



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RAIRON FERNANDES DE AZEVÊDO CRUZ

SIMULAÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADOR

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2013

RAIRON FERNANDES DE AZEVÊDO CRUZ

SIMULAÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADOR

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa, DSc.

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2013

RAIRON FERNANDES DE AZEVÊDO CRUZ

SIMULAÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICOS EM TRANSFORMADOR

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Edson Guedes da Costa, DSc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho às boas pessoas que temos o prazer de conviver diariamente, nos fazendo crer que vale a pena continuar acreditando na humanidade e esperando sempre por dias ainda melhores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que em sua infinita bondade me deu a oportunidade de nascer e viver num lugar maravilhoso, de natureza extraordinariamente abundante e cercado de seres humanos incríveis sem os quais não faria sentido algum essa caminhada que é a vida. Ainda no plano espiritual agradeço a São Francisco de Assis pelo exemplo que sempre me fascinou desde a infância e foi sempre uma fortaleza onde obtive abrigo, renovação e força infinita para continuar com fé e coragem.

Dentre esses companheiros de jornada, tenho carinho e agradecimento especial aos meus pais que não mediram esforços para me proporcionar uma boa educação, bagagem necessária e suficiente para enfrentar a vida com leveza, coragem e responsabilidade. Além do apoio material e emocional que me permitiu seguir sempre o caminho do respeito e da bondade com todos e alcançar os objetivos que tracei.

À minha amada namorada Renata, companheira, amiga, confidente e colega de curso, durante essa extenuante e recompensadora jornada que foi nossa graduação. Me fez perceber que existem pessoas nascidas umas para as outras e que não há dificuldade que não possa ser superada se há amor.

Agradeço aos meus professores de toda a vida e muito especialmente aos docentes do curso de Engenharia Elétrica que ultrapassam todas as expectativas de preparo, dedicação, responsabilidade e comprometimento. Em especial ao professor Edson Guedes que me orientou no último ano de curso na elaboração desse trabalho e nas disciplinas Técnicas de Alta Tensão e Equipamentos Elétricos, tendo sido um exemplo de dedicação monástica ao trabalho, integridade e confiança na plena capacidade de cada pessoa. Agradecimento especial também aos demais professores e funcionários do LAT que me fizeram entender a importância de um time sintonizado. Agradeço especialmente também ao professor Mário Araújo pelo excelentíssimo curso de eletromagnetismo ministrado no início do ciclo profissional do curso que me possibilitou o entendimento dos principais conceitos utilizados no curso de engenharia elétrica e, em especial, na elaboração do trabalho de conclusão de curso.

Aos amigos do curso, indispensáveis nos momentos de estudo, que me fizeram compreender que quando não estamos sós, nenhuma tarefa é impossível. Em especial ao amigo Tiago pela confiança e consideração de ter me indicado para participar desse projeto e pelo prazer da convivência que transformou o trabalho em diversão e as dificuldades em experiências de aprendizado e aos colegas Igor e Newton pelo auxílio na utilização do software Comsol. Ainda em relação à ferramenta computacional utilizada, agradeço ao bolsista de iniciação científica Rafael Mendonça pela presteza em auxiliar-me na utilização do programa e aos alunos de mestrado Jalberth e Valdemir pelo auxílio na disciplina Técnicas de Alta tensão que serviu como base teórica para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ainda aos meus animais de estimação Vinny (*em memória*) e Pitoco pelo exemplo de amor incondicional e companheirismo que, em seu exemplo animal, me permitiram melhorar o relacionamento interpessoal.

*“Comece fazendo o necessário,
depois o que é possível e, de repente,
você estará fazendo o impossível.”*

São Francisco de Assis.

RESUMO

Este trabalho trata da simulação de campos elétricos em um transformador para ensaios com tensões nominais 0,22/50 kV. Consiste na simulação computacional e análise de resultados utilizando o software COMSOL MULTIPHYSICS, baseado no método numérico “Método dos Elementos Finitos (MEF)”. O equipamento simulado é um transformador para ensaios projetado no Laboratório de Alta tensão da Universidade Federal de Campina Grande pelo aluno Tiago Oliveira, sob a orientação do Professor Edson Guedes da Costa. A finalidade principal é a análise da qualidade do projeto, em especial na escolha e dimensionamento dos materiais isolantes empregados. Ao final do trabalho, são sugeridas alterações, especificações mais detalhadas de alguns componentes e recomendações de montagem.

Palavras-chave: Campos Elétricos, Transformadores para Ensaios, Método dos Elementos Finitos, Simulações Computacionais, Técnicas de Alta Tensão.

ABSTRACT

This work deals with the simulation of electric fields in a testing transformer with rated voltages 0,22/50 kV. Consists of computer simulation and analysis results using the COMSOL Multiphysics software, based on the numerical method "Finite Element Method (FEM)". The simulated device is a testing transformer designed at the High Voltage Laboratory of the Federal University of Campina Grande by Tiago Oliveira student, under the guidance of Professor Edson Guedes da Costa. The main purpose is to examine the quality of the project, particularly in the selection and sizing of insulating materials employed. At the end of the work are suggested changes, some more detailed specifications of components and assembly recommendations.

Keywords: Electric Fields, Transformers for Testing, Finite Element Method, Computer Simulations, High Voltage Engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Capacitor de Placas Paralelas.....	8
Figura 2. Diferença de potencial entre dois pontos A e B.....	10
Figura 3. Diferença de potencial entre dois pontos localizados nas proximidades da terra.....	11
Figura 4. Efeito das diferenças de potenciais sobre a corrente de fuga.....	11
Figura 5. Formação de arco elétrico.....	12
Figura 6. Princípio de funcionamento de um transformador.....	15
Figura 7. Núcleo magnético constituído de chapas laminadas.....	17
Figura 8. Relação entre potência, corrente e tensão nos enrolamentos de um transformador.....	19
Figura 9. Esquema de um transformador mostrando seus principais componentes.....	22
Figura 10. Circuito série ressonante utilizando conversor de frequência. [KUFFEL].....	27
Figura 11. Gerador de Alta Tensão Contínua.....	28
Figura 12. Transformador para ensaios com tampa isolante e tanque metálico.....	31
Figura 13. Transformador para ensaios de propriedade do LAT-UFCG.....	32
Figura 14. Esquema de ligação típico de transformadores para ensaios.....	32
Figura 15. Transformador para ensaios com carcaça isolante e tampa metálica.....	33
Figura 16. Transformador para ensaios com carcaça isolante e tampa metálica de propriedade do LAT-UFCG.....	34
Figura 17. Transformador para ensaios com tanque metálico e bucha de alta tensão.....	35
Figura 18. Disposição dos enrolamentos do transformador para ensaios.....	37
Figura 19. Anéis e chapa equalizadora envolvendo o enrolamento de alta tensão.....	38
Figura 20. Divisão de um domínio irregular em elementos finitos.....	42
Figura 21. (a) Modelo real dos enrolamentos dispostos em camadas e (b) modelo simplificado utilizado na simulação computacional.....	52
Figura 22. Esquema de construção da bucha de alta tensão.....	56
Figura 23. Modelo construído apresentado na tela principal do programa. (COMSOL).....	59
Figura 24. Materiais empregados em cada componente do transformador.....	60
Figura 25. Definição dos potenciais na camada 95 do enrolamento de alta tensão. (COMSOL). 62	
Figura 26. Malha para simulação utilizando Método dos Elementos Finitos. (COMSOL).....	63
Figura 27. Resultado obtido com a simulação utilizando o software COMSOL Multiphysics. (COMSOL).....	64
Figura 28. Representação dos potenciais na região da bucha de alta tensão em falsas cores.....	65

Figura 29. Análise da região próxima à base da bucha de alta tensão: (a) linha de campo traçada e (b) gráfico fornecido para a variação de potencial.....	66
Figura 30. Linhas equipotenciais da região próxima ao terminal de alta tensão e reta traçada para análise da variação de potencial.....	67
Figura 31. Gráfico de variação de potencial na região próxima ao terminal de alta tensão.....	68
Figura 32. Linha de variação de potencial entre a primeira camada do enrolamento de alta tensão e o núcleo.....	70
Figura 33. Variação de potencial elétrico ao longo da região entre a primeira camada do enrolamento de alta tensão e uma das pernas do núcleo.....	71
Figura 34. Gabarito para orientar a disposição das espiras no enrolamento de alta tensão.....	73

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	5
Resumo.....	8
Abstract.....	9
Lista de Ilustrações.....	10
Sumário.....	12
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivo.....	2
1.2 Motivação.....	2
2 Revisão Bibliográfica.....	
2.1 Campos Elétricos.....	5
2.2 Potencial Elétrico.....	7
2.3 Capacitância.....	7
2.4 Isolação e Dissipação de Calor.....	9
2.5 Transformadores.....	13
2.6 Transformadores Reais.....	15
Núcleo.....	16
ENROLAMENTOS.....	18
Tanque.....	20
Buchas.....	21
2.7 Técnicas de Alta Tensão.....	23
2.8 Ruptura dos Dielétricos.....	24
2.9 Geração de Altas Tensões.....	26
2.10 Transformadores para Ensaios.....	29
2.11 Anéis Equalizadores.....	37
2.12 Outras Considerações a Respeito de Transformadores para Ensaios.....	38

2.13	Problemas de Valor de Fronteira.....	38
2.14	Métodos Numéricos.....	40
2.15	Método dos Elementos Finitos (MEF).....	41
3	Material e Métodos.....	51
3.1	Projeto do Transformador.....	51
3.2	Complementações ao projeto.....	55
3.3	Programa Comsol Multiphysics.....	56
4	Resultados e Análise.....	58
4.1	Construção do Modelo.....	58
4.2	Definição dos Materiais.....	59
4.3	Definição dos Potenciais.....	61
4.4	Criação da Malha.....	63
4.5	Resultados Obtidos.....	64
4.6	Análise da Bucha de Alta Tensão.....	65
4.7	Análise do Enrolamento de Alta Tensão e Janela do Núcleo.....	69
3.	Conclusão.....	72
	Bibliografia.....	
	Apêndice A – Tutorial: Comsol Multiphysics 4.3.....	75
	Apêndice B – Formulação Matemática dos Conceitos de Eletromagnetismo.....	93
	A Lei de Coulomb.....	93
	O Princípio da Superposição.....	94
	O Campo Elétrico.....	95
	Cálculo do Campo Elétrico.....	95
	Fluxo de Campo Elétrico e Lei de Gauss.....	96
	Equação de Poisson.....	97
	Teorema de Gauss.....	99
	Potencial Elétrico.....	100
	Anexo A – Resumo do Projeto.....	103
	Núcleo.....	104

Bobina de Baixa Tensão.....	106
Bobina de Alta Tensão.....	107

1 INTRODUÇÃO

Geração de alta tensão é utilizada em Engenharia Elétrica com diversas finalidades. Em atividades de pesquisa, muitas vezes faz-se necessário estudar o comportamento de diversos materiais e equipamentos face à aplicação de altas tensões alternadas ou contínuas. Em atividades didáticas utilizam-se altos níveis de tensão exaustivamente, sobretudo, em disciplinas ligadas à pesquisa em alta tensão como Técnicas de Alta Tensão ou estudo do comportamento de meios isolantes quando se aplica altas tensões como também na disciplina Materiais Elétricos. É utilizada ainda a geração de alta tensão em ensaios para certificação e verificação de materiais e equipamentos utilizados em sistemas de potência, em especial os Equipamentos de Proteção Individual e Coletiva utilizados em linha viva.

Nesse contexto, os transformadores para ensaios são parte fundamental dos sistemas de geração de alta tensão tanto alternada quanto contínua. Geralmente tais equipamentos são projetados para oferecerem relação de transformação elevada, de modo que pequenas tensões facilmente controláveis sejam aplicadas, obtendo-se altos níveis de tensão. Apesar da utilização de alta tensão, a potência e a corrente empregadas em ensaios são baixas o que diferencia fundamentalmente os transformadores para ensaios daqueles utilizados em transmissão, distribuição, proteção e medição. A construção de transformadores de alta tensão apresenta diversas particularidades e como não são produzidos em escala industrial, no Brasil, assim é importante conhecer, a distribuição de campo elétrico para que se possa dimensioná-lo de forma tecnicamente satisfatória e economicamente viável.

Pelo exposto, uma importante etapa no projeto de equipamentos de alta tensão é o estudo dos campos elétricos presentes durante a sua plena utilização. Para que se possa dimensionar corretamente os condutores, materiais isolantes e demais partes componentes de um equipamento elétrico é necessário conhecer o esforço elétrico (campo elétrico aplicado) a que estará sujeita cada parte do equipamento. Em transformadores para ensaios esse estudo é ainda mais importante, pois um ponto crítico no dimensionamento de tais equipamentos é a isolamento elétrica.

O estudo dos campos elétricos envolve a solução de diversas equações diferenciais para o estudo das distribuições de campo em diferentes geometrias. Para que se obtenham soluções exatas, faz-se necessária a resolução analítica de equações diferenciais, muitas vezes extensas e complexas. Quando se utilizam geometrias diversas, a solução torna-se impraticável devido ao grande número de equações diferenciais a resolver. Existe um grande número de métodos e associados a eles software para solucionar problemas complexos de configurações de campos, entre eles se destaca o método dos elementos finitos. O método dos elementos finitos (MEF) consiste em dividir a geometria do problema em pequenos elementos, cujas soluções de fronteira podem ser obtidas por interpolação de uma solução aproximada, de modo que podem ser utilizados métodos numéricos, associados a softwares, para obter resultados satisfatórios.

No Laboratório de Alta Tensão, comumente se utiliza o software COMSOL para simular diversos tipos de estudos físicos utilizando soluções numéricas através do método dos elementos finitos. Um desses estudos é o de campos elétricos, que atende a necessidade descrita anteriormente de simulação de tal fenômeno físico no projeto de transformadores para ensaios.

