLPE, é bastante usado em aplicações de transmissão e distribuição de energia elétrica. As principais características dos cabos XLPE são de baixo valores de permissividade no material dielétrico e características de perda, alta resistência mecânica, excelente resistência a solventes e elevados níveis de condutividade termomecânica (SHAHSAVARIAN e SHAHRTASH, 2015).

A degradação do material isolante é o fenômeno responsável pela redução da expectativa de vida útil dos cabos elétricos que podem ser acumulados por diferentes fatores de natureza interna e/ou externa. Esses fatores estabelecem seus mecanismos pela conjunção de solicitações de natureza térmica, elétrica, química ou mecânica que podem ocorrer em conjunto ou em separado (AZIMUDDIN e REFAAT, 2021). Com a intensidade do campo elétrico, alta temperatura e estresse mecânico, os materiais de isolamento sofrem degradação e, por fim, ruptura dielétrica em tempo longo de operação. A arborescência elétrica é um fenômeno de pré-ruptura que acontece em materiais de isolamento, é o principal problema para as causas de falhas em cabos elétricos. Esse fenômeno da arborescência é causada pelas impurezas, vazios e defeitos mecânicos, onde o campo elétrico local é distorcido em pequenas regiões de materiais de isolamento de cabos de energia (SU *et al.*, 2020; TANAKA e GREENWOOD, 1978).

A geometria, tamanho e a dimensão dos vazios são fatores importantes que podem afetar as distribuições das densidades dos campos elétricos e magnéticos nos cabos. Os valores dos campos eletromagnéticos se modificam quando há vazios de ar no interior dos cabos elétricos, quando comparado ao cabo supostamente ideal (BHATTI *et al.*, 2021).

A presença de descargas parciais precisam de uma atenção e monitoramento no período de funcionamento dos cabos de energia. Para o efeito excedente do campo elétrico, os vazios presentes na isolação podem provocar rupturas e iniciar o fenômeno da arborescência elétrica devido ao acúmulo de cargas nos volumes de vazios (AHMED *et al.*, 2016).

Existem relações importantes que devem ser observadas no estudo de cabos elétricos que são as seguintes grandezas físicas: Tensão elétrica, mecânica, temperatura, umidade, vazio e ambiental, que podem influenciar da isolação do cabo e contribuir para o rompimento da isolação (BHATTI *et al.*, 2021; SEONG *et al.*, 2015).

O fenômeno está relacionado a diversos aspectos da continuidade de descargas parciais, ou seja, um aumento do campo interno, o campo remanescente que fica após eliminação da tensão externa, carga espacial, bem como os métodos de decaimento de carga relacionado à condutividade do material da superfície (FLORKOWSKI *et al.*, 2016; OH *et al.*, 2020; PIRKER e SCHICHLER, 2016).

No entanto, é importante observar que a descarga interna do isolamento é afetada pela distribuição do campo elétrico sólido, que geralmente é gerado por defeitos, partículas, bolhas ou vazios (ALSHARIF *et al.*, 2012; XIA *et al.*, 2020). O fenômeno da arborescência, que também está associada a partículas de descarga interna que começam a conduzir nos defeitos (partículas/vazios) no isolamento. A presença do campo elétrico com mais frequência, umidade, umidade e estresse elétrico adicional no cabo de polietileno pode contribuir para o efeito das arborescências em água dentro do cabo e aumentar a intensidade do vetor campo elétrico (CHENG, 2000; XIA *et al.*, 2020). Além disso, fatores como descarga de eletricidade, contaminantes, partículas, rugosidade e carga espacial também podem afetar a vida útil do isolamento podendo chegar a ruptura no material (CHENGWEI *et al.*, 2008; HANLEY *et al.*, 2003; XIA *et al.*, 2020).

A pesquisa do efeito pelicular em cabos elétricos são desenvolvidos por simulações computacionais através dos métodos dos elementos finitos para o cálculo do campo magnético a fim de analisar o efeito pelicular em função da importância da geometria do cabo de potência (DIAS *et al.*, 2018).

A degradação do material isolante é o fenômeno responsável pela redução da expectativa de vida útil dos cabos elétricos que podem ser acumulados por diferentes fatores de natureza interna e / ou externa. Esses fatores estabelecem seus mecanismos pela conjugação de solicitações de natureza térmica, elétrica, química

ou mecânica que podem ocorrer em conjunto ou em separado (AZIMUDDIN e REFAAT, 2021). Com a intensidade do campo elétrico, alta temperatura e estresse mecânico, os materiais de isolamento sofrem degradação e, por fim, ruptura dielétrica em tempo longo de operação. Esse fenômeno da arborescência é causada pelas impurezas, vazios e defeitos mecânicos, onde o campo elétrico local é distorcido dentro de pequenas regiões de materiais de isolamento de cabos de energia (SU *et al.*, 2020; TANAKA e GREENWOOD, 1978).

Outra possibilidade de defeitos em cabos de potência é o acúmulo de cargas elétricas em algumas regiões denominadas vazios entre o condutor e o revestimento do cabo (TIAN *et al.*, 2004). Com isso, há o aumento da intensidade do vetor campo elétrico radialmente ao condutor, que pode levar ao rompimento parcial do dielétrico também com o passar do tempo (LANCA *et al.*, 2007).

As escolhas das amostras foram motivadas por conta das aplicações e sua complexabilidade do tema, quando o assunto se refere a cabos de energia elétrica. Os principais critérios adotados para a escolha dos cabos de potência com condutor de Al foi a importância dos custos, uma vez que a maioria dos cabos instalados em operação apresenta áreas de seção transversal maior que 16 mm^2 . De acordo com a exigência oferecida pela maioria das normas internacionais, os condutores de áreas transversais nominais que sejam menores que 16 mm^2 , devem ser de cobre recozido (NAIR e NITHIYANANTHAN, 2016). O que difere dos cabos de Al para o de Cu, é a capacidade de conduzir corrente real e sua impedância. O cabo de Al tem uma capacidade de condução de corrente menor e uma impedância maior do que o condutor de Cu de mesma seção transversal.

A geometria, tamanho e a dimensão dos vazios são fatores importantes que podem afetar as distribuições das densidades dos campos elétricos e magnéticos nos cabos. Os valores dos campos eletromagnéticos se modificam quando há vazios de ar no interior dos cabos elétricos, quando comparado ao cabo supostamente ideal (BHATTI *et al.*, 2021).

A técnica do Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizada com base no software COMSOL Simulation para verificar o comportamento da distribuição de temperatura e o principal a relação específica entre o vazio no cabo de isolamento XLPE e a distância do vazio do condutor e ao redor do isolamento do cabo em vários locais. O desempenho do cabo isolado de polietileno reticulado (XLPE) é criado através do MEF no módulo de transferência de calor Comsol Multiphysics vazio dentro do isolamento do cabo posicionado em diferentes posições (BHATTI *et al.*, 2021) .

A análise da pesquisa até o momento mostrou que o tamanho e a densidade dos vazios não são apenas uma indicação do grau de envelhecimento, mas a proximidade de um valor de parâmetro limitante pode estar correlacionada a um nível de vida

útil restante para um determinado conjunto de tensões impostas pelo ambiente e pela operação (HORVATH *et al.*, 2000).

Segundo o autor (MUSA *et al.*, 2021). A distribuição do campo elétrico e do potencial no modelo de cabo estudado, os cabos sem defeitos, não apresentou alterações nas linhas equipotenciais. Quando existem defeitos, as linhas equipotenciais são alteradas e as linhas aparecem mais concentradas dentro das suas cavidades mais próximas dos condutores nos núcleos. As magnitudes do campo são máximas nas cavidades dentro do núcleo do cabo.

Capítulo 3

FUNDAMENTOS DA MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X

3.1 A MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS X

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos necessários para o entendimento deste estudo de tese e sua metodologia.

A microCT é uma técnica não-destrutiva com capacidade de reproduzir imagens que correspondem as estruturas internas dos corpos a serem estudados, com resoluções espaciais da ordem de micrômetros. A microCT ficou conhecida atualmente, seja no mundo científico ou industrial (DE ARAÚJO, 2019).

Na década de 60, Allan M. Comark (1924 – 1998) apresentou pela primeira vez e implementou matematicamente, a reconstrução de imagens geradas através da microCT como fruto de um trabalho que se deu início a partir de observações feitas por ele alguns anos antes, quando foi convidado a auxiliar no hospital Groote Schuur. Ainda na década de 60, o primeiro protótipo de um TC com objetivos médicos, iniciou-se por Godfrey N. Hounsfield (JIANG *et al.*, 2009).

Em 1972, Hounsfield divulgou o primeiro diagnóstico clínico por imagens ao universo científico. Por essa conquista ele dividiu com Comark o prêmio Nobel de medicina em 1979 (BUSHBERG e BOONE, 2011). Nos anos seguintes, realizou-se a criação do primeiro sistema de CT, beneficiando diferentes áreas com essa tecnologia, foram realizadas tomografias em diversas amostras, tais como: plantas, peças industriais, rochas, animais, artefatos arqueológicos e qualquer outro corpo com tamanho adequado para o tomografo (JIANG *et al.*, 2009).

Atualmente a microCT, tem utilidade em diversos centros de pesquisas de grande importância no mundo nas mais diversas áreas do conhecimento principalmente vol-

tada para investigações na morfologia de estruturas, dentre outras. O equipamento possui uma característica, no tubo de raios X , que permite com que o tamanho seja reduzido, chamado de "Microfoco". Com resolução na ordem de micrômetros os equipamentos de microCT usados em laboratórios normalmente possuem um sistema de fonte detector fixo onde as amostras estudadas é que sofre rotação durante a aquisição das imagens digitalizadas. Para a obtenção de imagem com maior qualidade, deve se observar quanto menor o foco, melhor será a nitidez das imagens geradas pelo equipamento (DE ARAÚJO, 2019).

3.2 PRINCÍPIOS DA microCT

Para se obter as imagens, o sistema possui um detector do tipo Flat-Panel DXR (GE) como pode ser visto na Figura.3.1 (c) com matriz de 1012 x 1012 pixels com $20\mu m$ de tamanho de pixel, com a possibilidade de ser convertido em uma matriz de 2024 x 2024 pixels e capacidade de produção de até 30 quadros por segundos (DE PAIVA TELES, 2016). Para se conseguir imagens 3D de estruturas internas e cortes, ou seções, de um determinado material usando a técnica da microCT, são adotados dois procedimentos básicos necessários: A aquisição de projeções radiográficas em vários ângulos pelo sistema fonte-detector e a reconstrução matemática das imagens recebidas (DE PAIVA TELES, 2016).



Figura 3.1: (a) Microtomógrafo V|tomex|xm, à direita, o painel de controle para manipulação do corpo de prova e o monitor de vídeo. (b) Imagem da disposição dos dois tubos de raios X similares ao utilizados no sistema B, na parte superior o tubo microfoco e abaixo o tubo nanofoco (c) Imagem do detector Flat Panel no interior do equipamento (DE PAIVA TELES, 2016).

3.2.1 Reconstrução de Imagens tomográficas

De acordo com a lei de Beer-Lambert, ela se válida apenas para feixes monocromáticos, ou seja, feixes com fótons com mesma energia. Como foi comentado anteriormente, o feixe de raios X gerados por tubos usados em sistemas de microCT convencionais são policromáticos. Para esse tipo de feixe de raios X , o coeficiente de atenuação μ varia com a energia do feixe. No entanto, o coeficiente de atenuação decresce com a energia do feixe, com isso, os feixes que possuem energias superiores, são nomeados de feixes de raios X duros, têm maior poder de penetração, os feixes moles, são aqueles com as energias inferiores, são absorvidos pelo material (WILDENSCHILD e SHEPPARD, 2013).

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.1)$$

Como foi comentado na Eq.(3.1), observa-se que medindo o valor da energia incidente, I_0 , o feixe de energia transmitida, I , e sabendo, a princípio, dimensões do material investigado, é possível calcular o valor médio do coeficiente de atenuação linear de material homogêneo. Porém, para outros tipos de materiais, compostos, aqueles constituídos por mais de um elemento químico, em consequência disso, possui diversos coeficientes de atenuação linear, para obtenção de atenuação total sobre o objeto deve-se "dividir" em segmentos menores. Se os segmentos são pequenos, pode-se considerar que cada um deles é um material homogêneo. Com isso, pode-se aplicar a Eq.(3.1) a cada elemento.

$$I = I_0 (\exp -\mu_1 \Delta_x \exp -\mu_2 \Delta_x \dots \exp -\mu_N \Delta_x) \quad (3.2)$$

Se Δ_x , for muito pequeno, $\Delta_x \rightarrow 0$ a Eq.(3.2) pode-se reescrita como, se o objeto estivesse confinado a uma fatia no plano xy , pode-se reescrever a Eq.(3.3).

$$I = I_0 \exp\left(-\int_L \mu(x, y) dl\right) \quad (3.3)$$

Onde, $\mu(x, y)$ é o coeficiente de atenuação linear no ponto (x, y) e dl é um incremento de comprimento, e a integração é calculada ao longo do caminho L da fonte ao detector. A partir da Eq.(3.3) pode-se escrever da seguinte maneira:

$$P(\theta, t) = -\ln \frac{I}{I_0} = \int_L (\mu(x, y)) dl \quad (3.4)$$

Como visto na Eq.(3.4), $P(\theta, t)$ é a integral de linha do coeficiente de atenuação

linear ao longo do caminho percorrido pelo feixe, possibilitando ser calculada pelo logaritmo natural da razão entre a intensidade do feixe que atravessa o material e o feixe incidente (DE PAIVA TELES, 2016; YU *et al.*, 2009). Visando se obter uma imagem de seção do objeto estudado, se faz obrigatório a aquisição em passos angulares constantes de várias projeções. Onde cada projeção possui a partir de diversos quadros melhorando dessa forma a relação sinal - ruído no sistema de detecção (DE ARAÚJO, 2019). Na Eq.(3.4), os parâmetros θ e t são. Ângulo de projeções e a posição radial dos raios; como pode ser observada na Figura 3.2 a seguir. Estes parâmetros, possuem as origens da integral de linha, acoplados as coordenadas espaciais x e y através da seguinte relação:

$$x \cos \theta + y \sin \theta = t \quad (3.5)$$

As equações descritas acima, só tem validade apenas para feixe de raios X utilizando imagem monocromáticas, isto é, possui o mesmo comprimento de onda. Porém, na maioria das fontes de raios X , são mais policromáticas e consequentemente, os feixes de raios X possui certa largura de banda (SALES, 2010). A atenuação linear $\mu(x, y)$, é uma função da energia de fótons e pode ser representada pela Eq.(3.4), que deverá ser incluído na integração ao longo do espectro energético de raios X (FORSBERG, 2008).

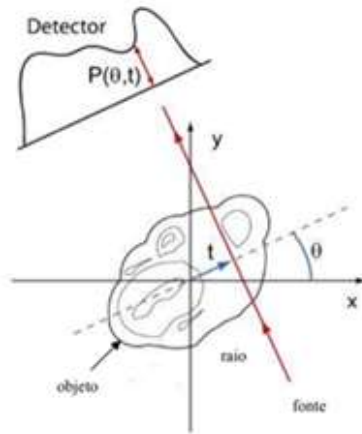


Figura 3.2: Um feixe de raios X se propagando por uma seção transversal do objeto (SALES, 2010; WANG e MILLER, 2020).

O número de projeções coletadas com a rotação de 360° , são fatores que influenciam na qualidade das imagens reconstruídas. A imagem é reconstruída em parcela de montante total de projeções em $1D$, adquirida lado a lado em sequência angular, esse método que controla os dados de projeções antes da reconstrução. Como pode ser visto na Figura 3.3 a distribuição de projeções em função do ângulo de projeção é chamada de sinograma (SALES, 2010).

Como mostrado no sinograma a seguir, foram capturadas 364 projeções durante uma rotação, de modo que o ângulo entre dois passos subsequentes das projeções seja aproximadamente 1° . Quanto menor o número de projeções coletadas, isso implicará em passos discretos entre a separação subsequente, e a qualidade do aspecto será perdido. Ao pesquisar um sinograma, também existe a possibilidade de se investigar e detectar se o objeto se movimentou durante o procedimento de varredura, o que geraria um movimento descontínuo das características da amostra, para um número limitado de ângulos. Esse movimento indesejável resulta em artefatos (unsharpness) no slice reconstruído.

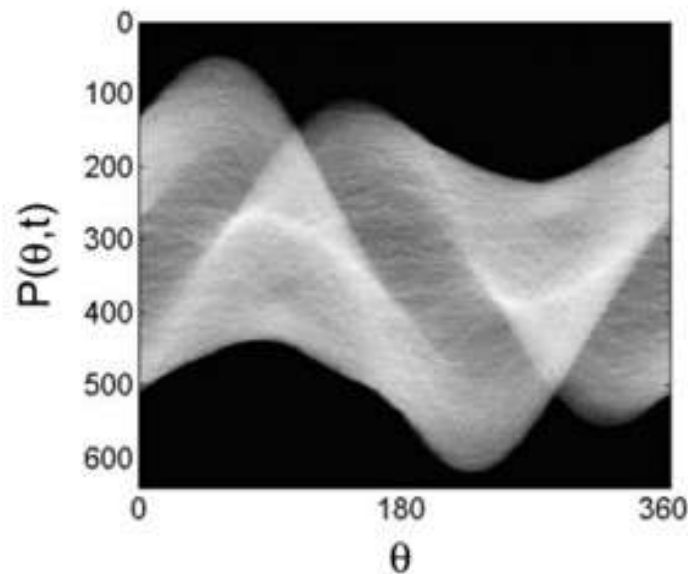


Figura 3.3: Exemplo de uma sinograma (FORSBERG, 2008; SALES, 2010).

Para um determinado ângulo θ , somente coordenadas x e y que satisfazem a Eq.(3.5) estarão sobre a linha da fonte e somente os pontos com estas coordenadas que irão corroborar com a integral de linha da Eq.(3.4). A fonte e o detector se movimentam em torno do objeto e para cada valor específico de ângulo de projeção $1D$ é adquirida. A rotação completa resulta nos parâmetros de projeções de todos os valores de θ e t . O que ficar na parte externa da linha da fonte, não entrará no cálculo da integral para a posição t na projeção. Uma pseudofunção muito utilizada na matemática para este tipo de situação é o delta de Kronecker $\delta(u)$. Ele é representado de seguinte forma: $\delta(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } u = 0 \\ 0, & \text{se } u \neq 0 \end{cases}$, sabendo que somente as coordenadas x e y satisfazem o $\delta(u)$ que estão implícitos nos cálculos das projeções. Neste caso, pode-se substituir a integral de linha pela integral dupla, como pode ser observado a seguir na Eq.(3.6).

$$P_\theta(t) = \int_L f(x, y) ds = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy \quad (3.6)$$

Se x e y estão sobre a linha da fonte, de acordo a Eq.(3.5), o que implica em $\delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) = \delta(0) = 1$, então:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx dy \quad (3.7)$$

A função $P_\theta(t)$ sabendo o valor de θ fixo, e somente t variando, define uma projeção paralela, ou seja, ao longo de um conjunto de raios paralelos. Para se formar uma projeção podem ser incluídos a divergência dos raios-soma. Estas projeções são conhecidas de projeções de feixe de leque, uma vez que os raios-soma são divergentes, com isso, cada raios-soma incluso na projeção em leque corresponderá a diferentes ângulos θ , ou seja, cada raio-soma possuirá uma inclinação em relação ao eixo de ordenadas (DE SIQUEIRA OLIVEIRA, 2012).

Voltando ao problema para a determinação dos coeficientes de atenuação, tem-se que cada raio-soma é o resultado da integral dos coeficientes de atenuação ao longo de um raio de acordo com a Eq.(3.4). Tornando-se comum que se $\mu(x, y)$ é uma função bidimensional tal que $f(x, y)$ no modelo matemático, visto na Eq.(3.4), corresponde a um raio - soma $P_\theta(t)$. Se o corpo de prova pesquisado é transladado ao longo de um caminho perpendicular ao feixe de radiação e, a intervalos regulares deste deslocamento, existe valores para I , usada na Eq.(3.3). Desta forma a Eq.(3.7), pode-se adquirir as projeções (DE SIQUEIRA OLIVEIRA, 2012).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx dy \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) \mu(x, y) = \lambda_\theta(\nu) \quad (3.8)$$

O lado esquerdo da Eq.(3.8), é conhecido de transformada de Radon da distribuição $\mu(x, y)$ e expressa a relação linear entre a função do objeto $\mu(x, y)$ e os dados experimentais da projeção $\lambda_\theta(\nu)$ (DE SIQUEIRA OLIVEIRA, 2012). Para a reconstruir uma imagem tomográfica consiste em inverter a transformada de Rodon para encontrar $\mu(x, y)$ a partir de um conjunto de projeções $\lambda_\theta(\nu)$ (DE SIQUEIRA OLIVEIRA, 2012; WANG *et al.*, 1993).

Uma observação inerente a ser feita ao caso de medidas extensas, que necessite de vários elementos para detecteções independentes, pode se conhecer os valores de I e gerar uma projeção em leque. Estas projeções são paralelas e em formato de leque,

ou seja, serão utilizados para calcular os coeficientes de atenuação ou, os parâmetros desejados do corpo de prova pesquisado, através do teorema da fatia de Fourier cujo resultado é equivalente a uma "transformada inversa" de Radon. Iniciando o teorema formulando a transformada de Fourier da função bidimensional $f(x, y)$ e da projeção mostrada anteriormente na Eq.(3.6).

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (3.9)$$

e

$$S_{\theta}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\theta}(t) e^{-j2\pi\omega t} dt \quad (3.10)$$

Fazendo a variável v da transformada $F(u, v)$ tender a zero. A expressão final da transformada da projeção inicial ($\theta = 0$), pode ser observada a seguir:

$$F(u, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux)} dx dy \quad (3.11)$$

Substituindo $P_{\theta}(t)$, para $\theta = 0$, tem-se que:

$$F(u, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} P_0(t) e^{-j2\pi(ut)} dt = S_0(\omega) \quad (3.12)$$

As variáveis (u, v) e (ω, θ) estão implícitas entre si através de simples relações trigonométricas, $u = \omega \cos \theta$ e $v = \omega \sin \theta$. Observa-se que tanto representando a transformada por $f(x, y)$ ou $F(u, v)$ ou por $F(\omega, \theta)$ tem o mesmo sentido matemático, ou seja, $F(u, 0) = F(\omega, 0) = S_0(\omega)$. Com isso, fica demonstrado a solução para qualquer $\theta \neq 0$. Para que isso fique claro, substituem-se as variáveis x e y por t e s . Que são variáveis de um sistema de coordenadas das projeções. Observando a Figura 3.3, onde se apresenta o esquema simples de uma projeção e que a coordenada s coincide com a direção do raio da fonte e que a coordenada t corresponde ao eixo perpendicular aos mesmos raios da fonte, e que é paralela à direção da projeção. Desta maneira (s, t) e (x, y) estão ligadas através de uma matriz de rotação (PINHEIRO, 2008).

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t \\ s \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

ou seja, qualquer ponto (x, y) de $f(x, y)$ está incluído nas coordenadas (s, t) calculadas por meio de matriz de rotação como pode ser visualizada na Eq.(3.13). Reescrevendo a Eq.(3.6), em função das variáveis t e s , tem-se que:

$$P_\theta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t, s) ds \quad (3.14)$$

Com isso, a transformada de Fourier da projeção, fica:

$$S_\theta(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_\theta(t) e^{-2j\pi\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t, s) e^{-j2\pi\omega t} ds dt \quad (3.15)$$

Voltando para o sistema de coordenadas cartesianas (x, y) e substituindo a Eq.(3.5) na Eq.(3.15), obtém-se a seguinte expressão:

$$S_\theta(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \quad (3.16)$$

Para, $F(u, v)$ e $u = \omega \cos \theta, v = \omega \sin \theta = F(\omega, \theta)$. Então, sabendo as informações de cada projeção $P_\theta(t)$ que estão disponíveis, pode-se calcular sua transformada $S_\theta(\omega)$ que, foi mostrada acima, ou seja, equivale à transformada $F(\omega, \theta)$. Se $F(\omega, \theta)$ e $F(u, v)$ são iguais, deve ser calculada sua função $f(x, y)$ original de acordo com sua simples transformada inversa (PINHEIRO, 2008).

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{j2\pi(xu+yv)} du dv \quad (3.17)$$

Retornando aos coeficientes de atenuação, se o corpo de prova estudado transladar, e essa amostra for girando de um passo angular de $\Delta\theta$ ao final de cada uma das translações, resulta em projeções $P_i\Delta\theta(t)$ obrigatoriamente para reconstruir a informação original do corpo de prova investigado (PINHEIRO, 2008).

Um fato importante deve ser observado quando se reconstrói a função $f(x, y)$: Como os raios-soma de cada projeção são paralelos, ao se igualar as projeções de um ângulo θ e $\theta + 180^\circ$, observa-se que essas projeções possuem os mesmos valores, porém em ordem inversa. Ou seja, não há necessidade de se utilizar todas as projeções ao longo dos 360° em torno da amostra estudada, somente metade do corpo (PINHEIRO, 2008).

$$\begin{aligned}
f(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \\
&= \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} F(\omega, \theta) e^{j2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} \omega d\omega d\theta \\
&\quad + \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(\omega, \theta + \pi) e^{j2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta + \pi)} \omega d\omega d\theta
\end{aligned} \tag{3.18}$$

e

$$F(\omega, \theta + \pi) = F(-\omega, \theta) \tag{3.19}$$

Priorizando a necessidade de utilizar somente as projeções contidas entre 0 e π , pode-se partir para a equação de reconstrução que mostrada a seguir na Eq.(3.2). Uma vez que $F(\omega, \theta)$ é idêntico a $S_{\theta}(\omega)$, substituindo a primeira pela segunda na equação da transformada inversa (PINHEIRO, 2008).

$$\begin{aligned}
f(x, y) &= \int_0^{\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega, \theta) |\omega| e^{-j2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} d\omega \right) d\theta \\
&= \int_0^{\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(\omega) |\omega| e^{j2\pi\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} d\omega \right) d\theta
\end{aligned} \tag{3.20}$$

O filtro deve ser observado com bastante atenção $|\omega|$, o surgimento desse filtro é, devido à mudança de sistemas de coordenadas retangulares para polares. Essa mudança de coordenadas pode ser interpretado como a transformada inversa do produto de dois espectros de frequência, um espectro corresponde a transformada de projeção $P_{\theta}(t) - S_{\theta}(t)$, e corresponde ao espectro do filtro $|\omega|$. A propriedade utilizada na implementação do algoritmo de reconstrução 2D - feixe paralelo, é, o inverso do produto de dois espectros que é igual à convolução entre as respectivas inversas (PINHEIRO, 2008). Desta forma, chamando a inversa do produto dos espectros de $Q_{\theta}(t)$, pode-se escrever na forma compacta da equação de reconstrução, que será apresentada a seguir:

$$Q_{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(\omega) |\omega| e^{2j\pi\omega t} d\omega \tag{3.21}$$

onde: $t = x \cos \theta + y \sin \theta$:

e

$$f(x, y) = \int_0^\pi Q_\theta(x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta \quad (3.22)$$

A Eq.(3.22) possui uma vantagem, pois sinaliza quais passos e que ordem elas devem ser feitas para que a implementação do processo de reconstrução seja permitido. Os computadores trabalham realizando funções implícitas e representação discreta é necessário mudar as integrais por somatórios, limitar os espectros em frequência e interpolar valores, e toda essa operação irá influenciar em erros na reconstrução da função $f(x, y)$. Com isso, a implementação do algoritmo de reconstrução aproveitará o fato da inversa do produto no domínio das frequências serem a convolução entre inversas de cada um dos espectros. Fazendo $H(\omega)$ o espectro $|\omega|$.

$$Q_\theta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_\theta(\omega) H(\omega) e^{2j\pi\omega t} d\omega \quad (3.23)$$

Fazendo a multiplicação do espectro $|\omega|$ por uma "janela"(função "box") $b_\Omega(\omega)$ de largura bem definida Ω (*ciclos/cm*).

$$\Omega = \frac{1}{2\tau} \quad (3.24)$$

e

$$H(\omega) = |\omega| b_\Omega(\omega) \therefore b_\Omega(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \Omega \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{2j\pi\omega t} d\omega = \frac{1}{2\tau^2} \frac{\sin 2\pi t/2\tau}{2\pi t/2\tau} - \frac{1}{4\tau^2} \left(\frac{\sin \pi t/2\tau}{\pi t/2\tau} \right)^2 \quad (3.26)$$

É obrigatório a discretização dos valores de t . Se os valores de t são múltiplos inteiro de τ , então a função $h(t)$ para $t = n\tau$ será:

$$h(n\tau) = \begin{cases} \frac{1}{4\tau^2}, & n = 0 \\ 0, & n \text{ par} \\ \frac{-1}{n^2\pi^2\tau^2}, & n \text{ impar} \end{cases} \quad (3.27)$$

A próxima etapa é discretizar a função $Q_\theta(t)$ e rescrever na forma de convolução e trocando as variáveis t e t' por $n\tau$ e $k\tau$ e a integral pelo somatório. Na equação discretizada será apresentada a seguir:

$$Q_\theta(t) = \int P_\theta(t')h(t-t')dt' \Rightarrow Q_\theta(n\tau) = \tau \sum_{k=-\infty}^{\infty} P_\theta(k\tau)h(n\tau - k\tau) \quad (3.28)$$

Após apresentar a equação discretizada, limita-se o intervalo sobre o qual operará o somatório, ou seja, o índice k deixa de ser responsável pelos valores infinitos para assumir uma faixa de valores.

$$Q_\theta(n\tau) = \tau \sum_{k=0}^{N-1} P_\theta(k\tau)h(n\tau - k\tau) = \tau \sum_{k=0}^{N-1} h(k\tau)P_\theta(n\tau - k\tau) \quad (3.29)$$

Para, $n = 0, \dots, N - 1$.

Estas são as equações usadas na implementação do algoritmo de reconstrução. O algoritmo final torna-se:

- Convolução de todas as projeções com o filtro $h(t)$, que está representada na Eq.(3.29).
- Retroprojetar os valores das projeções filtradas que estejam sobre a reta a .

$$f(i\Delta x, j\Delta y) = \Delta\theta \sum_{l=0}^{L-1} Q_l\theta\Delta(a) \quad (3.30)$$

Onde: $a = i\Delta x \cos l\Delta\theta + j\Delta y \sin(l\Delta\theta)$.

3.2.2 Gerações das Imagens

Ao final da reconstrução uma imagem digital é exibida, a imagem digital apresentada em forma de matriz ($N \times M$), o elemento de imagem formado pela interseção das linhas e colunas é conhecido e denominado como pixel. Uma forma abreviada da expressão "picture element", quanto maior o número de linhas e colunas melhor será a resolução da imagem (DE SIQUEIRA OLIVEIRA, 2012).

Cada elemento da imagem terá um tom de cinza proporcional ao coeficiente de absorção $\mu(x,y)$, ponto a ponto. A região de maior densidade aparece cinza claro e a região que é menos densa apresenta mais escura, como pode ser visto na Figura 3.4 a seguir.

Em uma representação tridimensional da imagem, o exemplo, da matriz bidimen-

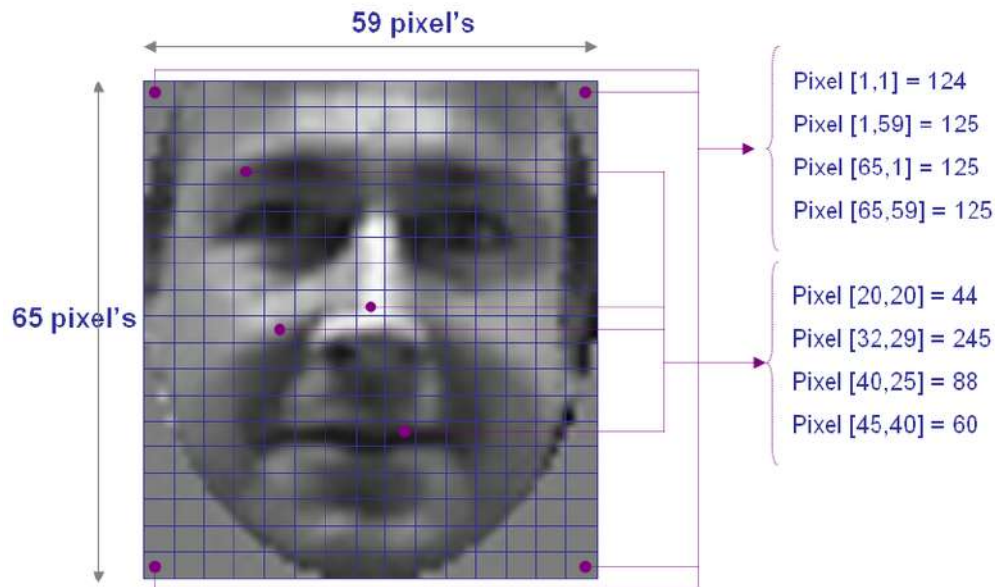


Figura 3.4: Representação do pixel (DE RAMÓN BALMASEDA, 2011)

sional é substituída pela matriz volumétrica. A espessura do corte de uma imagem construída pela tomografia computadorizada está ligada à profundidade do corte. O volume formado pelas dimensões do pixel e profundidade do corte é denominado de Voxel.

3.2.3 Parâmetros quantificados

O resultado obtido de uma tomografia é um conjunto de dados cujo objetivo é analisar através dos coeficientes de atenuação linear. Os parâmetros morfométricos são calculados pelo programa de análise de dados para o volume total da amostra e para as imagens geradas de seção transversal. Ao pesquisar o volume completo os resultados são calculados de forma integrada e para a análise das fatias os resultados são baseados na integração de diversas investigações 2D da seção transversal (DE SIQUEIRA OLIVEIRA, 2012).

Para obtenção de dados importantes e precisos, é recomendado que se faça os cálculos tomando como referência as regiões ou volume de interesse. A região de interesse conhecida como (ROI), que se refere a uma região selecionada de uma imagem única e transversal e o volume de interesse (VOI) a região selecionada de todo objeto. A partir da investigação em 2D realizada dentro do ROI, também é possível obter o volume 3D essa é a soma coletiva de todos os ROIs sobre o conjunto contínuo de imagens de seção transversal. Com isso, deve ser compreendido que estes resultados são baseados na integração de muitas análises 2D e isso é diferente de se obter resultados a partir da análise de todo volume.

A partir de investigações do volume é possível estimar parâmetros, tais como superfícies, volumes e espessuras de objetos, entre outros. Todas as medições dos parâmetros morfométricos em 3D e 2D são realizadas nas imagens segmentadas ou binarizadas, a segmentação deve ser feita antes da análise morfométrica (LESZCZYŃSKI *et al.*, 2014).

O volume total de grande importância o (VOI) é o volume quantificado baseado no tamanho do voxel da imagem binarizada, a porcentagem de volume e objeto é proporcional ao volume de interesse ocupada pelos objetos sólidos da imagem binarizada (DE SIQUEIRA OLIVEIRA, 2012). Este parâmetro torna-se importante quando o volume pesquisado é bem definido dentro da região do sólido, com isso, o volume de interesse descarta as bordas da imagem binarizada.

O volume total de vazios pode ser estimado. Primeiramente, pode ser adquirido o volume completo de espaços vazios (poros) totalmente fechados. Um poro fechado é definido a partir da imagem binarizada como voxels pretos que se encontram completamente cercados, por todos os lados, por voxels brancos. A porosidade fechada ou porcentagem de poros é conhecida como a quantidade de poros bloqueados existentes em relação ao volume total (DE SIQUEIRA OLIVEIRA, 2012). É viável também se determinar a quantidade de poros conectados, ou seja, poros conectados (voxel preto) é definido como qualquer espaço vazio encontrado dentro do sólido (voxel branco) ou entre os sólidos que apresentam conexões em 3D com espaços fora do sólido. A porosidade efetiva ou porcentagem dos poros conectados, é o chamado volume de poros conectados como uma porcentagem do volume total da região de interesse. De acordo com a porosidade fechada e a porosidade efetiva pode-se determinar a porosidade total que será o volume de todos os poros presentes na imagem (conectados e isolados) como uma porcentagem do volume inteiro de interesse. O volume total de interesse da amostra é conhecido como (VOI) é o volume quantificado baseado no tamanho do voxel da imagem binarizada, ou seja, a porcentagem do volume e objeto é a proporção do VOI ocupada pelos objetos sólidos da imagem binarizada. Estes parâmetros só pode ser validados se o volume investigado for bem definido dentro da região do sólido, ou seja, o VOI não pode conter as bordas da imagem binarizada.