1.1 OBJETIVO

Simular os campos elétricos em um transformador de alta tensão para ensaios utilizando o Método dos Elementos Finitos com auxílio do software COMSOL Multiphysics.

1.2 MOTIVAÇÃO

As aplicações dos transformadores para ensaios no âmbito da Engenharia Elétrica e particularmente no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande são muitas. Diariamente são realizadas atividades de pesquisa, ensaios de equipamentos e atividades didáticas que necessitam de uma fonte de alta tensão controlável, compondo assim, um conjunto de equipamentos que permitam utilizar com segurança e precisão altos níveis de tensão. Um equipamento fundamental no conjunto é o transformador para ensaios que apresenta características bastante diversas dos demais tipos de

transformadores comercializados mais comumente. Buscando atender a essa necessidade, está sendo projetado um transformador para ensaios no próprio Laboratório de Alta Tensão para suprir uma carência atual.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Os seres vivos apresentam necessidades básicas como alimentação e abrigo. O ser humano, em especial, é capaz de construir ferramentas e moldar seu habitat de modo que consiga satisfazer suas necessidades com o mínimo esforço e o maior grau de conforto possível. Para isso, aproveita as diversas formas de energia que a natureza possibilita. A energia elétrica, embora praticamente não seja aproveitada diretamente pelo ser humano, é a mais versátil em termos de transporte e conversão em outras formas aproveitáveis como energia calorífica e mecânica, dessa forma, uma vez obtida a energia elétrica, consegue-se transformá-la em praticamente qualquer outra forma desejável. Apesar de ser de difícil armazenamento, consegue-se acumular diversas formas potenciais de geração de energia elétrica, tais como o armazenamento de combustíveis fósseis e nucleares e o aproveitamento de potenciais hídricos através da construção de barragens. Além de aproveitamentos em tempo real como da energia eólica, fonte renovável e inesgotável. Dificuldades comuns a praticamente todas essas formas de aproveitamento são, por exemplo, a necessidade de grandes instalações, geração de poluição ambiental, necessidade de geração em grandes blocos para viabilizar investimentos e, devido a tudo isso, a tendência de afastar os centros geradores dos centros consumidores. Devido a essas dificuldades, há uma tendência de construção das unidades geradoras em pontos geográficos distantes dos chamados centros de carga, que são as grandes cidades. Para solucionar o problema da distância geográfica, foram desenvolvidas as chamadas linhas de transmissão, que consistem num conjunto de cabos e equipamentos auxiliares responsáveis por interligar eletricamente a geração e a utilização da energia elétrica. Para que a energia seja levada de um local a outro, deve haver uma diferença de potencial, que resulta na criação de uma corrente entre pontos distintos, de modo que a potência possa ser transmitida.

As primeiras leis físicas estudadas que governam a eletricidade, indicam que alguns materiais favorecem a passagem de corrente, enquanto outros se opõem. Costuma-se portanto, utilizar os chamados materiais condutores, aqueles que não se opõem à passagem de corrente, na construção das linhas de transmissão, enquanto que os chamados isolantes, que se opõem à passagem de corrente são utilizados para separar eletricamente as

linhas de transmissão das demais estruturas, impedindo assim que a corrente se disperse no caminho. Os materiais condutores mais utilizados são os metais, em especial, o cobre e o alumínio, que embora sejam ótimos condutores, apresentam ainda perdas, ou seja, se opõe, ainda que minimamente, à passagem de corrente elétrica, transformando parte dela em calor. A lei de Ohm, formulada por Georg Simon Ohm em 1827, nos diz que para certos condutores metálicos, homogêneos e filiformes, a uma dada temperatura, é constante a razão entre a diferença de potencial e a intensidade da corrente. Esta constante é a resistência do condutor. Portanto, para determinado condutor, quanto maior a tensão entre os terminais do condutor, menor será a corrente. Sabe-se ainda que, pelo efeito Joule, a circulação de corrente causa aquecimento proporcional dos condutores, e quanto maior o aquecimento, maiores as perdas já que mais energia elétrica estará sendo desperdiçada na forma de calor na superfície dos condutores. Busca-se portanto, elevar cada vez mais a tensão, de forma que a corrente elétrica seja a menor possível e em consequência, ocorram menores perdas.

Inicialmente a tensão e corrente elétricas eram primordialmente contínuas, alimentando basicamente sistemas de iluminação a arco e incandescentes. A tensão alternada, desenvolvida por Nikola Tesla no final do século dezanove, é atualmente a forma de geração, transmissão e utilização de energia elétrica mais utilizada. Em relação à tensão contínua, a alternada apresenta diversas vantagens e por isso encontrou mais amplo emprego nos sistemas elétricos.

Uma das primeiras dificuldades encontradas no início da utilização da energia elétrica em larga escala foram as perdas. Era necessário que as máquinas geradoras de energia elétrica, e seus respectivos acionadores primários estivessem sempre localizados próximo às cargas uma vez que não era possível transmitir energia a longas distâncias devido às perdas e queda de tensão. Sabendo-se que a tensão e correntes são proporcionais à potência transmitida, se chegou à conclusão que o ideal seria elevar a tensão e dessa forma diminuir a corrente elétrica para que a mesma potência fosse transmitida, uma vez que, as perdas estão intimamente relacionadas à corrente e não ao nível de tensão empregada.

2.1 CAMPOS ELÉTRICOS

O estudo de materiais e a forma como reagem entre si, levou à descoberta das cargas elétricas. Uma das primeiras experiências mostra que se atritamos dois corpos de diferentes materiais, como lã e vidro por exemplo, eles tornam-se capazes de atrair ou repelir outros corpos de massa reduzida. Isto por que os materiais na forma natural apresentam equilíbrio entre cargas positivas e negativas. Quando atritamos materiais distintos, alguns tornam-se carregados positivamente e outros negativamente, ou seja, alguns acumulam cargas positivas e outros acumulam cargas negativas. Este estudo é denominado eletrostática e a primeira expressão matemática que descreveu seu comportamento foi a lei de Coulomb, que estabelece:

- Cargas de mesmo sinal repelem-se enquanto cargas de sinal contrário atraem-se;
- A força de atração ou repulsão é proporcional ao produto entre as cargas;
- A força entre duas cargas é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas;
- A força é dependente do meio em que as cargas estão colocadas;
- A força atua ao longo da linha que une as duas cargas;

A expressão matemática da lei de Coulomb é dada por:

(1)

Onde F [Newtons] é a força de atração ou repulsão entre as cargas, q_1 e q_2 [Coulombs] são as cargas representadas em magnitude e sinal, r [metros] é a distância entre elas e ϵ [Farad/metro] é uma propriedade do meio material, denominada permissividade.

A interação entre cargas obedece ao princípio da superposição, isto é, caso existam muitas cargas, ou distribuições de cargas, interagindo podemos aplicar o princípio da superposição calculando o efeito de cada carga pontual em um determinado ponto e somando os resultados. Tal propriedade será importante para o cálculo de campos elétricos que definiremos a seguir.

O vetor intensidade de campo elétrico E é dado pela força por unidade de carga imersa nesse campo elétrico. O campo elétrico é portanto a influência da distribuição de

cargas nas proximidades de um ponto em estudo por unidade de carga aplicada àquele ponto. A intensidade de campo elétrico é medida em Volt/Metro ou Newton/Coulomb. Uma forma simplificada de cálculo de campos elétricos é a partir do potencial elétrico escalar, V , medido em Volt que definiremos a seguir. A confecção de linhas de campo a partir de utilização de métodos numéricos consiste numa forma bastante simplificadora de estudo do problema e previsão de pontos de concentração de campos.

Em equipamentos ou componentes que possuem quinas, bordas, interrupções abruptas de superfícies descontínuas os campos elétricos podem crescer indefinidamente mesmo sendo gerados por pequenas tensões. Materiais condutores e isolantes com formatos pontiagudos ou quinas com raio de curvatura nulo ou pequeno podem ser inapropriados a depender do nível de tensão utilizado.

2.2 POTENCIAL ELÉTRICO

A tensão entre dois pontos de um circuito é um conceito oriundo da definição de potencial elétrico, ou seja, é a diferença de potencial entre os dois pontos. Já o potencial elétrico de um determinado ponto é o trabalho por unidade de carga, realizado por um agente externo, para deslocar uma carga de teste do infinito até esse ponto. Nessa definição, consideramos que o infinito possui potencial nulo. A diferença de potencial entre dois pontos é, portanto, o potencial de um ponto em relação a outro, ou seja, o trabalho necessário para deslocar uma carga de teste entre os dois pontos. Os termos diferença de potencial e tensão são equivalentes e empregaremos preferencialmente o termo tensão neste texto.

A relação entre o campo elétrico e o potencial elétrico é dado pela Lei de Maxwell. O potencial pode ser calculado a partir do conceito de campo elétrico calculando-se o trabalho necessário para deslocar uma carga submetida a um campo. Este valor de trabalho é justamente a diferença de potencial entre os dois pontos da trajetória da carga

2.3 CAPACITÂNCIA

A energia potencial é um conceito presente no estudo de diversos tipos de fenômenos físicos, como a energia potencial gravitacional, por exemplo. No estudo da energia elétrica, há a energia potencial elétrica que pode ser armazenada em forma de campo elétrico, utilizando dispositivos condutores e meios isolantes de modo a manter esses campos estáticos. Tais dispositivos são denominados capacitores e a propriedade que tem de armazenar energia é denominada capacitância. A construção física mais comumente utilizada para representação de capacitores é a utilização de duas placas metálicas paralelas, submetidas cada uma a um potencial elétrico, separadas por uma pequena distância que é preenchida por um material isolante, ou dielétrico. Na Figura 1 é mostrado o esquema de construção de um capacitor de placas paralelas, submetidas aos potenciais V_1 e V_2 , com $V_1 \neq V_2$.

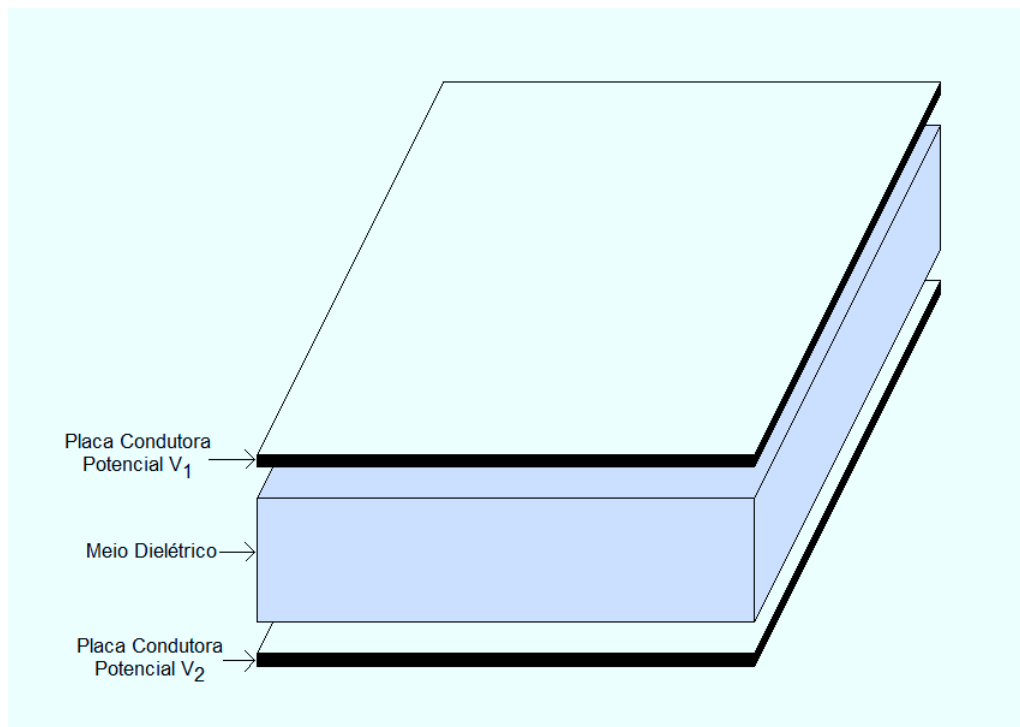


Figura 1. Capacitor de Placas Paralelas

Existe uma relação entre a carga armazenada nas placas de um capacitor e a diferença de potencial entre elas que é uma constante de proporcionalidade denominada capacitância. Ou ainda, a capacitância de um capacitor é a relação entre a carga armazenada em suas placas e a diferença de potencial entre elas.

Dois fatores são determinantes da capacitância: meio dielétrico utilizado entre as placas e a geometria utilizada. Embora os capacitores sejam representados em circuitos elétricos por duas placas paralelas, supondo a construção similar à mostrada na Figura 1,

outras formas construtivas são mais comuns e pode-se determinar a capacitância entre pontos distintos mesmo que eles não tenham sido dispostos com a finalidade de construir o elemento denominado capacitor. Em linhas de transmissão, por exemplo, a capacitância entre a linha e a superfície é um parâmetro importante a ser considerado, ainda que a função da linha de transmissão não seja funcionar como um capacitor. Em muitos equipamentos verifica-se por exemplo a presença de capacitâncias parasitas, causadas pela proximidade entre dois materiais condutores submetidos a uma diferença de potencial.

A unidade de medida utilizada para expressar capacitâncias é o Farad (F), em homenagem a Michael Faraday, que criou o conceito de capacitância e percebeu que o aumento do isolamento elétrico entre as placas do capacitor, resultava em aumento da capacidade de armazenamento de carga, ou ainda, aumento da capacitância. Ou seja, o emprego de dielétricos de menor permissividade resulta em aumento de capacitância, mantidas constantes as demais características do dispositivo.

Capacitores encontram vasta aplicação no domínio da Engenharia Elétrica seja em circuitos de baixa tensão e corrente contínua como nos de alta tensão e corrente alternada. Em resumo, os capacitores são empregados atualmente desde a escala nanométrica em microeletrônica até as aplicações em alta e extra alta tensão (da ordem de 1000 kV).