3.3 PARÂMETROS FÍSICOS DE QUALIDADE DA IMAGEM

Identificar sobre as características de um sistema de microCT permite realizar de maneira adequada para um determinado propósito, para obter resultados melhores e confiáveis, quando conhecidas as melhores condições de operação para melhor

investigar uma amostra. Nesse contexto, serão apresentados a seguir a descrição das metodologias de obtenção de alguns parâmetros físicos que influenciam na qualidade das imagens geradas através da microCT, tais como tamanho do foco do tubo de raios X , as resoluções espaciais, densidades, e a avaliação dos ruídos (DE PAIVA TELES, 2016).

3.3.1 Determinação do tamanho focal

As dimensões de um tubo de raios X de um sistema convencional da microCT tem uma importante finalidade que implica nas limitações das resoluções espaciais do arranjo. Quanto menor o tamanho focal, menor será a penumbra geométrica processada, o que permite obter as projeções mais acuradas (DE PAIVA TELES, 2016). Os equipamentos denominados comerciais são desenvolvidos com os tamanhos de focos em dimensões na ordem de micrômetros ou ainda algumas centenas de nanômetros (LANDIS e KEANE, 2010).

3.3.2 Feixes cônicos

A geometria de feixe cônico é a forma natural do feixe de um tubo de raios X . E com isso. Traz a vantagem de permitir a reconstrução de um espaço $3D$ diretamente dos dados de projeções $2D$, ao invés de reconstruir slice por slice. Em outras palavras, não há necessidade de colimar o feixe e, portando, ser feito pela utilização da energia emitida (SALES, 2010).

Existem diversas técnicas para reconstrução com feixe cônico. A mais usada é: (FELDKAMP *et al.*, 1984). E repetidamente referida como algoritmo de Feldkamp.

- Algoritmo de Feldkamp

A Eq.(3.4), pode ser reescrita para duas dimensões através de projeções tridimensionais do objeto $f(x, y, z)$.

$$P(\theta, a, b) = P(\theta, a(x, y, \theta), b(x, y, \theta)) = \int_L f(x, y, z) dl \quad (3.31)$$

Onde a e b são as coordenadas horizontal e vertical do dectetor, respectivamente. Sabendo que L é o comprimento geométrico que um raio se propaga através da amostra investigada em seu caminho para o detector e o θ é o ângulo de projeção. As coordenadas do dectetor a e b são relacionadas à x , y , z e θ , que são definidas a seguir:

$$a(x, y, \theta) = R \frac{-x \text{sen}(\theta) + \cos(\theta)}{\cos(\theta)} \quad (3.32)$$

e

$$b(x, y, z, \theta) = z \frac{R}{R + x \cos \theta + y \sin \theta} \quad (3.33)$$

Onde R é o raio da trajetória da fonte. Como pode ser visto na Figura.3.5, a geometria de feixe cônico é mostrada com um pouco mais de detalhes. Observe que o sistema fonte-detector gira em volta do objeto em sistema de coordenadas. Uma observação importante nas medições atuais o sistema fonte-detector permanece fixo, enquanto o objeto estudado que será rotacionado. O momento angular relativo permanece constante, esse parâmetro tem uma grande importância na reconstrução. Portanto, é possível visualizar que o sistema de coordenadas do detector, nesse caso, se desloca de modo que o eixo b coincide com a direção de z . Esta operação é puramente regida pela matemática e o detector virtual está relacionado com o desenvolvimento físico do detector por conta de um simples dimensionamento de escalas (FELDKAMP *et al.*, 1984; SALES, 2010).

O processo de reconstrução é fundamentalmente o mesmo modo que o feixe paralelo, porém, com certas complexidades geométrica faz com que um número de fatores a ponderar seja obrigatório no algoritmo de reconstrução. O Processo de filtração é dado por:

$$\tilde{P}(\theta, a, b) = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + a^2 + b^2}} P(\theta, a, b) \right) * g(a) \quad (3.34)$$

Na Eq.(3.34), $*$ denota a convolução entre a projeção $P(\theta, a, b)$ e $g(a)$, que é chamado de filtro rampa. Outra observação importante é o fator na frente da projeção conhecido como pré-fator de peso e pode ser relacionado com a geometria do feixe, segundo a Eq.(3.35):

$$\frac{R}{\sqrt{R^2 + a^2 + b^2}} = \cos \varphi \cos \psi \quad (3.35)$$

Onde φ e ψ são os ângulos leque e cônico, respectivamente, como pode ser visto na Figura 3.5. O pré-fator de peso e projeção filtrada $\tilde{P}(\theta, a, b)$ dada pela Eq.(3.34) é finalmente reprojeta no espaço tridimensional da amostra $f(x, y, z)$, como pode ser observado na Eq.(3.36) de forma que o algoritmo de Feldkamp é do tipo retroprojeção filtrada é dado por (DE ARAÚJO, 2019):

$$f(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{(R + x \cos \theta + y \sin(\theta))^2} \tilde{P}(\theta, a(x, y, \theta), b(x, y, z, \theta)) d\theta \quad (3.36)$$

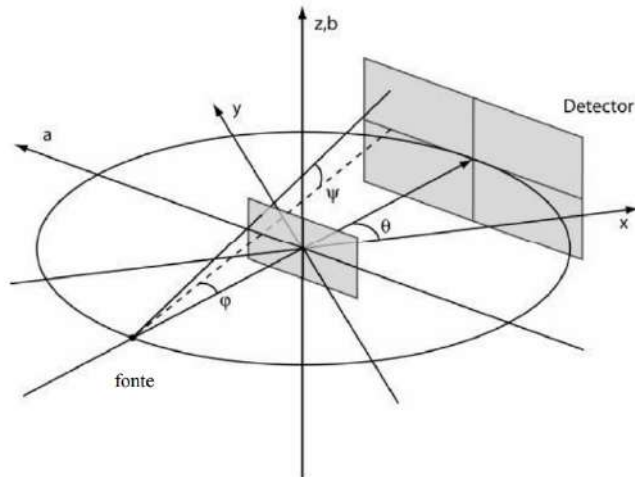


Figura 3.5: Geometria de formação das projeções(SALES, 2010)

O formalismo matemático com maior compreensão pode ser obtido deste resultado ou pode ser encontrado em (TOMOGRAPHY, 2008). Uma imagem digital de duas dimensões, pode ser definida como uma função $f(x, y)$ nas quais x e y são coordenadas espaciais, e sua amplitude f para qualquer par de coordenadas (x, y) que é chamada de intensidade de radiação ou nível de cinza da imagem no respectivo ponto. Para se conhecer a imagem digital os valores da amplitude de f para qualquer que seja o valor do par de coordenadas (x, y) finito, ou seja, com quantidades discretas, bem definidas, cada um com seu determinado local e valor. Estes elementos são chamados, elementos de imagem, ou pixels que é o termo mais utilizado. Um conjunto de pixel tem a funcionalidade de formar as amostras por inteira e cada elemento representativo de um valor numérico de tons de cinza.

O armazenamento da imagem digital, se dá por meio de dígitos binários denominados bits, ou seja, os valores admitidos são, 0 ou 1, um conjunto de 8 bits é chamado byte e estes são usados para representar os pixels de uma determinada imagem digital, onde cada configuração de bytes representa diferentes tonalidades de níveis de cinza nos pixels (DE ARAÚJO, 2019).

A quantificação das imagens $3D$ pode ser representadas pelas coordenadas (x, y, z) . Nestas condições as imagens são representadas como uma sequência de imagens $2D$ ao longo do eixo z e o menor elemento nesse caso pode ser chamado de *voxel*. Os pontos de amostragens são fenômenos físicos que representam os *voxels*, que são usados para reconstruir no computador a forma ou respectiva função das estruturas em $3D$. Existem várias técnicas de correções que podem ser realizadas para reduzir ruídos e artefatos indesejáveis nas imagens digitais, questão principal que gira em torno da qualidade da imagem digital (DE ARAÚJO, 2019).

Capítulo 4

CABOS ELÉTRICOS

4.1 ARBORESCÊNCIAS

Há alguns anos, o fenômeno das arborescências foram um grande mistério para os cientistas devido à complexidade da medição e a dificuldade de quantificar as arborescências. Recentemente chegou-se a uma compreensão de que essas arborescências consistem de aglomerados de moléculas de água na matriz do polímero que, quando em estágios avançados, se conectam, podendo formar canais contínuos que se assemelham a ramos de uma árvore quando visualizado por meio de microscópios. Dentre os mecanismos que podem levar ao envelhecimento sob ação do campo elétrico, destaca-se o fenômeno da arborescência, vista como um dos principais causadores de anomalias em materiais poliméricos usados como isolantes. Esse termo é utilizado ao problema causado em dielétricos submetidos a estresse elétrico. Quando surge a arborescência significa que o defeito reduz consideravelmente a rigidez ou suportabilidade do material que terá futuramente à ruptura dielétrica. O fenômeno tem grande possibilidade de acontecer em qualquer polímero, sendo sua visualização muitas vezes imperceptível ou detectadas apenas pela presença de cargas nas isolações de etileno propileno (EPR) (CARVALHO, 2005). Além do que, também acontece alterações nas propriedades elétricas como, por exemplo, modificações na constante dielétrica e movimento de cargas parciais, o qual é responsável pela característica não linear do fenômeno. Este último efeito acarreta um aumento do campo elétrico nas extremidades dos micro-canais, que, em casos desenvolvidos, pode levar à ruptura do dielétrico. Se um campo elétrico é aplicado, a polarização dentro da cavidade faz com que as cargas se movam na arborescência e se concentrem na região limite entre o contorno das arborescências e a região não degradada no polímero. Esse efeito é a causa para o progresso localizado de campo elétrico nas pontas das arborescências, e afinal por meio de arborescências elétricas a ruptura do cabo pode ter início (LIMA *et al.*, 2008b; MACHADO *et al.*, 2022; PATSCH e JUNG, 1999).

4.2 PROCESSO DE GERAÇÃO DAS ARBORESCÊNCIAS

Conforme os mecanismos de deformação e o surgimento, do fenômeno de arborescência elétrica será abordada de maneira mais detalhada. Isolantes sólidos costumam apresentar condutividade elétrica que depende dos elétrons livres e dos íons. Pelo seu mecanismo bastante complexo, será comentado apenas a condução iônica, abordando a condução eletrônica apenas em casos específicos. As impurezas localizadas em um isolante sólido, sendo de natureza iônica e indicando suficiente mobilidade, com objetivo de chegar até os eletrodos e lá serão neutralizados, isso significa que serão excluídas da estrutura do material. Ao decorrer desse fato, diminuição da concentração dos portadores de cargas, e daí, um aumento acréscimo da capacidade de isolação do material. A condução iônica em isolantes sólidos que possuem grade iônica é função principalmente do comportamento dos íons que são retirados da grade, devido à ação vibratória da energia térmica, que pode incidir. Quando expostos à temperatura bem mais altas, os íons serão os da própria estrutura cristalina e na qual as baixas temperaturas os íons sobre tudo proveniente da impureza, cujos íons são conectados, de modo menos rígidos, ao material usado (SCHURCH *et al.*, 2014).

É coerente a compreensão que o fenômeno da arborescência é influência da combinação desses processos, até este momento não foi possível estabelecer a importância relativa de cada um desses processos de aparição do fenômeno da arborescência (LIMA *et al.*, 2008b; MACHADO *et al.*, 2022; ZONG-HUAI *et al.*, 1994). Apesar do mecanismo de geração das arborescências não seja de todo perfeitamente compreendido, foi observado que provavelmente os seguintes fatores são responsáveis (CRINE, 1998; MACHADO *et al.*, 2022; ZONG-HUAI *et al.*, 1994):

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

Qualquer definição sobre a geração de arborescências necessita de sua verificação experimental e é usado para explicar a influência de diversos parâmetros no surgimento e no aumento de arborescências. Desta maneira, qualquer tentativa para descobrir as arborescências em cabos tem que partir das modificações morfológicas localizadas e eletricamente notável devido às arborescências (LIMA *et al.*, 2008a). Em atividades, somente correntes externas mensuráveis, devido ao movimento das

cargas na parte interna do cabo e na proximidade das arborescências após a aplicação do campo elétrico à isolação, é que podem ser utilizados para a constatação das arborescências em cabos (LIMA *et al.*, 2008a; PATSCH e JUNG, 1999). O processo de desenvolvimento e o aumento desse fenômeno apenas ocorre em ambientes onde há uma alta taxa de umidade interna à isolação de cabos que operam em todo tempo em ambientes de temperatura mais intensas, e que ainda tenham áreas onde o campo elétrico seja não uniforme.

Dessa forma, sem esses fatores não aconteceria o problema, no entanto, os locais onde são instalados os cabos de potência isolados a XLPE são fundamentalmente subterrâneos, onde existe muita umidade e calor. (LIMA *et al.*, 2008a) Em vista que, é quase impossível a obtenção de campos elétricos uniformes ao longo do material isolante, em razão das impurezas e microfissuras provocadas por estresses mecânicos, com isso, o aparecimento de arborescências é praticamente inevitável. Nesse sentido, é essencial que se conheça os mecanismos responsáveis pelo surgimento desse evento.

Segundo os autores,(DUBICKAS, 2006; HOSSAM-ELDIN *et al.*, 1998; LIMA *et al.*, 2008a; PATSCH e JUNG, 1999) as arborescências têm a origem devido à presença de impurezas na isolação ou danos mecânicos que mudam o campo elétrico daquela região e na existência externa de água na forma de umidade em volta do cabo que, com o crescimento da temperatura de modo que alterar sua solubilidade, entra no interior do isolante da forma de molécula espalhadas. Devido à rigidez do material dielétrico existente, o campo elétrico não uniforme, surge um acúmulo localizado de moléculas de água na região de grande intensidade de campo. Essa aglomeração continuará até que aconteça um processo inverso de difusão, que tende a homogeneizar a concentração de água, até que possa estabelecer um equilíbrio, ou uma concentração pontual exceda a solubilidade no polímero e podendo gerar prematuramente gotículas de água. Com as moléculas de água, pode ocorrer um crescimento da pressão interna do polímero, ocasionando fissuras e resultando formações de ramificações. No local onde acontece as arborescências, a concentração do vetor campo elétrico gera estresse de Maxwell. Por conta da polarização, as moléculas de água próximo do local afetado são direcionadas para o ponto de mais intensidade do campo pelo fenômeno chamado de "**dielectrophoresis**", surgindo assim, micro-gotículas dentro da isolação. A intensidade de campo elétrico, por sua vez, se torna mais intenso nas regiões de fronteira entre as extremidades dos ramos das arborescências e o material dielétrico ainda íntegro, alternando forças de Maxwell nesses pontos, podendo provocar novas fadigas e defeitos na estrutura da isolação.

As arborescências podem aparecer de duas maneiras:

(a) **vented-tree**, como pode ser visto na Figura 4.1, a arborescência surgiu a partir das extremidades do material isolante, os quais se encontram em contato com o condutor ou com a blindagem / capa e se desenvolvem em direção ao interior do material isolante. Esse processo começa muitas das vezes partindo de poros presente nestas superfícies formados durante sua fabricação, ou pela ação de certos líquidos (STEENNIS e KREUGER, 1990).

(b) **bow-tie-tree**, a Figura 4.2, mostra que crescem do lado de dentro da isolação para as extremidades, se configurando na forma mais comum do fenômeno, sendo a causa responsável a presença de impureza no interior do dielétrico ou estresse mecânico devido ao transporte e/ou manuseio desses cabos de potência (LIMA *et al.*, 2008a; STEENNIS e KREUGER, 1990).

Nesta circunstancia, além das impurezas da isolação que geram a arborescência do tipo **bow-tie-tree** é de imensa importância considerar a aparição de íons na camada de isolação, que também contribui para o aparecimento e o aumento das arborescências. Com base nesta constatação e com base nas evidências experimentais sobre a influência de partículas de sais no nascimento de arborescências **bow-tie-trees** os íons, em particular, desempenham um papel importante no processo de aparição das arborescências na isolação de cabos elétricos (LIMA *et al.*, 2008a; PATSCH e JUNG, 1999; STEENNIS e KREUGER, 1990).



Figura 4.1: Arborescência do tipo vented-tree (LIMA *et al.*, 2008b).



Figura 4.2: Arborescência do tipo bow-tie-tree (LIMA *et al.*, 2008b).

As arborescências do tipo **vented-tree** são mais ofensivas do que as do tipo **bow-tie-tree** porque reduzem a resistência dielétrica do isolador e atingem pontos em que ocorrem as falhas (DUBICKAS, 2006). Outros aspectos para observar com atenção dizem respeito ao estresse mecânico aplicado à cadeia do material polímero devido ao aumento das arborescências que favorece a ocorrência de alguns processos químicos tais como a oxidação. E dessa forma podem acontecer alterações químicas na região afetada pelo fenômeno e não podem ser apontadas como surpresas no processo de criação eletrofísico. (LIMA *et al.*, 2008a; SARMA, 1999). Além disso, há diferentes diversidades químicas em arborescências elétricas encontradas em laboratórios que podem ser definidas não pelo tipo de local que acontece, como também pelo tempo de envelhecimento. Em laboratório, obtêm-se um envelhecimento mais rápido pela aplicação de níveis altos de estresses elétricos em cabos de potência em recipientes contendo água antes aquecida, o qual não é suficiente para oxidação do material (SARMA, 1999).

Foi verificado mediante pesquisas com microscópios que, em regiões de defeitos, haviam canais com diâmetros com o comprimento que não excediam $1\mu\text{m}$, enquanto em outros pontos danificados pelo fenômeno da arborescência esses canais alcançavam o valor de até $4\mu\text{m}$ de diâmetro. Essas anomalias, em regiões pré-deterioradas, significam a existência de um pré-estágio do fenômeno da arborescência. Isso se deve ao fato de que, localidades onde as moléculas de água se deslocam com maior facilidade em direção às pontas dos ramos do fenômeno da arborescência e, da mesma forma, pela ocorrência da precipitação dessa água, quando existe o equilíbrio de uma supersaturação local ou é acessado o estresse elétrico aplicado ao cabo (PATSCHE e JUNG, 1999).

4.3 FATORES DE INFLUÊNCIA

4.3.1 Influência da temperatura

A influência da temperatura no dispositivo de formação e crescimento das arborescências é objetivo de pesquisa de diversos autores e, ainda existe pouca concordância e compreensão a respeito do assunto. No entanto, diversos trabalhos indicam que a temperatura pode favorecer de forma, distintas para o aumento das arborescências (BULINSKI *et al.*, 1988; JUNG e PATSCH, 2000; PATSCH, 1988; PATSCH e JUNG, 1999). Entretanto, a maioria das pesquisas indica que a temperatura pode ajudar de forma distinta na propagação das arborescências. O aumento da temperatura modifica a solubilidade¹ tanto da água quanto da isolação, deixando a umidade existente ao redor do cabo penetrar mais facilmente e, com isso, agiliza o desenvolvimento do fenômeno até que ocorra um desequilíbrio de tal modo que a elevação da temperatura seja de grande importância que ocorra uma evaporação excessiva a ponto ressecar as cavidades das arborescências. Para os autores que conseguiram altos níveis de degradação em um tempo curto, quando aplicado temperatura de até 75 °C em recipientes de envelhecimento (SARMA, 1999).

As pesquisas relacionadas a temperatura que mostrou a importância na criação do fenômeno **vented-trees** e na geração do **bow-tie-trees** que se desenvolveu mais rapidamente em temperaturas mais altas. Todavia, tanto num caso quanto no outro, o tempo para acontecer a ruptura dielétrica na isolação são sempre inferiores ao processo de envelhecimento, pois se dá a temperaturas elevadas devido à redução acentuada da resistência dielétrica, que pode ser responsável pela ruptura no material, com o passar do tempo (BULINSKI *et al.*, 1988).

Pode-se chegar conclusão que mesmo a temperatura não tendo influência relevante na iniciação na geração do fenômeno das arborescências do tipo **vented-trees**, ela é importante no processo final do defeito. Dessa forma, identifica-se que o gradiente de temperatura é um parâmetro de grande importância na evolução do processo de degradação do dielétrico (BULINSKI *et al.*, 1988).

4.3.2 Influência de sais e de outros íons

A presença de partículas de sais na composição do polímero pode ser visualizadas como ponto de partida de futuras arborescências, mas ainda existem diversas discussões a respeito da influência das propriedades químicas de sais ou outros íons da produção e crescimento do fenômeno. Com relação à interferência das soluções

¹É a propriedade física das substâncias de se dissolverem, ou não, em um determinado líquido. Denomina-se soluto, os compostos químicos que se dissolvem em outra substância. O solvente é a substância na qual o soluto será dissolvido para formação de um novo produto.

aquosas de sais, por exemplo, $LiBr$ ou $NaCl$, embora mesmo não acontecendo um consenso geral, algumas pesquisas indicam que estas atrasam a aparição das arborescências ao diminuir a pressão de saturação externa ao polímero, a qual se impõe a outras imperfeições (temperatura, nível de umidade, etc), forçando de água inclusa na isolação, dessa maneira, quanto mais concentrado de sal na água, menor será a geração do fenômeno. Através da utilização de diversas concentrações de sal de $LiBr$ como eletrólito no pilar da arborescência **water-needle**, foi observado que com concentração mais alta de sal é responsável pelo fenômeno da arborescência menor. A apuração dos resultados é compatível com os pesquisados em amostras de cabo XLPE de 20KV submetida a uma concentração úmida de $NaCl$ no qual se identificou menores arborescências do que nas amostras submetidas à água pura. Esses fatos acontecem em concordância com os resultados os quais relatam que cabos usados em região costeira não apresentam defeitos significativos por arborescência, como dano causado pelo sal da água do mar e por conta da temperatura da água ser mais baixa que a temperatura do isolamento, o que ajudou a impedir o aparecimento de arborescências (PATSCHE e JUNG, 1999). Segundo o processo degradativo da água do mar, quando comparada a água potável, progrediu, em pequena quantidade, do episódio do fenômeno, assim como o tamanho, em menores proporções, dos ramos das arborescências (HOBDELL *et al.*, 2000).

4.3.3 Influência do estresse elétrico

A presença do campo elétrico é de grande importância para o processo de deterioração falado nesse capítulo. Assim o estresse elétrico aplicado em cabo de energia, é a causa diretamente pelo processo de aparição de ruptura no dielétrico. Mostrar que, tensões superiores a nominal aceleram o mecanismo de degradação, pontualmente devido ao fenômeno da arborescência do tipo **bow-tie-tree**, aumentando a quantidade de ocorrências, mas, com respeito ao tamanho das arborescências, estas se apresentaram menores que aquelas encontradas para os casos em que se aplicou tensão nominal. Dessa forma, o crescimento do estresse elétrico aplicado aos cabos de potência anteriormente deteriorado aumenta a possibilidade da ruptura dielétrica (HOBDELL *et al.*, 2000).

4.3.4 Influência da frequência da tensão de alimentação

A faixa de valores de frequências de sistema de potência são de 50Hz a 60Hz. Mas diversos desses sistemas estão submetidos às tensões harmônicas e transitórias na qual as frequências podem alcançar alguns KHz. Recentes pesquisas mostram que a frequência do estresse elétrico aplicado à isolação possui grande influência no processo de formação de **bow-tie-trees**. Cabos que são expostos a tensões com a

frequência na ordem de $500H_Z$, tiveram um crescimento próximo a 60% no tamanho das arborescências em comparação com as originais de tensões com a frequência de $50H_Z$. As pesquisas concluem que a frequência não colabora para o desenvolvimento de **vented-trees**, sendo que não foi detectado diferença nas formações investigadas para as duas situações propostas, para as frequências na faixa de $50H_Z$ a $500H_Z$ (HOBDELL *et al.*, 2000). Desta maneira, pode-se aguardar que redes elétricas que abranjam avançados índices de distorção harmônica de tensão, os cabos nelas instalados estejam submetidos a níveis de defeitos superiores àqueles encontrados em sistemas onde a tensão seja somente senoidal (LIMA *et al.*, 2008b).

4.3.5 Proliferação de arborescência elétrica a partir da arborescência em úmida

O tipo degradação em cabos com os revestimentos poliméricos devido à arborescência é um fenômeno de diversas fases. A fase mais adiantada qualifica-se pela ruptura da isolação. Inicia-se quanto uma arborescência elétrica começa nas vizinhanças da arborescência em água (LIMA *et al.*, 2008b). Essa etapa é geralmente menor em duração quando comparado ao surgimento e ao crescimento e tem sido pouco pesquisado (BULINSKI *et al.*, 1998; LIMA *et al.*, 2008b).

O fenômeno da arborescência elétrica, conforme já comentado, é um acontecimento de pré-ruptura elétrica e está diretamente associado a existência de vazios e impurezas no seu interior e da isolação e com a eventualidade do fenômeno de descargas parciais quando o dielétrico é submetido a uma intensidade de campo elétrico. As descargas parciais que acontecem internamente na isolante tem por sua responsabilidade à existência de micro-vazios ou dissemelhança do material com pontos de alta condutividade. Tal como acontece nos pontos de defeitos nas camadas semicondutoras. Essas anomalias levam à concentração das linhas de campo elétrico bem próxima. O fenômeno das descargas parciais, geram energia térmica pontuais(DUARTE, 2001; LIMA *et al.*, 2008b).

Visando elucidar os meios do surgimento de uma arborescência elétrica a partir de uma arborescência em água na parte de dentro do polietileno, foram verificadas, ao mesmo tempo, as características das descargas parciais, proliferação das arborescências elétricas e os fenômenos associados. Foi apurado que a tensão em que ocorre logo no início da arborescência elétrica é iniciada a partir da ponta de um micro canal de umidade. Quando ela se relaciona com o micro canal de água da base da arborescência, as descargas parciais tornam-se grandes rapidamente (LIMA *et al.*, 2008b; MAIRE e WITHERS, 2014; SAITO *et al.*, 2005).

As formato das arborescências podem ser diversos, por isso a perspectiva área é delineada como o produto do comprimento horizontal **b**, e do comprimento vertical

a, na Figura 4.3. Observa-se que a tensão inicial cresce com o aumento da área da arborescência, em especial, para os casos em que a frequência nominal de funcionamento seja acima de $60Hz$. O progresso da tensão inicial no desenvolvimento dos fenômenos das arborescências elétricas que refletem os maiores riscos para a ruptura da camada isolante. Enfatizando que a área de uma arborescência em água seja zero, isso significa que a mesma não determinada pelos métodos usados na pesquisa (LIMA *et al.*, 2008b; MAIRE e WITHERS, 2014; SAITO *et al.*, 2005)

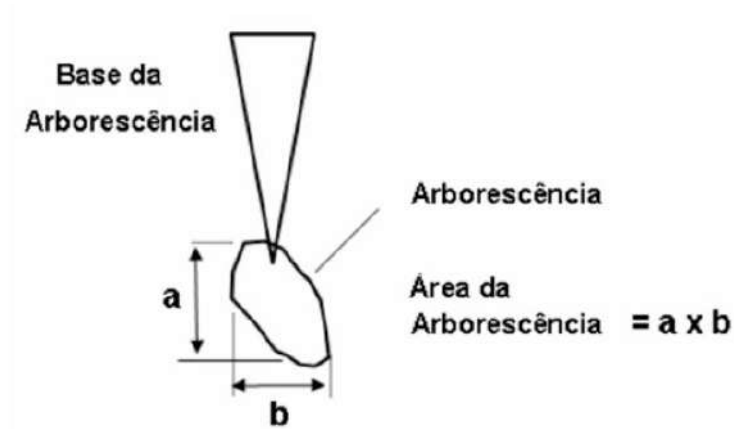


Figura 4.3: Falhas na camada de isolamento devido à presença de arborescências (LIMA *et al.*, 2008b).

Capítulo 5

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo o objetivo é apresentar os materiais e métodos usados nas investigações para a obtenção dos resultados que serão presenciados a seguir. O Fluxograma da Figura 5.1 descreve os passos executados, desde as escolhas das amostras dos cabos até a validação das ideias implementadas pelo programa Comsol Multiphysics.

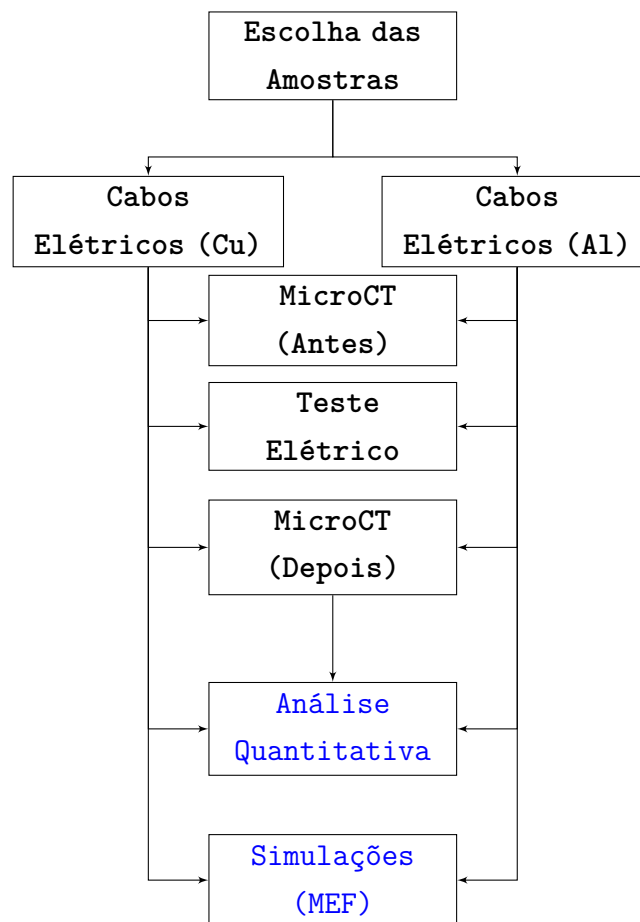


Figura 5.1: Fluxograma da metodologia proposta

O fluxograma da Figura 5.1 representa o que foi planejado para este trabalho, desde a escolha das amostras até os resultados que serão discutidos nesta tese. Inicialmente foi escolhido dois tipos de cabos com geometrias completamente diferentes. Suas aplicações são utilizados em inúmeros locais que podem ser residenciais ou industriais. Logo após ter selecionado as amostras, foram realizadas uma microCT, para conhecer melhor a estrutura dos núcleos dos cabos antes de submeter eles os pulsos de corrente elétrica. Em seguida, conduziu-se aos ensaios elétricos visando passar uma corrente elétrica¹ nas amostras de cabos escolhidos. E logo depois foi feito novamente uma microCT, para verificar os efeitos da corrente nos condutores, onde foi constatado que aconteceu algumas alterações nas configurações dos núcleos após analisar os resultados qualitativos e quantitativos de cada amostra separadamente.

Como ponto de partida se estudou e adaptou os procedimentos experimentais para as realizações dos ensaios com as amostras de cabos de potência de baixa tensão. Outra linha de atuação foi planejada para o melhor entendimento do fenômeno durante a passagem da corrente elétrica no modo AC, verificado na simulação computacional usando o programa Comsol Multiphysics, que tem como base a resolução das equações de Maxwell utilizando o MEF e sua condutividade considerada isotrópica.

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1.1 Ensaio elétrico e a realização da microCT

Os ensaios elétricos foram planejados e executados conforme o fluxograma da Figura 5.1. Foi utilizando dois tipos de amostras de cabos com núcleos de materiais diferentes e geometrias bem distintas, um com o modelo flexível encordado de cobre e a outra amostra de Alumínio rígido, regidos pelas normas da ABNT NBR 7286 e 8182. Para os cabos encordados de cobre foram testados três áreas de seções transversais, com as áreas de seções transversais de 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2 . E nas amostras multiplexadas com o núcleo de Alumínio foi testado apenas com a área de seção transversal de 25 mm^2 .

Esses testes elétricos foram realizados usando uma máquina de solda com o valor nominal corrente próximo de 250 A. Foram dados picos de soldas em um intervalo de tempo bem reduzidos por conta da limitação do equipamento de solda, esses espaços entre um pico e outro foi de 2s a 3 s, sendo executado 10 picos em cada amostras.

Em seguida as amostras foram direcionadas ao laboratório de instrumentação nuclear (LIN) para realizar uma nova microCT dos cabos que foram energizados.

¹pulsos com a intensidade de corrente elétrica na 250 A

Sabe-se que o meio externo influenciou bastante nos resultados das amostras energizadas. Principalmente nas mudanças de temperaturas e a umidade relativa do ar.

5.2 DESCRIÇÕES DAS AMOSTRAS

5.2.1 Descrição das amostras e equipamentos

Os cabos de energia unipolar de potência com o condutor de Al tem a isolação composta termofixo à base de etileno - propileno de alto módulo (HEPR), apropriado para temperatura de operação de até 90°C , e cobertura em PVC com resistência a Ultravioleta B (UVB), para as tensões de até 1 kV AC e 1,5 kV DC.

Os cabos de energia elétrica com o núcleo de cobre tem a seguintes descrições: Cabo unipolar de potência flexível, com condutor de cobre estanhado encordado classe 5, isolação composta de termofixo à base HEPR e apropriado para temperatura de operação no condutor em regime permanente de até 90°C .

Segundo a norma NBR NM 280² e NBR 7286³, os cabos possuem coberturas compostas de camadas extrudadas de cloreto de polivinila - PVC (ST2), com características especiais de resistência à chama, resistente ao UVB e livre de chumbo (isento de metais pesados). As descrições dos materiais que foram utilizados nos ensaios elétricos, são. Cabos isolados, dois tornos mecânicos para prender os cabos nas extremidades, alicate amperímetro para medir a intensidade de corrente elétrica e a tensão de saída de fonte, duas bocas jacarés que compõem a máquina de solda para prender nas amostras investigadas.

Primeiramente, os cabos de energia foram fixados pelos tornos mecânicos e presos pelas bocas jacarés, para a passagem da corrente elétrica nos cabos de potência. Depois disso, cada cabo, recebeu dez picos de solda, totalizando um tempo estimado de 10 s a 15 s, com a amplitude da corrente de pico marcando numericamente na fonte 250 A. O alicate amperímetro foi usado para medir a intensidade de corrente elétrica que transitou pelo cabo de energia no momento do experimento.

O alicate amperímetro neste experimento teve como objetivo medir a corrente elétrica no cabo e a tensão de saída da fonte. Como podem ser visualizadas nas Figuras 5.2 e 5.3. Na Figura 5.3, pode-se observar a máquina de solda e o alicate amperímetro que marca a tensão de saída da fonte o valor inicial da tensão de 59,8 V. Agora na figura 5.3, mostra a realização de como foi montado o experimento e o valor da corrente observável em um instante qualquer entre zero e 10 s, no alicate

²condutores para cabos isolados (IEC 60228 MOD), NBR 6251- Cabos de potência com isolação extrudada para tensões de 1 a 35 kV Requisitos construtivos

³ Cabos de potência com isolação extrudada de borracha (EPR) para tensões de 1 a 35 kV - Requisitos de desempenho

amperímetro marcando a corrente em dez picos, com o valor numérico de 237,4 A.



Figura 5.2: Máquina de solda utilizada como fonte de corrente elétrica e tensão de saída da fonte registrada em alicate amperímetro.

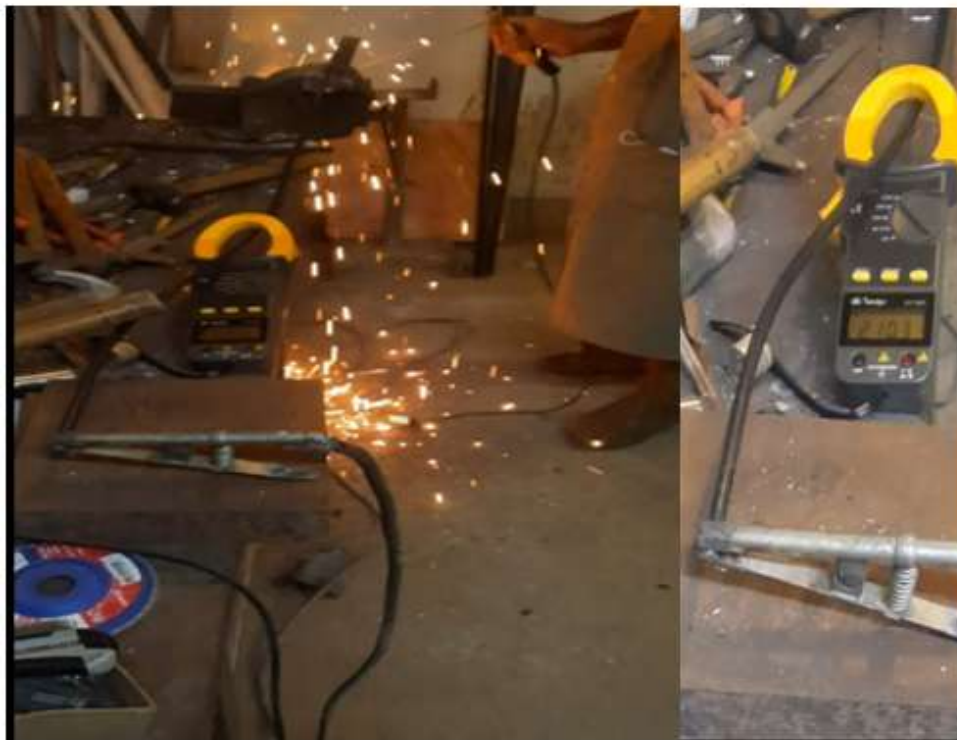


Figura 5.3: Ensaio elétrico realizado nas amostras de cobre e alumínio.

5.2.2 A microtomografia computadorizada de raios X

O sistema utilizado para a realização da técnica de microCT, foi o equipamento Phoenix Vtomex M (BHGE). Os parâmetros de aquisição para a aquisição das

imagens nas amostras investigadas nesse trabalho foram. Tensão de 140 kV, corrente elétrica de 100 micro A, ltrio de 0,3 mm de cobre, tamanho do pixel 15 micro m, frames 5 e um total de 1000 projeções. Para a reconstrução das imagens, foi utilizado o programa Phoenix Datos Reconstructionv.2.5.0 onde foram aplicados ajustes no momento da reconstrução tais como: alinhamento, beam har dening correction e aplicados ltros de pós-processamento de suavização e realce de bordas. O programa CT Analyserv.1.16.4.1 foi empregado para gerar as análises quantitativas. Para fins de comparação, foram analisados o mesmo comprimento de 24 mm (1600 slices) em cada amostra. Com as análises, foram obtidos o volume total de vazios em percentual e o histograma de distribuição de volumes de vazios por intervalo. Na visualização das imagens em 3D, foram utilizados os programas VG Studio Max 3.0 e Avizo 2020.3.

Capítulo 6

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

6.1 RESULTADO DA *microCT* APLICADOS EM CABOS ELÉTRICOS COM O NÚCLEO DE ALUMÍNIO E COBRE

Para o cabo elétrico de alumínio com seção transversal de $25mm^2$ foi possível identificar que antes de ser submetido ao ensaio elétrico não havia vazios entre o condutor e o material isolante, conforme pode ser observado na Figura 6.1(A). Após a passagem da corrente elétrica, observou-se o aparecimento de vazios, conforme Figura 6.1(B). Os círculos vermelhos destacam os defeitos que apareceram após aplicar a corrente. Esses defeitos são encontrados em toda a amostra e foram analisados e quantificados para destacar as regiões que apareceram. A renderização 3D da amostra pode ser vista na Figura 6.1(C) que destaca o volume dos vazios após a passagem da corrente elétrica, o mapa de cores corresponde a espessura desses vazios podem ser observados na Figura 6.2(B). Além de visualizar os defeitos, a fim de fornecer uma comparação quantitativa foi realizada a análise do método de ajuste de esfera 3D e foi possível obter a distribuição do tamanho dos vazios antes e depois do teste elétrico Figura 6.1(D) e nos resultados pode se destacar o fenômeno da arborescência elétrica detectado na isolação.

6.1.1 Resultados da *microCT* aplicados em cabos de energia elétrica de alumínio.

Os resultados foram visualizados na Figura 6.1, nos itens(A), (B), (C) e (D). Onde foi usado a técnica da *microCT*, e as análises das imagens foram realizadas nos programas *VG Studio Max 3.0* e *Avizo 2020.3*, para chegar nesses efeitos dei-

xados pela corrente elétrica que serão apresentados a seguir. No item (A), pode ser percebido uma imagem realizada pela microCT, em um cabo elétrico tomado como referência chamado de cabo piloto ¹, ou seja, não há defeitos. No item (B), após os ensaios elétricos foram observados vazios e os círculos vermelhos destacam essas regiões.

Ficou claro, que após a passagem da corrente elétrica o condutor aqueceu-se até uma certa temperatura deixando sequelas na isolação interna. Percebe-se que esses defeitos não se encontram em um único ponto analisado no cabo, podendo existir essas anomalias em diversos pontos da amostra.

Verificando os resultados na Figura 6.1 nos itens (C) e (D), (C) medições lineares realizadas nos vazios e (D) destaque do fenômeno de arborescência detectável por microCT.

Com isso, observa-se que seu núcleo aqueceu como o esperado e danificou seu dielétrico, podendo haver ruptura total do seu revestimento. E conseqüentemente existir uma grande possibilidade de ocasionar o fenômeno da arborescência elétrica e a interrupção do fornecimento de energia elétrica (CHENG, 2000).

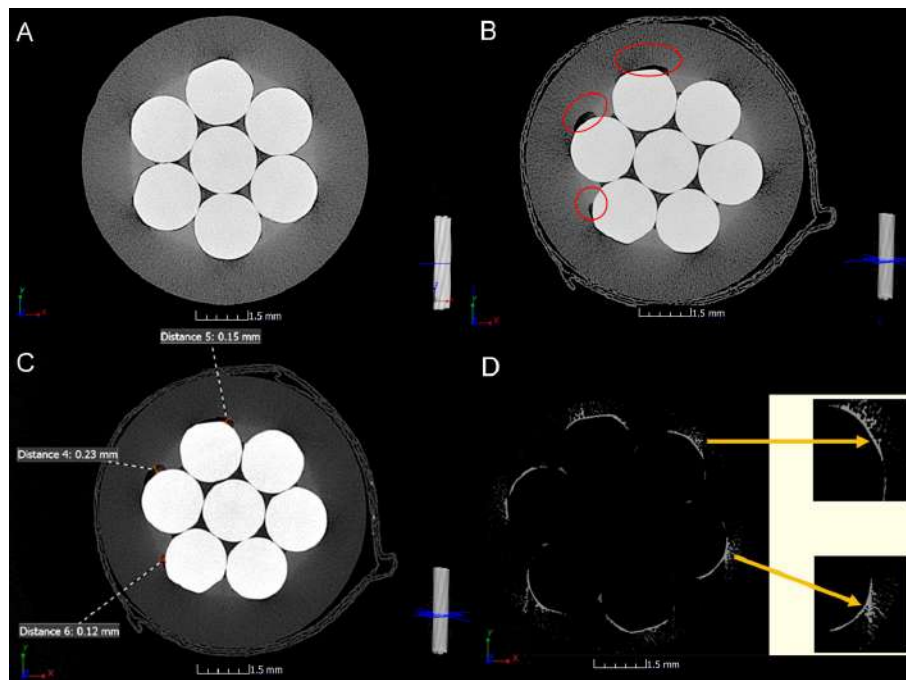


Figura 6.1: MicroCT do cabo elétrico de Al com seção transversal de 25 mm^2 (A) antes dos ensaios elétricos, (B) após os ensaios elétricos foram observados vazios e os círculos vermelhos destacam essas regiões, (C) medições lineares realizadas nos vazios e (D) destaque do fenômeno de arborescência detectável por microCT.

¹antes de submetidos a tensão elétrica

Esses defeitos foram encontrados em toda a amostra, conforme mostrado na renderização 3D da Figura 6.2(A). Com os resultados, foi possível extrair apenas as regiões de vazios após o ensaio elétrico e realizar análises quantitativas. Aplicou-se o método Sphere Fitting, onde as esferas são encaixadas nos vazios e assim obteve-se uma distribuição diamétrica 3D. Esses resultados são codificados por cores em função do diâmetro e podem ser vistos na Figura 6.2(B). A Figura 6.2(C), por outro lado, fornece uma comparação quantitativa da distribuição do tamanho dos vazios antes e depois do teste elétrico. É possível observar que as correntes pulsadas geraram vazios na camada isolante com diâmetros de maior concentração entre (0,04 e 0,13) *mm*.

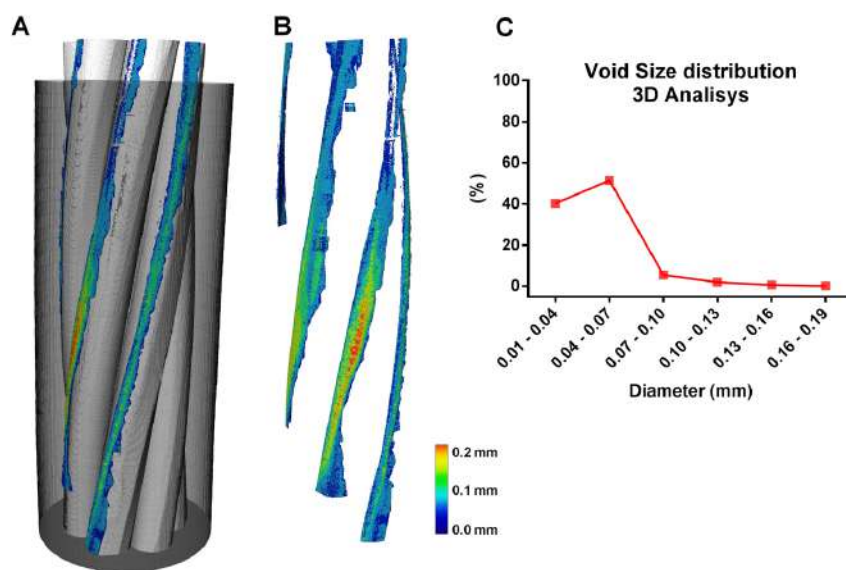


Figura 6.2: MicroCT 3D do cabo elétrico de Al com seção transversal de 25 *mm*² após os testes elétricos (A) amostra completa (B) extração dos vazios identificados com código de cores para diâmetro e (C) distribuição 3D do tamanho dos vazios.

Esse comportamento é explicado pela expansão do núcleo dos cabos devido à passagem de corrente elétrica. A passagem de corrente elétrica aqueceu o condutor, o que causou defeitos no isolamento interna do cabo, ou seja, os defeitos surgiram devido ao fenômeno do efeito Joule (CHEN *et al.*, 2009). O aquecimento do núcleo do cabo danificou seu dielétrico, podendo ocasionar a ruptura da camada isolante e provocar o fenômeno da arborescência elétrica (DENSLEY, 2001b). Esse fenômeno pode levar a uma perda ou diminuição das propriedades físicas e químicas, impactando o desempenho e as propriedades elétricas dos materiais. (CALABRESE *et al.*, 2022; CHEN *et al.*, 2009; DENSLEY, 2001b; HVIDSTEN *et al.*, 2002).

Como pode ser presenciado os resultados da Figura 6.2 o diâmetro dos volumes de vazios calculados no volume 3D, sofreram uma alteração após o ensaio elétrico.

Com isso, interpretando os resultados mostrados, entre os intervalos (0,04 - 0,07) *mm* e (0,07 - 0,10) *mm*, apresentaram um aumento de volume percentual. Esse aumento da temperatura, ocorreu uma dilatação do condutor e em cada elemento de volume de vazios, o resultado da quantificação do aumento do volume de vazios pode ser constatado no gráfico que está sendo apresentado na Figura 6.2, no item (C).

Através dos cortes 2D em diferentes posições ao longo da amostra, é possível realizar medições lineares em relação ao diâmetro desses vazios. O maior diâmetro medido em 2D foi de 0,23 *mm* e o menor em torno de 0,12 *mm* como pode ser visto na Figura 6.1 (C).

As características dos materiais dielétricos, depende, da distribuição do campo elétrico dentro dos materiais. Segundo a condutividade e permissividade dos preenchimentos utilizados a intensidade do vetor campo elétrico constante surge aumentos pontuais de temperatura por conta da concentração do campo elétrico (SCHMIDT, 2019). Geralmente, grandes intensidades de campos elétricos devem ser evitados, pois energizam os elétrons e provocam ionização. E conseqüentemente depende da intensidade do campo elétrico, a uma grande possibilidade de causar uma descarga parcial ou uma ruptura dielétrica (CALABRESE *et al.*, 2022).

Outra observação a ser feita são nos picos de tensões que acontecem quando há um aumento instantâneo de tensão na rede elétrica, geralmente provocados por descargas elétricas provenientes de raios. A queda de tensão em muitas das vezes está associada ao mau dimensionamento dos condutores elétricos. Mesmo com as excelentes características do condutor de eletricidade que nesse caso é o Alumínio, deve-se considerar que os cabos possuem uma resistência elétrica, isto é, ocorrerão pequenas perdas de tensão no condutor e isso pode levar as condições em que os condutores não são dimensionados adequadamente para as circunstâncias a que estão expostos, que pode resultar em falhas prematuras dos isolamentos em diversos cabos (MEIER e CHOWDHURY, 2019).

O campo elétrico aplicado e a existência de condições adequadas, como, por exemplo, umidade no interior e outros elementos contaminantes nos vazios, propiciam a ocorrência de descargas parciais no interior da região de defeitos (ZHU *et al.*, 2018).

Ocorrendo a queda de tensão excessiva em dado ponto da instalação, a correção normalmente se dá através do redimensionamento dos cabos, substituindo o lance de fiação problemático por cabos de maior bitola ou áreas. O problema de queda de tensão costuma acontecer em lance de fiação de 30 metros ou mais, e pode ser prevenido já na fase de projeto. Conforme indicada na norma NBR 5410 / 2004, em instalações atendidas por redes de baixa tensão, o limite máximo para queda de tensão no ponto de uso deve ser 5% em relação ao ponto de entrega da concessionária.

Para melhorar os efeitos antes da camada isolante, o cabo é preenchido nos vazios entre a superfície do núcleo de cobre ou alumínio e a superfície interna do material isolante com uma película semicondutora. Esta fina camada preenche os vazios. Porém, os vazios mais internos não são preenchidos ²(DUBICKAS, 2006).

Até este momento, estão sendo descritos as consequências causadas no cabo de alumínio após ter passado uma corrente elétrica no material e constatado que aconteceu o fenômeno do efeito Joule nos condutores onde se manifestaram durante os picos de correntes propostos. As consequências de perdas do dielétrico acima do permitido levam a um aquecimento do isolante, acarretando a sua destruição, uma vez que as propriedades dos isolantes são praticamente modificadas pela alto valor da temperatura, e cada isolante tem, assim, uma temperatura limite, acima do qual o material não deve ser mais usado até seus valores plenos. Essas temperaturas possuem uma "classificação térmica dos materiais isolantes", descrita na norma PB-130 da ABNT.

Essas perdas dielétricas variam em função de diversas grandezas. Com isso, a tensão utilizada, a frequência e outras que podem influenciar fortemente sobre a ($\tan \delta$), dependendo das próprias situações estruturais do dielétrico. As propriedades elétricas, mecânicas, e físicas dos materiais isolantes utilizados em eletricidades, depende imensamente da variável temperatura. Como os dielétricos ficam frequentemente dependentes, em serviço, a acentuadas variações de temperaturas e da sua capacidade de conduzir melhor o calor.

Até esse momento, como verificado na Figura 6.1 anteriormente, o aumento de temperatura influi dificilmente sobre as propriedades isolantes, com retificação algumas exceções, onde, temporariamente, o fenômeno poderá ser invertido. Ou seja, a elevação da temperatura carrega consigo a queda da resistência elétrica, do valor do vetor campo elétrico de ruptura e da resistência mecânica. Com a subida da solicitação mecânica, aumenta o ângulo de perdas e a deformação do corpo de prova. Por isso, a exigência de se conhecer a temperatura máxima permissível de um material, sem que as desvantagens mencionadas obtenham valores indesejáveis.

O motivo do aparecimento de um envelhecimento é geralmente é a modificação química do material decorrente do calor presente no condutor. Existem, certos materiais que perdem a flexibilidade, submetendo riscos ao seu funcionamento adequado, como os isolantes de cabos elétricos, por queda de camada protetora; o óleo mineral, perante certas temperaturas elevadas, dá origem a subprodutos (lamas) de baixa capacidade de isolamento. A temperatura, entretanto, não é a única preocupação que leva ao envelhecimento. Interferem também a composição do ambiente envolvente do material, seu nível de oxigênio ou a presença de ozona, ou ainda a exposição do

²alguns cabos têm núcleo prensado a fim de reduzir estes espaços e conseqüentemente reduzir seu diâmetro. No entanto, se tornam menos flexíveis chamados de cabos setoriais, entre outros

material a radiações que podem levar a mudanças estruturais, por exemplo, raios UVB, campo elétrico ou esforço mecânico acima permitido.

A arborescência elétrica é causada pela interação entre o campo elétrico de alta e média tensões e as impurezas ou defeitos no isolamento do cabo. Quando o campo elétrico é aplicado a um cabo isolado com defeitos, os elétrons começam a se mover dentro do material do isolamento, criando uma zona de alta concentração de elétrons na ponta do defeito. Isso pode levar à ionização do material do isolamento, formando pequenos canais elétricos em forma de árvore, vistos no resultado do cabo de alumínio.

Ao longo do tempo, esses canais elétricos podem se estender e se ramificar, criando uma rede complexa de ramos elétricos que se estendem pelo isolamento do cabo. Isso pode causar uma diminuição gradual da resistência elétrica do isolamento, e eventualmente pode levar a uma falha total do isolamento e a um curto-circuito do cabo.

O processo de ruptura dielétrica dos materiais sólidos é muito complexo e já deu diversas interpretações a muitas teorias e superposições. No entanto, mesmo sem ter uma teoria completa relacionado ao assunto, há em comum uma concordância nas afirmativas de que um dielétrico sólido pode diminuir suas propriedades devido a causas puramente elétrica (diferença de potencial) ou até mesmo causas térmicas (elevação de temperatura).

Para a ruptura elétrica, a explicação mais atual sobre esse assunto tem como base física quântica e no mecanismo eletrônico da ruptura, iniciando pela condutividade elétrica de um isolante exposto a imensas intensidades de campo. Com a contribuição da moderna física, é possível antever, com uma boa aproximação, a intensidade de campo que vai influenciar a ruptura. Entretanto, existem muitos detalhes e comportamentos paralelos, durante a ruptura, permanece sem esclarecimento satisfatório.

O estudo experimental da ruptura elétrica da camada isolante do cabo permite concluir que, a grandeza da intensidade do campo na ruptura precisa totalmente da estrutura molecular do corpo de prova, da configuração do campo aplicado e da classe de tensão do ensaio.

A estrutura do campo atuante sobre o isolante é a decorrência da geometria e da tensão aplicada ao corpo de prova. Paralelamente, há possibilidades que ocorra distorções do campo, devido à heterogeneidade estrutural dos cabos elétricos, apresentados sobretudo devido ao aparecimento interno de bolsas de ar e impurezas, ou da característica do material isolante se apresentar em camadas. Esses acontecimentos levam a uma situação tal, que somente em excepcionais acontecimentos pode se considerar o campo como sendo homogêneo. Quanto mais homogêneo for o isolante, no que atribui a sua estrutura, tanto menor a probabilidade de acontecer distorções

internas de campo, e a ruptura será função da homogeneidade do campo que atua sobre o isolante. O valor máximo desse campo será obtido, quase sempre, em corpos e campos os mais homogêneos possíveis (SCHMIDT, 2019).

Somente nesse caso, a tensão de ruptura ou valor da rigidez dielétrica, varia linearmente com a espessura das amostras. Os dielétricos ficam sempre dependentes, sem serviços, à ação de campos elétricos, mais ou menos intensos que se divide de modo homogêneo em materiais homogêneos.

Para prevenir a arborescência elétrica em cabos de Alumínio, é importante usar isolamentos de alta qualidade e garantir que o campo elétrico não exceda os níveis recomendados para o cabo específico. Além disso, a manutenção regular do cabo pode ajudar a detectar defeitos no isolamento antes que eles se tornem críticos e causem falhas no cabo.

6.2 RESULTADOS DOS CABOS DE POTÊNCIA COM NÚCLEO DE COBRE

Nesta seção apresenta-se os resultados dos testes envolvendo cabos com núcleo de cobre com três diferentes valores de área de seção transversais, 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2 . Foi aplicado a mesma intensidade de corrente elétrica repetido os mesmos procedimentos experimentais do cabo de alumínio. A seguir serão apresentados os resultados quantitativamente e qualitativamente os volumes de vazios antes e após submetidos aos picos de corrente elétrica.

Nos cabos com os núcleos encordoados de cobre não foram observados o aparecimento de vazios na camada isolante após os ensaios elétricos. Portanto, foram avaliadas as variações de espaços vazios no condutor. Assim, foram realizadas análises comparativas antes e depois do ensaio elétrico, considerando os vazios existentes no condutor. Esta seção mostra os resultados experimentais para os cabos flexíveis (encordoados) regidos pela norma da ABNT NBR 7286. Em suma, as correntes pulsadas aumentaram o volume de vazios para todas as amostras, conforme destacado abaixo na Figura 6.3. As análises de microCT mostraram que o volume vazio total em porcentagem (%) demonstra um aumento para todos os diferentes tamanhos de seção transversal. Os vazios estão em mapas codificados por cores para identificar visualmente as regiões onde o material apresenta as maiores variações. Além disso, foi possível calcular a distribuição do tamanho dos vazios e comparar esses valores antes e depois dos ensaios elétricos, os resultados são apresentados nas Figuras 6.3.

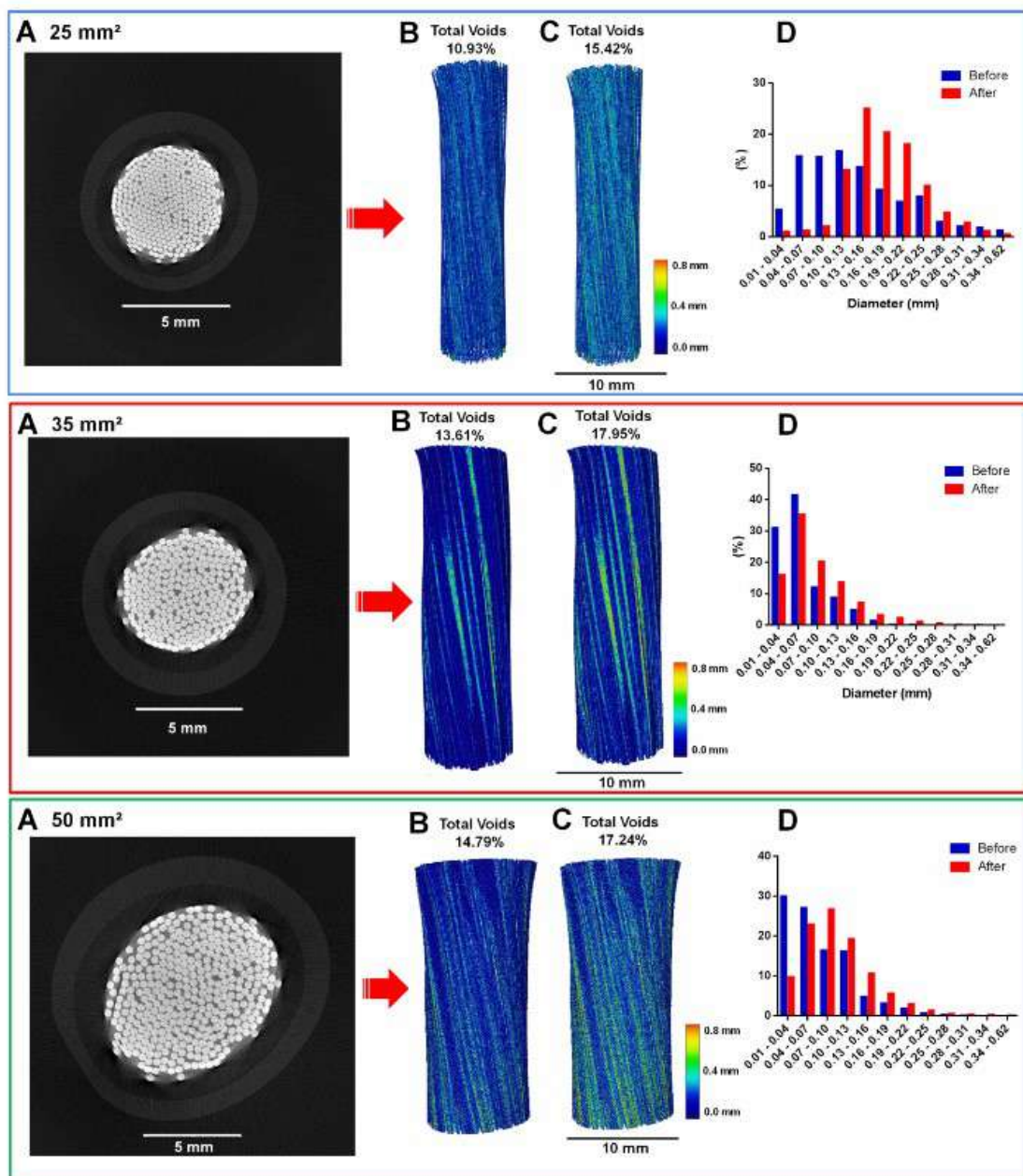


Figura 6.3: Análise 3D de cabos elétricos de cobre, a figura demonstra (A) corte transaxial após o teste elétrico, (B) volume total de vazios antes, (C) volume total de vazios depois, ambos com código de cores para diâmetro, (D) distribuição 3D de volumes vazios, respectivamente para área da seção transversal de: 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2 .

A seguir a Tabela 6.1 que expõem os resultados quantitativos dos cabos com núcleo de cobre para cada tipo de amostras segundo a sua área de seção transversal, verificado após a microCT.

Tabela 6.1: Resultados quantitativos do cabo de potência de cobre.

Amostras	Diâmetro Externo (mm)	Diâmetro Interno (mm)
25 mm^2	13	10
35 mm^2	12	9
50 mm^2	10,5	7,5

Verificando os resultados do cabo de 25 mm^2 antes do teste elétrico, estava concentrado em uma faixa entre (0,04 - 0,13) mm e após o teste elétrico passou a ficar entre (0,16 - 0,25) mm , conforme podemos observar nas Figuras 6.3 (D).

Os resultados dos modelos de cabos com superfície de 35 mm^2 , mostraram um comportamento ligeiramente diferente, ocorreu aumento percentual na faixa de (0,07 a 0,28) mm . Como pode ser visto na Figura 6.3, os filamentos não estão distribuídos uniformemente dentro do cabo e com isso, existe uma grande possibilidade de que quando ocorre o aumento de temperatura, alguns filamentos mudem de posição inicial e assim modifiquem o volume de vazios no cabo devido a sua dilatação do metal.

Como pode ser visualizado na Figura 6.3, a distribuição de tamanho dos vazios no núcleo de cobre com seção transversal de 50 mm^2 . Existiu uma pequena alteração nos volumes de vazios na parte interna localizada no intervalo entre (0,01-0,07)mm e no intervalo de (0,1 - 0,22) mm. O volume total de vazios apresentou um aumento de 2,45% em relação ao volume inicial. Esse comportamento está relacionado à área da seção transversal maior que as amostras anteriores, pois a distribuição de energia no condutor foi melhor dissipada e conseqüentemente diminuiu o acúmulo do campo elétrico radial no interior do condutor. Cabos com seções transversais maiores dissipam menos energia devido à sua menor resistência elétrica. A resistência elétrica de um condutor é inversamente proporcional à seção transversal, o que significa que quanto maior a seção transversal do cabo, menor será sua resistência elétrica. Além disso, cabos com seções transversais maiores têm uma capacidade de corrente mais alta, o que significa que eles podem transportar mais energia sem superaquecer ou sobrecarregar. Isso os torna ideais para aplicações de alta potência, como transmissão de energia elétrica em longas distâncias. Por essas razões, esses modelos de cabos de energia são preferidos em muitas aplicações, especialmente em sistemas de alta potência e transmissão de energia elétrica em longas distâncias.

Embora a possibilidade de mudanças no volume de vazios dos filamentos seja uma consideração importante na fabricação e uso de cabos, ela não é a única. Outros fatores, como a resistência elétrica do cabo, sua capacidade de conduzir corrente elétrica e sua resistência à quebra e ao desgaste, também são importantes para garantir um desempenho confiável e seguro do cabo.

6.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS USANDO O PROGRAMA COMSOL MULTIPHYSICS

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações realizadas usando o programa Comsol Multiphysics, para os dois modelos de cabos elétricos analisados pela microCT, as simulações tiveram como base as medidas advinda reais verificadas pelo tomografo Phoenix Vtomex, e fazendo o circuito usando a norma NBR 5410 conforme o método de instalação B1 com a corrente elétrica alternada e a frequência adotada é de $60H_z$ com defasagem de 120° elétricos.

As simulações foram feitas sob duas condições: A primeira é com os sistemas de cabos elétricos supostamente ideais e cabos elétricos com vazios inseridos aleatoriamente para as amostras com os núcleos encordoados flexíveis de cobre, os vazios foram colocados no centro do cabo com objetivo de mostrar que quando os filamentos se movimentam mudando de posição na parte interna por conta da impedância do material, acontecendo assim o aumento do volume de vazios e causando consequências no funcionamento das redes. Já para o modelo rígido com o núcleo de alumínio os defeitos implementados foi apenas na isolação do cabo composto do material PVC. Com isso, os resultados em 2D que serão apresentados por sistemas trifásicos, podem ser interpretados pelos mapas de cores para a melhor visualização do fenômeno eletromagnético em cabos trifásicos mais próximo do funcionamento real.

Uma observação muito importante, a ser evidenciada nessa pesquisa relacionada aos cabos de energia elétrica, onde tiveram as medidas verificadas pelo equipamento Phoenix Vtomex M.E e reproduzida o mais próximo possível da geometria das amostras e implementada no programa Comsol Multiphysics conforme as medidas notadas através da microCT.

6.3.1 O Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos reparte os domínios de um modelo em enormes quantidades de elementos reduzidos, que caracterizam as menores regiões onde as Equações Diferenciais Parciais (EDP), que dominam o comportamento físico do sistema, são aproximadas. O arranjo das equações individuais aproximadas de tal forma que todos esses elementos gerem um sistema matricial de equações, que resolvido apenas uma vez, possibilita a aproximação da solução relacionada a todos os domínios do problema (ALZAMORA *et al.*, 2020; CHEN e KONRAD, 1997).

A característica indispensável do método dos elementos finitos é uma ordem

generalista que facilita em solucionar uma grande parte das aplicações através de uma metodologia específica e pré-estabelecida. Essa particularidade também facilita a elaboração de um único algoritmo ou programa de computador preparado para aplicar o referido método em diversos problemas, dependendo apenas da inserção e do desenvolvimento. Existem diversos problemas que podem estar relacionados a diferentes combinações de geometrias e tipos de materiais. Um software comercial, conhecido como o Comsol Multiphysics, resolve diferentes aplicações que envolve diversas outras áreas.

A sequência de passos para a execução da simulação por meio do método dos elementos finitos envolve: A definição das equações que regem o sistema, a limitação da dimensionalidade do modelo, determinação dos domínios, a escolha das condições de fronteiras, discretização do modelo e a solução do sistema de equações.

A seguir será apresentado, conforme o fluxograma da Figura 6.4 a metodologia implementada para as simulações dos cabos trifásicos com ou sem anomalias nas isolações e em seus condutores usando como base para a solução numérica das equações de Maxwell e o métodos dos elementos finitos.

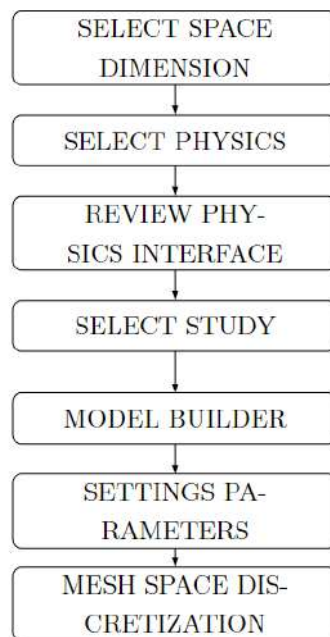


Figura 6.4: Fluxograma mostrando a metodologia para a obtenção dos resultados da simulação no programa Comsol Multiphysics.

As análises realizadas neste trabalho tiveram as seguintes características para a obtenção dos resultados. Modelos de cabos trifásicos, com o mesmo diâmetro das amostras de cabos encordoados de 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2 e foi estudado um modelo de cabo multiplexado com o condutor de alumínio e área de seção transversal de 25 mm^2 e isolamento de PVC.

Os parâmetros utilizados para as soluções numéricas das equações de Maxwell usando os métodos dos elementos finitos, podem ser visualizadas nas Tabelas 6.2. As equações de Maxwell são compostas pela lei de indução eletromagnética de Faraday, lei de Maxwell-Ampere, lei da corrente elétrica de Gauss e lei do fluxo magnéticos de Gauss, que tem como base o cálculo numérico do campo eletromagnético (CHEN *et al.*, 2019).

A forma diferencial das equações de Maxwell são apresentadas a seguir. Os resultados gerados através das equações de Maxwell constitutivas onde o campo eletromagnético se caracteriza por quatro funções vetoriais, dependentes da posição e do tempo: O campo elétrico \mathbf{E} , o campo magnético \mathbf{H} , potencial vetor para o campo magnético uniforme \mathbf{A} e a densidade de fluxo magnético \mathbf{B} (GRIFFITHS, 2012).

As leis básicas que descrevem os campos eletromagnéticos, são as equações de Maxwell que relacionam esses cinco vetores. Onde ρ e \mathbf{j} são densidades de carga e corrente. Sob certas condições, essas equações são válidas para qualquer meio onde há o campo eletromagnético. Esses resultados foram calculados através do programa Comsol Multiphysics onde as equações estão implícitas na rotina do programa, chamado **Sstudy Time Dependent** (Ampère's Law 1).

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (6.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (6.2)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (6.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (6.4)$$

Entre as intensidades e as densidades de campo elétrico e magnético existem ainda as seguintes relações, válidas para materiais isotrópicos lineares (GRIFFITHS, 2012).

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6.5)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (6.6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (6.7)$$

Nestas relações, μ é a permeabilidade magnética (expressa em \rightarrow Henry/m), ϵ

é a permissividade elétrica (expressa em $\rightarrow \text{F/m}$) e o σ é a condutividade elétrica, (expressa em $\rightarrow \text{S/m}$). Os parâmetros μ , ϵ e σ são grandezas escalares, que foi considerado constantes para os materiais lineares isotrópicos (GRIFFITHS, 2012).

O campo elétrico radial é calculado pelo gradiente da tensão elétrica entre o condutor (senoidal no tempo) e o potencial da terra (nulo) na circunferência externa. Este cálculo é feito automaticamente pelo programa usando as equações de Maxwell e a equação 6.3, com as condições previamente discutidas. Quanto a componente do campo elétrico na direção $\hat{k} = \hat{z}$ arbitrando que a densidade de corrente elétrica está homogeneamente aplicada nesta direção \hat{k} , atravessando uma área de seção S .

6.3.2 Determinação da dimensionalidade do modelo

Quaisquer fenômenos físicos descobertos no mundo real tem suas características tridimensionais. Porém, na maioria dos problemas são permitidos aproximações por modelos que variam apenas uma ou duas coordenadas espaciais. A preferência da dimensionalidade de um dado problema pode ser solucionado pelo MEF que deve se considerar alguns princípios, tais como. Possui simetria, exatidão desejada e desempenho computacional.

Geralmente, os dispositivos ou equipamentos exibem geometrias tridimensionais naturalmente simétricas ao longo dos eixos espaciais. Para a identificação do tipo da simetria em um dado equipamento pode ser verificado quando seções transversais paralelas do sistema se distribuem de maneira idêntica ao longo de todo eixo longitudinal (ALZAMORA *et al.*, 2020). Acrescentando essa condição, para se modelar determinados problemas por um exemplo de duas dimensões, é fundamental que as grandezas físicas em pesquisas também variem, predominantemente, em apenas dois eixos, isso acontece com os cabos elétricos. O cabo simulado através de sua seção transversal equivalente com a vista à aplicação em problemas eletromagnéticos, que pode ser visto na Figura 6.5. Esta apresentação não causará perdas significativas de informações conforme a geometria ou dos valores das grandezas físicas implícitas no sistema.