2.4 ISOLAÇÃO E DISSIPACÃO DE CALOR

Duas grandezas estão presentes em qualquer circuito elétrico que se deseje analisar: tensão e corrente. Diz-se que a voltagem elétrica (ou diferença de potencial) e a corrente são duas quantidades fundamentais em Engenharia Elétrica.

O conhecimento dessas duas grandezas é de fundamental importância para o estudo dos equipamentos elétricos, pois seu funcionamento acarretará em circulação de corrente e diferenças de potencial. A circulação de corrente em qualquer material, mesmo os condutores mais eficientes ocasiona dissipação de calor e isto deve ser levado em conta para o dimensionamento dos condutores a serem utilizados, uma vez que, a quantidade de calor utilizado é inversamente proporcional à seção transversal dos condutores utilizados, isto para uma mesma quantidade de corrente. Sendo assim, o melhor equipamento é aquele onde a

seção transversal dos materiais condutores é maximizada, causando assim a menor dissipação de calor possível, ou seja, menor oposição à passagem de corrente elétrica.

Para que haja circulação de corrente elétrica, é necessário existir diferença de potencial entre dois pontos. Estando os dois pontos ligados por um material condutor, haverá circulação de corrente preferencialmente através desse material, sobretudo em sua periferia, e dessa forma, a circulação de corrente se dará entre os pontos com diferentes potenciais elétricos. Para que as correntes sigam os caminhos preferenciais descritos, é comum a utilização de materiais isolantes em volta dos condutores, evitando que as correntes escapem por outros caminhos. Isto ocorre por que, além da diferença de potencial entre os dois pontos desejados, haverá sempre diferença de potencial entre pelo menos um desses pontos e sua vizinhança. Em última análise, se há diferença de potencial entre dois pontos, um deles estará necessariamente sob um potencial diferente de zero, que é o potencial da superfície terrestre. Nesse caso, haverá a tendência de circulação de corrente entre tal ponto e a terra. Deve-se portanto utilizar mecanismos que evitem a circulação de corrente para a terra e as formas mais simples são: aumentar as distâncias entre o ponto com potencial elevado e os demais ou a utilização de materiais isolantes, na tentativa de confinar a corrente elétrica apenas no meio desejado.

Tomemos o exemplo mais simples que ilustra o conceito acima. Considere na Figura 1 que entre os pontos A e B exista uma diferença de potencial V e que nenhum dos pontos encontra-se sob potencial nulo, ou seja:

(2)

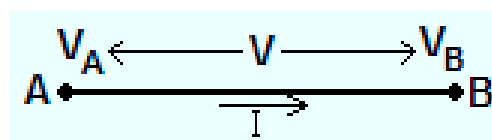


Figura 2. Diferença de potencial entre dois pontos A e B.

Os dois pontos serão conectados por um material condutor e se estabelecerá uma circulação de corrente entre os dois pontos. Ao longo do condutor, a diferença de potencial entre os pontos A e B irá se distribuir uniformemente, de tal maneira que nos pontos mais próximos ao ponto A a tensão será próxima de V_a e nos pontos mais próximos a B a tensão será próxima de V_b , igualando-se a V_b no limite final do condutor, onde este encontra o ponto

B.

Feitas tais considerações, ampliaremos o modelo descrito considerando agora que os pontos A e B e o condutor que os une estão localizados nas proximidades da superfície terrestre, onde o potencial é nulo. A Figura 2 ilustra a descrição acima.

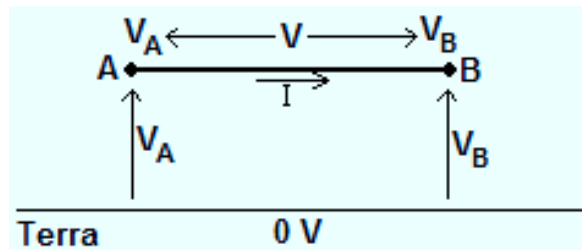


Figura 3. Diferença de potencial entre dois pontos localizados nas proximidades da terra.

Observamos então que além da diferença de potencial entre os pontos A e B, há ainda diferenças de potencial entre ambos os pontos e a terra, e ainda entre cada ponto do condutor e a terra, uma vez que o potencial V distribui-se uniformemente ao longo do condutor. Considerando-se que, assim como não há condutor perfeito, também não há meio isolante perfeito, o ar que circunda os pontos com potencial não nulo e que os separa da terra permitirá circulação de corrente, ainda que muito pequena. Supondo que os potenciais V_a e V_b sejam elevados gradativamente e que a distância entre eles e a terra seja diminuída, é de se esperar que a corrente circulante através do ar, entre os pontos com potencial não nulo e a terra aumente gradativamente. Esta corrente é denominada corrente de fuga, pois é aquela que não segue o caminho preferencial, ou seja, não circula através do condutor. Na Figura 3 ilustramos a corrente de fuga por linhas tracejadas.

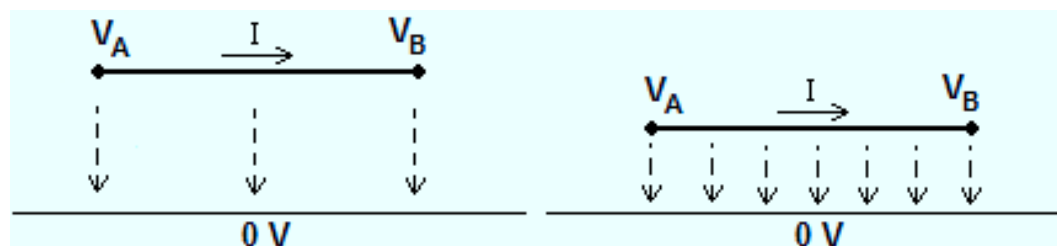


Figura 4. Efeito das diferenças de potenciais sobre a corrente de fuga.

Se extrapolássemos a aproximação entre os pontos com potencial não nulo e a terra para valores infinitesimais, haveria um momento em que, antes que a distância fosse nula, haveria a ionização do meio isolante, o ar, tão forte que o mesmo perderia suas propriedades isolantes e possibilitaria a formação de um canal de corrente preferencial, cuja

amplitude seria bem maior que a da corrente de fuga. Tal corrente é denominada de arco elétrico e apresenta comportamento caótico, forte elevação de temperatura em sua vizinhança e numa situação como a descrita, é difícil determinar o momento e a localização exata da formação do arco pois há variáveis não controladas (condições atmosféricas nos diversos, distribuição de potencial ao longo do condutor e nos pontos A e B) na formação do arco. O momento de formação do arco elétrico é denominado disrupção. A Figura 4 ilustra através de uma seta disforme a formação caminho de através do meio ionizado.

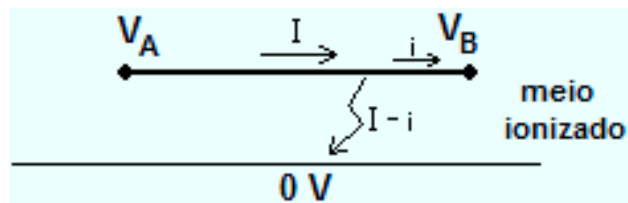


Figura 5. Formação de arco elétrico

A partir do exposto, se pode presumir que a isolação elétrica é uma característica importante na construção de equipamentos elétricos pois nestes, a corrente elétrica deverá fluir seguindo os caminhos preferenciais criados utilizando os materiais condutores. Ficou evidenciado no exemplo acima que a forma mais simples de aumentar a isolação elétrica seria o aumento da distância entre os pontos com potenciais distintos. A distância entre os pontos A e B deverá também ser levada em consideração pois uma grande diferença de potencial entre os mesmos poderia acarretar a formação de um arco elétrico através do ar entre os pontos, de modo que a corrente não circularia unicamente pelo caminho preferencial.

Há, no entanto uma segunda e mais eficiente forma de aumentar a isolação elétrica entre pontos com diferentes potenciais: a utilização de materiais dielétricos, ou isolantes. Considere agora que na mesma Figura 5 fosse inserida uma capa de material isolante ao redor do condutor. Dado que os materiais isolantes se opõem à circulação de corrente através de suas moléculas, a corrente de fuga considerada anteriormente seria reduzida. Caso a distância entre o condutor e a terra fosse diminuída, a formação de um arco elétrico seria dificultada também pela presença do material isolante. As distâncias entre pontos sob diferentes tensões, ou sob diferentes potenciais elétricos e a utilização de materiais dielétricos entre tais pontos constitui a base para os estudos de isolação elétrica. Este é um dos aspectos fundamentais no projeto de equipamentos elétricos e estudo de seu comportamento quando em utilização.

O segundo aspecto fundamental, estudado no início desta seção diz respeito ao calor gerado pela circulação de corrente nos materiais elétricos. Portanto, o estudo de equipamentos elétricos deve levar em consideração os potenciais, ou tensões, que comumente denomina-se tensão nominal de um equipamento e a corrente elétrica prevista para percorrer suas partes condutoras, comumente denominada corrente nominal do equipamento. Enquanto a tensão nominal é importante na determinação das distâncias necessárias entre os pontos submetidos a diferentes potenciais elétricos no equipamento, bem como o estudo dos materiais isolantes a serem empregados, a corrente é importante no dimensionamento dos materiais condutores a serem empregados para que estes possibilitem a passagem das correntes nominais.

1.5. TRANSFORMADORES

Enquanto as perdas estão relacionadas com quantidade de corrente fluindo num condutor, a necessidade de isolamento está relacionada ao nível de tensão empregado. Seria necessário, portanto, estabelecer uma solução de compromisso entre o nível de tensão e de corrente empregados, uma vez que correntes elevadas seriam impraticáveis de transmitir e tensões muito elevadas seriam impraticáveis de utilizar pois todos os equipamentos necessitariam de altos níveis de isolamento. Uma solução para este problema foi novamente proposta por Tesla, que desenvolveu o transformador, equipamento capaz de elevar ou diminuir tensões alternadas. Com isto, foi possível separar a geração da utilização da energia elétrica pois a energia gerada nas máquinas em tensão relativamente baixa era elevada utilizando um transformador elevador e transmitida em alta tensão, e baixa corrente. Próximo ao ponto de utilização, um transformador abaixador reduzia o nível de tensão para que pudesse ser utilizada por equipamentos comuns como lâmpadas e motores de indução.

Até hoje esta é a solução adotada no sistema elétrico. Mesmo a transmissão em corrente contínua, ainda muito utilizada para transmitir energia entre longas distâncias, lança mão de transformadores para elevar tensão antes da retificação e reduzi-la após a inversão. O transformador é, portanto um equipamento de fundamental importância para os sistemas elétricos. Seu emprego é vasto e são construídos numa grande variedade de tamanhos, potências nominais, relações de tensão, e tipos construtivos. Ao acompanhar o caminho do fluxo de potência desde a geração de energia elétrica até o consumo,

encontraremos uma infinidade de transformadores. Logo após a energia ser gerada, tomando por exemplo o caso da geração hidrelétrica, são utilizados transformadores elevadores para que a tensão gerada em níveis de até 20 kV sejam elevados para níveis compatíveis com a transmissão a longas distâncias, tipicamente 230, 500, 750 ou 1000 kV. Para tal, são utilizados os chamados transformadores elevadores. Quando as linhas de transmissão aproximam-se dos grandes centros consumidores, é necessário reduzir o nível de tensão para valores compatíveis com a subtransmissão, tipicamente 69 kV, e distribuição onde os valores típicos são 13,8 ou 34,5 kV. Para isso, são utilizados transformadores abaixadores, ou transformadores de potência, localizados em subestações do tipo abaixadoras. As redes de subtransmissão e distribuição ramificam-se então ligando as pequenas cidades e levando energia elétrica aos bairros e distritos das grandes cidades. Este é o chamado circuito primário da distribuição. Ao aproximar-se de centros concentrados de cargas (bairros e bairros) ou de grandes consumidores (edifícios residenciais e comerciais ou indústrias) são novamente utilizados os transformadores abaixadores, nesse caso denominados transformadores de distribuição, instalados em subestações do tipo abrigadas ou em instalações aéreas (postes). A partir dos transformadores de distribuição, são construídos os chamados circuitos secundários de distribuição, onde as tensões são tipicamente 220 ou 380 Volts. Para muitos equipamentos do nosso cotidiano, esse nível de tensão é compatível com a utilização final, são exemplos desse tipo de equipamento lâmpadas, eletrodomésticos e motores de indução. Já outros equipamentos são projetados para operar com tensões ainda mais reduzidas e para isso são utilizados transformadores, muitas vezes, localizados no interior dos próprios equipamentos, para reduzir esses níveis a valores desejáveis.

Com um pequeno esboço do sistema elétrico, percebemos a fundamental importância dos transformadores e sua onipresença quando se trata de energia elétrica. Dada sua indiscutível importância, cabe ressaltarmos alguns aspectos de seu funcionamento. O transformador é um equipamento que, por meio de indução eletromagnética, transfere energia de um circuito chamado primário para um ou mais circuitos denominados secundário ou terciário, sendo mantida a mesma frequência porém com tensões e correntes diferentes. Seu funcionamento está baseado nos fenômenos de mútua indução magnética entre os circuitos eletricamente isolados.

Cada um dos circuitos de um transformador consiste em um conjunto de enrolamentos, dispostos em torno de um núcleo magnético. Ao circular corrente no circuito

primário, um fluxo magnético é criado no interior dos enrolamentos, por efeito de sua indutância, e como estes estão dispostos ao redor do núcleo magnético, o fluxo concentra-se preferencialmente no núcleo. Estando o enrolamento secundário, e os demais caso existam, dispostos também ao redor do núcleo magnético, haverá circulação de um fluxo magnético no interior desta bobina, criando-se assim uma corrente induzida. O número de espiras de cada enrolamento determina os valores de tensão e corrente que serão induzidos entre seus terminais, uma vez que o fluxo magnético é comum a todos os enrolamentos. A equação fundamental de operação de um transformador de dois enrolamentos é mostrada na Equação 3 a seguir.

$$(3)$$

onde N_1 e N_2 são os números de espiras dos enrolamentos primário e secundário, V_1 e V_2 são as tensões entre os terminais de cada enrolamento e I_1 e I_2 são as correntes circulantes nos enrolamentos primário e secundário. Na Figura 6 são ilustrados os conceitos definidos anteriormente. O fluxo magnético é representado na figura por ϕ .