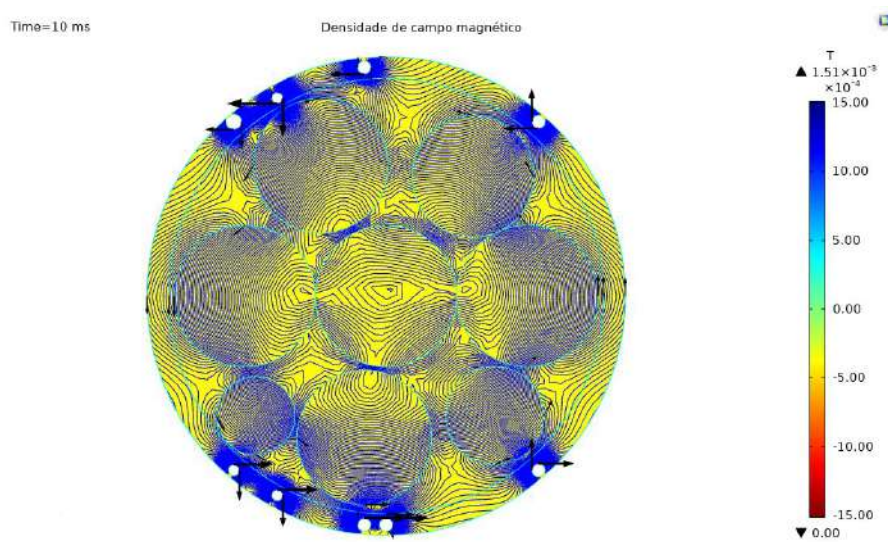


Figura 6.5: Simulação do cabo elétrico a partir do modelo bidimensional

Por essa razão, quando o sistema não exibe simetria em nenhum dos eixos ou em ocasião em que as grandezas físicas em análise também necessite de ser determinada para todas as componentes espaciais é primordial que modelos em três dimensões sejam usados. Na realidade os modelos em 3D demandam maiores custos computacionais, ligados a memória e ao tempo de simulação, para se obter resultados pelo MEF. Na maioria das vezes, se aproxima a solução do problema em 3D para 2D mesmo que nem todos os requisitos da simetria não o satisfaça. E com isso, deve-se ponderar se o ganho computacional compensa a perda da exatidão das soluções, e vai depender de sua aplicação final que necessite de maior ou menor teor de fidelidades dos resultados.

6.3.3 Definições dos Domínios

Os demais problemas resolvidos pelos MEF devem possuir domínios e limites muito bem definidos. Os domínios estão ligados a várias regiões com características de materiais específicos que alteram a solução do problema; a junção dos diversos domínios origina o modelo completo. Os limites estão associados a exigência do problema em identificar uma região de solução fechada para qual se deve determinar as grandezas físicas.

Em alguns acontecimentos, como o exemplo mostrado na Figura 6.5, a própria geometria do cabo exibem os limites do modelo apresentando todos os fenômenos físicos de interesse que estão localizados em seu interior. Porém, na maioria das vezes, as geometrias não serão expostos os limites especificados, nos casos em que os campos procedentes de determinadas fontes propagam-se ao longo do ar e solo, isso acontece nas linhas de transmissões de energia elétrica. Nesses casos é importante

colocar uma fronteira artificial com o intuito de simular a natureza "infinita" dos problemas de maneira a não alterar os resultados das regiões de interesse (ALZAMORA *et al.*, 2020; DE ASSIS; QUOC *et al.*, 1993).

A maneira mais comumente de realizar os procedimentos é inserir os limites dos domínios em posição "bem distantes" da região de importância e colocar as condições de contorno nas linhas (em modelos 2D) ou até mesmo em superfícies (em modelos 3D) que determinam o modelo, e essa técnica é conhecida como truncamento. Para essas situações, as condições de contorno precisa ser definida e normalmente, são atribuídos valores nulos para os potenciais classificados como grandezas escalares e os campos eletromagnéticos vetoriais nos problemas eletrostáticos e eletrodinâmica. No termo usado como "bem distantes" deve ser compreendido como o tamanho mínimo do domínio em que, a partir dele, não acontecem mudanças relevantes nos valores da solução da região de interesse, mesmo depois da atribuição de grandes extensões. Essa discretização das malhas formada por elementos finitos são bem maiores que a usada na região de interesse, pois as modificações das grandezas nesses locais geralmente são menores e esse tipo de abordagem pode acontecer em custo computacionais imensos devido às dimensões que esse domínio pode chegar (CHEN e KONRAD, 1997).

Existem outras técnicas mais desenvolvidas que podem ser utilizadas com os mesmos objetivos, como, por exemplo, o uso de funções de mapeamento que equivalem à característica de domínios "infinitos" pelo meio de mudanças de coordenadas específicas das funções interpoladoras. Os programas que utilizam o MEF mais volumosos, como o Comsol Multiphysics, já determinam recursos onde um deles é o mapeamento qualificado a fornecer ao usuário a competência de simular alguns tipos de domínios sem a obrigatoriedade de aplicar a técnica de truncamento, que pode ser bem complicada de ser utilizar. Ou seja, a definição dos domínios tem grande valia na modelagem de um determinado problema que utiliza o MEF que foi percebido que algumas especificidades, principalmente no que se refere na duplicação dos domínios naturalmente sem fronteiras ou no "infinito" (CHEN e KONRAD, 1997).

6.3.4 Escolhas das condições de fronteira

O estudo de um problema que possui com base o MEF consiste, fundamentalmente, transformação de um sistema de equações diferenciais que representam determinados fenômenos físicos em um sistema de equações cuja solução é bem próxima da solução dos primeiro nós da malha de elementos finitos. Desta maneira, assim como nos estudos das equações diferenciais, onde é primordial estabelecer as condições de fronteira ou contorno com interesse de restringir o número de soluções viável ao problema, para o MEF é de grande importância especificar os valores que

a solução do sistema precisa obedecer em alguns locais (ALZAMORA *et al.*, 2020; BARROS, 2002; SORIANO, 2003).

Os dois tipos de condições de fronteiras mais habitualmente utilizados em aplicações envolvendo o MEF, são:

- Condições de fronteira de Dirichlet: Para o domínio do contorno de Dirichlet, os valores da incógnita essencial do problema são claramente definidos em fronteiras escolhidas. Nos problemas magnéticos e eletrostáticos, para essas condições implicar impor os valores dos potenciais vetoriais magnéticos A e o escalar elétrico V em um determinado local, respectivamente. Primeiramente, o contorno Dirichlet é normal utilizar para definir o potencial vetor A nulo nos limites dos domínios do problema, com o intuito de manter todo fluxo magnético dentro da região interna (ALZAMORA *et al.*, 2020; BARROS, 2002; MEEKER, 2005; RAO, 2017; SALON e SALON, 1995; SORIANO, 2003). A outra condição, é muito usada para fixar um valor de tensão sobre a superfície do condutor estabelecido (CARDOSO, 2016; MEEKER, 2005; SALON e SALON, 1995).

- Condições de fronteira de Neumann: Neste caso, quando as condições de fronteiras são determinadas por valores concedidos às derivadas de primeira ordem das incógnitas e não pelos valores dela própria, considera-se o contorno de Neumann. Para os problemas que envolvem o magnetismo, essa condição é dada por $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ e designar que o fluxo magnético é normal à fronteira (ALZAMORA *et al.*, 2020; MEEKER, 2005). Nos problemas que envolvem eletrostática, o contorno de Neumann determina que o campo elétrico seja tangencialmente à fronteira (BASTOS e SADOWSKI, 2003).

Já a utilização de outras fronteiras, tais como a mista e a periódica. Mais referências sobre as condições de fronteiras na aplicação do MEF podem ser visualizados por (BASTOS e SADOWSKI, 2003; CARDOSO, 2016; FRAJI *et al.*, 2013).

6.3.5 Discretização do Domínio

Depois das definições dos modelos dos domínios, logo em seguida é discretizá-los por meio de regiões menores denominadas de elementos, construindo a chamada malha de elementos finitos. A precisão da solução adquirida mediante simulações que possuem como base o MEF encontra-se diretamente ligada à qualidade dos elementos finitos que discretizam as diversas regiões que integram o problema, ou seja, existe uma dependência direta entre o perfil da malha e a precisão dos resultados.

O procedimento de discretização dos domínios interessam ao modelo pode ser simplificado em duas etapas:

- A opção para a escolha do modelo da geometria de cada elemento: As regiões devem ser divididas em elementos geométricos específicos selecionados em um conjunto de opções ligadas diretamente à dimensionalidade do modelo que pode ser $(1D, 2D, 3D)$. Essa triagem é feita verificando-se a geometria do domínio e a força de variação das grandezas no local. Cada elemento deve estar ligado a um único meio homogêneo e não é permitido regiões vazias, isto é, sem elementos.

- Refinamento da malha: Nos locais onde acontecem as maiores modificações das grandezas específicas ao problema, é obrigatório a utilização de uma quantidade maior de elementos finitos visando coletar de maneira mais exata as modificações. Essa fase é fundamental, pois, os valores das grandezas na parte interna de um elemento geométrico são obtidos por meio de aproximações efetuadas por funções interpoladoras que usam os valores dos nós dos elementos como referência. Com isso, elementos abundantes em regiões de maiores mudanças das grandezas reproduzir erros excessivos nas soluções procuradas. No entanto, quanto refinada for a malha, maior é o tempo e o custo da memória computacional indispensável para chegar a resposta. Com isso, o refinamento da malha deve ser calculado e planejado de maneira bem otimizada e ter como foco apenas nas regiões de grandes incertezas das grandezas físicas do problema, de modo que elementos grandes possam ser utilizados nos locais em que variam mais suavemente.

Conforme especificado, o conjunto de opções de elementos geométricos está ligado às dimensões do modelo. Para o caso mais compreensível, é o de uma única dimensão, apenas uma singularidade é possível, os elementos lineares. Para o domínio 2D, a geometria pode ser triangulares e quadriculares, entre diversos, como, por exemplo, os quadriláteros e o paralelogramos. Por fim, em domínios em 3D, as escolhas de elementos para malha podem ser. Tetraedros, hexaedros, prismas ou pirâmides e outras diferentes variações.

6.3.6 Desenvolvimentos do Sistema de Equações

Uma metodologia mais aplicada no que envolve a solução de um problema pelo MEF é desenvolvimento das equações ligadas aos elementos que fazem parte da malha que discretiza os domínios. Sobre outro ponto de vista, quando o usuário somente manipula o problema pelo meio do determinado software, como o Comsol Multiphysics, essa técnica fica oculta, sendo o próprio programa o autor para o desenvolvimento das equações a partir dos desafios, domínios de malha de elementos finitos determinados pelo usuário. Um pequeno número de programas mais elaborado, como o Comsol Ou Ansys, autoriza o usuário a escolha da ordem das equações correlacionadas aos elementos finitos.

Essa metodologia envolve três fases: Determinar as funções interpoladoras. Ajustar

tar a função à equação diferencial pelos métodos específicos e montar o sistema de equações. Essas três fases serão mais detalhadas a seguir.

6.3.7 Seleção das Funções Interpoladas

Todos os elementos geométricos utilizados na discretização de domínios unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, exibem dois tipos de entidades geométricas. Vértices e arestas. Os vértices são usados para unir as arestas, onde são configurados com um dos locais cujos valores desconhecidos ou as incógnitas do problema com a prioridade de ser encontrada. Esses pontos específicos são chamados de nós em todo momento estão em um número idêntico ou superior à quantidade dos vértices. exemplificativamente, seja o triângulo, o elemento exclusivo dentre todos os que constroem uma malha de elementos finitos discretiza todo o domínio bidimensional. Considerando que esse domínio estivesse relacionado a um problema da eletrostática, o qual o triângulo mostra a menor região desde que são resolvidas as equações do sistema, e seus nós somos os pontos onde valores do potencial elétrico deve ser descoberto.

Atribui-se, agora, que o problema solucionado e os valores dos potenciais escalares exatamente nos nós do elemento triangular, já falado neste capítulo, foram descobertos. Visto que somente os valores nos foram alcançados, o questionamento a ser feito é. Quais são os valores usados para os potenciais no interior do triângulo? São apenas usadas a chamadas funções interpoladoras.

Funções interpoladoras podem ser usadas quando se possui um conjunto de pontos com valores determinados e, a partir deles, se almeja descobrir os valores de outros pontos. Essas funções necessitam ser desenvolvidas de modo a exibir o valor preciso nos pontos já determinado e conceber estimativas para diversos pontos. Para o modelo citado anteriormente, interpolar tem o significado de encontrar o potencial nos seus nós. Essa descrição pode ser desenvolvida para todos os problemas solucionados com base no MEF.

Para o caso do potencial vetor magnético A , a interpolação são, em sua maior parte, polinomiais, apesar da possibilidade de utilizar outras, como as dos modelos trigonométricos e exponenciais. A escolha pelos polinômios se atribui pelo motivo da discretização ser bastante simples, e sua formulação é bem apropriada aos algoritmos de computador e seus cálculos são facilmente compreendidos. Enquanto isso, os polinômios concordam que uma melhora na exatidão das soluções das equações diferenciais seja realizada através do crescimento do grau das funções relacionada a eles.

Uma peculiaridade muito valorosa dos polinômios interpoladores é que exclusivamente só há um polinômio de grau n capaz evoluir para $n + 1$ pontos. Porém,

existem diversas manipulações matemáticas capazes de desenvolver esse polinômio, especificamente como forma de *Lagrange* e *Newton*, a escolha do método é conforme o problema proposto. No MEF, o método de *Lagrange* é surpreendente por expor a função interpoladora no formato de um somatório de produtos dos seus nós. Para quaisquer casos de diferenciação numérica de dados discretos, a forma de *Newton* é mais conveniente (ALSHARIF *et al.*, 2012; ALZAMORA *et al.*, 2020; CIRINO *et al.*, 2009).

Dessa forma, as funções interpoladoras usadas no MEF é constantemente ou na maioria das vezes é um polinômio de *Lagrange*, dois quais a expressão depende diretamente do tipo da ordem do elemento geométrico. Sabe-se que existem diversos tipos de elementos diferentes, será seguidamente comentado apenas os equacionamentos dos elementos básicos para os modelos 1D, 2D e 3D que são nessa ordem, os elementos lineares, triangulares e tetraédricos.

6.3.8 Elementos Lineares

Para problemas que envolve uma única dimensão, ou seja, para situações onde as grandezas variam em apenas um eixo espacial, os domínios são capazes de discretizar os elementos lineares formados por dois nós. Nesse caso, a função interpoladora polinomial deve ser obrigatoriamente uma equação do primeiro grau, representado por uma reta que atravessa por dois nós ou pontos, nos molde da seguinte maneira $f(x) = a + bx$.

Onde $f(x)$ é a variável que depende de a e b são constantes e x é a variável independente. Com o objetivo de descobrir as constantes a e b dessa equação comentada acima, diversas outras técnicas conseguem ser usadas, uma delas significam escrever essas equações para cada um dos seus nós, que serão mostrados a seguir, as duas Eq.(6.10) e Eq.(6.11), e aplicar a regra de *Cramer*. Essa técnica é usada para outros elementos. Mais uma técnica possível de se usar é por semelhança de triângulos no elemento linear.

$$f(x_1) = a + bx_1 \tag{6.8}$$

e

$$f(x_2) = a + bx_2 \tag{6.9}$$

Aplicando a técnica de semelhança de triângulo para a dedução do polinômio interpolador do primeiro grau, será vista nas Eq.(6.12) e Eq.(6.13).

$$\frac{f(x) - f(x_1)}{x - x_1} = \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \tag{6.10}$$

Mexendo nos termos, a equação anterior pode ser escrita da seguinte maneira:

$$f(x) = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} f(x_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(x_2) \quad (6.11)$$

A Eq.(6.13) é chamada como polinômio interpolador de Lagrange é o admite descobrir os valores da função em pontos intermediários do elemento linear diante do conhecimento dos valores dos seus nós. Por outro lado, essas equações permitem escrever de outras maneiras, conforme o polinômio interpolador de Newton.

6.3.9 Construção do modelo virtual e traçado do mesh.

Conforme a teoria dos elementos finitos, o custo computacional e características dos resultados estão diretamente acoplados ao tamanho e tipo de elemento. Assim, nessa etapa do trabalho foram realizados testes para que se chegasse a um tipo de malha com melhor custo benefício.

Para a malhar da Figura 6.6, foi escolhido um elemento triangular gerado pelo próprio programa automaticamente pelo domínio externo, tendo em vista que essa região é de principal interesse do estudo. Com isso, todas as análises foi conectada nos elementos do domínio interno dos cabos de energia que estão sendo pesquisados, inicialmente tendo 250 elementos triangulares de primeira e segunda ordem.

Foi desenvolvido assim um algoritmo para simulação de três cabos elétricos de baixa tensão, todos com os núcleos de cobre e alumínio, com o sem defeitos, operando sob uma tensão alternada de 1kV, com defasagem de 120° elétricos entre cada fase e fazendo um estudo dos fenômenos eletromagnéticos nos cabos.

Para a simulação, foram discretizadas malhas para os dois tipos de cabos elétricos. Os vazios foram inseridos aleatoriamente em sua isolamento e núcleos com diferentes tamanhos e formas circulares contendo suas coberturas de PVC como isolante a fim de observar a influência desses vazios no campo elétrico e magnético. A Figura 6.6 ilustra os modelos de cabos elétricos aplicados para condutores de Cobre e Alumínio. As malhas podem ser divididas em várias formas triangulares, tetraédricas e hexaédricas (DE ASSIS; QUOC *et al.*, 1993). Neste estudo foi utilizado a forma triangular para soluções 2D a fim de otimizar o tempo computacional da simulação(DE ASSIS; QUOC *et al.*, 1993).

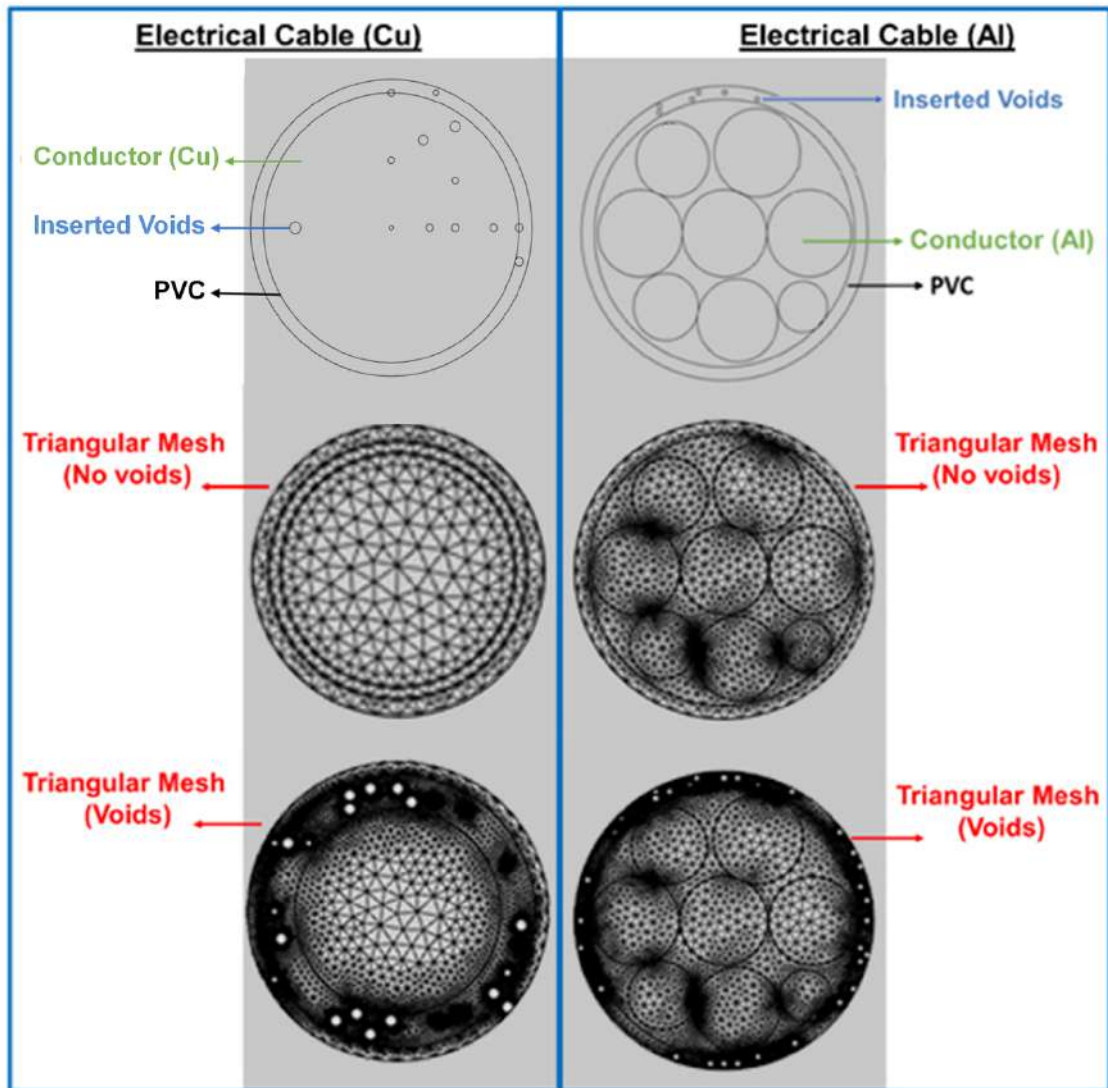


Figura 6.6: Modelo de malha aplicado na simulação de cabos elétricos de Cobre e Alumínio, respectivamente. A figura destaca a geometria das malhas utilizadas para as diferentes condições de vazios e as fases de: condutor, PVC e vazios inseridos.

Na Figura 6.6, estão sendo evidenciados seis modelos de cabos discretizados pelos mesh onde essa subdivisão resulta em uma malha de elementos finitos na maioria das vezes em problemas bidimensionais e pode ser construída de elementos triangulares ou quadriláteros. Os vértices dos elementos são denominados nós ou pontos nodais.

6.4 RESULTADOS PARA OS CABOS DE COBRE USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Analisando os resultados das Figuras 6.7 até 6.44 ficou elucidado que os defeitos manipulados nas partes internas da isolação e do núcleo dos cabos de potência são os causadores das alterações em diversas grandezas físicas de grande influência no eletromagnetismo em cabos de potência e conseqüentemente pode acarretar diversos problemas nas redes elétricas, uma das causas mais comumente é a interrupção no funcionamento da energia e caso esses defeitos não sejam sanados poderá futuramente ocorrer vários outros fenômenos que podem envelhecer a estrutura do revestimento e levar a curtos-circuitos.

6.4.1 Resultados das simulações computacionais para os cabos de potências com o núcleo de cobre com as áreas das seções transversais de 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2

Os resultados são apresentados da seguinte maneira. Cabos sem imperfeições (supostamente ideias), com defeitos apenas na parte interna da amostra dos cabos, ou seja, no condutor. Analisando as simulações feitas pelo método dos elementos finitos, nesta seção, ficou simples entender que os defeitos nas partes internas dos cabos de energia elétrica acarretou problemas nas grandezas fundamentais do eletromagnetismo de grande importância para o funcionamento dos cabos nas redes elétricas.

A simulação feita nos modelos de cabos de potências, com a corrente alternada como modelo trifásico, estão sendo exibidos nas Figuras 6.7 - 6.44, e pode ser contemplado neste capítulo. Nesse primeiro resultado, usando amostras de cabos com o núcleo de cobre, são comparados três modelos de áreas distintas com os seguintes valores, 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2 .

Na Tabela 6.2, que virá a seguir são mostrados os dados de entrada que possibilitou a realização dos estudos no programa Comsol Multiphysics que possui como base o método dos elementos finitos. Com esses dados foi possível calcular numericamente as equações de Maxwell exibidas anteriormente que estão disponíveis pelo próprio programa, nos cabos de energia com o material condutor de cobre e alumínio.

Tabela 6.2: Parâmetros usados nos resultados dos cabos trifásicos apresentados usando o programa Comsol Multiphysics.

Nome	Expressões	Valor
I_0	250 [A]	250 A
ω	376,8 [rad/s]	376,8 rad/s
I_1	$I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$	-47,489 A
J_1	$I_1/(\pi \cdot r^2)$	-23431 A/m ²
I_2	$I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + 2 \cdot \pi/3)$	236,31 A
J_2	$I_2/(\pi \cdot r^2)$	$1,16 \cdot 10^5$ A/m ²
I_3	$I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + 4 \cdot \pi/3)$	-188,8 A
J_3	$I_3/(\pi \cdot r^2)$	-93153 A/m ²
V_0	1000 [V]	1000 V
V_1	$V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$	-189,96 V
V_2	$V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + 2 \cdot \pi/3)$	945,26 V
V_3	$V_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + 4 \cdot \pi/3)$	-755,2 V

Para os resultados exibidos pelo Comsol Multiphysics a seguir os mapas de cores mostram os valores numéricos das seguintes grandezas eletromagnéticas para os cabos coaxiais que são. Densidade de campo magnético, distribuição do campo elétrico, densidade de potência volumétrica, densidade corrente elétrica. Todas essas grandezas podem ser visualizadas desta forma. Sem anomalias e com defeitos.

Fazendo uma breve análise dos resultados que envolvem apenas as densidades de fluxo magnético nas Figuras 6.7 até 6.12. A densidade de campo magnético \mathbf{B} está entrando na página, e é uniforme com uma região circular de raio R. Como mostra os resultados a seguir. Como densidade de fluxo magnético aumenta ou diminui, o fluxo magnético através da superfície limitada por curva fechada C também varia, e uma força eletromotriz $\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \epsilon$ induzida em torno de C. O campo elétrico induzido é determinado através de $\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{-d\phi_m}{dt}$.

Verificando os dois cabos elétricos superiores identificados como (1) e (2) ficou claro que a densidade de campo magnético está entrando na página e aumentando a intensidade. O campo elétrico induzido está no sentido anti-horário.

Observe também que o campo elétrico \mathbf{E} , e, portanto a força eletromotriz, existe ao longo de qualquer curva fechada limitando a área na qual o fluxo magnético está variando, independente da existência, ou não, de um cabo ou de um circuito ao longo de uma curva (GRIFFITHS, 2012; HALLIDAY *et al.*, 1996; HAYT JR e BUCK, 2013).

Os cabos mostrados na Figura 6.7 é o modelo usado para a simulação computa-

cional usando o método dos elementos finitos. Para todos os resultados dos cabos de cobre, foi considerado que o núcleo estivesse maciço, os demais parâmetros foram os mesmos visualizados pela microCT e a norma da ABNT NBR 7286 que descreve todas as características do cabo.

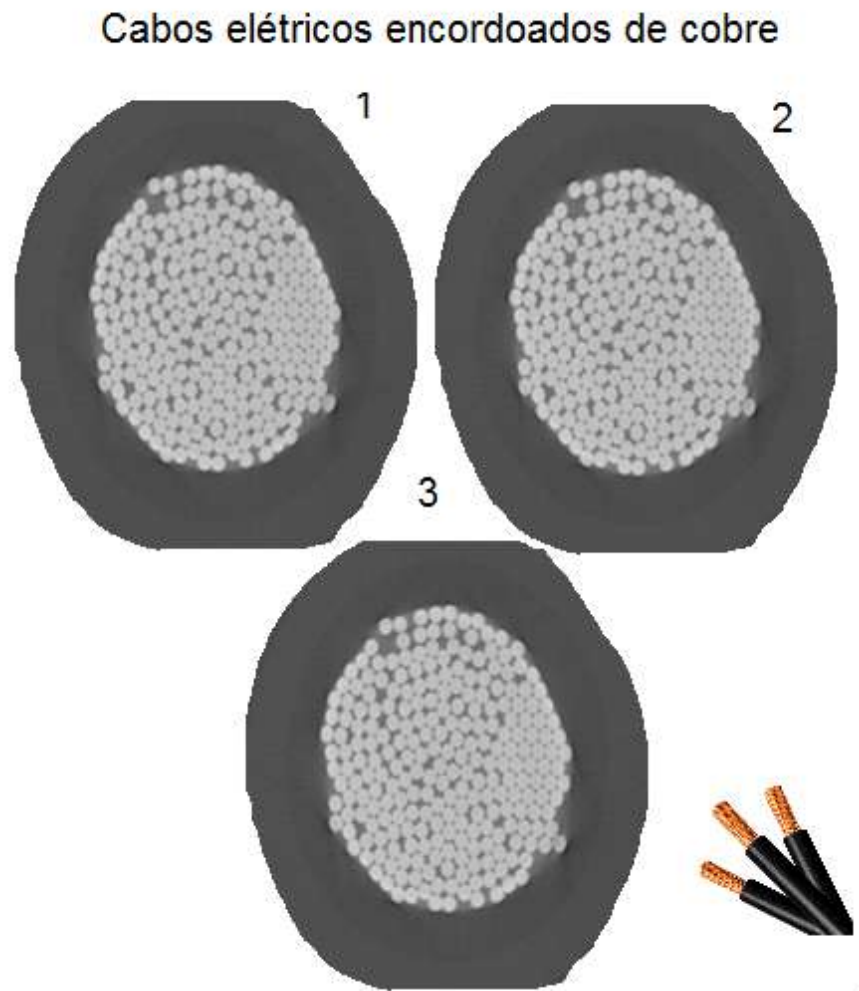


Figura 6.7: Cabos com núcleo de cobre visto pela microCT com a seção transversal de 25 mm^2 .

Agora será mostrado os resultados das simulações utilizando o programa Comsol Multiphysics, para calcular a densidade de campo magnético nos cabos de cobre com as três superfícies pesquisadas neste trabalho.

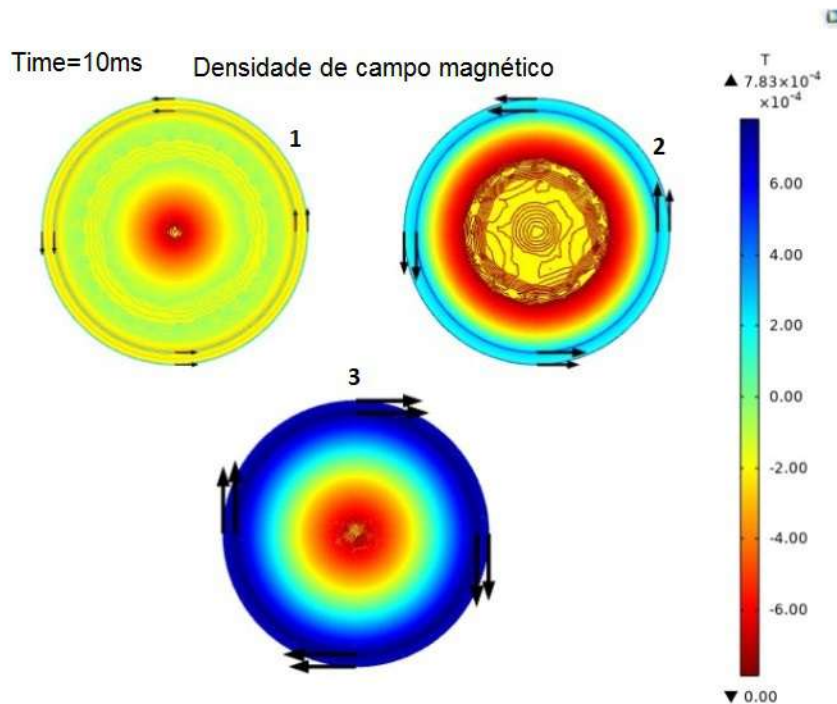


Figura 6.8: Cabo trifásico sem defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 25 mm^2 .

O resultado apresentado na Figura 6.8, a fase (1) mede $B = 0,2 \text{ mT}$ na superfície do cabo. As linhas de induções magnéticas dos cabos são uniforme em todas as fases (1), (2) e (3). Na fase (3) o campo magnético chegou ao valor de $B = 7,83 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

Na Figura 6.9 pode se observar na fase (2) onde foi colocado mais imperfeições no condutor que os vazios geraram um campo magnético ao redor deles com valores aproximadamente $B = 0,03 \text{ T}$. E nas três fases do sistema as linhas de indução magnéticas sofreram alterações. Isso ficou simples de vê em todos os resultados que se expressou a densidade de campo magnético. Verificando as três fases (1), (2) e (3), em todas as fases, o campo magnético chegou próximo de $B = 4,98 \cdot 10^{-3} \text{ T}$.

Observando as Figuras 6.8, 6.10 e 6.12, a fase (1) e (2) a densidade de campo magnético adentra à página e sai na fase (3), com pode ser visto nas simulações.

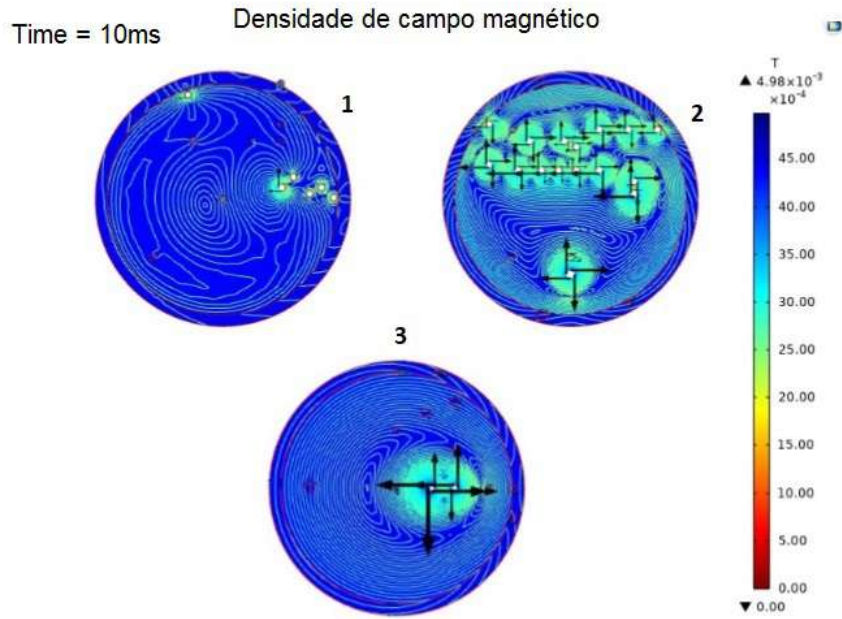


Figura 6.9: Cabo trifásico com defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 25 mm^2 .

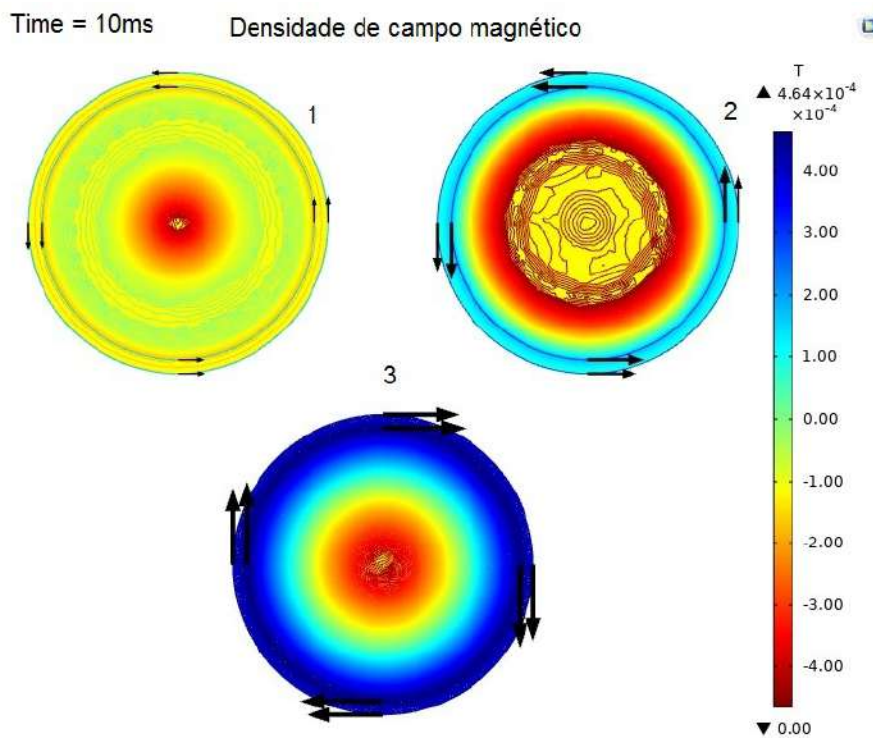


Figura 6.10: Cabo trifásico sem defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 35 mm^2 .