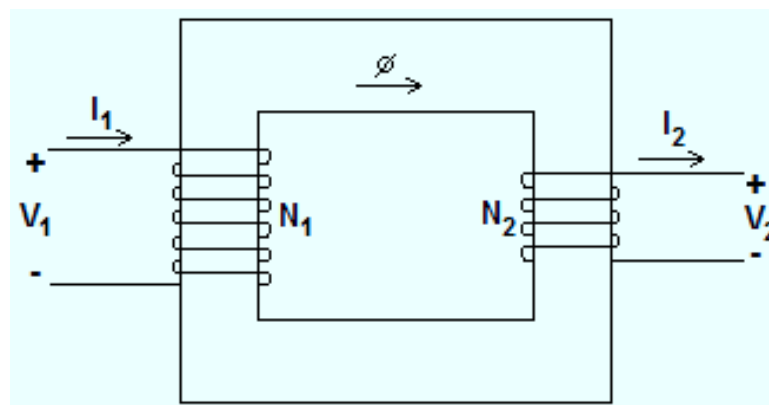


Figura 6. Princípio de funcionamento de um transformador.

1.6. TRANSFORMADORES REAIS

Conhecidas as tensões nominais desejadas e as correntes nominais que deverão percorrer um transformador, a partir dos valores de tensão do circuito no qual o mesmo será utilizado e na potência requerida, é possível calcular suas dimensões, materiais condutores e isolantes empregados, formas de dissipação de calor e o formato das partes constituintes de modo que o mesmo funcione corretamente. As características de tensão, corrente e potência

de um transformador bem como sua forma de ligação são as características mais importantes do equipamento e constituem os chamados dados de placa, por serem obrigatoriamente descritos em uma placa metálica fixada à carcaça do equipamento.

Os componentes fundamentais a serem dimensionados num transformador são: o núcleo, as bobinas (ou enrolamentos), o tanque e as buchas. Detalharemos a construção de transformadores imersos em líquido isolante já que estes são os mais convencionais e serão a base para a construção do transformador para ensaios estudado.

NÚCLEO

O núcleo de um transformador é o caminho preferencial de fluxo magnético que circulará no interior dos enrolamentos, permitindo a transferência de potência entre o circuito primário e o secundário. Dessa forma, deverá ser utilizado material de baixa relutância, ou seja, que se oponha o mínimo possível à circulação de fluxo magnético, são os chamados materiais ferromagnéticos. Dessa maneira, a dispersão de fluxo é minimizada, reduzindo-se portanto as perdas do transformador já que praticamente todo o fluxo magnético criado pelo enrolamento primário estará concatenado no núcleo e será integralmente utilizado para indução de tensão e corrente no enrolamento secundário.

Para o dimensionamento do núcleo, deve ser conhecido o valor de indução magnética ao qual o mesmo estará submetido. O valor da indução magnética varia em função da corrente elétrica que a causará. Para o correto dimensionamento do núcleo, deve-se conhecer portanto a condição de funcionamento do equipamento (dados de placa) e as características do material ferromagnético utilizado, em especial, sua curva de magnetização, ou ainda, laço de histerese. A curva de magnetização é uma importante característica dos materiais ferromagnéticos, ela descreve a resposta do material, em termos de densidade de fluxo magnético, ao campo magnético aplicado. A característica de uma curva de magnetização é uma região linear, nas proximidades da origem dos eixo vertical e uma região de saturação à medida que o campo magnético aumenta.

Conhecendo então a condição de funcionamento do circuito, corrente nos enrolamentos e conseqüentemente o campo magnético a ser aplicado, deve-se escolher um valor de indução magnética na curva de magnetização de modo que não seja atingida a região de saturação. O núcleo será então dimensionado de modo a obedecer a essas condições. A

indução magnética deverá ser relativamente baixa para que sejam evitadas elevadas distorções da corrente de magnetização (região não linear da curva de magnetização). As distorções da corrente de magnetização seriam refletidas em distorções harmônicas na tensão dos enrolamentos.

Os materiais utilizados inicialmente para a confecção de núcleos magnéticos de transformadores eram o ferro e algumas de suas variações, como o ferro doce. Com o aprofundamento dos estudos de materiais ferromagnéticos, foram selecionados e desenvolvidos materiais que apresentavam comportamento mais aproveitável em termos de curvas de magnetização. Atualmente são utilizados mais largamente os aços-silício, ligas de ferro carbono e silício. São os chamados materiais magneticamente moles, que apresentam elevada susceptibilidade magnética, sendo facilmente magnetizáveis quando submetidos a campos magnéticos. Como os metais apresentam baixa resistividade elétrica, é comum que, quando submetidos a campos magnéticos, sejam criadas correntes em seu interior, ou correntes parasitas. Essas correntes não seriam aproveitadas no circuito elétrico do equipamento e, portanto, são indesejáveis. Para contornar o problema da criação de correntes parasitas, desenvolveu-se a técnica de laminação dos núcleos magnéticos, que consiste em utilizar finas chapas metálicas eletricamente isoladas entre si na composição do núcleo, de modo que a circulação das correntes parasitas seja reduzida. A Figura 6 ilustra a constituição do núcleo.

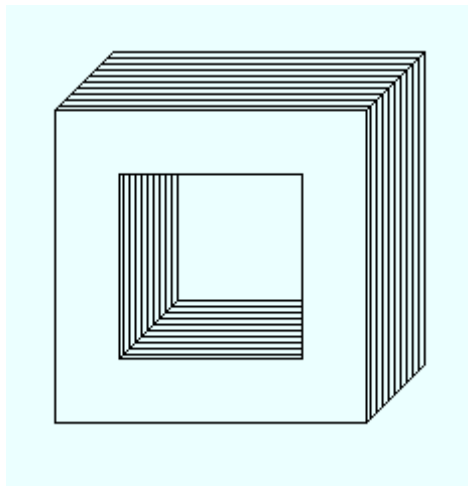


Figura 7. Núcleo magnético constituído de chapas laminadas.

Para que se consiga a isolação elétrica entre as chapas do núcleo, são utilizadas camadas de esmalte isolante entre as chapas.

Excetuando-se alguns casos especiais, o núcleo dos transformadores é geralmente conectado eletricamente ao tanque e ambos são aterrados. Deveremos então levar em consideração adiante a questão da isolação elétrica entre os enrolamentos, cujo potencial será diferente de zero e o núcleo aterrado.

ENROLAMENTOS

A interface entre circuito elétrico e circuito magnético num transformador se dá entre o núcleo (pertencente ao circuito magnético) e os enrolamentos (pertencentes ao circuito elétrico). O fluxo magnético que circula no núcleo é criado pela circulação de corrente nos enrolamentos que, devido à sua forma construtiva, constituem indutâncias. Devem ser empregados na construção dos enrolamentos materiais condutores, ou seja, aqueles que apresentam baixa resistividade e que por isso dissipam menor quantidade de calor quando percorridos por corrente elétrica. O cobre é, sem dúvidas, o material mais empregado na construção de enrolamentos de transformadores, devido principalmente à sua boa condutividade e facilidade de fiação, ou seja, boa ductibilidade. Para o dimensionamento dos condutores utilizados deve-se conhecer os dados de funcionamento do transformador, sobretudo, tensões e correntes nominais, condições de utilização em sobrecarga e surtos de tensão e corrente a que o equipamento estará exposto. A partir desses dados e das especificações do condutor utilizado, fornecidas pelo fabricante, são escolhidas as dimensões dos condutores utilizados em cada enrolamento.

Para um transformador com apenas dois enrolamentos (circuitos primário e secundário), a potência deverá ser integralmente transmitida de um circuito para o outro, excetuando-se as perdas. Dado que a relação de transformação entre os enrolamentos acarreta uma relação inversa entre as correntes circulantes, mantida a mesma potência, percebe-se que a corrente no enrolamento de maior tensão, ou seja, maior número de espiras, será menor que a corrente no circuito de menor tensão. Os condutores empregados nos circuitos primário e secundário serão então de diferentes seções transversais já que a capacidade de circulação de corrente exigida para cada um será distinta. Perceba na Figura 7 que a potência expressa por P no lado esquerdo (enrolamento de maior tensão) é idêntica à potência P vista no lado direito. Como a relação de tensão obedece a relação de espiras ($n_1 > n_2$), teremos $V_1 > V_2$. Se o produto entre tensão e corrente ($P = V.I$) nos dois enrolamentos é igual, teremos necessariamente a relação entre correntes: $I_2 > I_1$. Matematicamente, temos:

(4)

A relação n_1/n_2 é expressa pela letra a , conhecida como relação de transformação.

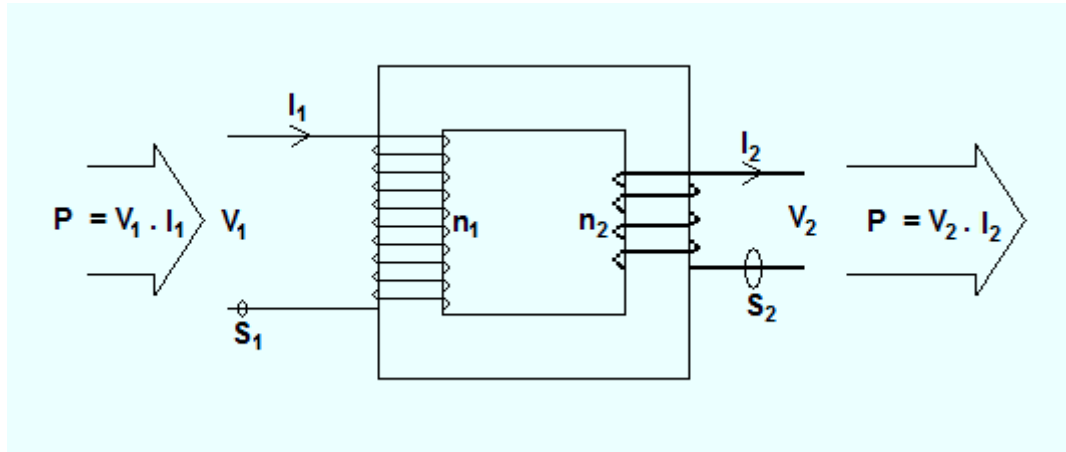


Figura 8. Relação entre potência, corrente e tensão nos enrolamentos de um transformador.

Deve-se perceber que a distribuição de potencial se dá ao longo de todo o enrolamento de um transformador, ou seja, num transformador cujo enrolamento primário apresenta tensão nominal de 220 Volts, um dos terminais do enrolamento poderá ser conectado à terra e o outro a um potencial de 220 Volts em relação à terra. Dessa forma, os potenciais nos extremos do enrolamento serão perfeitamente determinados e os potenciais intermediários serão distribuídos ao longo dos enrolamentos. Fazendo uma aproximação aceitável, pode-se supor que a distribuição de tensão se dê de uniformemente ao longo do enrolamento. Se houverem 220 voltas, ou espiras, no enrolamento, haveria diferença de 1 Volt entre uma espira e outra.

Vimos que os enrolamentos são constituídos de material condutor e que as espiras que o constituem estão justapostas, formando uma bobina. Dado que há diferença de potencial entre uma espira e suas vizinhas, há de supor que deverá existir uma forma de isolamento entre as espiras. Tal isolamento é obtida com a utilização de condutores esmaltados, ou seja, revestidos de uma camada de material isolante (esmalte) durante seu processo de fabricação. Nos pontos onde são necessárias conexões elétricas, o esmalte é extraído, por processo de raspagem, de modo que se tenha acesso eletricamente ao condutor.

O esmalte isolante garante a isolamento entre as espiras. São utilizados ainda outros materiais isolantes na construção das bobinas com a finalidade adicional de moldar o formato final das mesmas, facilitando a montagem e evitando desgaste do esmalte dos condutores. O

material mais comumente utilizado para tal finalidade é o papelão, moldado especialmente com essa finalidade de modo que apresente boa rigidez mecânica e não reaja quimicamente com o óleo isolante do transformador.

Em transformadores com enrolamentos muito longos, um conjunto de espiras poderá estar sobreposto a outras, formando as chamadas camadas. Entre uma camada de espiras e outra, são utilizadas camadas de papel, que garantem a proteção do esmalte dos condutores, maior isolação entre as camadas submetidas a diferentes potenciais elétricos e melhor controle do formato final da bobina. Em transformadores onde a distribuição de potenciais é um fator crítico, aqueles de menores dimensões e altos valores de tensão, a distribuição das camadas de espiras deve obedecer a um estudo rigoroso para que a rigidez dielétrica dos materiais isolantes não seja excedida. Veremos adiante que podem ainda serem utilizados materiais fenólicos para a melhor disposição dos enrolamentos em torno do núcleo.

TANQUE

O tanque de um transformador, embora não seja parte constituinte nem do circuito elétrico nem do circuito magnético, é de fundamental importância na construção do equipamento.

Entre suas funções está a de condicionar o núcleo e os enrolamentos em seu interior, os protegendo das intempéries e garantindo que as partes vivas do equipamento não sejam facilmente acessíveis.