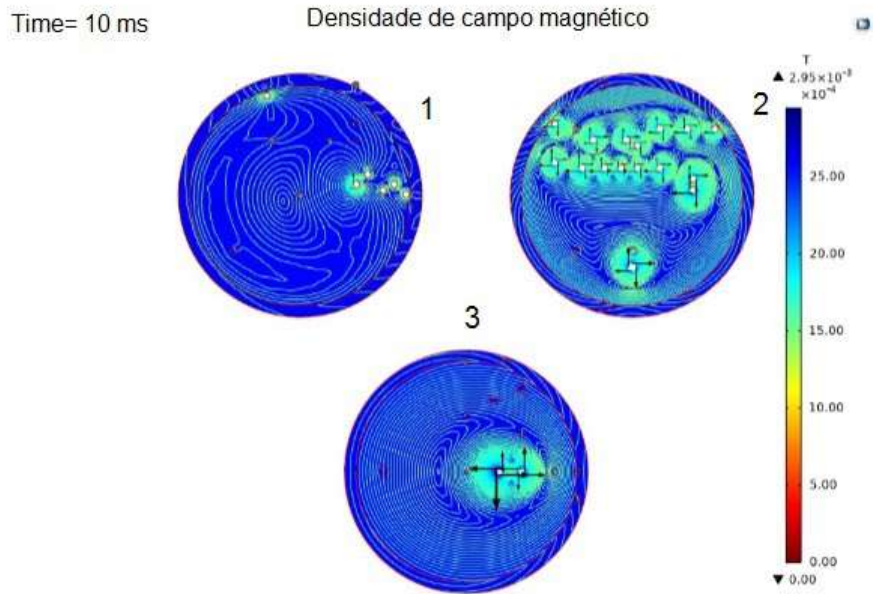


Figura 6.11: Cabo trifásico com defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 35 mm^2 .

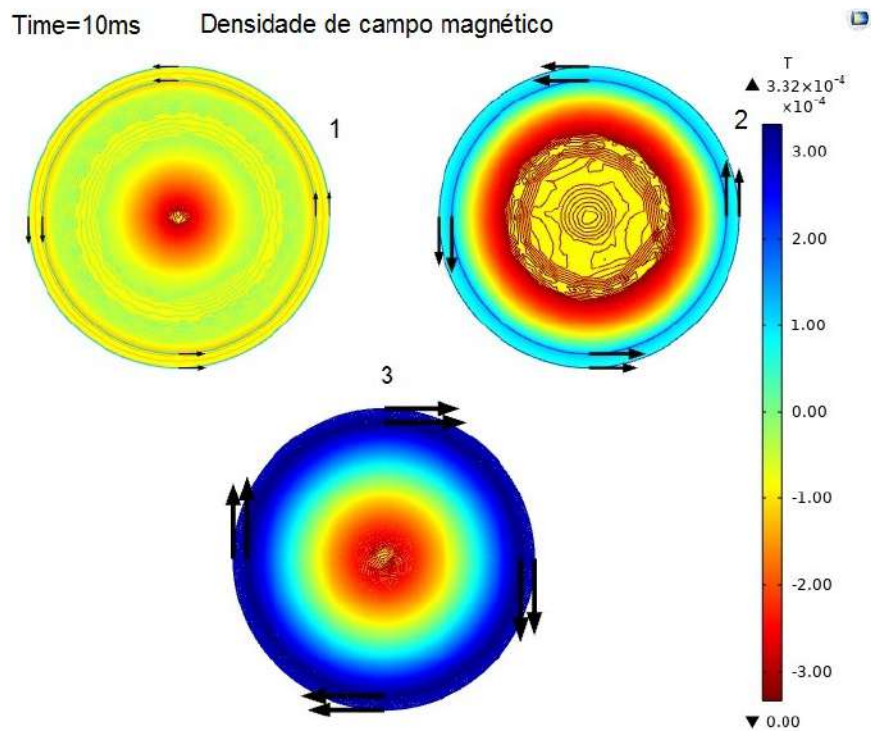


Figura 6.12: Cabo trifásico sem defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com área de seção transversal de 50 mm^2 .

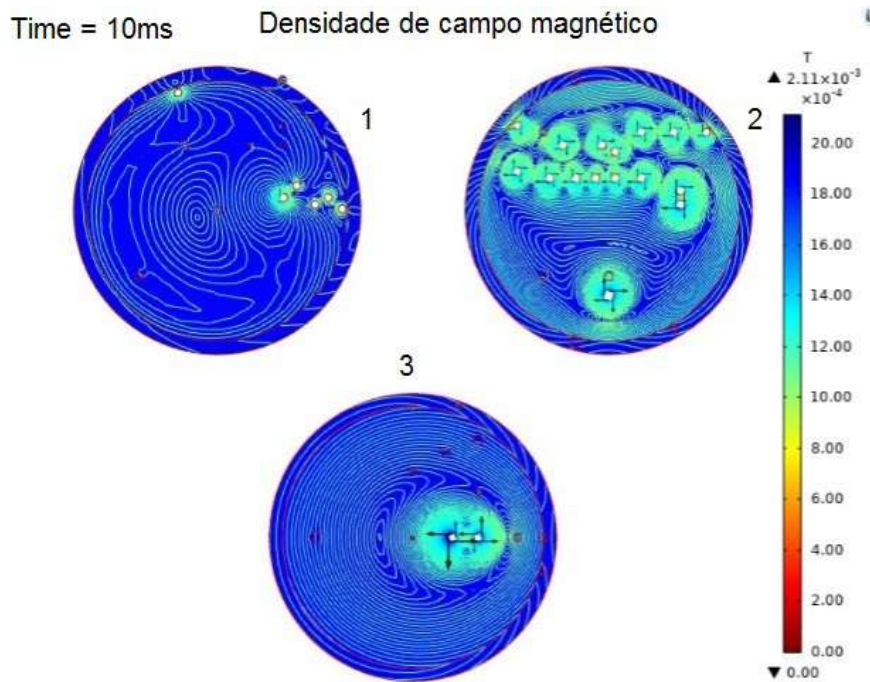


Figura 6.13: Cabo trifásico com defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 50 mm^2 .

Analisando os resultados anteriores das Figuras 6.8 até 6.13, ficou esclarecido que os defeitos provocaram modificações na densidade de campo magnético dos sistemas de cabos.

A densidade de campo magnético é um parâmetro importante em cabos elétricos, pois está relacionado com a eficiência energética e a segurança do sistema elétrico. Além disso, é a medida da força desse campo magnético em um determinado ponto do espaço. Quanto maior a densidade de fluxo magnético, maior será a força do campo magnético e maior será a interferência com outros circuitos próximos. Uma alta densidade de campo magnético pode causar problemas como interferência eletromagnética em outros equipamentos eletrônicos, aquecimento excessivo dos cabos, perda de eficiência energética e até mesmo risco de incêndio. Por isso, os cabos elétricos são projetados para operar com uma densidade de fluxo magnético segura e eficiente. Os fabricantes de cabos usam materiais capazes de reduzir a densidade de fluxo magnético e minimizar os efeitos adversos. Além disso, o tamanho e a geometria dos cabos são projetados para suportar uma carga elétrica de forma adequada e para minimizar as perdas de energia.

Agora serão exibidos os resultados das simulações nas Figuras de 6.14 a 6.19, os valores das normas do campo elétrico em apenas 10ms em cabos com os núcleos sem e com anomalias. As Figuras 6.14, 6.16 e 6.18, mostram as distribuições de campo elétrico apenas nos modelos de cabos sem defeitos.

A intensidade do campo elétrico, bem como a concentração de linhas equipotenciais, variam entre os núcleos dos cabos. Esta situação é antecipada considerando as mudanças no ângulo de fase do potencial elétrico aplicado em cada núcleo. A intensidade do vetor campo elétrico por meio de dois cabos é máxima no núcleo da fase (3). Em seguida do núcleo da fase (2). Da mesma maneira, as linhas equipotenciais estão estacionadas mais próximo do núcleo uniformemente distribuídas no núcleo das três fases. A distribuição uniforme tanto do campo elétrico como das linhas equipotenciais pode estar diretamente relacionada a natureza homogênea da isolação do cabo, em especial à permissividade. As magnitudes médias do campo elétrico ocupando as três fases.

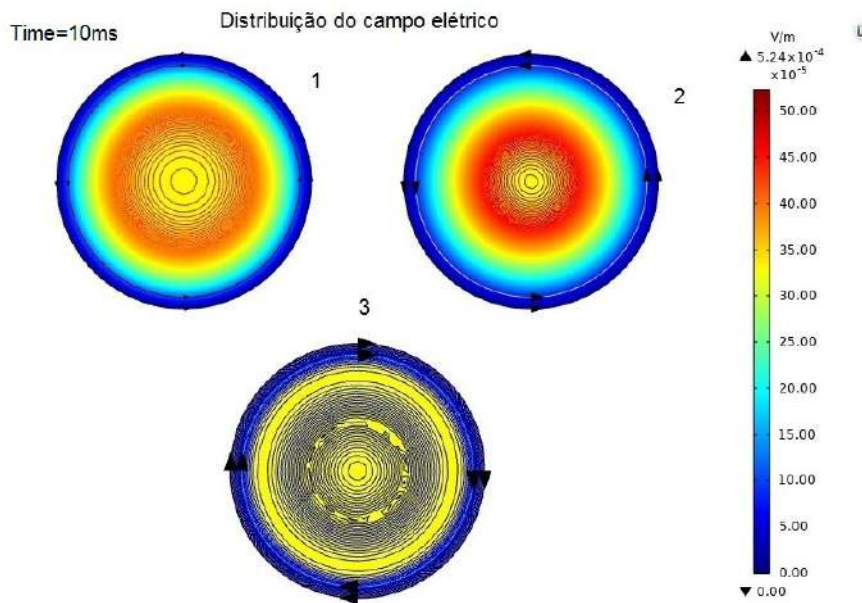


Figura 6.14: Distribuições de campo elétrico no modelo de cabo XLPE de três núcleos sem cavidade.

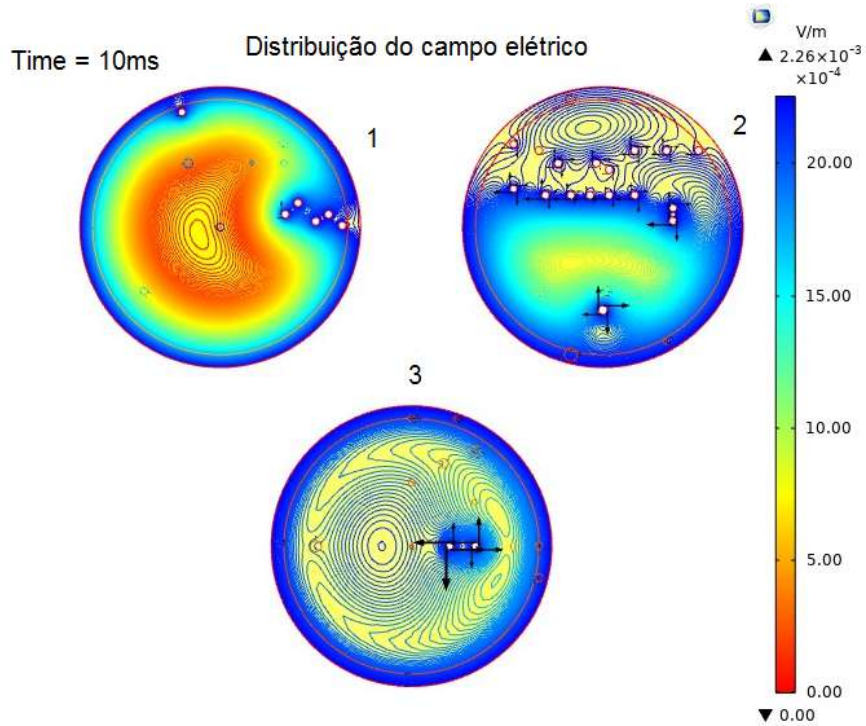


Figura 6.15: Cabo trifásico submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 25 mm^2 .

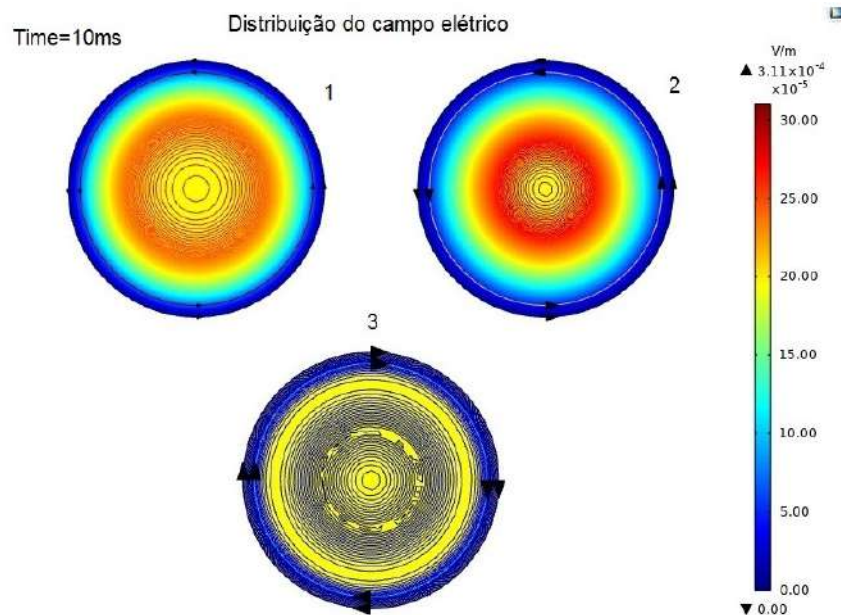


Figura 6.16: Cabo trifásico sem defeitos submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 35 mm^2 .

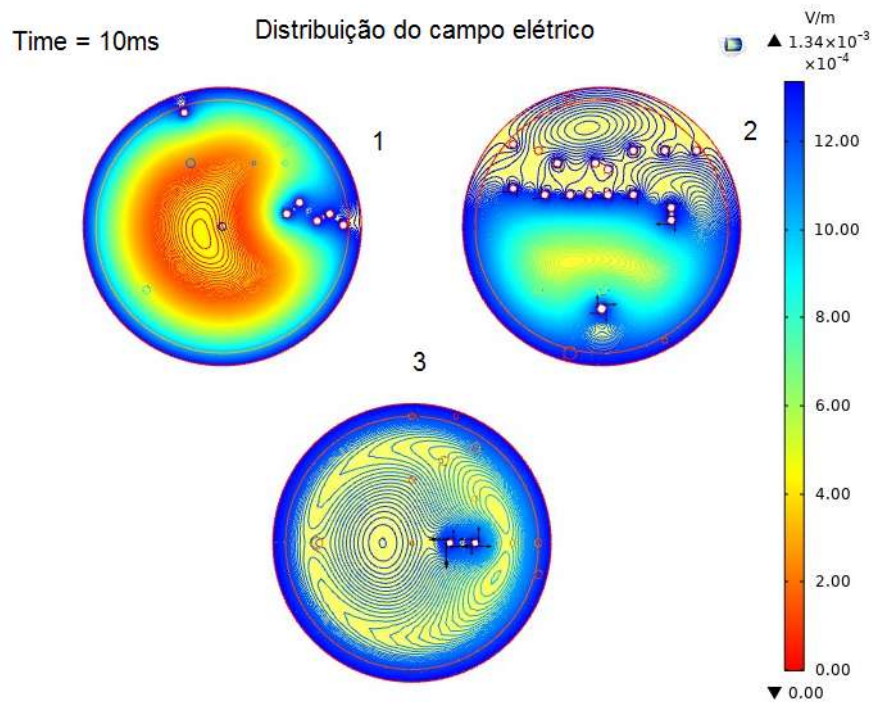


Figura 6.17: Cabo trifásico com anomalias submetido a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 35 mm^2 .

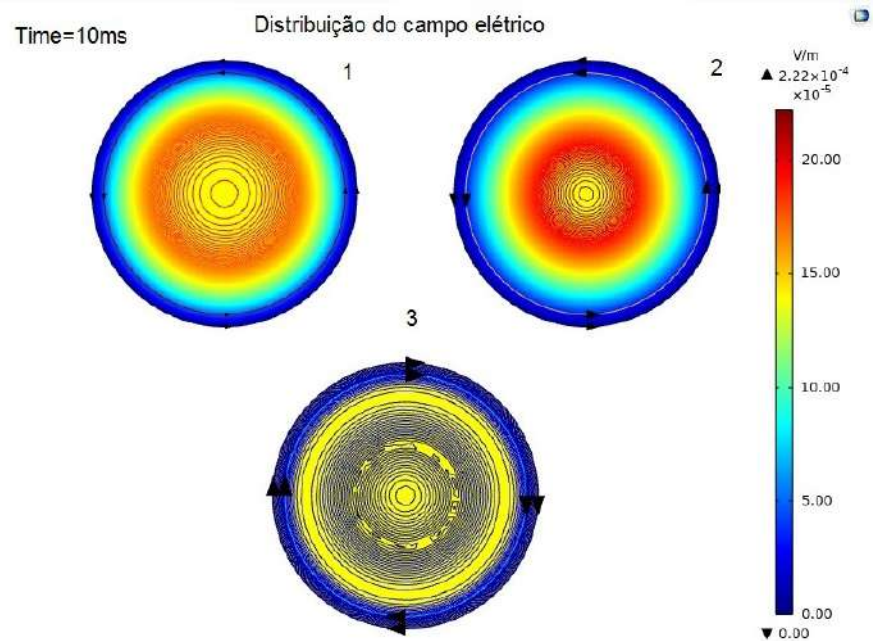


Figura 6.18: Cabo trifásico sem defeitos submetidos a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 50 mm^2 .

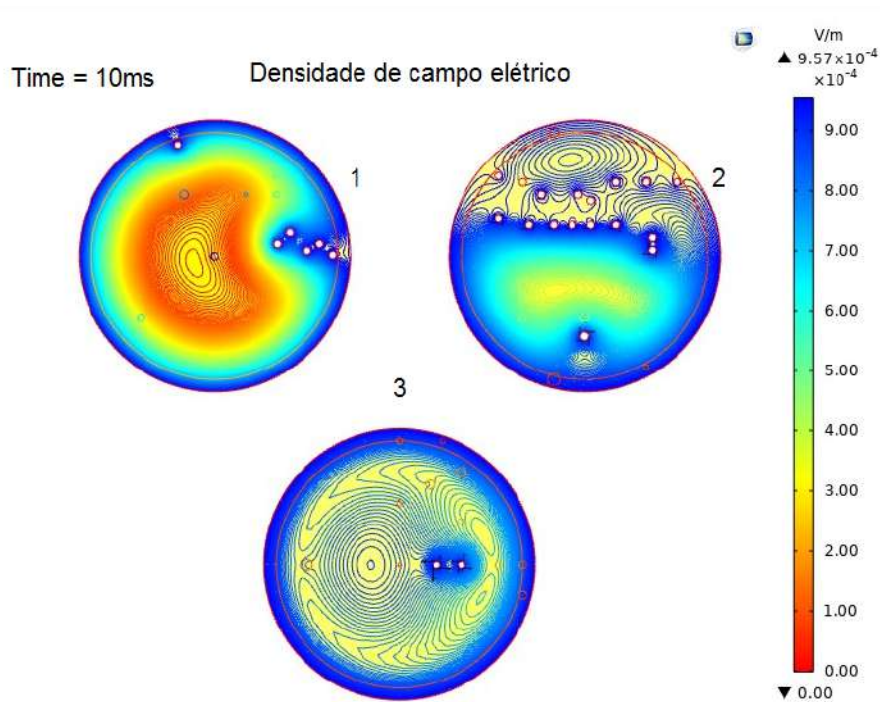


Figura 6.19: Cabo trifásico com anomalias submetidos a corrente alternada no instante de 10ms com a área de seção transversal de 50 mm^2 .

As Figuras 6.15, 6.17 e 6.19 demonstra os gráficos de superfícies das variações de campo elétrico no modelo de cabo contendo inúmeras cavidades preenchidas com ar. A presença de cavidades (vazios) aumentou a intensidade de campo na isolação do cabo, causando distorções significativas na uniformidade da distribuição dos campos. Em cada núcleo, a intensidade do campo elétrico é vista nos defeitos mais próximos do condutor. Nos cabos com as áreas de seções transversais de 25 mm^2 o campo elétrico chegou a $2,26 \cdot 10^{-4} \text{ V/m}$, para 35 mm^2 a intensidade $1,34 \cdot 10^{-4} \text{ V/m}$ e $9,57 \cdot 10^{-4}$ para o cabo com maior área de seção transversal. Devido ao deslocamento de fase na tensão aplicada, a intensidade do campo elétrico nas cavidades aumentaram a resultante do campo no condutor. Para resumir, os valores das magnitudes médias dos campos dentro desses vazios não são discutidos.

Da mesma maneira, as linhas equipotenciais sofrem alterações por conta da presença das cavidades que aparecem no cabo com a fase (3) modificando toda homogeneidade das linhas de campo. Pode-se notar que as linhas equipotenciais formam um padrão distintos entre as cavidades. Isso significa que a concentração da intensidade do campo elétrico em torno das regiões de isolamento são delimitadas pelas cavidades. Por tanto, na Figura 6.15 analisando a fase (3) a intensidade do campo elétrico ficou mais intensa no condutor com a fase (1) gerando uma desordem na parte interna. Para as demais fases o campo elétrico passou a se deslocar para o isolante do cabo. Na fase (2) o campo elétrico no núcleo está numa faixa de $5 \cdot 10^{-3}$

V/m no núcleo do cabo na fase (2). Na fase (3) o campo elétrico foi distribuído no cabo com a intensidade de campo elétrico entre $0,005 V/m$ à $0,01 V/m$.

O campo elétrico é gerado pela presença de uma diferença de potencial elétrico entre os extremos do cabo, produzida por uma fonte de energia externa, como uma bateria ou gerador. O campo elétrico é uma medida da força que atua sobre as cargas elétricas dentro do cabo, como elétrons e íons.

A intensidade do campo elétrico é afetada pelo diâmetro do cabo, a distância entre os condutores e o tipo de material isolante utilizado entre os condutores. Uma alta intensidade de campo elétrico pode causar problemas como descargas elétricas, interferência eletromagnética, perda de eficiência e até mesmo risco de incêndios, provocado pelo efeito Joule.

Por isso, os cabos elétricos são projetados para suportar a intensidade de campo elétrico necessária para transmitir a corrente elétrica de forma segura e eficiente, quando as imperfeições são minimizadas. Os fabricantes de cabos utilizam materiais isolantes adequados para reduzir a intensidade do campo elétrico e minimizar os efeitos adversos. Além disso, o tamanho e a geometria dos cabos são projetados para suportar a carga elétrica de forma adequada e para minimizar as perdas de energia conforme a norma da ABNT 5410, que fala sobre a importância de dimensionar corretamente os cabos.

o campo elétrico é um parâmetro importante na seleção e projeto de cabos elétricos, uma vez que afeta diretamente a eficiência e a segurança do sistema elétrico. É importante selecionar cabos elétricos que operem com intensidades de campo elétrico seguras e eficientes, para garantir a confiabilidade e a segurança do sistema elétrico.

Analisando os cabos trifásicos com a defasagem de 120° elétricos sem defeitos. As linhas de indução possuem circunferências concêntricas localizada envolta do condutor. Em duas fases do sistema, as linhas de indução tem o mesmo sentido e em uma delas o sentido oposto. Isso se dar por conta da defasagem elétricas entre as fases.

Verificando que conforme a regra da mão direita onde o polegar vai apontar para o sentido do vetor velocidade. Os outros dedos vão apontar para o sentido do vetor campo magnético; A palma da nossa mão vai sair o vetor força magnética, perceba que em um dos cabos as linhas de indução está no sentido contrário, esse motivo se dá por conta da corrente está variando senoidalmente no tempo.

A densidade volumétrica de potência é uma medida importante para o funcionamento de cabos de energia elétrica. Ela indica a quantidade de energia que está sendo transferida através do cabo e, conseqüentemente, a quantidade de calor gerado pelo mesmo. Quando uma corrente elétrica flui por meio de um cabo, há uma dissipação de energia na forma de calor, devido à resistência elétrica do material condutor do

cabo. Essa dissipação de energia resulta em um aumento de temperatura no cabo, o que pode levar a danos no material e até mesmo à falha do cabo.

A densidade volumétrica de potência é definida como a potência elétrica dissipada por unidade de volume do cabo. Se a densidade volumétrica de potência for muito alta, o cabo pode superaquecer e falhar. Portanto, é importante garantir que a densidade volumétrica de potência seja mantida nos limites seguros para o cabo.

Agora serão exibidos os cabos de potências sem defeitos encordoados de cobre que está sendo representado nos resultados das densidades volumétrica de potência que pode ser vista nas Figuras 6.20 à 6.25, com as áreas de seções transversais de 25mm^2 , 35mm^2 e 50mm^2 , respectivamente.

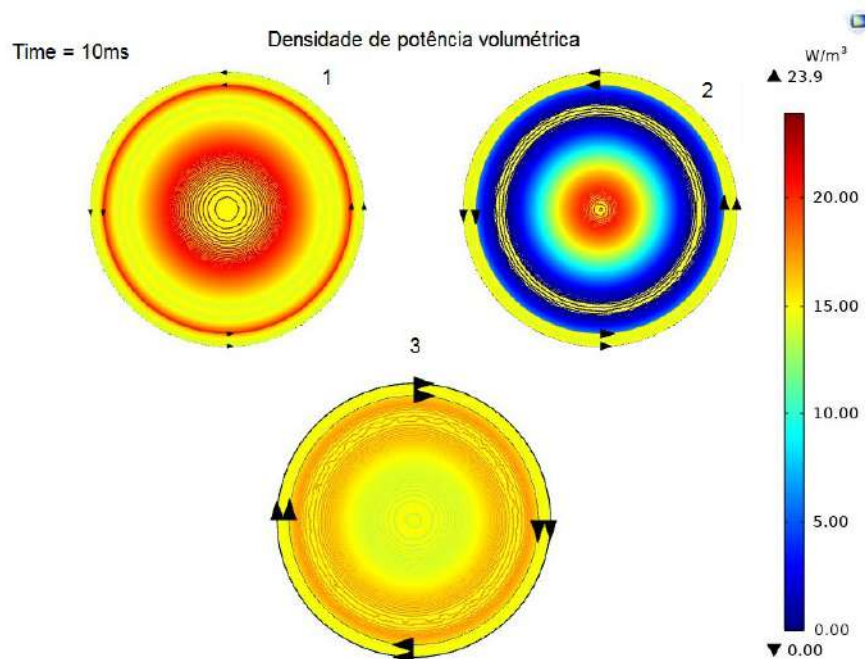


Figura 6.20: Cabos de potência sem defeitos com o condutor de cobre e área de seção transversal 25mm^2 representando os valores da potência térmica.

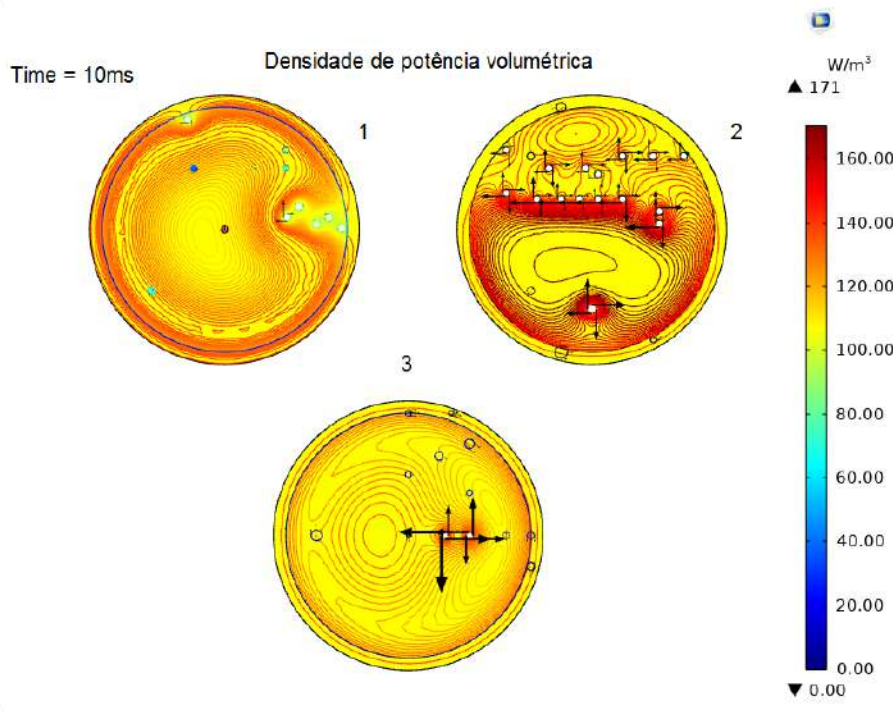


Figura 6.21: Cabos de potência com defeitos e o condutor de cobre e a área de seção transversal 25 mm^2 .

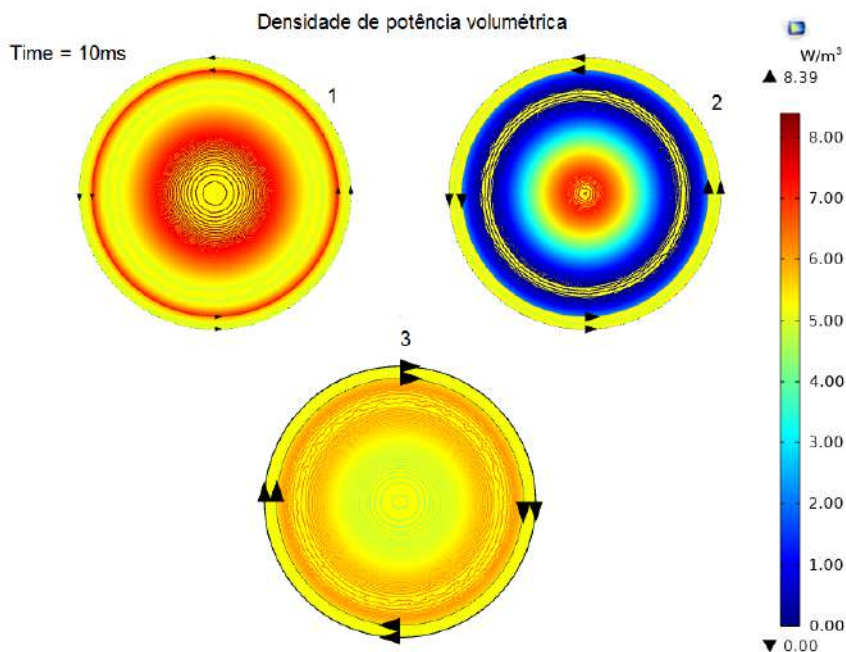


Figura 6.22: Cabo trifásico sem defeitos com o condutor de cobre e área de seção transversal representado a densidade de potência volumétrica do sistema trifásico com a seção transversal de 35 mm^2 em 10ms.

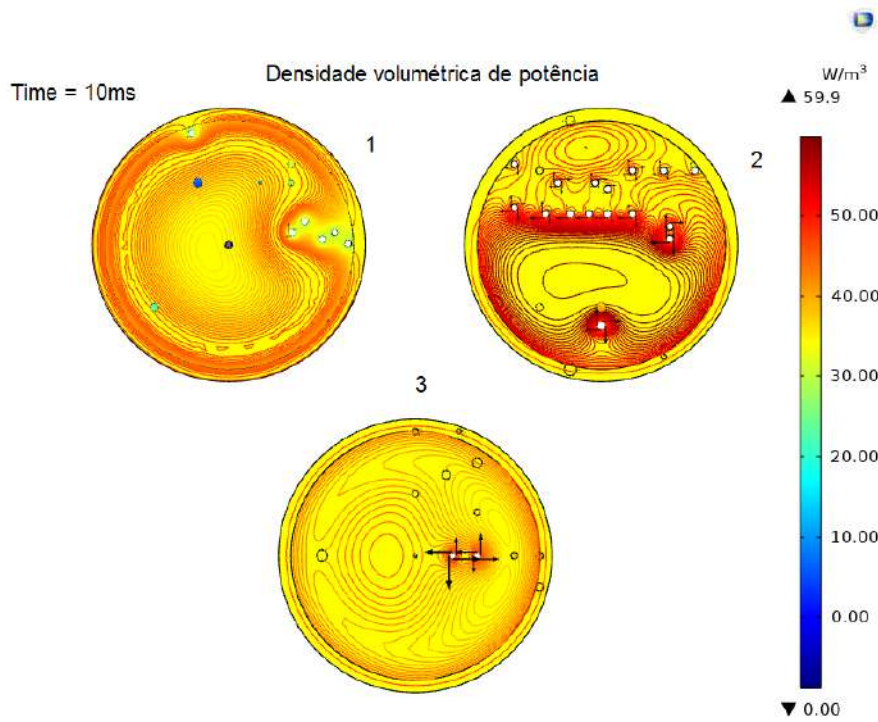


Figura 6.23: Cabos de potência com defeitos e o condutor de cobre e a área de seção transversal 35 mm^2 representando os valores da potência térmica.

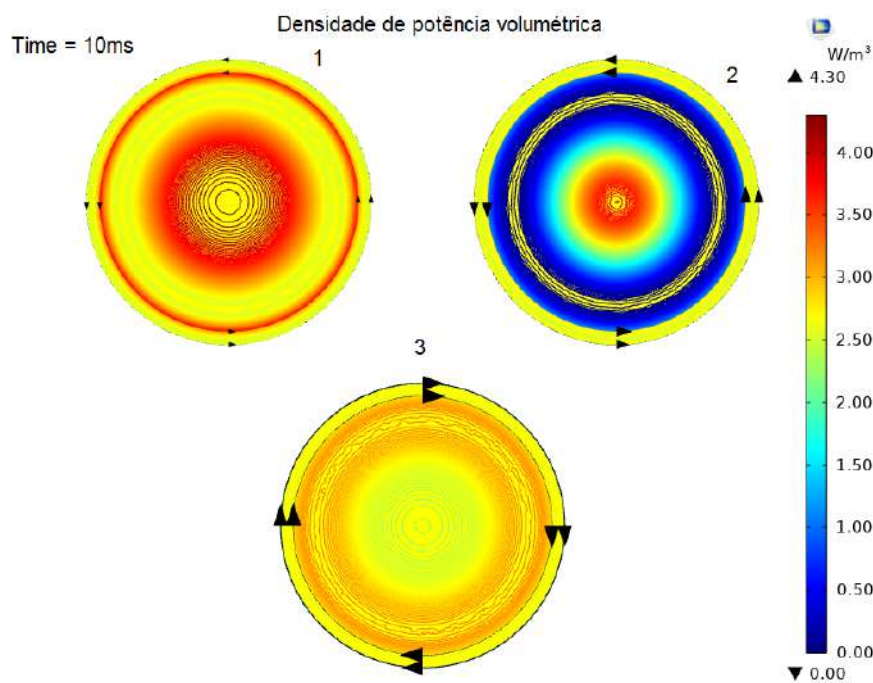


Figura 6.24: Cabo de potência trifásico sem defeitos com o condutor de cobre e área de seção transversal de 50 mm^2 .

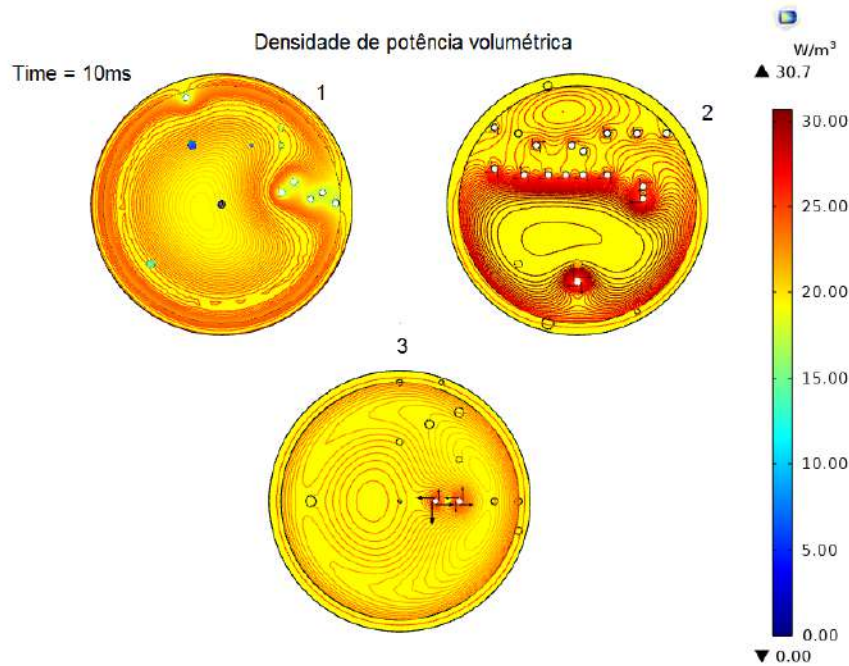


Figura 6.25: Cabo de potência com defeitos e o condutor de cobre e a área de seção transversal 50 mm^2 representando os valores da potência térmica.