Além disso, o núcleo é hermeticamente fechado e seu interior é preenchido com óleo isolante, de dupla finalidade: isolação elétrica e refrigeração. Outra finalidade do núcleo é de evitar a entrada de umidade em seu interior, o que prejudicaria a característica de isolação dos materiais isolantes empregados e favoreceria o processo de oxidação dos componentes metálicos. Vimos que os enrolamentos estarão sujeitos a potenciais elétricos, em muitos casos, de valores elevados. Tal condição poderia acarretar a elevação de potencial de equipamentos localizados nas proximidades do equipamento, que poderiam ocasionar acidentes e falhas no funcionamento da subestação. O tanque do transformador é então aterrado, garantindo que seu potencial seja nulo e, portanto evitando distribuições de potencial indesejadas nas proximidades do equipamento, excetuando-se alguns casos especiais que serão detalhados à frente.

Há ainda funcionalidades acessórias, tais como a de dar suporte à instalação de radiadores de calor e seu sistema de ventilação forçada, caso exista. No tanque, ou carcaça, são ainda instalados os quadros de comando e ligação do transformador, o tanque de expansão, aparelhos de medição e monitoramento, comutador, entre outros.

BUCHAS

Vimos que o tanque do transformador possibilita o confinamento dos potenciais elétricos em seu interior, no entanto, é necessário alimentar os enrolamentos do equipamento, ou seja, ligá-los eletricamente ao exterior através de condutores isolados ou nus. Nesse processo, é necessário garantir que não haverá contato elétrico entre o tanque e os condutores e que a condição hermética do núcleo não seja prejudicada.

O componente capaz de realizar tais funções é a bucha, que dá suporte mecânico e características de isolamento e distribuição de potencial adequado para a alimentação do transformador. A bucha deve ser capaz de oferecer a distância necessária entre os pontos de passagem de condutores e o tanque, de modo a evitar descargas entre condutores e tanque.

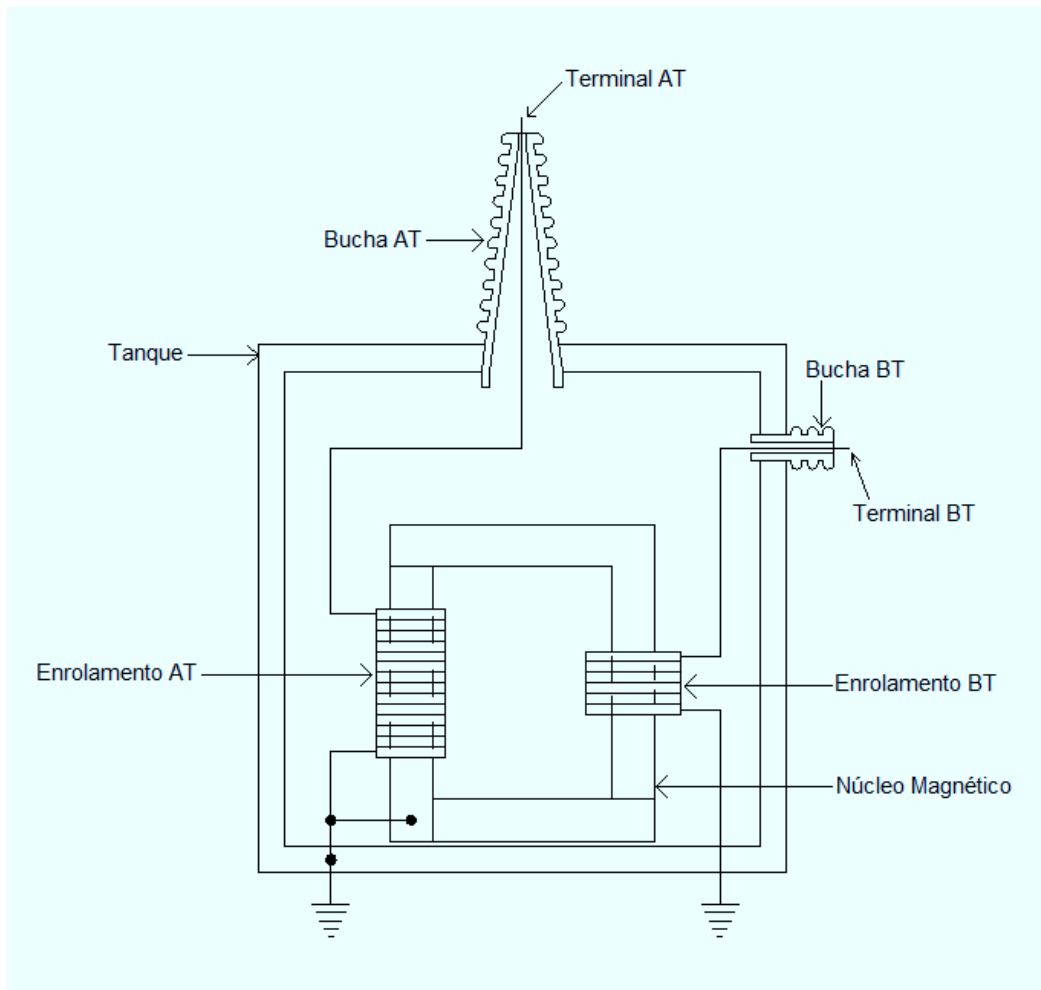


Figura 9. Esquema de um transformador mostrando seus principais componentes.

Por estar instalada do lado externo do transformador, a bucha deve ser construída de material resistente às intempéries e corrosão além de possuir capacidade mecânica de suportar seu próprio peso e a força de tração imposta pelos cabos a ela conectados.

Na Figura 8 pode ser visto um esquema básico de um transformador onde são evidenciadas as principais partes constituintes descritas anteriormente. Observe que a forma de ligação dos enrolamentos apresentada na figura é meramente ilustrativa e o transformador evidenciado é do tipo monofásico. Mais detalhes sobre a construção de transformadores dos diversos tipos podem ser encontrados em literatura especializada. Para os propósitos do presente trabalho, os conceitos fundamentais explanados servirão de base para o detalhamento do transformador em estudo.

2.1 TÉCNICAS DE ALTA TENSÃO

Conforme demonstrado em seções anteriores, a utilização de altas tensões apresenta diversas vantagens, sobretudo em termos de redução de perdas e economia de condutores, devido à diminuição de corrente. Projetar e operar equipamentos utilizando altas tensões requer, no entanto estudos cuidadosos devido às necessidades de isolamento, seja pelo cálculo das distâncias, emprego de materiais isolantes ou formato dos componentes. Os efeitos das altas tensões podem ser estudados tanto na frequência de utilização para a qual foram projetados, como por modelos de circuitos eletrostáticos.

A geração e medição de altas tensões não é tarefa corriqueira. Para a obtenção de altos valores de tensão em laboratório, seja para ensaio de equipamentos ou para pesquisas é necessário um conjunto de equipamentos de grande complexidade e muitas vezes, de grandes dimensões. Seria impraticável, tanto por questões econômicas como de segurança, a utilização de altas tensões oriundas diretamente de sistemas elétricos em funcionamento. Dessa forma, deve-se buscar equipamentos que possibilitem a obtenção de altas tensões sob condições controladas e em ambiente adequado. São basicamente três tipos de sinais de tensão utilizados em laboratórios de alta tensão: tensão alternada em frequência industrial, impulso de tensão e tensão contínua. Cada um desses tipos de tensão requer um instrumental específico para sua geração e medição.

O ramo da Engenharia Elétrica especializado na geração e medição de altos níveis de tensão em laboratório é denominado Técnicas de Alta Tensão, coincidindo o termo com uma das disciplinas dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica. Tal estudo é ainda denominado Engenharia de Alta Tensão, do inglês *High Voltage Engineering*. Nesse âmbito, estão compreendidos tanto os estudos para projeto e construção de equipamentos voltados à utilização de altas tensões em laboratório como a obtenção de resultados experimentais utilizando tais fontes, ou seja, pesquisas relacionadas ao comportamento de materiais e equipamentos quando submetidos a altas tensões em suas diversas formas.

2.2 RUPTURA DOS DIELÉTRICOS

No estudo do comportamento dos materiais quando submetidos a altas tensões, a característica mais importante a ser analisada é a ruptura dos dielétricos. As faltas no sistema elétrico de potência ocorrem normalmente devido ao rompimento dos dielétricos, total ou parcialmente. Dois motivos acarretam esse tipo de acontecimento: o mal condicionamento do dielétrico ou o excessivo campo elétrico aplicado ao material em determinado ponto, ou seja, concentrações de campo.

A ruptura dos dielétricos causa prejuízos, seja pela perda de energia associada, deterioração do material isolante, ou mesmo pelos danos causados aos equipamentos em decorrência da falta. Além da ruptura dos dielétricos, através das chamadas descargas disruptivas, são estudadas também as descargas parciais que são pequenas descargas elétricas que ocorrem no interior dos dielétricos, geralmente devido a imperfeições ou presença de impurezas, mas não causam a ruptura completa do meio isolante. Nas descargas parciais não há formação de um caminho de corrente entre dois pontos sob diferentes potenciais e separados pelo dielétrico, o que ocorre são formações de pequenas descargas no interior do material dielétrico.

Estuda-se separadamente a ruptura nos materiais dielétricos sólidos, líquidos e gasosos devido às diferenças no comportamento dos materiais e no mecanismo de ruptura. A temperatura ambiente e pressões normais os gases são ótimos isolantes elétricos, com condutâncias da ordem de 10^{-17} A/cm². Quando submetidos a diferenças de potencial, entre dois eletrodos metálicos por exemplo, há ionização das moléculas gasosas, com forte tendência de movimento de cargas entre um eletrodo e outro, causando a ruptura do dielétrico a condução de eletricidade entre os eletrodos. Antes da ruptura, se observa que a diferença de potencial aplicada ao dielétrico causa ionização de suas moléculas, devido à atração sofrida pelos elétrons mais externos. Em determinado momento, as moléculas encontram-se altamente ionizadas e o movimento brusco de um elétron ao se chocar com elas causa a formação de uma avalanche de elétrons que origina a corrente disruptiva.

A utilização de materiais isolantes sólidos é vasta em todos os níveis de tensão. Nas altas tensões são muitos os isolantes sólidos empregados, alguns combinados com

isolantes líquidos como o papel impregnado em óleo mineral. Várias teorias foram formuladas na tentativa de explicar a ruptura dos dielétricos sólidos, havendo ainda necessidade de estudos aprofundados que detalhem completamente seu mecanismo. Isso porque nesses materiais há formação de correntes que, ao contrário dos gases, vêm de várias fontes de polarização: iônica, eletrônica ou movimento de dipolos, sendo que, do ponto de vista da medição, as correntes originadas por cada tipo de polarização não apresentam diferenças, dificultando o estudo de cada tipo separadamente.

A ruptura dos dielétricos líquidos necessita também de definições conclusivas, havendo atualmente duas formas de abordagem do problema. Na primeira, se analisa o comportamento dos líquidos como uma extensão da teoria dos gases, atribuindo a ruptura então à formação da avalanche de elétrons ocasionada pela ionização das moléculas. Essa teoria é razoável para líquidos de extrema pureza, onde a polarização eletrônica e iônica é reduzida. Quando há, no entanto, presença grande de impurezas, a medida que o campo aplicado é elevado, o líquido tende a apresentar uma corrente crescente, que depois é estabilizada, e por final, quando o campo aplicado é muito elevado, tende a uma instabilidade, ocorrendo então a avalanche. A outra forma de abordagem da ruptura dos dielétricos líquidos tenta inicialmente explicar fisicamente o comportamento dos líquidos, partindo daí para a explicação das razões e das características da condução nos líquidos. Deve-se sempre levar em consideração no estudo de dielétricos líquidos a chamada ruptura de cavidade, causada por inclusão de gases na forma de bolhas. Essas bolhas causam diminuição da característica isolante do meio pois o gás em seu interior geralmente apresenta menor rigidez dielétrica que o líquido no qual está imerso, configurando portanto um ponto de concentração de campo elétrico e favorecendo a ruptura.

O rompimento dos dielétricos é de grande preocupação em equipamentos de alta tensão, sendo responsáveis pelo desgaste dos isolantes e, portanto, do equipamento, o que ocasiona prejuízos materiais e imateriais devido ao risco de defeitos causadores de acidentes. Este é por isso um estudo importante da área de Técnicas de Alta Tensão e seus resultados são utilizados no dimensionamento e escolha dos materiais empregados na construção dos equipamentos.

2.3 GERAÇÃO DE ALTAS TENSÕES

Em Técnicas de Alta Tensão são comuns a utilização de tensões alternadas, contínuas e de impulso. Para cada forma de onda desejada, são utilizados circuitos específicos que permitem sua geração controlada e medição. Geralmente são utilizadas fontes de baixa tensão alternada (da ordem de 100 a 400 V) para a alimentação dos equipamentos que possibilitarão a geração das altas tensões. Por esse motivo, seja qual for o tipo de tensão desejado, deve-se partir sempre de tensões alternadas e o equipamento mais utilizado para elevação desse tipo de tensão é o transformador. Mesmo quando a tensão desejada seja do tipo contínua ou de impulso, o transformador elevador é utilizado pois é realizada a elevação da tensão alternada para em seguida ser obtida, por meio de circuitos e equipamentos específicos, as formas desejadas.

Vimos que, no estudo de equipamentos elétricos, são necessários níveis de tensão elevados pois atualmente os sistemas elétricos de transmissão operam tipicamente na ordem de 230, 500 ou 700 kV e há sistemas de transmissão operando em 1000 kV e estudos para utilização de níveis ainda mais elevados. Além disso, para os ensaios de equipamentos é necessária a aplicação de tensões superiores às tensões nominais, pois os equipamentos, quando em utilização, são muitas vezes expostos a níveis superiores aos nominais.

Geradores de alta tensão são então fabricados com o intuito de produzir tensões acima dos valores nominais dos sistemas, mesmo quando estas já são elevadas. Os valores aplicados são determinados por normas nacionais e internacionais assegurando o funcionamento seguro dos equipamentos quando sujeitos a sobretensões.

A maioria dos equipamentos elétricos empregados atualmente em altas tensões são alimentados em tensão alternada, em 50 ou 60 Hz. É portanto, a alta tensão alternada, a mais utilizada em ensaios e pesquisas em alta tensão. Para a geração de altas tensões alternadas são utilizados basicamente dois tipos de circuitos geradores: os transformadores para ensaios e os circuitos série ressonantes. Os transformadores para ensaios são a categoria de equipamento a ser estudado de forma aprofundada neste trabalho. Em ambos, a técnica de elevação de tensão consiste na utilização de uma fonte alternada de baixa tensão (da ordem de 200 a 400 V) seguida pelo aparato elevador. No caso dos

transformadores para ensaios são utilizados um sistema de controle para aplicação da baixa tensão e um transformador com alta relação de transformação, capaz de elevar a tensão aos níveis desejados. São empregados muitas vezes ligação de transformadores para ensaios em cascata. Mais à frente serão detalhados os aspectos construtivos de vários tipos de transformadores para ensaios e suas formas de ligação. Os circuitos série ressonantes utilizam de forma proposital a ressonância entre indutâncias e capacitâncias de forma controlada obtendo-se altos valores de tensão entre os elementos série quando é atingida a frequência fundamental do circuito. Dado que os objetos ensaiados em alta tensão são prioritariamente capacitivos, estes constituem a capacitância necessária à construção do circuito LC, podendo ser utilizado o enrolamento secundário de um transformador para ensaios como o elemento indutivo desejado.

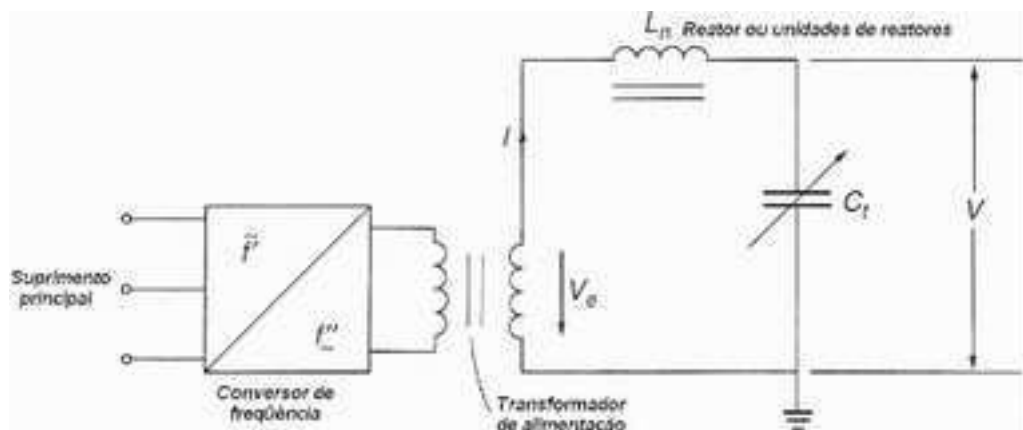


Figura 10. Circuito série ressonante utilizando conversor de frequência. [KUFFEL].

Na Figura 10 é mostrado um circuito série ressonante alimentado por uma fonte de tensão de frequência variável, cuja tensão é elevada com a utilização de um transformador elevador e em seguida o circuito LC série propriamente dito, onde a capacitância é composta pelo próprio objeto sob teste e a indutância por um reator ou unidades de reatores em série. Conforme a frequência é variada, aproxima-se do valor de ressonância onde são atingidos altos valores de tensão devido à baixa impedância alcançada.

Altas tensões em corrente contínua são usualmente empregadas em ensaios de objetos de teste cuja alta capacitância requereria grande potência das fontes de tensão alternada como cabos muito longos, por exemplo. Além disso, são empregadas ainda altas tensões contínuas em ensaios de equipamentos utilizados em sistemas de transmissão em corrente contínua e pesquisas científicas em Engenharia Elétrica, Física aplicada, Eletroquímica e áreas afins. Usualmente são utilizados transformadores para ensaios para

a obtenção de altas tensões alternadas e em seguida, circuitos retificadores que utilizam diversos dispositivos semicondutores em série. Os retificadores semicondutores substituíram com muitas vantagens as antigas formas de retificação como válvulas, piscinas de mercúrio e retificadores mecânicos. Os diodos semicondutores utilizados constituídos de silício normalmente não suportam tensões reversas maiores que 2500 V mas se prestam muito bem à conexão em série de vários deles, constituindo circuitos série divisores de tensão. Na Figura 11 é apresentado o circuito de um gerador de alta tensão contínua de meia onda, ou seja, que possibilita a passagem de tensão em apenas uma polaridade e “grampeia” o valor de pico durante o semi-ciclo seguinte devido à presença do capacitor.

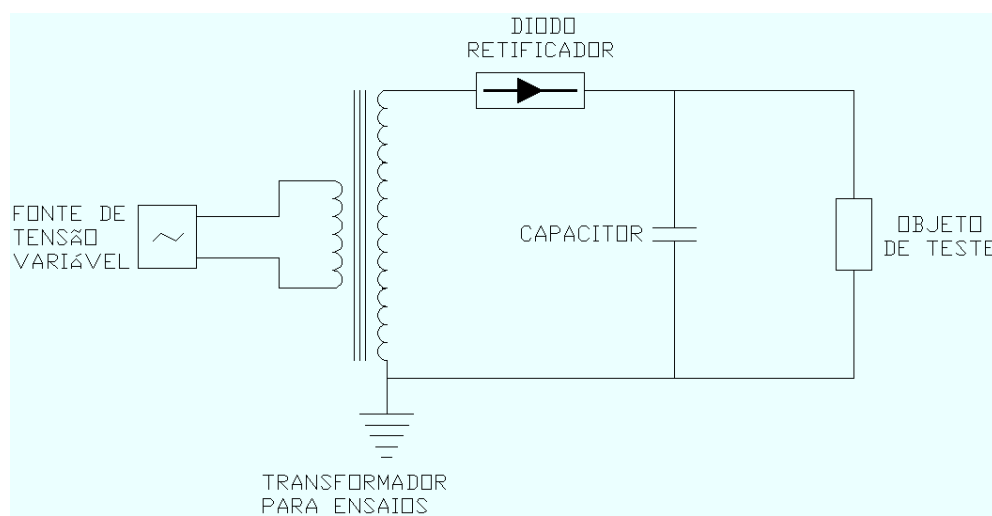


Figura 11. Gerador de Alta Tensão Contínua.

Deve-se observar que, na Figura 11, alguns elementos são mostrados como uma idealização do componente real. O diodo retificador não consiste de um componente, ou equipamento, único fabricado em silício e capaz de operar em valores elevados de tensão. Há na verdade a construção de um diodo de alta tensão a partir de um conjunto de vários pequenos diodos, onde a distribuição de potencial se dá de forma gradual através do conjunto ligado em série. Há diversas considerações de ordem prática a respeito da construção desse tipo de componente, assim como de resistores e capacitores de alta tensão que fogem do escopo deste trabalho. O capacitor mostrado na mesma figura consiste muitas vezes de um circuito divisor de tensão capacitivo que permite a medição de tensão a partir de valores coerentes com os equipamentos de medição usuais, além de que, na construção dos capacitores que compõe o divisor, sobretudo aquele conectado ao terminal de alta tensão, as considerações a respeito do diodo devem ser estendidas. A respeito da geração de alta tensão contínua, existem ainda circuitos mais complexos formados a partir da ligação em cascata de

vários circuitos retificadores idênticos que fogem ao nosso propósito. O que há de mais importante para a finalidade deste trabalho a respeito da geração de alta tensão contínua é que, geralmente, são utilizados transformadores para ensaios na geração de uma alta tensão alternada e a partir dela são obtidas as altas tensões contínuas, o que reforça a importância de tal equipamento no estudo das Técnicas de Alta Tensão. Outros modos de geração de alta tensão contínua são possíveis, a partir dos chamados geradores eletrostáticos, tais como o gerador de Van de Graaff. O princípio de funcionamento de tais arranjos é a propriedade de atração entre cargas devido ao atrito com corpos compostos de materiais distintos.

O terceiro tipo usual de sinal de alta tensão utilizado em laboratório é a tensão de impulso, caracterizada por uma forma de onda de curta duração (poucos ciclos) e alto valor máximo, sendo o tempo de subida da onda bastante inferior ao de descida. Duas formas de onda de tensão de impulso são padronizadas e aceitas internacionalmente para caracterizar as tensões de impulso atmosférico (decorrentes da ocorrência de descargas atmosféricas, ou raios) e tensões de impulso de manobra, que são respectivamente a forma de onda $1,2/50 \mu\text{s}$ e $8/20 \mu\text{s}$. Onde o primeiro número indica o chamado tempo de subida e o segundo o chamado tempo de cauda, ou seja, no impulso de tensão atmosférico, o tempo necessário para que a onda atinja o valor máximo é $1,2 \mu\text{s}$ e o para que decaia até metade do valor máximo é de $50 \mu\text{s}$. Diversos são os circuitos e arranjos utilizados para obtenção dos sinais de impulso de tensão, onde os valores dos elementos (sobretudo resistores) utilizados determinam os parâmetros da forma de onda desejada. É de interesse novamente observar que para a alimentação de tais circuitos, parte-se de uma fonte de tensão alternada controlável de baixa amplitude, que por sua vez alimenta um transformador para ensaios, permitindo a obtenção de alta tensão alternada que então é utilizada nos circuitos geradores de impulso de tensão para a obtenção das formas de onda desejadas.

Concluimos desse pequeno resumo acerca das formas de onda usualmente utilizadas em Técnicas de Alta Tensão que os transformadores para ensaios estão presentes em praticamente todos os arranjos utilizados para obtenção das três formas de onda desejadas, sendo portanto um equipamento fundamental em qualquer laboratório de alta tensão.

2.4 TRANSFORMADORES PARA ENSAIOS

Vimos na seção anterior a importância dos transformadores para ensaios na manipulação de altas tensões em laboratório com suas diversas finalidades. O estudo mais aprofundado desses equipamentos é então de fundamental importância aos que desejam se aprofundar no estudo de Técnicas de Alta Tensão.

Transformadores para ensaios guardam muitas similaridades com os transformadores de potencial e os transformadores de potência empregados em sistemas de alta tensão. Com os transformadores de potencial, assemelham-se devido às altas relações de transformação e baixa potência nominal, no entanto, apresentam grande diferença quando consideram-se tensões nominais superiores a 138 kV, onde os transformadores de potencial empregados são do tipo TPC (transformador de potencial capacitivo) cuja construção é bem diversa dos transformadores para ensaios, onde não são utilizados divisores capacitivos em sua construção. Com os transformadores de potência guardam semelhança no que diz respeito ao aspecto construtivo, sobretudo para valores de tensão da ordem de 300 kV ou maiores. A presença de uma bucha de alta tensão (a depender do tipo de transformador para ensaios considerado) e o volume do tanque são características semelhantes. No entanto, os transformadores de potência tem uma menor relação de transformação se comparados aos transformadores para ensaios, além disso, como diferença ainda mais marcante, a potência dos mesmos é muito elevada já que sua finalidade é a transmissão de potência entre os circuitos primário e secundário, enquanto que nos transformadores para ensaios a potência transmitida é mínima. Devido à segunda diferença descrita, as correntes e fluxos magnéticos circulantes nos transformadores para ensaios são bastante pequenas, a despeito dos altos níveis de tensão empregados no enrolamento secundário.

Há várias formas de construção de transformadores para ensaios e vários arranjos possíveis a partir de cada um deles, sendo que três formas construtivas serão descritas a seguir em detalhes. A parte interna, ou seja, núcleo e enrolamentos serão apresentados de forma idêntica para os três mas deve-se levar em conta que podem existir diferenças construtivas também em relação a esses componentes, no entanto, a finalidade é descrever as distinções em relação ao aspecto construtivo externo. Na Figura 12 é mostrado o primeiro tipo construtivo, onde o tanque é confeccionado em material metálico (ferro ou aço) e a tampa é confeccionada em material isolante (compostos fenólicos ou acrílicos). Nesse arranjo, há a presença de uma bucha de alta tensão apenas com a finalidade de melhorar o acesso ao terminal de alta tensão, no entanto, a tampa isolante garante a isolação entre a carcaça

metálica aterrada e o terminal de alta tensão. Essa bucha pode ser construída em resina epóxi dadas suas pequenas dimensões e pouco esforço mecânico ao qual estará exposta.