As normas de densidades volumétricas que estão sendo exibidas nos cabos sem defeitos são $23,9 \text{ W/m}^3$, $8,39 \text{ W/m}^3$ e $4,30 \text{ W/m}^3$, respectivamente conforme as áreas de seções transversais em cabos supostamente perfeitos. Ou seja, quanto menor a área dos cabos, maior será sua energia térmica dissipada do material condutor.

Para os resultados com defeitos, a densidade volumétrica de potência aumenta significativamente, então, ficou da seguinte maneira. $59,9 \text{ W/m}^3$, 32 W/m^3 e $30,7 \text{ W/m}^3$, e isso pode levar a perda de eficiência na transmissão de energia elétrica, bem como possíveis danos aos cabos e revestimentos com o passar do tempo.

Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica dissipa toda energia acumulada por conta da resistência e com isso, é dissipada sobre a forma de calor. Esse fenômeno térmico pode ser chamado de efeito Joule, ocorre devido ao choque dos elétrons livres contra os átomos dos condutores.

De todos os resultados do padrão de distribuição da densidade volumétrica de potência obtidos, mostra claramente que o tamanho e a localização do vazio no isolante afetam o padrão de distribuição do cabo. Por outro lado, o cabo fica mais aquecido quando os vazios estão mais aglomerados, como pode ser visto nas Figuras 6.20, 6.22 e 6.24, na fase (1), onde aparece mais concentrações de vazios.

Os resultados visto nas Figuras 6.8 - 6.25, foram colocados nas Tabelas 6.3 - 6.5 a seguir, com o intuito de comparar os resultados de cada cabo sem e com defeitos. Para os resultados da Tabela 6.3, foi denominado B_1 como densidade de campo magnético sem defeitos e B_2 densidade de campo magnético com anomalias dado

em Tesla.

Tabela 6.3: Densidade de campo magnético.

Amostras	$B_1(\mathbf{t})$ (T)	$B_2(\mathbf{t})$ (T)
25 mm^2	$7,83 \cdot 10^{-4}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$
35 mm^2	$4,64 \cdot 10^{-4}$	$2,95 \cdot 10^{-3}$
50 mm^2	$3,32 \cdot 10^{-4}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$

Para as três amostras de cabos de cobre com diferentes áreas de seções transversais, o campo magnético é maior para o cabo de menor diâmetro, que nesse caso é 25 mm^2 . Para cabos com ou sem defeitos.

Para os resultados da Tabela 6.4, foi denominado E_1 como densidade de campo elétrico sem defeitos e E_2 chamada de densidade de campo elétrico com anomalias, dado em V/m .

Tabela 6.4: Resultados quantitativos do cabo de potência de cobre.

Amostras	$E_1(\mathbf{t})$ (V/m)	$E_2(\mathbf{t})$ (V/m)
25 mm^2	$5,24 \cdot 10^{-4}$	$2,26 \cdot 10^{-3}$
35 mm^2	$3,11 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$
50 mm^2	$2,22 \cdot 10^{-3}$	$9,57 \cdot 10^{-4}$

Para a Tabela 6.4, pode ser percebido que o vetor campo elétrico aumentou nas três análises feitas para os cabos de cobre. Esses resultados, deixou claro que os volumes de vazios nos cabos quando proliferam-se modificando suas posições, ocasionam - se as ampliações dos volumes de vazios nos filamentos que se encontram acoplados e dissipam as cargas elétricas com mais facilidades não deixando acontecer o acúmulo de campo elétrico no cabo.

A relação dos vazios em cabos está diretamente ligada às propriedades dielétricas do material isolante e à geometria do cabo, e influência diretamente o vetor campo elétrico no espaço vazio do cabo e isso pode ser visto nas simulações anteriores.

Para os resultados da Tabela 6.5, foi denominado DVP_1 como densidade de volumétrica de Potência sem defeitos e DVP_2 densidade de volumétrica de Potência com anomalias dado em W/m^3 .

Tabela 6.5: Resultados quantitativos do cabo de potência de cobre.

Amostras	$DVP_1(\mathbf{t})$ (W/m^3)	$DVP_2(\mathbf{t})$ (W/m^3)
25 mm^2	23,9	171
35 mm^2	8,39	59,9
50 mm^2	4,30	30,7

Para esses resultados que foram apresentados na Tabela 6.5 os defeitos influenciaram na parte térmica nos três casos estudados. No condutor com maior área aconteceu uma menor dissipação de energia térmica.

A não homogeneidade do campo elétrico no cabo de energia pode causar defeitos e até mesmo as correntes elétricas parasitas, que podem levar a sobreaquecimento, perda de energia e até mesmo falhas no cabo. Essas correntes parasitas são geradas por áreas com concentração de cargas elétricas, que podem surgir devido a imperfeições no material do cabo ou devido a variações na geometria do cabo. E também pode causar descargas elétricas, que podem danificar o cabo e os dispositivos elétricos conectados a ele. Por exemplo, se houver uma diferença de potencial elétrico significativa em diferentes pontos do cabo pode ocorrer uma descarga elétrica que danifica o isolamento do cabo e pode até causar um curto-circuito.

Portanto, é importante garantir que o campo elétrico dentro do cabo seja o mais homogêneo possível para evitar problemas de desempenho e segurança. Isso pode ser alcançado usando materiais de alta qualidade, técnicas de fabricação avançadas e projetando cuidadosamente a geometria do cabo.

As anomalias nas partes internas dos cabos elétricos alteraram diversas grandezas importantes para o funcionamento dos cabos estudados no eletromagnetismo. Nesses dois modelos de sistemas, o vetor campo elétrico não é mais homogêneo e os defeitos ficaram carregados com os vetores eletromagnéticos. Os campos magnéticos aumentaram por motivo dos volumes de vazios estarem carregados eletricamente e as consequências podem ser; O envelhecimento do revestimento por conta dos aumentos das potências dissipadas e o acúmulo do campo elétrico nas cavidades.

Quanto aos resultados referentes aos campos magnéticos analisando os mapas de cores, ficou claro que dentro dos condutores em que a fase está com a corrente elétrica mais intensa o campo magnético também fica mais intenso. Ao contrário do campo elétrico, duas fases podem interagir mais fortemente, dado ao fato que o fluxo magnético total em uma superfície fechada é nulo. Esse resultado advém da defasagem de 120° elétricos ³ entre as fases, uma em cada cabo.

³Isso significa que a tensão e a corrente elétrica em cada linha estão sempre em diferentes pontos de seu ciclo senoidal, garantindo que a energia elétrica seja transmitida de forma uniforme ao longo do tempo

Efeitos mecânicos: A densidade de campo magnético pode causar vibrações e movimentos no interior do cabo, especialmente em cabos flexíveis. Isso pode gerar desgaste prematuro nas camadas de isolamento e na capa externa do cabo, reduzindo a sua vida útil.

Interferência eletromagnética: A densidade de campo magnético pode gerar campos elétricos indesejáveis no ambiente ao redor do cabo, o que pode interferir em equipamentos eletrônicos próximos e causar problemas de funcionamento.

Por esses motivos, é importante escolher cabos elétricos adequados para cada aplicação, considerando a densidade de campo magnético que será gerada pelo transporte de corrente elétrica, além de garantir que o cabo esteja corretamente instalado e protegido contra interferências externas.

A densidade de corrente elétrica em cabos é uma medida importante que indica a quantidade de corrente elétrica que está fluindo por meio de uma seção transversal do cabo. Ela é expressa em ampères por metro quadrado A/m^2 e representa a quantidade de corrente elétrica que flui mediante um metro quadrado de área transversal do cabo.

Os próximos resultados apresentam a norma da densidade de corrente elétrica nos três cabos que podem ser representados pelo mapa de cores. Seguindo o modelo anteriormente, será mostrado o sistema de cabos sem anomalias e o com volume de vazios com tamanhos diversos, nas seguintes Figuras 6.26 até 6.31.

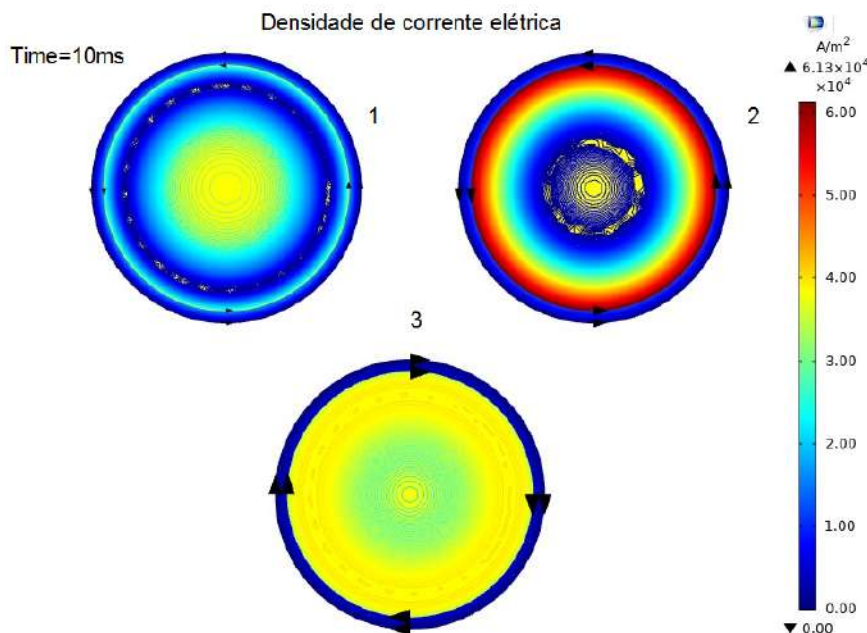


Figura 6.26: Cabos de potências sem defeitos com o condutor de cobre e a área de seção transversal 25 mm^2 apresentando os valores da densidade de corrente elétrica.

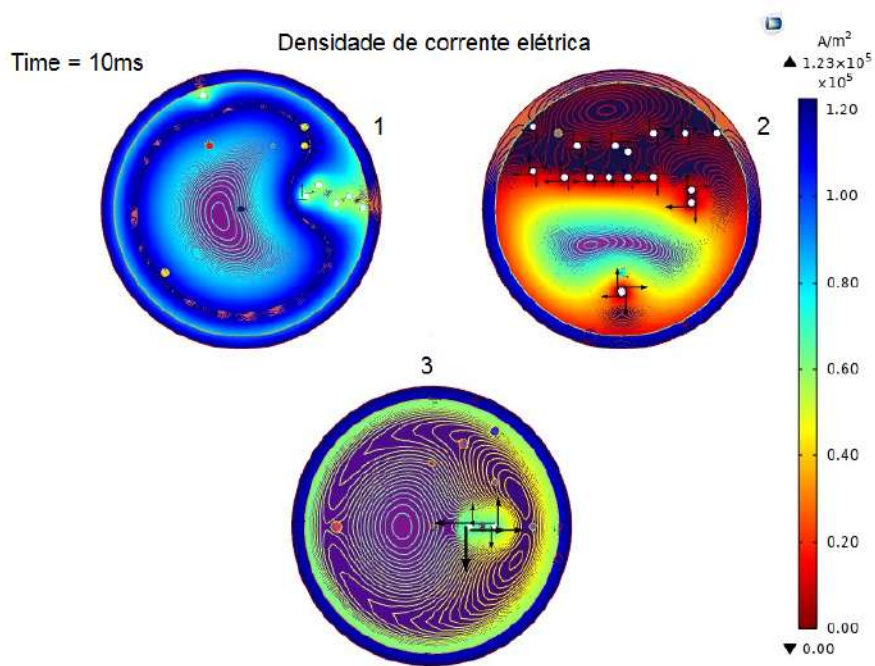


Figura 6.27: Cabos de potências com defeitos com núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 25 mm^2 apresentando os valores da norma da densidade de corrente elétrica.

Para os cabos de potência com a área seção transversal de 35 mm^2 :

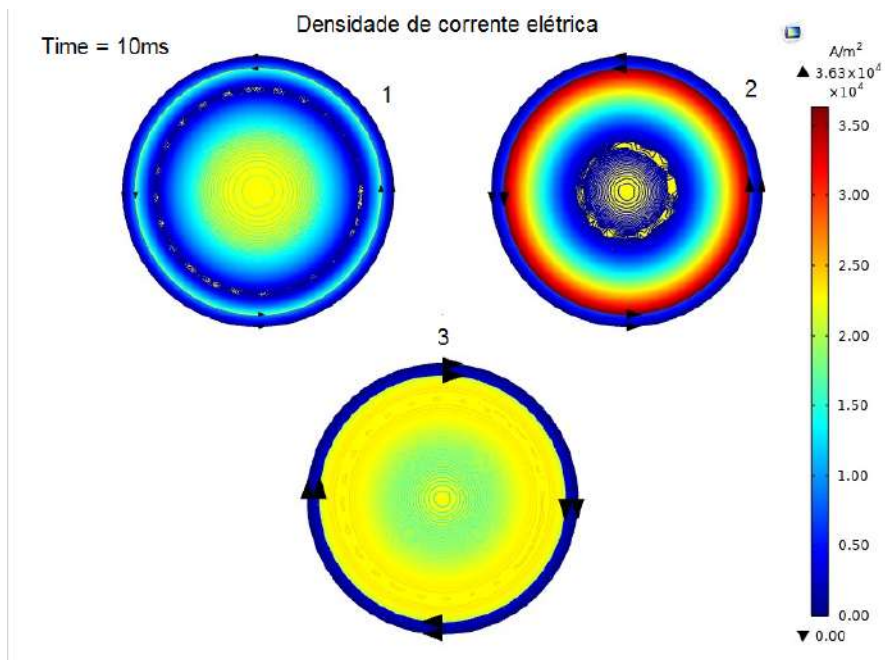


Figura 6.28: Cabo de potência trifásico sem defeitos com núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 35 mm^2 .

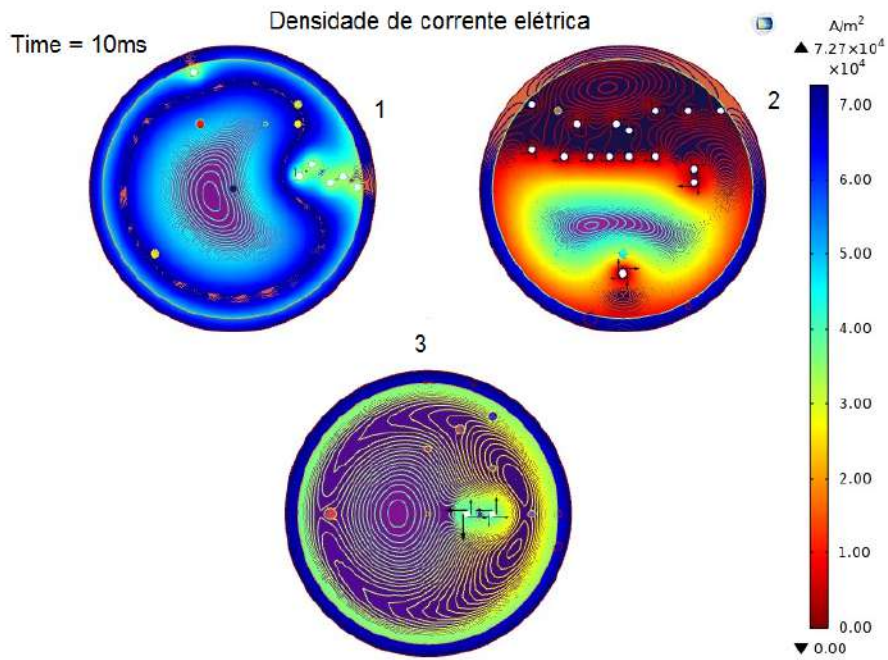


Figura 6.29: Cabos de potências com defeitos com núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 35 mm^2 .

Agora, será apresentado a densidade de corrente elétrica para o cabo de 50 mm^2 :

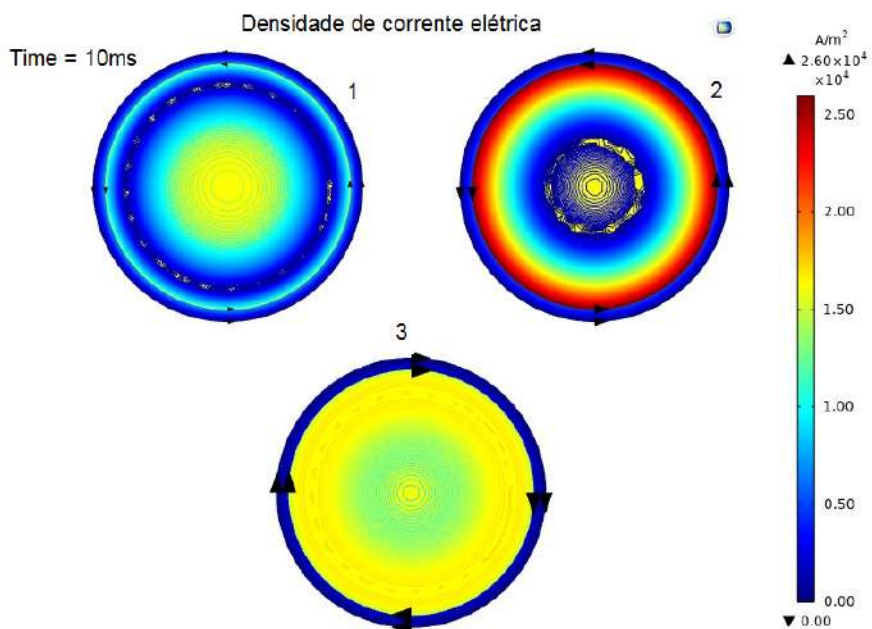


Figura 6.30: Cabos de potências sem defeitos com núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 50 mm^2 .

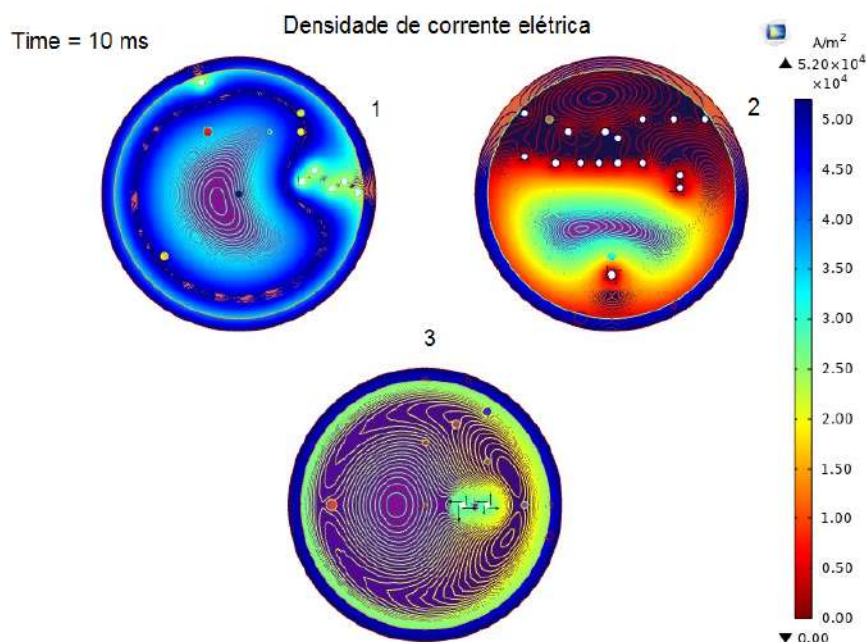


Figura 6.31: Cabo de potência com defeitos e núcleo condutor de cobre e a área de seção transversal 50 mm^2 .

Verificando os resultados dos cabos onde foi exibido a densidade de corrente elétrica em amostras sem defeitos e com defeitos, ficou elucidado que os vazios na parte interna dos condutores modificam bastante a rotina de funcionamento do cabo. Observe nas Figuras 6.26, 6.28 e 6.30, que representam os cabos, supostamente ideias, onde não há defeitos, ou seja, não passa intensidade de corrente elétrica no isolante. Ao contrário do sistema visto nas Figuras 6.27, 6.29 e 6.31, onde na fase (2), existe uma fuga da corrente elétrica, ou seja, pode evoluir para uma descarga parcial, com possibilidade de afetar o isolante do cabo de potência. Analisando os resultados, principalmente os sem defeitos, ficou esclarecido que a corrente elétrica não passa pelo isolante nas fases (1) e (3). Porém, de acordo com (GRIFFITHS, 2012), até mesmo os isolantes são ligeiramente condutores, embora a condutividade do metal seja astronômicamente maior.

Os valores das normas das densidades de corrente elétrica aumentaram significativamente para no cabo elétrico com defeitos, quando comparado aos cabos supostamente sem defeitos usados como parâmetros. A densidade de corrente elétrica é um parâmetro importante, porque pode afetar o desempenho e a segurança dos cabos de energia elétrica. Se a densidade de corrente elétrica for muito alta, o cabo pode aquecer e até mesmo falhar. Portanto, é importante manter a densidade de corrente elétrica dentro dos limites seguros para garantir a operação adequada e segura do cabo. A escolha adequada do material do cabo e sua seção transversal são alguns dos fatores que afetam a densidade de corrente elétrica. O dimensionamento correto

do cabo em relação à carga que será transmitida também é um fator importante a ser considerado. Além disso, a densidade de corrente elétrica também pode ser utilizada para medir o desempenho e a eficiência dos cabos de energia elétrica. Por exemplo, em aplicações de transmissão de energia elétrica em longa distância, a densidade de corrente elétrica pode ser usada para avaliar as perdas de energia no cabo e a eficiência da transmissão.

Os resultados apresentados na tabela 6.6 são simulações dos dados de três cabos de potência esquematizado para a corrente elétrica no modelo AC, com as frequências de 60 H_z e a tensão de 1 kV e a defasagem $\phi_0 = 120^\circ$ elétricos. Será mostrado a seguir densidade de corrente elétrica no instante de 10ms.

Tabela 6.6: Densidade de corrente elétrica de cobre.

Amostras	$J_1(t)$ (A/m^2)	$J_2(t)$ (A/m^2)
25 mm^2	$6,13 \cdot 10^4$	$1,23 \cdot 10^5$
35 mm^2	$3,63 \cdot 10^4$	$7,27 \cdot 10^4$
50 mm^2	$2,60 \cdot 10^4$	$5,20 \cdot 10^4$

Outra observação a ser feita de grande valia é sobre a defasagem elétrica em cabos de energia, é importante porque pode afetar a qualidade e a eficiência da transmissão de energia elétrica através deles. Os cabos elétricos têm dois fatores importantes: A impedância e a capacitância do cabo. A impedância do cabo é a medida de sua resistência elétrica e sua reatância, a resistência elétrica do cabo em relação à corrente alternada. A capacitância do cabo é a medida da capacidade do cabo de armazenar cargas elétricas.

Quando um cabo transmite corrente elétrica, a impedância e a capacitância do cabo causam uma defasagem elétrica entre a corrente e a tensão. Essa defasagem elétrica pode levar a uma perda de energia elétrica e a uma redução na eficiência da transmissão de energia através do cabo.

Além disso, a defasagem elétrica em cabos também pode afetar a qualidade da energia elétrica transmitida. Se a defasagem elétrica for muito alta, isso pode resultar em uma distorção da forma de onda elétrica, levando a problemas como interferência eletromagnética, aquecimento excessivo do cabo e mau funcionamento de equipamentos elétricos. Portanto, é importante minimizar a defasagem elétrica em cabos, escolhendo cabos com baixa impedância e capacitância, garantindo que os cabos sejam instalados corretamente e mantendo-os adequadamente. Isso ajudará a garantir uma transmissão eficiente e de alta qualidade de energia elétrica através dos cabos.

Os 120° elétricos também permitem que o sistema elétrico seja dimensionado

para lidar com cargas variáveis de forma eficiente. Por exemplo, se uma carga estiver conectada a uma das três fases, a carga naquela fase aumentará enquanto as outras duas fases permanecerão relativamente inativas. Isso significa que as três fases do sistema serão usadas de forma mais uniforme, evitando sobrecarga ou falhas em qualquer uma das fases.

Em resumo, os 120° elétricos são uma medida fundamental em sistemas elétricos trifásicos, permitindo que a energia elétrica seja transmitida de forma uniforme e eficiente. Eles são importantes para garantir a estabilidade e a eficiência do sistema, bem como para garantir a segurança do equipamento e das pessoas envolvidas.

Analisando os resultados mostrados nas Figuras 6.32 - 6.33, confirmam as distribuições de linha de densidades de campo magnéticos para diferentes instantes no interior do condutor. As intensidades do vetor campo magnético são expressas por diferentes linhas e instantes de no máximo 10ms.

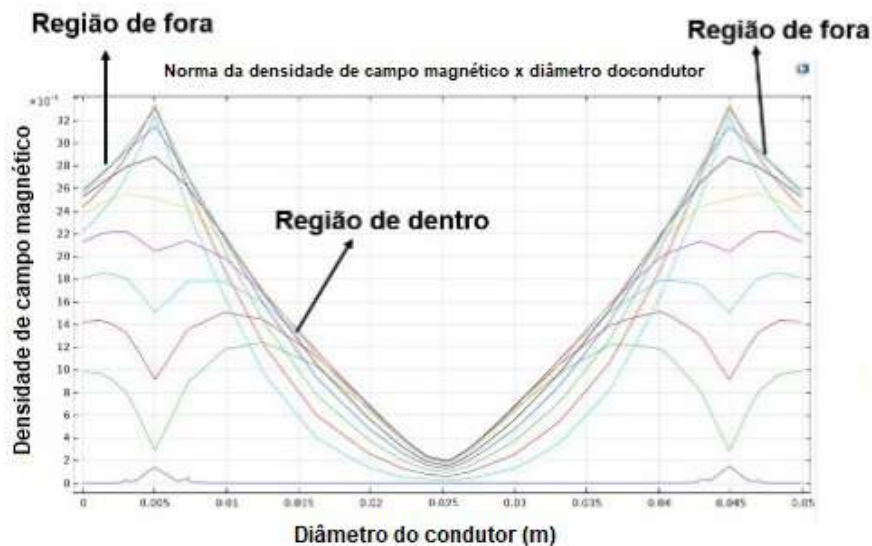


Figura 6.32: O gráfico que expressa a densidade de campo magnético sem defeitos em 10ms, com a área de 25 mm^2 .

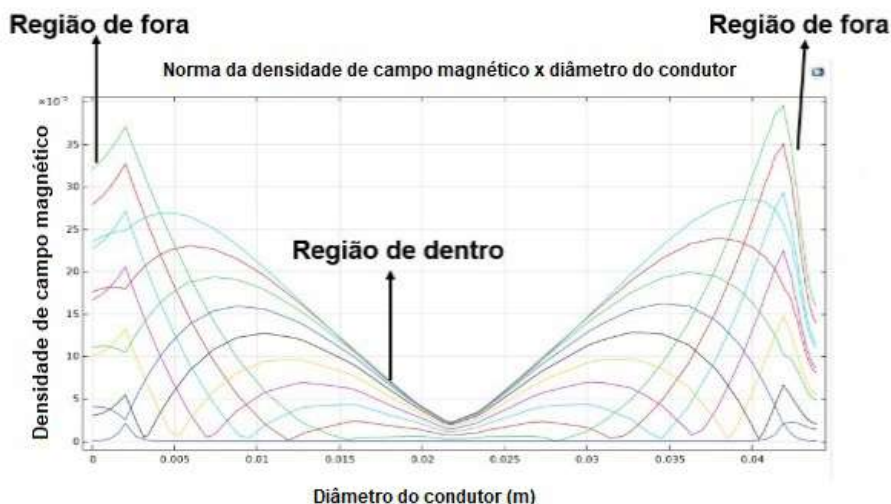


Figura 6.33: O gráfico que expressa a densidade de campo magnético com defeitos em 10ms, com a área de 25 mm^2 .

As Figuras 6.32 e 6.33 são exibidos nos gráficos os comportamentos das linhas de densidade de campo magnético dentro e fora do cabo elétrico para as amostras de cabos com defeitos surgiu modificações dentro e fora dos condutores como pode ser visualizado nas Figuras 6.33.

As impurezas são presenças de partículas nos isolantes de elementos não condutores de eletricidade, reduzindo a condutividade desses materiais. Existem substâncias nos isolantes que estão presentes devido à containerização ou devido a falhas de fabricação. Eles impedem o fluxo de corrente nos condutores, o que diminui significativamente os níveis de condutividade.

Esse fenômeno pode ser conhecido como magnetorresistência, pois contribui para a variação da resistência do núcleo do condutor por campos magnéticos intensos ao redor do cabo. Embora os condutores elétricos também criem campos magnéticos ao conduzir corrente, os componentes elétricos e magnéticos desses campos estão alinhados perpendicularmente entre si, de modo que não causam problemas para o fluxo de corrente atual. Por outro lado, os campos eletromagnéticos externos são independentes com o potencial de interromper o fluxo de corrente através desses condutores.

6.4.2 Resultados para cabos de alumínio usando métodos dos elementos finitos

Para o melhor entendimento dos resultados em 2D que será apresentado a seguir que podem ser interpretados pelos mapas de cores do mesmo modo que os resultados exibidos pelos cabos de potência de cobre, visto anteriormente. Nesta seção, as

amostras de cabos regido pela norma da ABNT NBR 8182 com o núcleo de alumínio, onde foi realizado simulações computacionais que podem ser visualizadas nos próximos resultados.

A Figura 6.34 mostra o modelo de cabo trifásico como base para a realização de simulação computacional feita através do programa Comsol Multiphysics. Os resultados das simulações visa estudar quatro grandezas de grande importância para o eletromagnetismo em cabos de potência de baixa tensão.

Os resultados das Figuras 6.35 e 6.36 mostram a norma da densidade do campo magnético no sistema trifásico de cabos de alumínio com a seção transversal de 25 mm^2 .

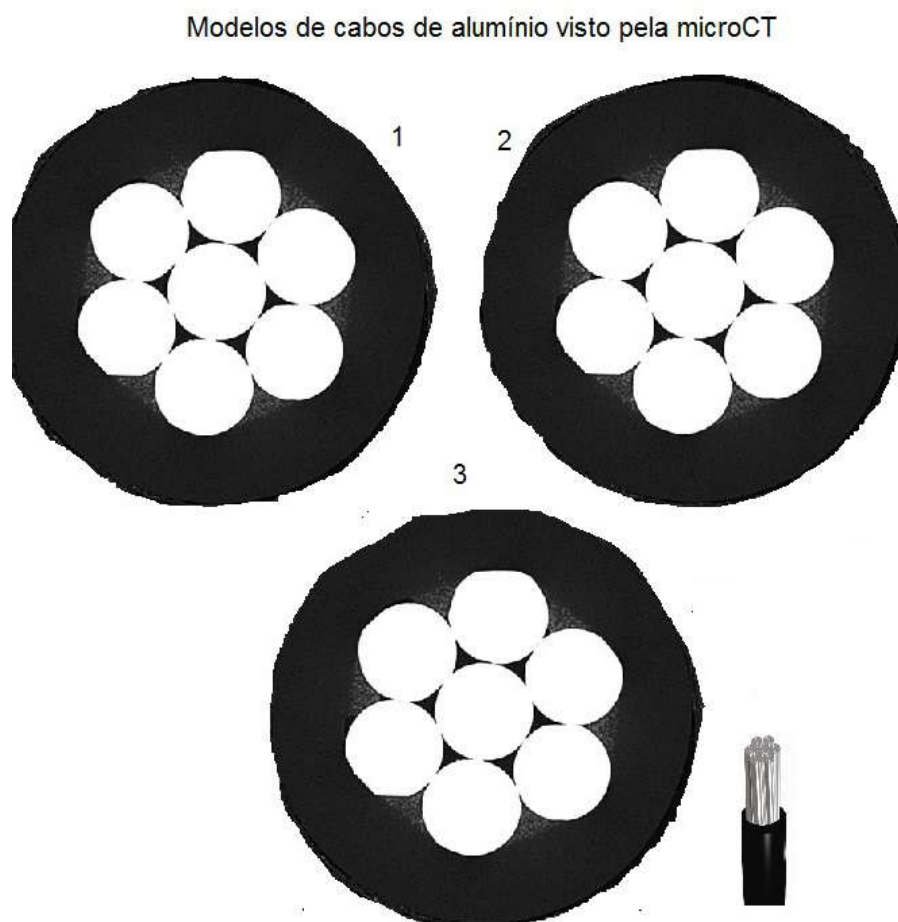


Figura 6.34: Modelo de cabo trifásico com núcleo de alumínio com 25 mm^2 .

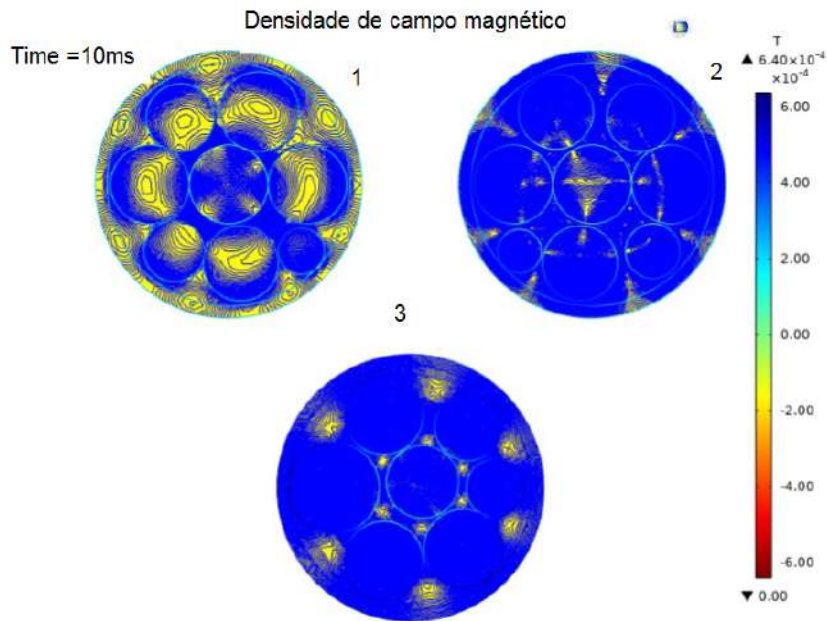


Figura 6.35: Cabo trifásico com o condutor de alumínio sem defeitos na isolação.

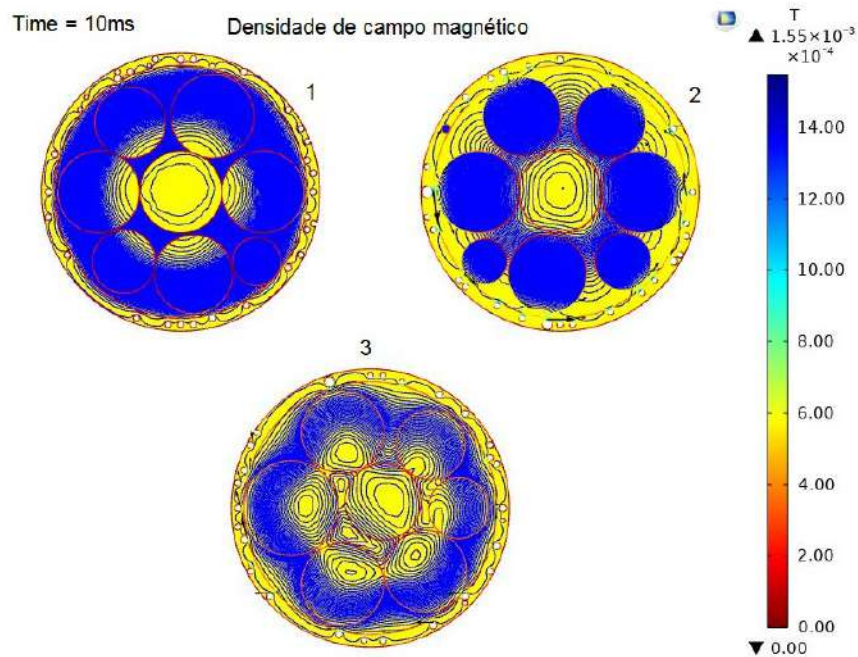


Figura 6.36: Cabo trifásico de alumínio com defeitos na isolação.