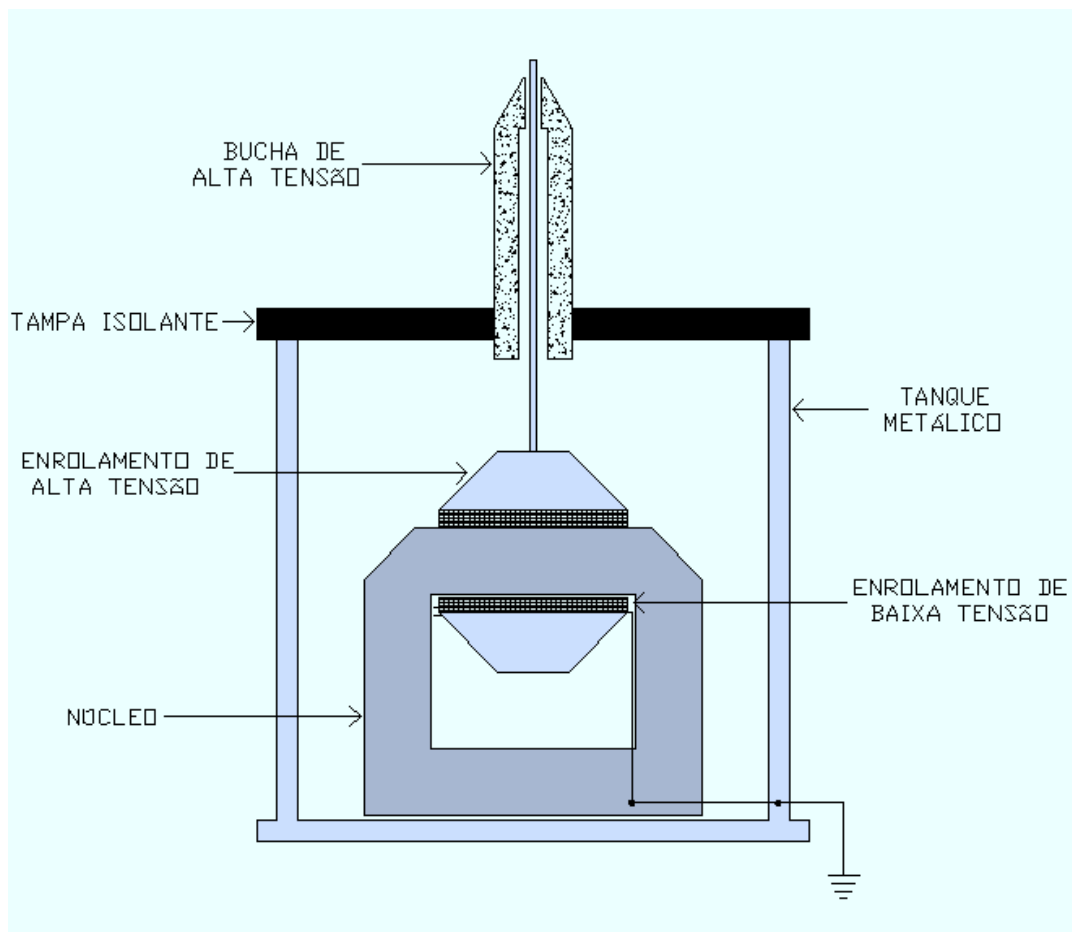


Figura 12. Transformador para ensaios com tampa isolante e tanque metálico.

Esse tipo de transformador para ensaios presta-se bem à obtenção de tensões da ordem de 50 a 200 kV e um exemplar pode ser visto na Figura 13, que mostra um transformador para ensaios de propriedade do Laboratório de Alta Tensão da UFCG, bastante utilizado no ensaio de equipamentos de proteção individual e coletiva. Algumas observações devem ser feitas em relação às ligações e disposição das bobinas em transformadores para ensaios. Conforme verificado na Figura 12, um dos terminais do enrolamento de baixa tensão e do enrolamento de alta tensão são conectados entre si e a um condutor que é aterrado, além de ser também conectado à carcaça metálica do transformador e ao núcleo magnético. Não é mostrado na figura mas o segundo terminal do enrolamento de baixa tensão deve ser acessível a partir de um borne na carcaça do equipamento. Além disso, é usual que aquele terminal aterrado mostrado na figura seja também acessível através de um borne e seu aterramento seja opcional.



Figura 13. Transformador para ensaios de propriedade do LAT-UFCG.

O segundo terminal do enrolamento de alta tensão é necessariamente levado ao terminal de alta tensão, na extremidade da bucha, através de um condutor de subida mostrado na figura. Tal configuração pode ser melhor compreendida a partir do circuito apresentado na Figura 14

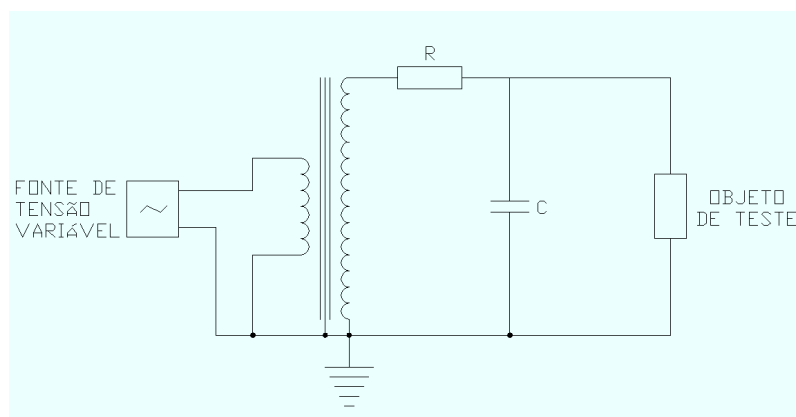


Figura 14. Esquema de ligação típico de transformadores para ensaios.

O formato da bucha de alta tensão do transformador apresentado na Figura 12 é importante para o estudo das distribuições de campo ao seu redor e será detalhado em outras seções.

Dessa maneira, o aterramento serve como referência de tensão para praticamente todos os elementos do circuito e deve ser por isso realizado de forma cuidadosa e efetiva.

Outra configuração bastante utilizada na construção de transformadores para ensaios é do tipo apresentado na Figura 15. Nesse tipo de equipamento é dispensada a utilização da bucha de alta tensão vista no esquema anterior, já que o terminal de alta tensão está conectado eletricamente à tampa metálica do equipamento.

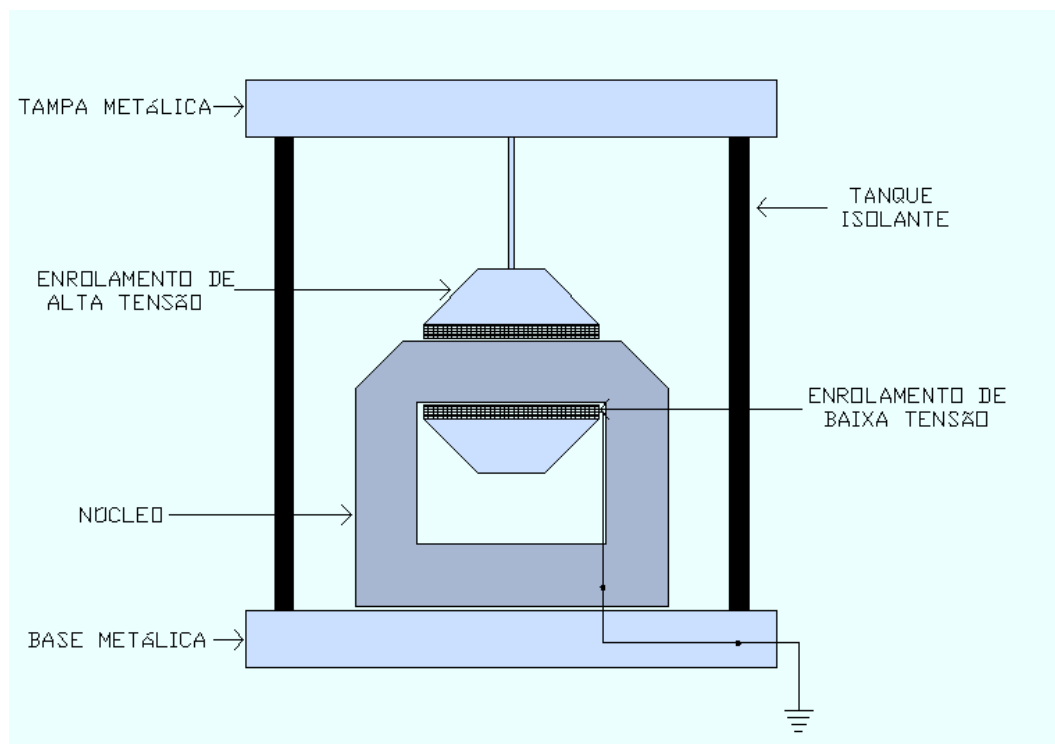


Figura 15. Transformador para ensaios com carcaça isolante e tampa metálica.

As considerações a respeito da forma de ligação dos enrolamentos e conexões à terra são válidas novamente, devendo-se observar, no entanto, que agora apenas a base do transformador será conectada à terra e não sua carcaça metálica inteira já que as laterais serão agora constituídas de material isolante (tipicamente são utilizados compostos fenólicos, resinas epóxi ou mesmo buchas cerâmicas). As laterais isolantes garantem a separação elétrica entre a base metálica conectada a um dos terminais do enrolamento de alta tensão e a tampa metálica conectada ao outro terminal. Haverá portanto entre a tampa e a base a diferença de potencial correspondente ao enrolamento de alta tensão. No Laboratório de Alta tensão da UFCG há exemplares desse tipo de transformador para ensaios, com tensões nominais 0,22/100 kV sendo este um tipo de transformador de bastante comum utilização em Técnicas de Alta Tensão, sendo fornecidos juntamente com os chamados kits de alta tensão (constituídos

por transformadores, mesas de comando, resistores, capacitores e diversos equipamentos auxiliares). Na Figura 16 é apresentado um desses equipamentos, cujas laterais são compostas em material fenólico.

No que diz respeito às distribuições de campo elétrico, o formato da tampa e da base deste tipo de transformador são importantes por evitarem concentrações de campo causadas por quininas por exemplo. Embora tenhamos ilustrado a ligação do terminal inferior (base metálica) diretamente à terra, há formas de ligação distintas que serão exemplificadas à frente e que elevam o potencial da base metálica.



Figura 16. Transformador para ensaios com carcaça isolante e tampa metálica de propriedade do LAT-UFCG.

O terceiro tipo de transformador para ensaios considerado é mais indicado à utilização em valores altos de tensão. Este é o modelo que mais se assemelha aos transformadores de potência convencionais, a maior diferença em relação ao aspecto construtivo é a ausência de radiadores ou ventilação forçada, além da ausência de buchas de baixa tensão já que a alimentação é realizada em valores baixos o que exige apenas a presença de uma caixa de ligações. A ausência de radiadores ou ventilação forçada é devido a uma característica comum a todos os transformadores para ensaios: as pequenas correntes e potência nominal, o que acarreta pouca geração de calor, além de sua utilização em curtos intervalos de tempo. Na Figura 17 é apresentado um esquema de construção de um transformador com essas características

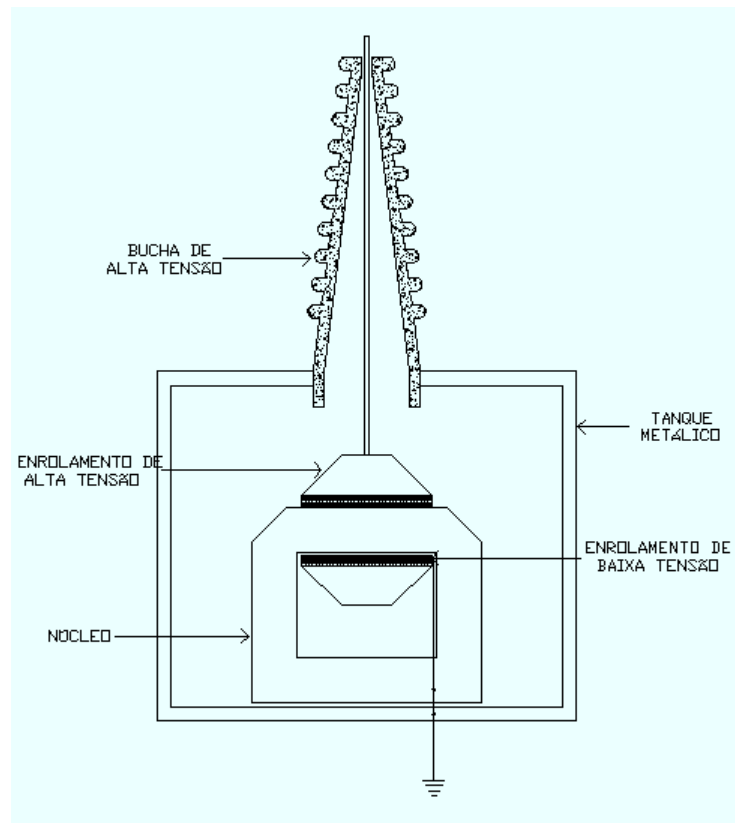


Figura 17. Transformador para ensaios com tanque metálico e bucha de alta tensão.

Um aspecto importante referente aos enrolamentos dos transformadores para ensaios deve ser observado. O enrolamento de baixa tensão apresenta pouca diferença de potencial entre seus terminais, valores sempre menores que 1 kV e muitas vezes da ordem de 0 a 300 V. Dada a grande relação de transformação, se sabe que a corrente no enrolamento de baixa tensão será muito superior ao de alta tensão, então, os condutores empregados devem ser bastante distintos em relação à seção transversal. Outra consideração a ser realizada é a elevação de potencial, que para os dois enrolamentos, se inicia num potencial igual ao do núcleo aterrado e aumenta conforme as espiras vão sendo dispostas ao redor do núcleo. Como são muitas espiras no enrolamento de baixa tensão e principalmente no enrolamento de alta tensão, serão criadas várias camadas de espiras isoladas entre si. Com a elevação de potencial, as espiras mais afastadas do núcleo estarão submetidas a um potencial mais elevado. Devido às duas considerações anteriores: maior seção dos condutores do enrolamento de baixa tensão e aumento do potencial com o afastamento do núcleo, é imperativo que o enrolamento de baixa tensão seja disposto mais próximo do núcleo que o enrolamento de alta tensão, ou seja, no processo de confecção do equipamento, é bobinado inicialmente o enrolamento de baixa tensão, com sua menor variação de potencial e

condutores de maior seção transversal para que em seguida seja sobreposto ao primeiro, o enrolamento de alta tensão, com elevação de potencial considerável em relação ao núcleo e condutor de menor seção. Seria portanto encarecedor dispor o enrolamento de baixa tensão sobre o de alta pois o comprimento das circunferências (espiras) seria elevado. Além disso, a diferença de potencial entre os dois terminais do enrolamento de baixa tensão é bem menor que no caso do enrolamento de alta tensão, então, caso o enrolamento de alta tensão fosse disposto mais próximo do núcleo, seria necessária a utilização de uma grande camada isolante entre os enrolamentos devido à diferença entre o maior potencial de alta tensão e o potencial de referência no início do enrolamento de baixa tensão. Há ainda uma questão relacionada ao fluxo magnético concatenado: dispondo o enrolamento de alta tensão, ou seja, o enrolamento secundário, ao redor do enrolamento de baixa tensão, ou primário, garante-se melhor aproveitamento do fluxo magnético gerado no primário para o secundário. Entre uma camada e outra dos enrolamentos de alta e baixa tensão são dispostas camadas de papel que devem oferecer isolamento adequada entre os diferentes potenciais nas camadas adjacentes. Os fios utilizados são ainda revestidos por uma camada de esmalte isolante e são utilizadas ainda camadas de papel rígido, como papelão, entre enrolamentos e entre o enrolamento e o núcleo com a finalidade de aumentar a isolamento e oferecer suporte mecânico à confecção das bobinas.