Verificando as fases (2) e (3) do sistema de cabo trifásico, o campo magnético ficou praticamente constante e homogêneo e chegou ao valor máximo de aproximadamente $B = 6,40 \cdot 10^{-4}$ T sem defeitos. E na fase (1) ocorreu variações maiores no condutor.

E para o cabo multiplexado de alumínio com defeitos o valor máximo da norma do campo magnético alcançou $1,55 \cdot 10^{-4}$ T.

A não homogeneidade do campo magnético no cabo de energia geralmente não causa defeitos diretos no cabo. No entanto, um campo magnético não uniforme pode criar correntes parasitas (ou correntes de Foucault) no cabo que podem resultar em perdas de energia e aumento de temperatura no cabo. Se essas correntes parasitas forem excessivas elas podem causar danos ao isolamento do cabo e levar a falhas no cabo. Além disso, um campo magnético forte e não uniforme próximo a outros equipamentos elétricos pode induzir tensões elétricas indesejadas nesses equipamentos e, portanto, causar interferência eletromagnética e outros problemas de compatibilidade eletromagnética. Portanto, embora a não homogeneidade do campo magnético no cabo de energia não cause diretamente defeitos, pode levar a problemas secundários que podem resultar em falhas no cabo ou em outros equipamentos.

Agora será apresentado os resultados do campo elétrico nos cabos de potência.

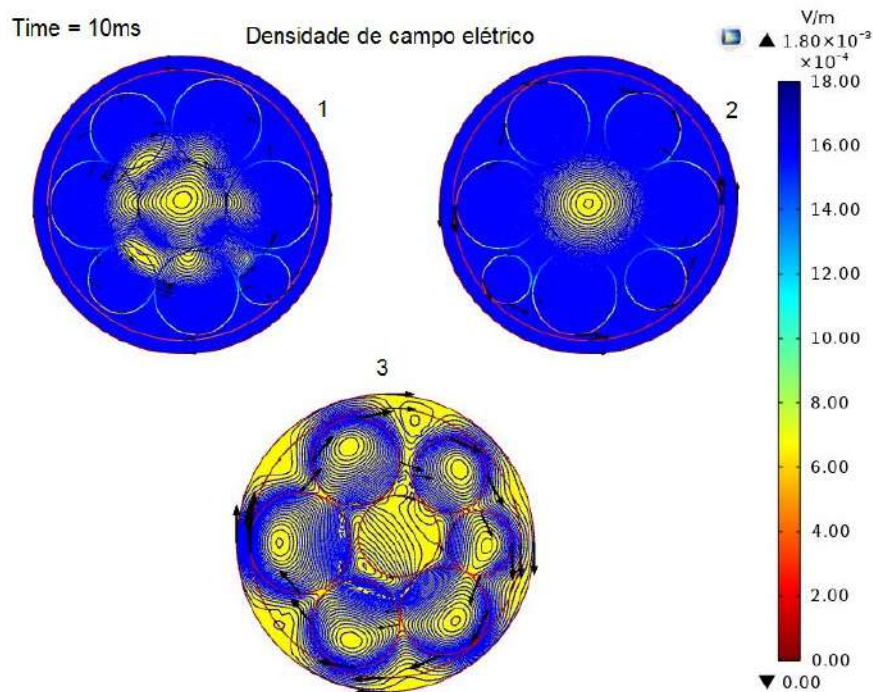


Figura 6.37: Cabo elétrico de alumínio sendo exibindo a norma do campo elétrico.

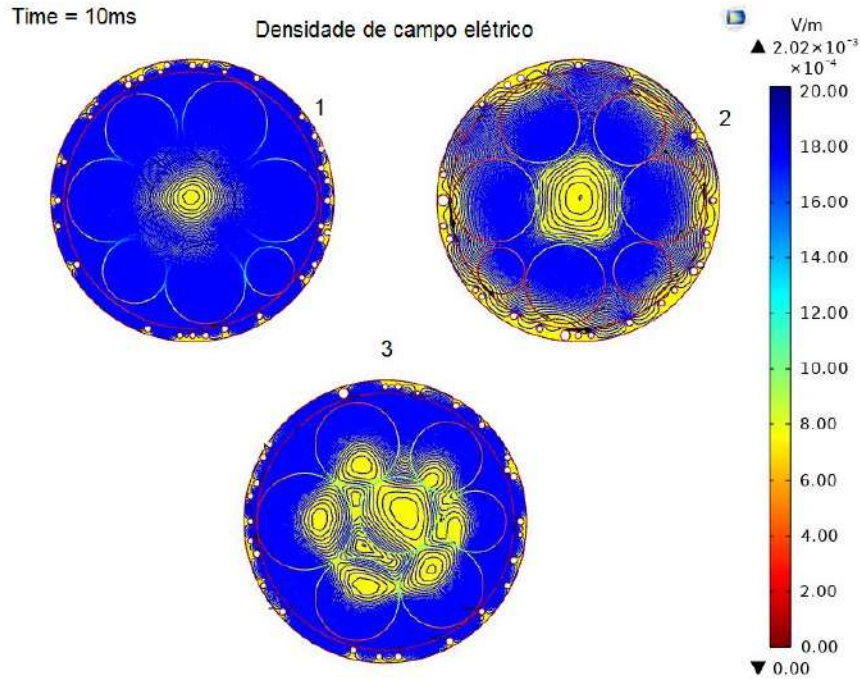


Figura 6.38: Cabo elétrico trifásico com núcleo de alumínio com anomalias na isolação exibindo a norma do campo elétrico.

Como pode ser observado o campo elétrico aumentou próximo de 12%, quando comparado ao cabo sem defeitos. Fazendo a comparação dos resultados, o cabo trifásico com defeitos na fase (3), o núcleo do cabo, o campo elétrico vale $8 \cdot 10^{-3}$ V/m. O cabo da fase (3) sem defeitos, o campo elétrico está próximo de $6 \cdot 10^{-3}$ V/m.

Os resultados exibidos nas Figuras 6.39 e 6.40, podem ser constatados que a densidade de potência volumétrica aumentou devido aos volumes de vazios em sua isolação e ficou evidente que os condutores aqueceram por conta dos defeitos.

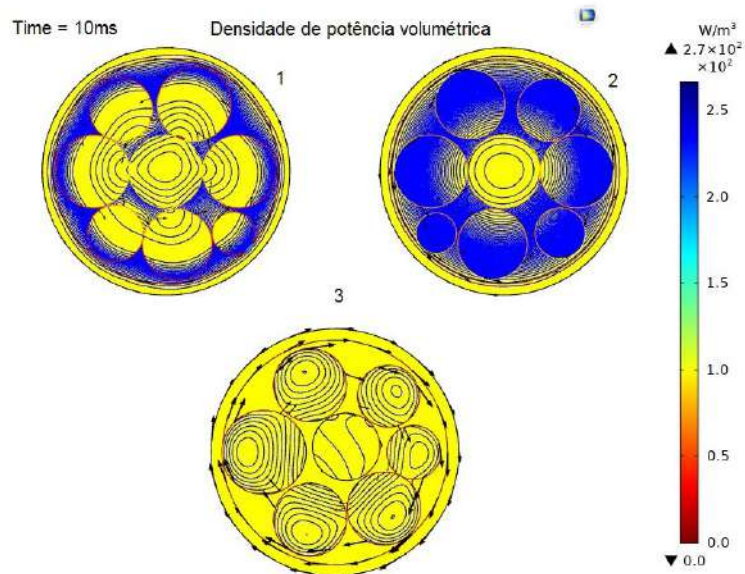


Figura 6.39: Cabo elétrico de alumínio sem defeitos na isolação exibindo a densidade volumétrica de potência.

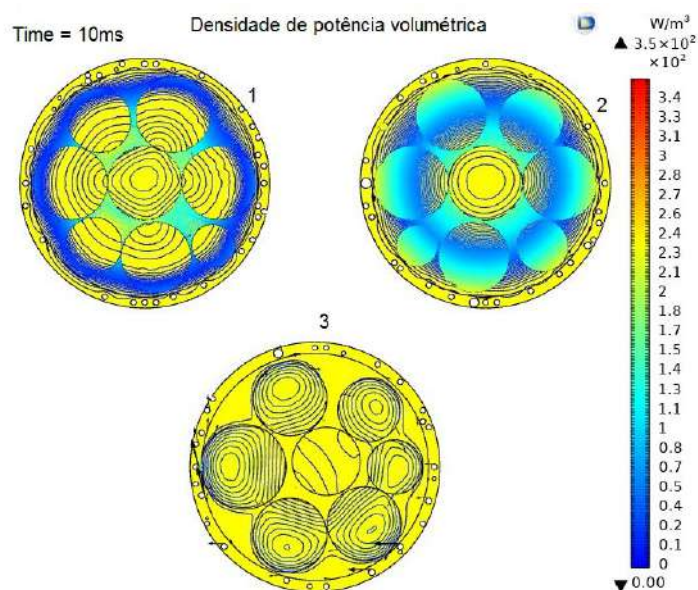


Figura 6.40: Cabo elétrico de alumínio com defeitos na isolação exibindo a densidade volumétrica de potência.

O interessante de destacar que o valor da densidade de potência volumétrica, para cabos sem defeitos vale 270 W/m^3 e para cabos com defeitos 350 W/m^3 . Nesse caso a densidade de potência aumentou na ordem de 60%. Para cabos com anomalias a energia térmica passa ser maior quando funciona com os vazios em sua isolação.

Agora, com o mesmo intuito de mostrar que ocorreu o aumento na densidade de corrente elétrica nos cabos de alumínio que pode ser vista nas Figuras 6.41 e 6.42.

Verificando as fases (1), (2) e (3) dos cabos sem defeitos. A densidade de corrente se distribuiu em quase toda a área do cabo e isso se dá ao fenômeno de grande importância quando se opera em corrente elétrica alternada, que é o efeito pelicular, onde neste trabalho não será falado com maiores detalhes. Para os cabos da Figura 6.42, a densidade de corrente nos condutores das fases (2) e (3), concentram-se nas bordas do metal condutor multiplexados de alumínio, chegando ao valor de $1,07 \cdot 10^5 A/m^2$.

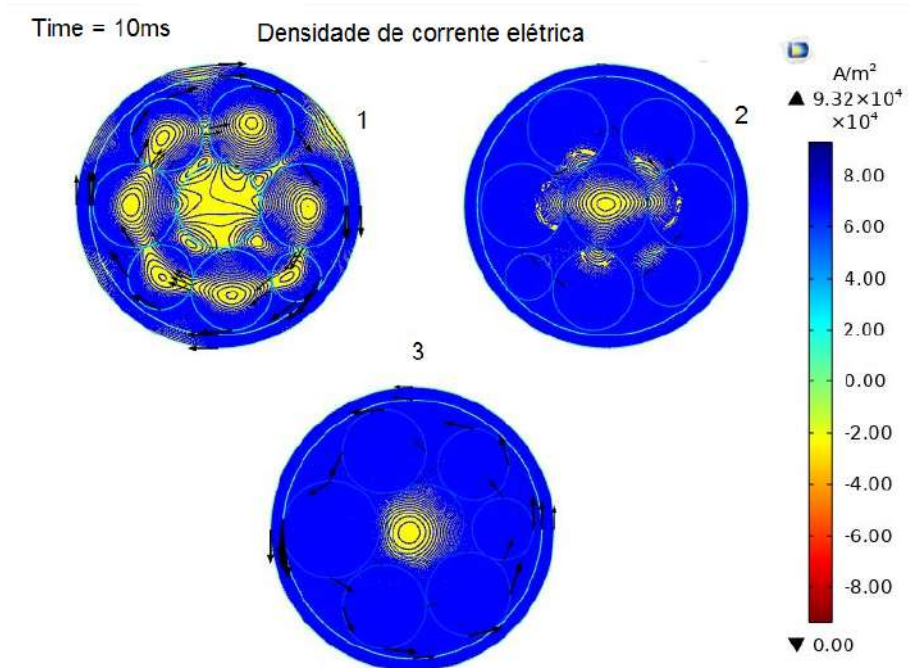


Figura 6.41: Cabo trifásico com núcleo multiplexados de alumínio sem defeitos na isolação com a área de seção transversal de $25 mm^2$.

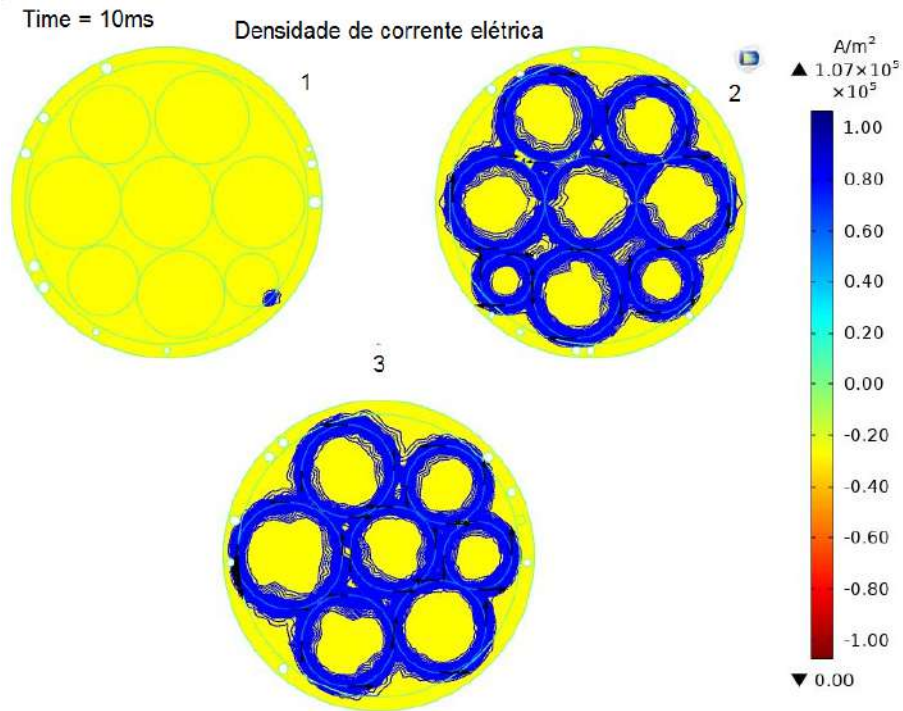


Figura 6.42: Modelo de uma única fase com núcleo multiplexados de alumínio com defeitos na isolação com a área de seção transversal de 25 mm^2 .

Analisando os resultados mostrados nas Figuras 6.43 e 6.44 são exibidos as distribuições de linha de densidades de campo magnético para diferentes instantes no interior do condutor de alumínio. As intensidades do vetor campo magnético são expressas por diferentes linhas e instantes de no máximo 10ms. Na Figura 6.43 pode se observar a distribuição da linha nos cabos sem anomalia interna. Figura 6.44, são os resultados da distribuição das linhas de densidade magnética com defeitos presumidos no núcleo do cabo.

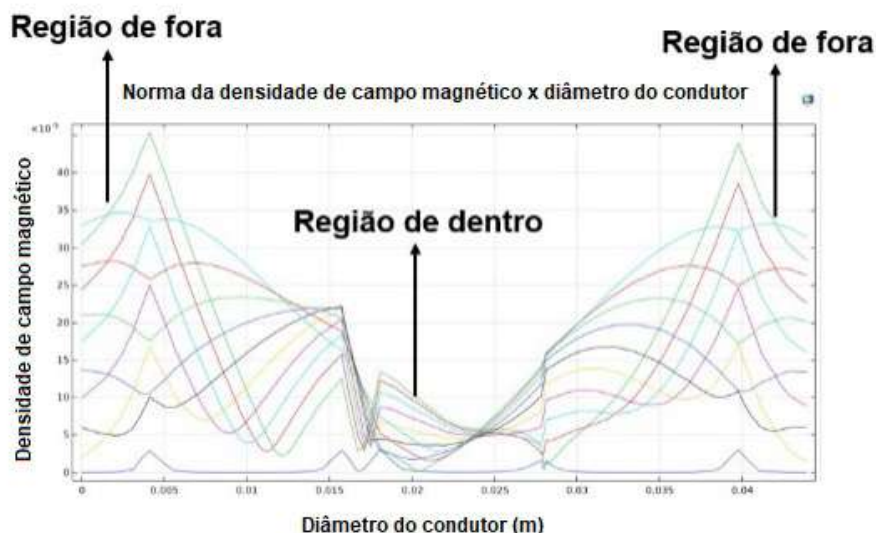


Figura 6.43: O gráfico que expressa a densidade de campo magnético com defeitos em 10ms, com a seção transversal de 25 mm²..

Por fim, os vazios no interior dos cabos elétricos também podem levar à acumulação de calor, o que pode causar o derretimento ou a quebra do isolamento do cabo. Isso pode resultar em incêndios e outros problemas de segurança. Portanto, é importante garantir que os cabos elétricos estejam bem isolados e livres de vazios para garantir um fornecimento seguro e eficiente de eletricidade.

O aumento do campo elétrico no interior do cabo pode gerar problemas. Sabendo que o campo elétrico é uma medida da força elétrica exercida sobre uma carga elétrica em um determinado ponto. Quando o campo elétrico é amplificado, no interior do cabo, podem ocorrer as seguintes consequências. Aumento da tensão elétrica onde o aumento do campo elétrico pode levar a um acréscimo da tensão elétrica no interior do cabo. Isso pode resultar em uma sobrecarga, o que pode evoluir para uma falha mecânica ou elétrica.

Aquecimento excessivo: O aumento do campo elétrico pode gerar calor no interior do cabo, resultando em um aquecimento excessivo. Isso pode levar a uma deterioração do isolamento do cabo e a um aumento da resistência elétrica e a falha do isolamento; por conta do aumento do campo elétrico pode acontecer um colapso do isolamento do cabo, o que resultará em um curto-circuito ou em uma fuga de corrente elétrica. E para finalizar, problemas com interferência eletromagnética.

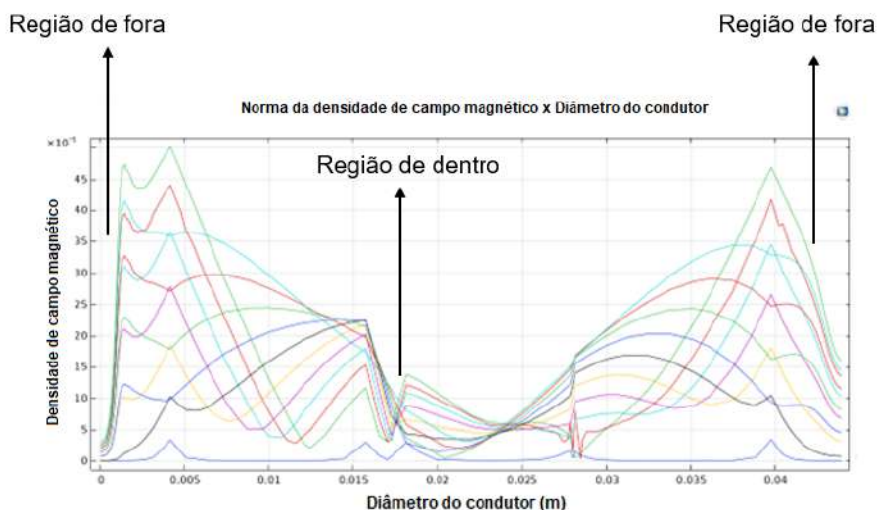


Figura 6.44: O gráfico que expressa a densidade de campo magnético com defeitos em 10ms, com a área de 25 mm^2 .

A densidade de fluxo magnético simulada para o alumínio apresentou grandes diferenças para as duas condições e foi observado um aumento no campo de fluxo magnético normalizado no gráfico para o volume de vazios inseridos. No gráfico, as intensidades do campo magnético estão sendo expressas por diferentes linhas e instantes de até 10ms. Os valores do campo magnético mostraram um aumento de $6,40 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ para $0,02 \cdot 10^{-3} \text{ T}$.

Os valores obtidos para o campo elétrico mostraram valores semelhantes de $1,80 \cdot 10^{-3} \text{ V/m}$ e $1,95 \cdot 10^{-3} \text{ V/m}$ para cabos ideais sem defeitos e vazios inseridos, respectivamente.

Para a densidade de potência volumétrica, apresentou acréscimo bem significativo, onde para os modelos de cabos sem defeitos foi de $270 \text{ (W/m}^3\text{)}$ e com vazios na isolação chegou a $350 \text{ (W/m}^3\text{)}$, isso comparado nos mesmos intervalos de tempo. Portanto, foi possível verificar que a inserção de vazios na camada isolante influenciou na potência dissipada podendo aumentar a temperatura do núcleo condutor.

Na natureza existem diversos elementos considerados bons condutores de energia elétrica, o mais estabelecido no mercado são esses dois metais, cobre e alumínio. Quais dos dois mais indicados para cada situação? Os fatores, físicos e químicos, considerados na seleção entre a condução feita por cabos de cobre ou alumínio são: Peso, custo, aquecimento e capacidade de condução elétrica. Logo, o tipo de aplicação se torna um fator mais importante na escolha entre dois materiais.

A vantagem do alumínio, é pelo custo, o alumínio é consideravelmente mais barato que o cobre, inclusive, comparativamente, o alumínio já chegou a ser oito vezes mais barato que um equivalente de cobre. Outras vantagens desses condutores é o peso e com isso resiste mais a deformação. Todas essas características reduzem os

custos do uso desse material transmissões maiores, pois as torres podem ser menos robustas e o espaçamento entre elas pode ser maior.

O cobre possui maior resistência aos fatores externos como oxidação e corrosão galvânica. Possui características que reduz o risco de superaquecimento das fiações. Além disso, o cobre é mais maleável que o alumínio, facilitando o uso para aplicações e instalações em que os cabos flexíveis são necessários ou desejáveis. Além disso, o cobre é melhor condutor que o alumínio. A resistividade dos respectivos materiais são $0,0172 \Omega \cdot mm^2/m$ e para o cobre e do alumínio $0,0282 \Omega \cdot mm^2/m$. O cobre pode ser mais caro, porém é mais resistente frente à degradação dos circuitos elétricos ao longo do tempo.

Tabela 6.7: Resultados dos cabos de cobre a alumínio sem defeitos.

25 mm²	Cobre	Alumínio
B(t)	$7,83 \cdot 10^{-4}T$	$6,40 \cdot 10^{-4}T$
E(t)	$5,24 \cdot 10^{-4}V/m$	$1,80 \cdot 10^{-3}V/m$
Q(t)	$23,9 W/m^3$	$270 W/m^3$
J(t)	$6,13 \cdot 10^4 A/m^2$	$9,32 \cdot 10^4 A/m^2$

Verificando os resultados da Tabela 6.7, pode-se perceber que o campo elétrico, a densidade de potência volumétrica e a densidade são maiores, e isso se dá por conta da resistividade do alumínio chegar a 65% mais alta do que a do cobre. Na Tabela 6.7 a densidade de campo elétrico é maior do que a do cobre. Isso pode ter sido um dos motivos que danificou os cabos de alumínio estudo pela microCT. Que mesmo com as amostras novas, surgiram problemas relacionados ao efeito Joule e o fenômeno da arborescência.

Dada a complexabilidade específica aos modelos 3D, diversos procedimentos foram adotados a fim de reduzir os custos de memória e tempo computacional relativos à simulação, tais como. Uso de simetrias, emprego de técnicas para a redução dos domínios, elaboração de refinamentos de malhas efetivos, redução dos domínios computacionais por meio de condições de fronteira, considerando a condutividade, reatividade e o dielétrico isotrópicos, entre outros. Todos esses procedimentos foram testados exaustivamente e suas possibilidades de simplificar os problemas, ao mesmo tempo, aprimorar a exatidão dos resultados.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

A técnica da microCT aplicada com simulações computacionais pode fornecer informações interessantes sobre a intensidade do campo magnético de cabos elétricos em operação. Com os ensaios de microCT na amostra de alumínio de 25mm^2 foi possível verificar que houve um aumento significativo no volume de vazios, inclusive com ruptura da isolação e observação do fenômeno de arborescência elétrica. O volume de vazios quantitativo e a distribuição de tamanho de vazios também foram estimados, fornecendo informações sobre o comportamento antes e depois do teste elétrico.

Apesar de apenas verificar diferenças significativas no cabo de alumínio com seção transversal de 25mm^2 . Em amostras de cabo elétrico de alumínio, apresenta grande possibilidade de ruptura dielétrica, onde a causa pode ser o fenômeno da arborescência elétrica. O efeito Joule causou vários danos devido à impedância do material. Com a simulação usando método dos elementos finitos, foi possível verificar que os volumes de vazios dentro do cabo foram carregados eletricamente, gerando campos eletromagnéticos ao redor dos volumes de vazios no condutor. Os mapas de cores dos campos elétricos gerados demonstraram a influência de volumes vazios. Esses vazios alteram os campos eletromagnéticos do cabo elétrico em operação, sua densidade de potência volumétrica e a densidade de corrente elétrica, e consequentemente modificar sua rotina nas redes elétricas.

A análise de cabos elétricos com núcleos de cobre mostrou que os volumes vazios mudaram ao longo do tempo em que o material condutor se expandiu. Foi possível verificar quantitativamente o volume de variações de vazios, bem como sua distribuição de tamanho. O uso de simulação complementou as informações obtidos com a microCT e demonstraram as variações de campos eletromagnéticos, densidade de potência volumétrica, densidade de corrente elétrica e a distribuição de linhas de fluxo magnético que causaram esses aumentos devido aos vazios. Ficou claro que os cabos de cobre com a mesma seção transversal que os de alumínio conduzem melhor a energia dissipada no condutor, mesmo dilatando os volumes vazios, não

foi observada quebra dielétrica. Assim, também foi possível estabelecer que esses parâmetros são diretamente influenciados pela inserção de vazios.

A simulação do campo elétrico neste complexo sistema previu uma relativa homogeneidade nas distribuições de campo elétrico dentro de cada cabo, que sempre uma fase interage muito fracamente com os outros, dos quais os dois restantes formam um dipolo relativamente mais fraco do que no caso magnético. Porém, para aqueles cabos com vazios inseridos, não apresenta essa homogeneidade nos condutores. Combinando os resultados obtiveram uma caracterização completa dos fenômenos que podem ocorrer em baixa tensão. Frequentemente fazendo com que o campo elétrico interaja com o isolamento do cabo e com o tempo pode causar problemas nos cabos de energia.

Referências Bibliográficas

- AHMED, Z., HUSSAIN, G. A., LEHTONEN, M., et al., 2016, “Analysis of partial discharge signals in medium voltage XLPE cables”. In: *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, pp. 1–6. IEEE.
- ALSHARIF, M., WALLACE, P., HEPBURN, D., et al., 2012, “FEM modelling of electric field and potential distributions of MV XLPE cables containing void defect”. In: *Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan*.
- ALZAMORA, A. M., OTHERS, 2020, “Cálculo de parâmetros de cabos isolados através do método de elementos finitos em três dimensões”, .
- ARAÚJO, R. G., OTHERS, 2002, “Análise das propriedades micro e macroscópicas de blindas de poliamida 4, 6/poliamida6”, .
- AZIMUDDIN, A., REFAAT, S. S., 2021, “Modeling and Simulation of Electrical Aging of Medium Voltage XLPE Power Cables Based on Finite Element Analysis”. In: *2021 22nd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, pp. 202–207. doi: 10.1109/MEPCON50283.2021.9686284.
- BARROS, F. B., 2002, “Métodos sem malha e método dos elementos finitos generalizados em análise não-linear de estruturas”, *São Carlos. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo*.
- BASTOS, J., SADOWSKI, N., 2003, “Maxwell equations, electrostatics, magnetostatics and magnetodynamic fields”, *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods; Bastos, JPA, Sadowski, N., Eds.*
- BHATTI, A. A., PENG, X., YANG, B., et al., 2021, “Effect of Void on Temperature Distribution in XLPE Power Cables by COMSOL Multiphysics Simulation”. In: *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, pp. 1–4. doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510219.

- BOGGS, S. A., 1990, “Partial discharge. III. Cavity-induced PD in solid dielectrics”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 6, n. 6, pp. 11–16.
- BULINSKI, A., BAMJI, S., DENSLEY, R., 1988, “Factors affecting the transition from a water tree to an electrical tree”. In: *Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 327–330. IEEE.
- BULINSKI, A., CRINE, J.-P., NOIRHOMME, B., et al., 1998, “Polymer oxidation and water treeing”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 5, n. 4, pp. 558–570. doi: 10.1109/94.708273. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/94.708273>>.
- BUSHBERG, J. T., BOONE, J. M., 2011, *The essential physics of medical imaging*. Lippincott Williams & Wilkins.
- CALABRESE, R. E., BURY, E., HAQUE, F., et al., 2022, “Effects of filler composition, loading, and geometry on the dielectric loss, partial discharge, and dielectric strength of liquid metal polymer composites”, *Composites Part B: Engineering*, v. 234, pp. 109686.
- CARDOSO, J. R., 2016, *Electromagnetics through the finite element method: a simplified approach using Maxwells equations*. Crc Press.
- CARVALHO, J. W. C., 2005, “A ARBORESCÊNCIA EM SÓLIDOS DIELÉTRICOS ANALISADA COMO UM TÍPICO CASO DE DIFUSÃO.” In: 8^o Congresso Brasileiro de Polímeros, ABPol, Águas de Lindoya-SP.
- CHEN, H., GAO, Y., ZHU, X., 2019, “Numerical calculation of electric field safety area of 10 kV transformer based on Maxwell”. In: *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, pp. 24–26. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881329.
- CHEN, Q., KONRAD, A., 1997, “A review of finite element open boundary techniques for static and quasi-static electromagnetic field problems”, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 33, n. 1, pp. 663–676.
- CHEN, Y., IMAI, T., OHKI, Y., et al., 2009, “Tree initiation time evaluation of epoxy/silica composites by partial discharge detection”. In: *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 404–407. doi: 10.1109/ICPADM.2009.5252405.
- CHENG, F., 2000, “Electric field distribution distorted by voids inside power cables”, .

- CHENGWEI, C., GANG, L., JIAN, L., et al., 2008, “The study on evaluation model for water in silicone oil of cable termination and simulate experiment”. In: *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 712–715. IEEE.
- CIRINO, A. W., DE PAULA, H., MESQUITA, R. C., et al., 2009, “Cable parameter variation due to skin and proximity effects: Determination by means of Finite Element Analysis”. In: *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 4073–4079. IEEE.
- CLAUSSEN, C., FAHLBUSCH, R., FELIX, R., et al., 1989, “CT and MR Imaging of Orbital Lesions”. In: *Computed Tomography and Magnetic Resonance Tomography of Intracranial Tumors*, Springer, pp. 576–625.
- CNUUDE, V., BOONE, M. N., 2013, “High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications”, *Earth-Science Reviews*, v. 123, pp. 1–17.
- CRINE, J.-P., 1998, “Electrical, chemical and mechanical processes in water treating”, *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, v. 5, n. 5, pp. 681–694.
- DE ARAÚJO, O. M. O., 2019, *METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE ROCHAS POR MEIO DIGITAL UTILIZANDO MICROCT E SIMULAÇÕES DE FLUXO DE FLUIDOS*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- DE ASSIS, M. C., “ANAIS DA VI JORNADA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA UEZO”, .
- DE PAIVA TELES, Á., 2016, *APLICAÇÃO DA MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X POR DUPLA-ENERGIA NA CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POROSOS*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- DE RAMÓN BALMASEDA, E. J., 2011, *Transformaciones basadas en el algoritmo Local Binary Pattern de imágenes capturadas con la Kinect para clasificación facial*. Tese de Mestrado.
- DE SIQUEIRA OLIVEIRA, M. F., 2012, *AValiação de Meios Geológicos Porosos por Técnicas Atômicas e Nucleares*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- DENSLEY, J., 2001a, “Ageing mechanisms and diagnostics for power cables - an overview”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 17, n. 1, pp. 14–22. doi: 10.1109/57.901613.
- DENSLEY, J., 2001b, “Ageing mechanisms and diagnostics for power cables-an overview”, *IEEE electrical insulation magazine*, v. 17, n. 1, pp. 14–22.
- DIAS, R. A., LIRA, G. R. S., COSTA, E. G., et al., 2018, “Skin effect comparative analysis in electric cables using computational simulations”. In: *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, pp. 1–6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395687.
- DIELÉTRICOS, P. E. M., 2005, *GUILHERME CUNHA DA SILVA*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná.
- DUARTE, P., 2001, “Danos à Camada Isolante de Cabos em Redes Não Blindadas Devido a Distorções do Campo Elétrico na Proximidade de Objetos Enterrados”, *Trabalho da disciplina Teoria Eletromagnética, 1º semestre de*.
- DUBICKAS, V., 2006, *On-line time domain reflectometry diagnostics of medium voltage XLPE power cables*. Tese de Doutorado, KTH.
- EICHHORN, R., 1983, “Treeing in solid organic dielectric materials”, *Engineering dielectrics*, v. 2, pp. 355–444.
- FELDKAMP, L. A., DAVIS, L. C., KRESS, J. W., 1984, “Practical cone-beam algorithm”, *Journal of the Optical Society of America A*, v. 1, n. 6 (jun.), pp. 612. doi: 10.1364/josaa.1.000612. Disponível em: <<https://doi.org/10.1364/josaa.1.000612>>.
- FLORKOWSKI, M., FLORKOWSKA, B., ZYDRON, P., 2016, “Observations of echo phenomena acquired from partial discharge measurements in voids”. In: *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICHVE.2016.7800820.
- FORSBERG, F., 2008, *X-ray microtomography and digital volume correlation for internal deformation and strain analysis*. Tese de Doutorado, Luleå tekniska universitet.
- FRAIJI, T. K., OTHERS, 2013, “Interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos, utilizando o ATP-uma análise da LT 525 KV Campos Novos-Blumenau”, .

- FREETH, T., BITSAKIS, Y., MOUSSAS, X., et al., 2006, “Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism”, *Nature*, v. 444, n. 7119, pp. 587–591.
- GJAERDE, A. C., 1997, “Multifactor ageing models-origin and similarities”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 13, n. 1, pp. 6–13.
- GRIFFITHS, D., 2012. “Introduction to electrodynamics (J. Smith, Ed.)(US”. .
- GROSSI, A., LANA, G., LIMA, D., et al., 2014, “Diagnóstico em Cabos de Média Tensão Utilizando o Método de Descargas Parciais”. In: *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 2862–2866.
- GULSKI, E., 1995, “Digital analysis of partial discharges”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 2, n. 5, pp. 822–837.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., 1996, “FUNDAMENTOS DE FÍSICA–Eletromagnetismo, Vol. 3, 4a Edição”, *LTC–Livros Técnicos e Científicos Editora SA*.
- HANLEY, T. L., BURFORD, R. P., FLEMING, R. J., et al., 2003, “A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 19, n. 1, pp. 13–24.
- HAYT JR, W. H., BUCK, J. A., 2013, *Eletromagnetismo*. Bookman Editora.
- HOBDELL, S., MAINWARING, S., HAMPTON, R., 2000, “An investigation of the factors affecting the growth of bow tie water trees in XLPE insulation systems”, .
- HORE 2017, SAMBIT E BASAK, S. E. H. N. E. D. S. E. M. M., “Estudos sobre o efeito da geometria e localização do vazio na distribuição do campo elétrico e descarga parcial no cabo de alimentação isolado XLPE por análise de elementos finitos usando simulação multifísica COMSOL”. In: *2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)*. doi: 10.1109/CERA.2017.8343330.
- HORVATH, D., WOOD, D., WYLIE, M., 2000, “Microscopic void characterization for assessing aging of electric cable insulation used in nuclear power stations”. In: *2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.00CH37132)*, v. 1, pp. 33–38 vol.1. doi: 10.1109/CEIDP.2000.885221.

- HOSSAM-ELDIN, A., AL HASAWI, W., ALI, M., 1998, “Study and modeling of water treeing in solid insulation of power cables”. In: *ICSD'98. Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (Cat. No. 98CH36132)*, pp. 89–92. IEEE.
- HVIDSTEN, S., FAREMO, H., ERIKSSON, R., et al., 2002, “Water treeing and condition assessment of high voltage XLPE cables”. In: *Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 02CH37316)*, pp. 112–115. IEEE.
- JIANG, H., OTHERS, 2009, “Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances”. In: *SPIE*.
- JUNG, J., PATSCH, R., 2000, “Selective detection of water trees in cables”, .
- KREUGER, F. H., 1989, *Partial discharge detection in high-voltage equipment*. Butterworth-Heinemann.
- LANCA, M., FU, M., NEAGU, E., et al., 2007, “Space charge analysis of electrothermally aged XLPE cable insulation”, *Journal of non-crystalline solids*, v. 353, n. 47-51, pp. 4462–4466.
- LANDIS, E. N., KEANE, D. T., 2010, “X-ray microtomography”, *Materials Characterization*, v. 61, n. 12 (dez.), pp. 1305–1316. doi: 10.1016/j.matchar.2010.09.012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.09.012>>.
- LESZCZYŃSKI, B., SKRZAT, J., KOZERSKA, M., et al., 2014, “Three dimensional visualisation and morphometry of bone samples studied in microcomputed tomography (micro-CT)”, *Folia morphologica*, v. 73, n. 4, pp. 422–428.
- LIMA, F. N. D., OTHERS, 2008a, “Uma contribuição à estimativa de indicadores de desempenho do estado operacional de cabos isolados sob a ação das arborescências”, .
- LIMA, F. N. D., OTHERS, 2008b, “Uma contribuição à estimativa de indicadores de desempenho do estado operacional de cabos isolados sob a ação das arborescências”, .
- LORIGAN, P., 1999, “A new generation tree retardant insulation compound for medium voltage power cable”. In: *1999 Rural Electric Power Conference (Cat. No. 99CH36302)*, pp. D2–1. IEEE.

- MACHADO, G. D. O., OTHERS, 2022, “Análise dos impactos das distorções harmônicas de tensão sobre a ocorrência de descargas parciais utilizando um modelo de elementos finitos”, .
- MAIRE, E., WITHERS, P. J., 2014, “Quantitative X-ray tomography”, *International materials reviews*, v. 59, n. 1, pp. 1–43.
- MASON, J. H., 1951, “The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges”, *Proceedings of the IEE-Part I: General*, v. 98, n. 109, pp. 44–59.
- MEEKER, D., 2005, “Finite Element Method Magnetics, User’s Manual, V3. 4”, <http://femm.foster-miller.net/Archives/doc/manual34.pdf>.
- MEIER, B. R., CHOWDHURY, B., 2019, “A Simple Approach to Conductor Sizing and Prolonging the Thermal Life of Electrical Cables Below 1000 V for Industrial and Commercial Applications”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 55, n. 5, pp. 4507–4514. doi: 10.1109/TIA.2019.2928238.
- MUSA, U., MATI, A. A., MAS’ UD, A. A., et al., 2021, “Finite Element Modeling of Fields Distributions in a Three-core XLPE Cable with Multiple Cavities”. In: *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, pp. 1–4. IEEE.
- NAIR, M. P., NITHIYANANTHAN, K., 2016, “An effective cable sizing procedure model for industries and commercial buildings”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, v. 6, n. 1, pp. 34.
- NOGUEIRA, L. P., 2011, *Microtomografia Computadorizada e Microfluorescência de raios X por luz síncrotron para avaliação dos efeitos da radiação em microestruturas ósseas de ratos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- OH, D.-H., KIM, H.-S., LEE, B.-W., 2020, “Novel Diagnostic Method of DC Void Discharge in High Temperature Superconducting Cable Based on Pulse Sequence Analysis”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 30, n. 4, pp. 1–5. doi: 10.1109/TASC.2020.2974437.
- PATSCH, R., 1988, “Water treeing in cable insulation—are laboratory tests meaningful?” In: *1988 Fifth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications*, pp. 242–245. IET.
- PATSCH, R., JUNG, J., 1999, “Water trees in cables: generation and detection”, *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, v. 146, n. 5, pp. 253–259.

- PINHEIRO, C. J. G., 2008, *Desenvolvimento de um algoritmo para quantificação de microestruturas em tomografias 3D de objetos complexos obtidas com radiação síncrotron*. Tese de Doutorado, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PIRKER, A., SCHICHLER, U., 2016, “Partial discharges at DC voltage-measurement and pattern recognition”. In: *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, pp. 287–290. IEEE.
- QUOC, T., SABONNADIÈRE, J., FANDINO, J., 1993, “A method for improving voltage stability based on critical voltage”. In: *Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference-SMC*, v. 3, pp. 746–750. IEEE.
- RAO, S. S., 2017, *The finite element method in engineering*. Butterworth-heinemann.
- REITZ, J., MILFORD, F., CHRISTY, R., 1982, “Fundamentos da teoria eletromagnética, tradução RB Sander e C”, *Duarte, Editora Campus, Rio de Janeiro, 3a. edição*.
- REMEYSEN, K., SWENNEN, R., 2008, “Application of microfocus computed tomography in carbonate reservoir characterization: Possibilities and limitations”, *Marine and Petroleum Geology*, v. 25, n. 6, pp. 486–499.
- SAITO, T., SUZUOKI, Y., KOMORI, F., et al., 2005, “Inception of electrical tree from water tree degradation-Effect of impulse voltage application and drying of water tree”. In: *CEIDP’05. 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005.*, pp. 540–543. IEEE.
- SALES, E., 2010, *Estudo da qualidade óssea através das técnicas de microtomografia e microfluorescência de raios x*. Tese de Doutorado, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SALON, S., SALON, S., 1995, “Calculation of Force and Torque”, *Finite Element Analysis of Electrical Machines*, pp. 97–123.
- SARMA, H., 1999, “Accelerated aging of TRXLPE insulated cables using water-filled tanks”. In: *1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333)*, v. 1, pp. 40–45. IEEE.
- SCHMIDT, W., 2019, *Electrical materials vol. 1: conductors and semiconductors*, v. 1. Editora Blucher.

- SCHURCH, R., ROWLAND, S. M., BRADLEY, R. S., et al., 2014, “Imaging and analysis techniques for electrical trees using X-ray computed tomography”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 21, n. 1, pp. 53–63.
- SCHURCH, R., ROWLAND, S. M., BRADLEY, R. S., et al., 2015, “Comparison and combination of imaging techniques for three dimensional analysis of electrical trees”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 22, n. 2, pp. 709–719. doi: 10.1109/TDEI.2014.004730.
- SEONG, J.-K., CHOI, W., KHAN, U. A., et al., 2015, “Correlation between DC electric field intensity and electrical breakdown of butt gap in LN2/PPLP composite insulation system”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 22, n. 1, pp. 7–13.
- SHAHSAVARIAN, T., SHAHRTASH, S. M., 2015, “Modelling of aged cavities for partial discharge in power cable insulation”, *IET Science, Measurement & Technology*, v. 9, n. 6, pp. 661–670.
- SITTNER, J., GODINHO, J. R. A., RENNO, A. D., et al., 2020, “Spectral X-ray computed micro tomography: 3-dimensional chemical imaging”, *X-Ray Spectrometry*, v. 50, n. 2 (out.), pp. 92–105. doi: 10.1002/xrs.3200. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/xrs.3200>>.
- SORIANO, H. L., 2003, *Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas Vol. 48*. Edusp.
- STEENNIS, E., KREUGER, F., 1990, “Water treeing in polyethylene cables”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 25, n. 5, pp. 989–1028. doi: 10.1109/14.59869. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/14.59869>>.
- SU, J., DU, B., LI, J., et al., 2020, “Electrical tree degradation in high-voltage cable insulation: progress and challenges”, *High voltage*, v. 5, n. 4, pp. 353–364.
- TANAKA, T., GREENWOOD, A., 1978, “Effects of charge injection and extraction on tree initiation in polyethylene”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, , n. 5, pp. 1749–1759.
- TIAN, Y., LEWIN, P., WILKINSON, J., et al., 2004, “Continuous on-line monitoring of partial discharges in high voltage cables”. In: *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 454–457. doi: 10.1109/ELINSL.2004.1380640.

- TOMOGRAPHY, T. B. C., 2008. “From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT”. .
- WANG, G., LIN, T.-H., CHENG, P., et al., 1993, “A general cone-beam reconstruction algorithm”, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, v. 12, n. 3, pp. 486–496. doi: 10.1109/42.241876. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/42.241876>>.
- WANG, Y., MILLER, J., 2020, “Current developments and applications of micro-CT for the 3D analysis of multiphase mineral systems in geo-metallurgy”, *Earth-Science Reviews*, v. 211 (dez.), pp. 103406. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103406. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103406>>.
- WILDENSCHILD, D., SHEPPARD, A. P., 2013, “X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems”, *Advances in Water resources*, v. 51, pp. 217–246.
- XIA, Z., BHATTI, A. A., PENG, X., et al., 2020, “Electric Field and Temperature Distribution of High Voltage Cables with the Addition of Particles based on COMSOL Simulation”. In: *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9280024.
- YESSI, SUPARTA, G. B., SWALAGANATA, G., 2018, “Measurement of Thermal Expansion Coefficient on Electric Cable Using X-Ray Digital Microradiography”. In: *2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, pp. 345–349. doi: 10.1109/EECSI.2018.8752736.
- YU, Z., THIBAUT, J.-B., BOUMAN, C., et al., 2009, “Edge-localized iterative reconstruction for computed tomography”. In: *10th International Meeting on Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine*.
- ZHU, Y., YANG, F., XIE, X., et al., 2018, “Studies on electric field distribution and partial discharges of XLPE cable at DC voltage”. In: *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, pp. 562–565. doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401106.
- ZONG-HUAI, F., YOSHIMURA, N., YANAGIWARA, M., 1994, “The research on microstructure of water trees in polyethylene”. In: *Proceedings of 1994*

4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), v. 1, pp. 440–443. IEEE.

Apêndice A

Anexo

Artigo publicado com a técnica da microCT.

Received: 28 September 2022 | Revised: 27 January 2023 | Accepted: 6 March 2023
DOI: 10.1002/xrs.3363

RESEARCH ARTICLE

X-RAY SPECTROMETRY WILEY

Imaging techniques as tool in the characterization of the impact of silica nanofluid in Indiana limestone

Olga M. O. de Araújo¹ | Keerti V. Sharma² | Caio M. S. F. F. dos Santos¹ |
Marcus V. S. da Silva¹ | Ramon S. dos Santos³ | Marcelino J. Anjos³ |
Davi F. Oliveira¹ | Alessandra S. Machado¹ | Ricardo T. Lopes¹

¹Nuclear Instrumentation Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

²Center of Innovation for Flow through Porous Media (COIFPM), University of Wyoming, Laramie, Wyoming, USA

³Physics Institute, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

Correspondence

Olga M. O. de Araújo, Nuclear Instrumentation Laboratory, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.
Email: olgaufjr@ufrrj.br

Funding information

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior; Grant/Award Number: 8887.476179/2020/00

Abstract

Indiana limestone is composed mainly of calcite and aragonite minerals, which are different crystalline forms of calcium carbonate. Due to its composition of almost pure calcium carbonate (around 97%), it is widely used in the petroleum industry as a standard porous media for laboratory experiments with a huge scope in industrial applications. A method to improve oil recovery is associated with the use of nanoparticles (NP). One of the most promising is presented to be that of silica (Si) NP, because of their compatibility with the reservoir and subsurface abundance. In this work, we applied Si NP at a concentration of 0.5%, prepared in a base fluid of 1000 ppm in crude oil, injected in Indiana limestone and tested them with microtomography (microCT) and micro x-ray fluorescence (microXRF) techniques to evaluate the impact of the treatment. Combining morphological results with the mapping of the elements, a more complete characterization of the sample is possible for a better understanding of these interactions applied in oil field industries.

KEYWORDS

Indiana limestone, microCT, microXRF, oil recovery, silica nanoparticles

1 | INTRODUCTION

In oilfield operations, one of the most serious problems is the unfavorable change in the pore space of the reservoir rock, which leads to formation damage. These damages are caused by different factors, including physical, chemical, hydrodynamic, thermal, mechanical, and biological damage throughout drilling and oil production operations.^{1,2} During the injection of high-pressure fluids into the reservoir, permanent damage from fine migration may occur. Furthermore, an undesirable deposition between the formation water and the injected fluids can occur, leading to a permanent reduction in permeability.^{3,4} Pore blockage is another significant cause of formation damage. It occurs in oil-containing layers caused by the retention or absorption of

flooded chemicals in the reservoir, which impedes the effective flow of chemical solutions, such as polymers, surfactants, and nanoparticles (NP). This pore blockage decreases the fluid injection capacity, and it even becomes necessary for the well to be deactivated in cases of a reservoir with very low permeability.^{5,6}

In recent years, studies have been carried out to evaluate the oil recovery associated with the injection of NP of 1 to 100 nm. NP are used in oilfield applications as they improve rheology, wettability, and oil recovery.⁷ When the NP is properly mixed into the base fluid, such as oil, water, and glycol, the solution is then called a nanofluid. Some NPs, such as titania, aluminum oxide, zirconium oxide, and silica (Si), have been used to synthesize stable nanofluids for wettability alteration and

Apêndice B

Trabalho submetido

Trabalho submetido com a técnica da microCT

EVALUATION OF LOW VOLTAGE ON ELECTRICAL CABLES USING MICROCT AND COMSOL MULTIPHYSICS

Marcus V S Silva^a, Olga M O de Araújo^a, Davi F de Oliveira^b, Cleiton M Freitas^b, Ricardo T Lopes^a
^a Nuclear Engineering Program at COPPE / UFRJ, Federal University of Rio de Janeiro.
Av. Horácio Macedo, 2030, 21941-941-Rio de Janeiro, RJ-Brazil.
^b Electrical Engineering Department / UERJ, State Universe of Rio de Janeiro.
R. São Francisco Xavier, 524- Maracanã, Rio de Janeiro - RJ, 20550-900 - Rio de Janeiro, RJ-
Brazil.

Abstract

Safety and quality are great challenges for electrical engineering and problems related to unscheduled system interruption due to device failures are a big problem, especially when these fails are caused by voids on power cable insulation. The main objective of this work is to evaluate the effect of current pulses, what usually happens in transients, on the proliferation of voids in insulating layer of electrical cables. For this, an X-ray microtomography system (microCT) was used to quantify voids on insulating layers of electrical cables of copper (Cu) and aluminum (Al) with different section before and after pulses of electrical current. The results showed an increase of voids caused by current pulses and increase of temperature inside conductor. Besides that, it was observed that current pulses increase the agglomeration of small imperfections into voids with larger diameters. The Comsol Multiphysics software, that uses Finite Element Method (FEM), was executed to simulate the low voltage cables with voids in insulating layer with Cu and Al conductor and describes how it affects electromagnetic and thermal fields. Results showed that cables with more quantity of voids have higher density of electromagnetic fields, magnetic fluxes and volumetric power density and dissipate more thermal energy than perfect cables (without voids).

Keywords: MicroCT, Electric Arboroscence, Electrical Cables, Finite Elements Method.

1. INTRODUCTION

Like living beings, materials and components of electrical installations undergo a natural process of aging and dielectric deterioration, which increases failure rates and loss of performance in insulation systems. Thermal and electric phenomenon promotes deterioration of cables and are related to environmental conditions such as humidity, and presence of contaminants or voids in insulating material. These phenomenon are responsible for the loss or drastic decrease of physical and chemical properties of materials and their electrical properties over time. Natural aging is the reason of defects in electrical installations, which can raise the risk of fire and compromise the integrity of the installation and the safety of people. Voids inside insulating layer of cables can be charged and expanded over time. The dilation and contraction, that happens by temperature variation inside cables, increase voids in insulating layer and lead to breakdown of the dielectric [1,2]. In addition, electrical currents associated with displacement of charges within void volumes heat insulating layer, especially in cases of voltage spikes. Under these conditions, electrical arboroscence can be generated and develop faults in the network [3,4]. Electrical arboroscence is a phenomenon of electrical pre-rupture associated with existence of voids and impurities inside insulating layer. It has the potential to distort the electric field in small regions of insulating materials of power cables [5,6] and is the main mechanism of failures in extruded dielectrics [7-9].

Apêndice C

Procedimentos da utilização do Comsol Multiphysics

Iniciando o programa seleciona-se a opção 2D para dimensionar o problema a ser investigado. Após essa escolha, foi realizado os seguintes passos: **Select Physics** → **AC/DC** → **Magnetics Fields (mf)**. A seguir foi feita uma avaliação da interface física dos cabos elétricos. No programa, selecionam-se as opções de configurações para a entrada das constantes do problema. Com isso, são escolhidos o tipo de estudo ser analisado. Para a corrente alternada, optou-se por **times dependent** (Select Study).

A implementação geométrica dos cabos elétricos que neste caso são círculos. A entrada destes valores e geometria das substâncias que corresponde a cada região, assim como as condições de contorno de cada região, escolhendo a opção **Model Builder**. No Comsol, deve-se definir as grandezas físicas utilizadas para a simulação do objeto que deseja ser estudado, as regiões para as atribuições dos materiais que as constituem.

C.1 Seção de dimensionalidade do problema.

Iniciando o programa, se seleciona a opção 2D, conforme a Figura C.1



Figura C.1: Selecionando dimensionalidade do problema a ser simulado.

C.2 Seleção dos módulos físicos

Foi feita a escolha SELECT PHYSICS → AC/DC → MAGNETIC FIELDS (mf), conforme a C.2.

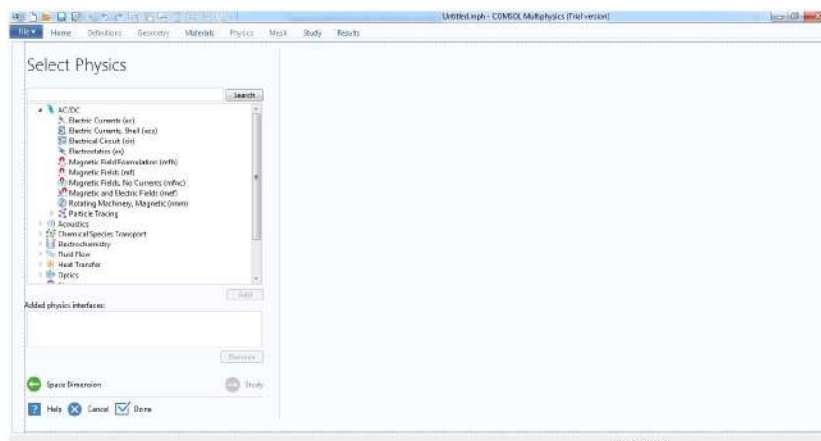


Figura C.2: Seleção dos módulos físicos a serem utilizados na simulação.

C.3 Seleção de variáveis

Em seguida se faz a avaliação de interface física dos cabos elétricos. No COMSOL, selecionam-se as opções e configurações para entrada das componentes do problema. Também se deve definir os eixos e a grade. Abrindo a aba "OPTIONS" fazem-se as seleções mostradas na Figura C3.



Figura C.3: Seleção das variáveis.

C.4 Seleção do regime temporal

Em seguida seleciona-se o tipo de estudo a ser analisado. No presente caso, optou-se por TIMES DEPENDENT (Select Study), conforme a Figura C4.

O estudo dependente do tempo é usado quando variáveis de campo mudam com o tempo. No eletromagnetismo é usado para calcular os campos eletromagnéticos transitórios, incluindo a propagação de ondas eletromagnética no domínio do tempo. Na transferência de calor é utilizado para calcular as variações de temperatura ao longo do tempo. Em mecânica de sólidos é usado para calcular a deformação varável com o tempo e de movimento de sólidos sujeita as cargas transitórias Em acústica é usado para calcular a variação do tempo de propagação das ondas de pressão.

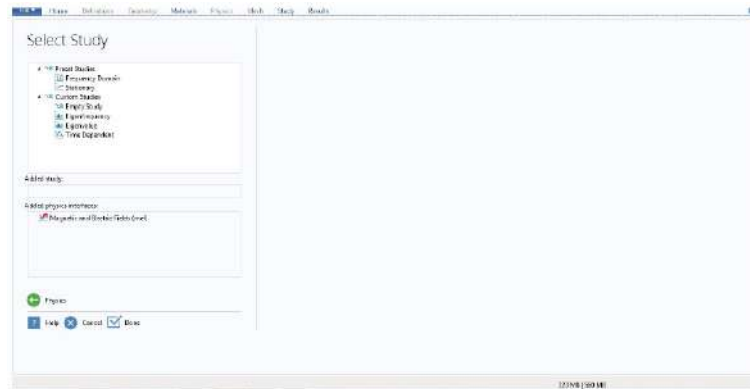


Figura C.4: Seleção do tipo de estudo.

C.5 Geometria

Seleciona-se a geometria dos cabos elétricos, que neste caso são círculos. Optou-se por simular um sistema trifásico, composto por três cabos em um único duto, operando a 1 kV e com uma corrente de 250 A (valores alternados). Cada cabo, como visto nos modelos acima, e uma fase, isto é a corrente está defasada entre os cabos de potência. A defasagem entre cada fase é de 120° elétricos.

Para esta simulação, uma simplificação foi feita. Não se usou blindagem de condutor, tendo em vista que os modelos dos cabos não tinham, e que o sistema computacional constrói círculos ideais. Estas decisões também consideram o fato de que as pequenas dimensões destas coroas circulares introduzam razões de aspectos que não permitam convergência da solução do problema.

Os modelos de cada cabo possuem seções transversais de 25 mm^2 , 35 mm^2 e 50 mm^2 . Nestas condições, foi utilizado dois cabos sendo com núcleo de cobre, a espessura do isolador, sendo o PVC, é 1 cm . E em alguns modelos foi colocado os vazios e selecionado o material ar.

A entrada desses valores geométricos, das substâncias que correspondem a cada região, assim como as condições de contorno de cada região, se dá na aba MODEL BUILDER, conforme a Figura C.5.

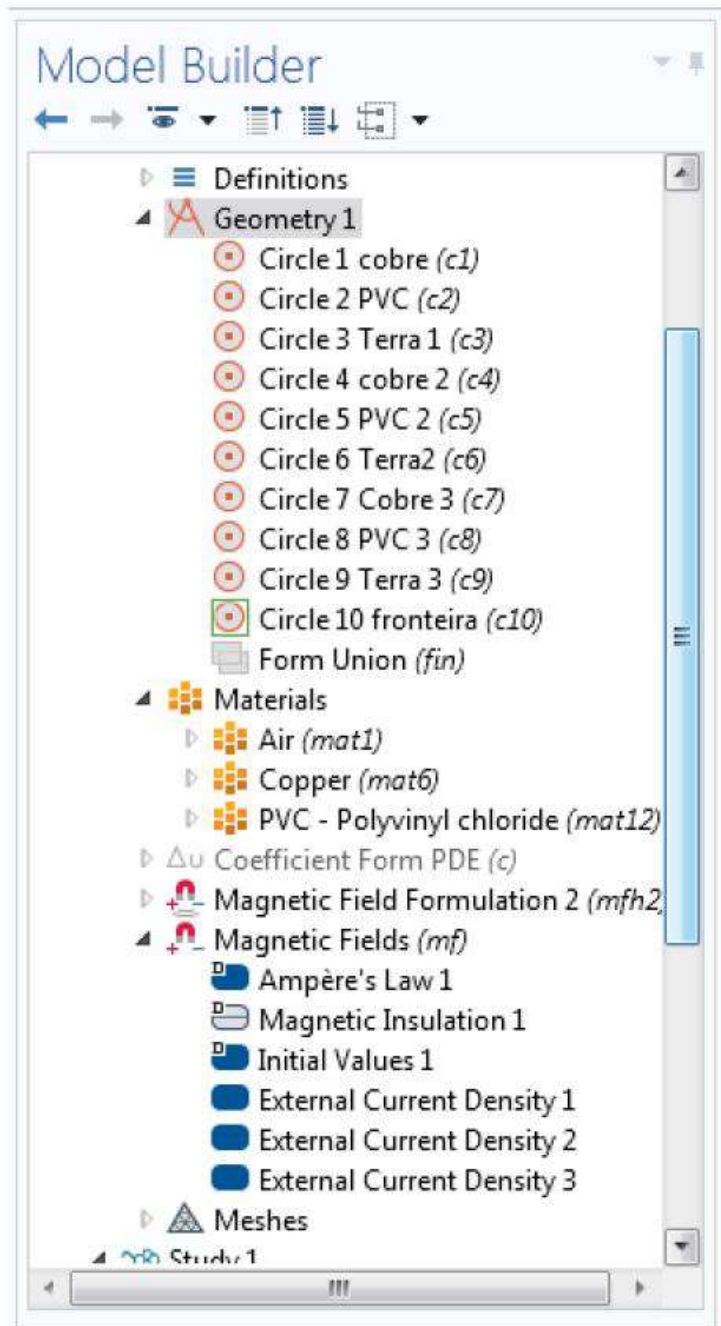


Figura C.5: As janelas para a definição das geometrias no COMSOL.

A Figura C5, obtida com esta entrada de dados na aba MODEL BUILDER é apresentada na aba GRAPHICS, conforme a Figura C.6.

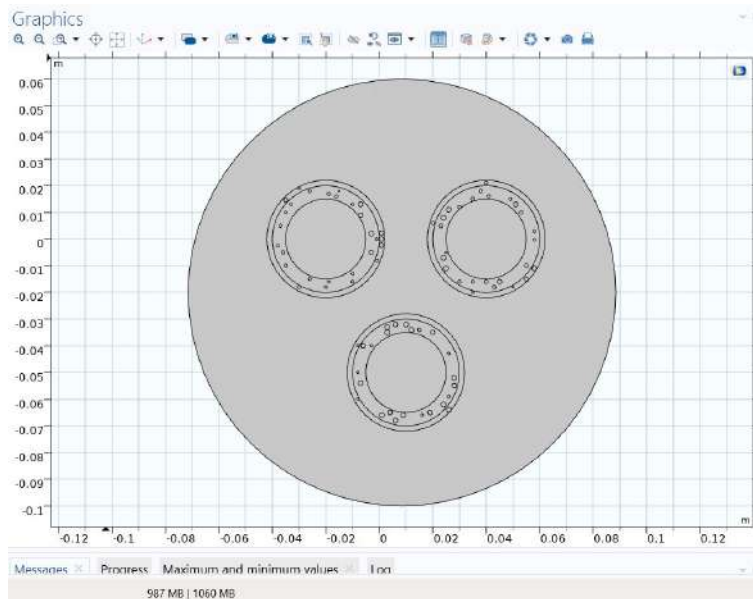


Figura C.6: O desenho das regiões a serem simuladas na aba GRAPHICS.

C.6 Entrada de dados dos materiais usados

No COMSOL, deve-se definir as grandezas físicas utilizadas para a simulação do objeto que deseja ser estudado, as regiões para atribuição dos materiais que as constituem, conforme ilustrado nas Figuras C.7 e C.8.

Settings
Parameters

Label: Parameters 1

Parameters

Name	Expression	Value	Description
I0	250[A]	250 A	
w	376.8[rad/s]	376.8 rad/s	
t	1[s]	1 s	
I1	$I0 \cdot \sin(w \cdot t)$	-47.489 A	
J1	$I1 / (\pi \cdot r^2)$	-23431 A	
r	0.0254	0.0254	
Pi	3.1415	3.1415	
I2	$I0 \cdot \sin(w \cdot t + 2 \cdot \pi / 3)$	236.31 A	
J2	$I2 / (\pi \cdot r^2)$	1.1659E5 A	
I3	$I0 \cdot \sin(w \cdot t + 4 \cdot \pi / 3)$	-188.82 A	
J3	$I3 / (\pi \cdot r^2)$	-93163 A	
V0	1000[V]	1000 V	
V1	$V0 \cdot \sin(w \cdot t)$	-189.96 V	
Vt	0[V]	0 V	
V2	$V0 \cdot \sin(w \cdot t + 2 \cdot \pi / 3)$	945.24 V	
V3	$V0 \cdot \sin(w \cdot t + 4 \cdot \pi / 3)$	-755.28 V	

Figura C.7: Caixa de diálogo SETTINGS PARAMETERS..

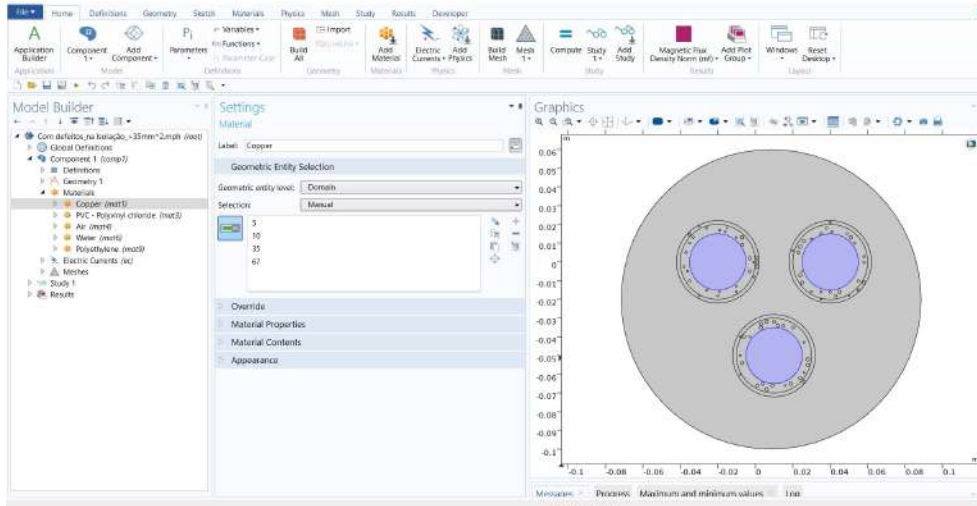


Figura C.8: Telas de atribuições das regiões cobre.

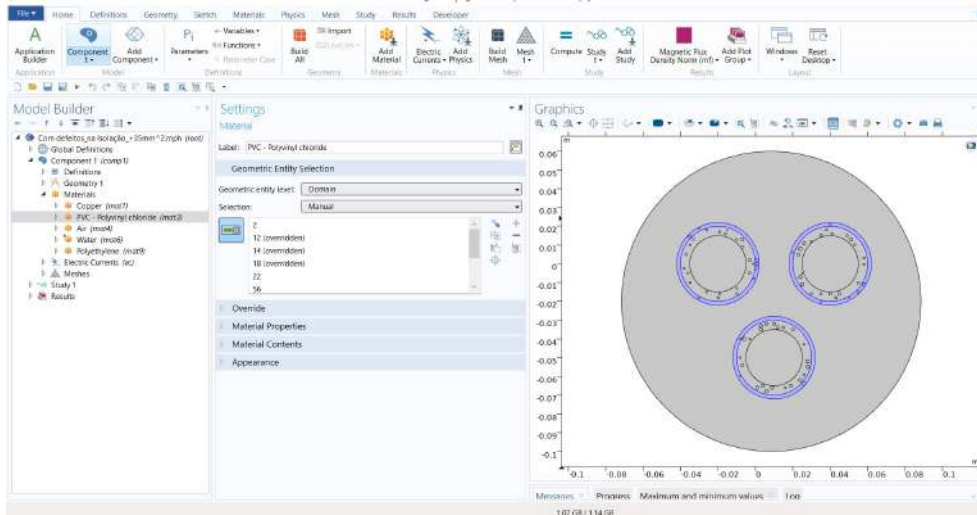


Figura C.9: Telas de atribuições das regiões PVC.

O campo elétrico radial é calculado pelo gradiente da ddp entre o condutor (senoidal no tempo) e o potencial da Terra (nulo) na circunferência externa. Este cálculo é feito automaticamente pelo COMSOL usando as equações de Maxwell e a relação (6.3), com as condições previamente discutidas.

Quanto a componente do campo elétrico na direção \hat{k} , arbitrando que a densidade de corrente elétrica está homogeneamente aplicada nesta direção \hat{k} , atravessando uma superfície S , e assim fica expressa como: $\hat{J} = I/A \hat{k}$.

Uma janela do COMSOL para entrada dos dados referentes a densidade de corrente senoidal aplicada é vista na Figura C.9.

As condições discutidas são implementadas a partir das equações obrigatoriamente fornecidas pelo COMSOL usando o MÓDULO MAGNETIC FIELDS (mf),

atribuindo cuidadosamente os valores das grandezas físicas. Uma das janelas para estas entradas pode ser vista na Figura C.9.

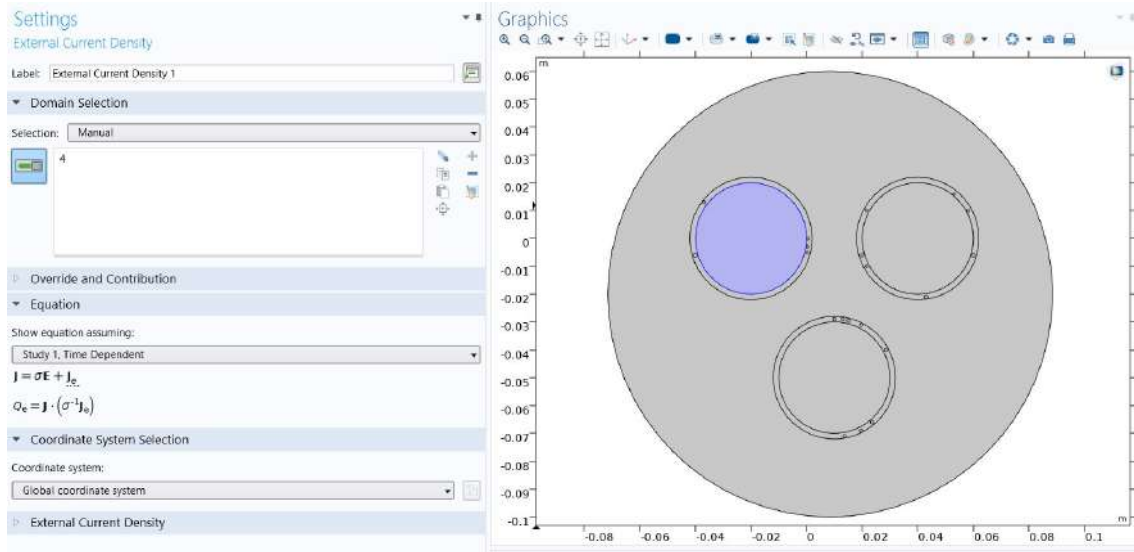


Figura C.10: Detalhe da entrada de dados na janela fornecida pelo COMSOL.

C.7 Discretização do espaço e a mesh

Por fim foram selecionados elementos triangulares e foi refinada a discretização do espaço, formando uma rede (mesh).

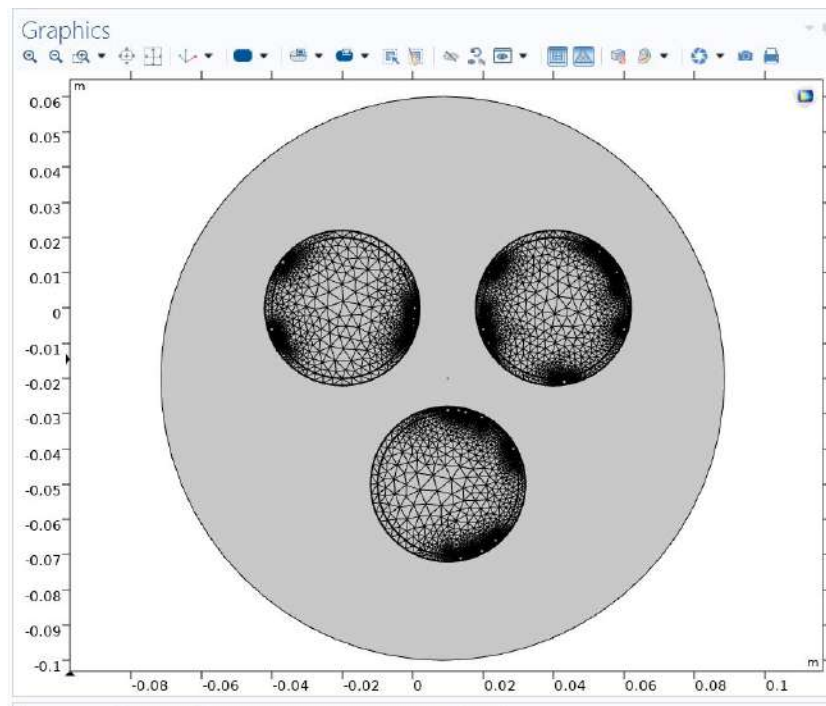


Figura C.11: Aba mostrando o sistema com 3 cabos recebendo a discretização do espaço com a construção da malha (mesh) com os elementos finitos triangulares.