Outra característica do enrolamento de alta tensão é seu formato trapezoidal, ou seja, as primeiras camadas apresentam mais espiras (maior largura) do que as últimas, isto por que, os potenciais mais elevados (últimas camadas) devem apresentar maior distância em relação aos pontos submetidos ao potencial de referência. Isto é ainda mais crítico na parte do enrolamento que fica próximo às pernas do núcleo (na janela do núcleo). Na Figura 18 é mostrado um esquema típico de ligação dos enrolamentos de um transformador para ensaios. As cores em escala de cinza apresentadas representam a elevação de potencial ao longo do enrolamento, onde o núcleo apresenta o potencial de referência (cor branca) e a última camada do enrolamento de alta tensão representa o maior potencial. A ligação fictícia ao núcleo demonstra o potencial de referência aplicado ao início dos enrolamentos, deve-se levar em conta que esses terminais são geralmente acessíveis através de bornes na carcaça do equipamento.

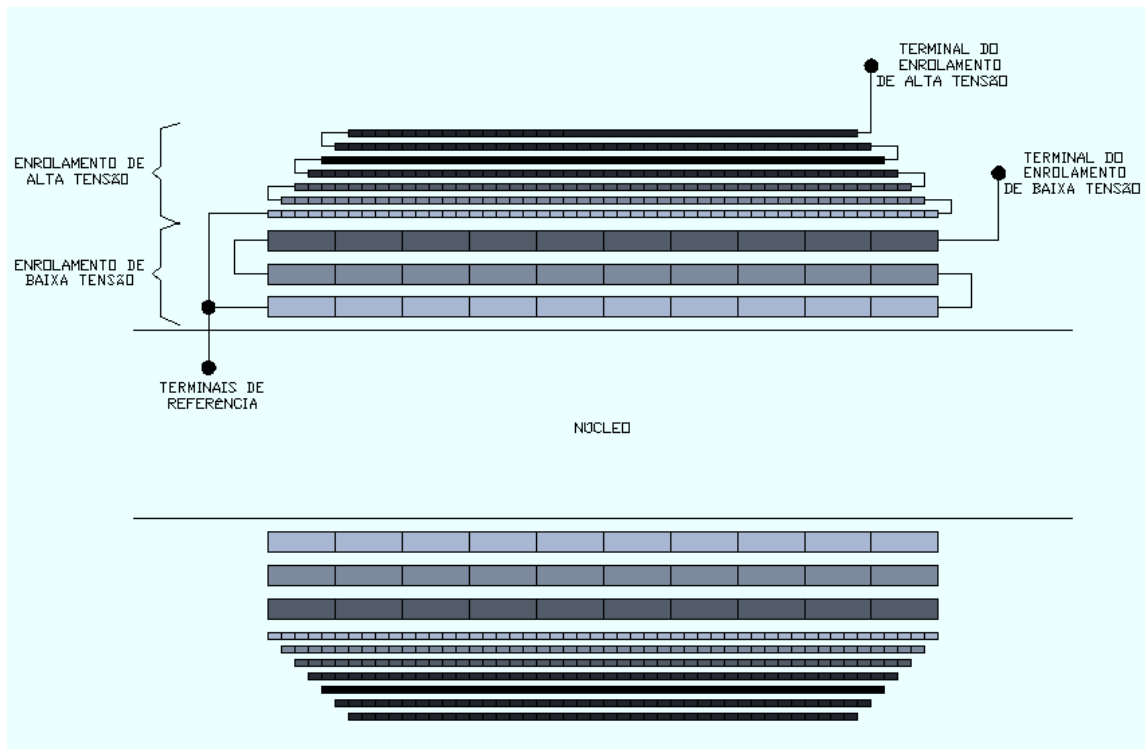


Figura 18. Disposição dos enrolamentos do transformador para ensaios.

2.5 ANÉIS EQUALIZADORES

Após a última camada do enrolamento de alta tensão dos transformadores para ensaios costuma-se utilizar anéis e chapas equalizadoras com a finalidade de uniformizar o potencial na região externa ao enrolamento.



Figura 19. Anéis e chapa equalizadora envolvendo o enrolamento de alta tensão.

2.6 OUTRAS CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DE TRANSFORMADORES PARA ENSAIOS

A explanação a respeito das principais características dos transformadores vista anteriormente é suficiente para a continuidade do presente trabalho. Há ainda algumas características desses equipamentos, sobretudo em relação a formas de conexão que são interessantes para os interessados em aprofundar o tema. A ligação em cascata e suas implicações não são necessárias ao entendimento das simulações de campos elétricos e o equipamento a ser estudado em profundidade não deverá prever este tipo de ligação, portanto, dispensamos seu estudo.

Deve ser buscado na bibliografia especializada (ver Referências Bibliográficas) o aprofundamento sobre o tema, em KUFFEL ou KAMARAJU há uma farta base teórica e rica exemplificação com fotos e desenhos para auxiliar nesse aspecto.

2.1 PROBLEMAS DE VALOR DE FRONTEIRA

Conforme destacado no início do texto, a simulação de campos elétricos é uma importante etapa no projeto de equipamentos elétricos de alta tensão. Quando se trata de transformadores para ensaios, o problema é ainda mais importante. A partir da Lei de Coulomb e da lei de Gauss, calculamos campos elétricos a partir de distribuições de carga conhecidas, ou quando o potencial V numa região é conhecido. No entanto, na maioria das situações práticas, nem a distribuição de cargas nem a distribuição de potencial são conhecidas.

Para simulação de campos elétricos em equipamentos alimentados por tensões alternadas, como os transformadores, podemos realizar uma abordagem eletrostática, considerando os potenciais nos pontos definidos e resolvendo o problema da distribuição de campos elétricos. O chamado problema de valor de fronteira consiste no conhecimento das condições eletrostáticas (potenciais elétricos) em alguns pontos ou regiões (fronteiras) e é desejável determinar os potenciais ao longo de toda a região. Esse é exatamente o problema de simulação de transformadores, onde são conhecidos os potenciais nos enrolamentos e a forma como os mesmos crescem ao longo das camadas e deseja-se estudar as distribuições de potenciais nas demais regiões, inclusive externamente ao equipamento.

Na solução clássica do problema de condições de fronteira são utilizadas as equações de Poisson e Laplace ou, ainda, o método das imagens. Os dois primeiros métodos envolvem a resolução de equações diferenciais que descrevem matematicamente o comportamento dos campos elétricos e magnéticos a partir das leis de Maxwell. O método das imagens é comumente utilizado para determinar potenciais e campos elétricos associados a cargas elétricas na presença de condutores. Por esse método se evita resolver as equações de Poisson e Laplace ao considerar o fato de que uma superfície condutora é equipotencial, reduzindo a complexidade da solução de vários problemas. O método das imagens estabelece que uma dada configuração de carga próxima a um plano infinito condutor perfeito aterrado pode ser substituída pela própria configuração de carga, por sua imagem e por uma superfície equipotencial no lugar do plano condutor.

Há ainda diversos métodos (analíticos, gráficos, numéricos, experimentais, etc.) para resolver um determinado problema de distribuição de potenciais, havendo pois diversas formas de resolução da equação de Laplace e é de se esperar que todos os caminhos levem à mesma solução, do contrário, necessitaríamos descartar os métodos que conduzissem a resultados distintos. Essa preocupação é expressa no teorema da unicidade que garante

a solução única para um problema de distribuição de potenciais seja qual for o método empregado na resolução das equações de Laplace. O teorema da unicidade nos diz que: se uma solução da equação de Laplace que satisfaça as condições de fronteira pode ser encontrada, então a solução é única.

Levando em consideração o teorema da unicidade e a proposta de resolução do problema da distribuição de potenciais proposta no presente trabalho, realizaremos o estudo aprofundado da resolução do problema a partir de métodos numéricos, ou computacionais, em particular, o Método dos Elementos Finitos. Garantida a unicidade de resolução do problema, utilizamos o resultado encontrado para a análise da distribuição de campos sem preocupação direta com a resolução das equações diferenciais a partir das Equações de Poisson e Laplace.

2.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos clássicos de resolução de problemas de valor de fronteira descritos anteriormente visam a encontrar uma solução na forma fechada, ou seja, na forma de uma equação algébrica explícita, na qual os valores dos parâmetros do problema podem ser substituídos. Para isso, muitas vezes são feitas idealizações a respeito da configuração do problema para que seja possibilitada a resolução a partir da observação de simetrias e desconsideração de alguns aspectos que podem ser considerados irrelevantes. Ainda que sejam feitas aproximações, a solução exata de problemas desse tipo só é viável para configurações relativamente simples.

Os chamados métodos de resolução não analíticos contrapõe-se aos métodos analíticos, ou exatos, por permitirem a resolução de problemas de maior complexidade, onde as soluções analíticas seriam impossibilitadas. Tais métodos não analíticos compreendem: métodos gráficos, métodos experimentais, métodos analógicos e métodos numéricos. Os três primeiros são de uso limitado e não constituem o objetivo de nossa discussão, enquanto os métodos numéricos, nosso objetivo principal de estudo, são, na atualidade, a forma mais praticável de resolução dos problemas de contorno na simulação de campos e potenciais elétricos, sobretudo devido ao avanço e barateamento dos computadores com alta capacidade de processamento.

Dentre as soluções numéricas usualmente empregadas destacamos o método dos momentos, método das diferenças finitas e método dos elementos finitos, sendo este último o método de solução a ser empregado para resolução do problema proposto a partir de uma ferramenta computacional que será descrita adiante. Dentre os três métodos destacados, o método dos momentos se presta à resolução de equações integrais enquanto os dois outros à resolução de equações diferenciais parciais.

Há uma relação estreita entre as soluções analíticas e as soluções numéricas dos problemas de eletromagnetismo. Para a resolução dos métodos numéricos partimos de uma simplificação analítica que permita a aplicação do método numérico. Embora as soluções encontradas sejam aproximadas, serão suficientes para as necessidades atuais da engenharia e as ferramentas computacionais de alto poder de processamento tem possibilitado soluções de elevada precisão que praticamente eliminam o caráter aproximado dos métodos numéricos.

Conforme mencionado, nosso objetivo é a utilização do método dos elementos finitos (MEF) para a resolução do problema de simulação de potenciais num transformador para ensaios. Detalharemos a seguir a resolução de problemas de fronteira a partir do MEF, exemplificando matematicamente a construção da solução, embora na resolução do problema proposto não seja necessário o equacionamento do método devido à utilização do programa computacional de simulações que aplica automaticamente o MEF a partir do fornecimento de dados do problema e configurações de precisão desejadas.

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Conforme visto anteriormente, o método dos elementos finitos é útil na resolução de equações diferenciais parciais. Enquanto o método das diferenças finitas, que apresenta o mesmo objetivo, representa o domínio em estudo por um conjunto de pontos de grade, o que torna difícil sua aplicação para problemas com contornos e regiões irregulares. Já o MEF é mais viável nestes casos por dividir o domínio em regiões de formatos diversos.

Quatro etapas envolvem a solução de um problema pelo MEF: (1) discretização do domínio (ou região a ser estudada) em um número finito de sub-regiões ou elementos, (2) obtenção das equações que regem o comportamento de um elemento típico, baseado nas

condições dos pontos em sua vizinhança, (3) conexão de todos os elementos no domínio e (4) resolução do sistema de equações obtido.

A primeira etapa, discretização no método dos elementos finitos, consiste em dividir o domínio em elementos que não se sobrepõem, marcando-se os nós e regiões, conforme a , são escolhidos nós e elementos para realizar a divisão.

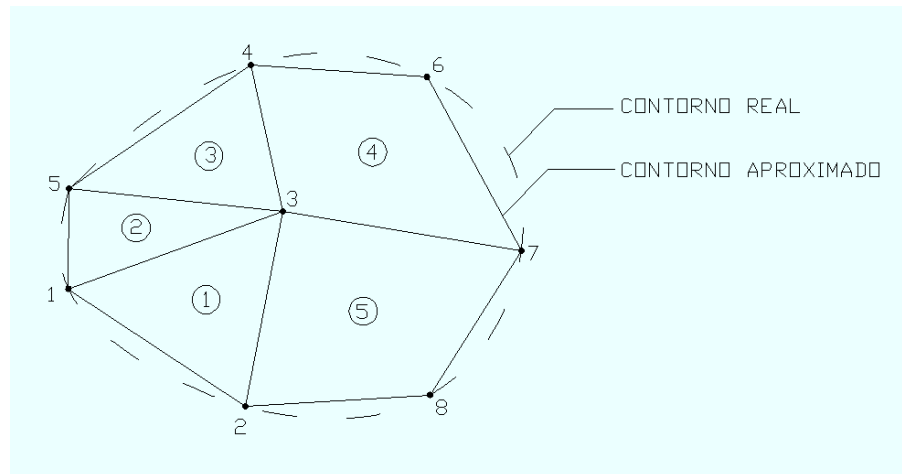


Figura 20. Divisão de um domínio irregular em elementos finitos.

É natural supor que o aumento do número de pontos e consequentemente de regiões tornaria o contorno aproximado cada vez mais parecido com o contorno real, o que naturalmente aumentaria a precisão da solução. Veremos adiante o custo de processamento que tal medida acarretaria. A solução para o problema consiste então em determinar o potencial V_i num elemento i e a partir dele calcular os potenciais nos vários elementos de sua vizinhança e assim por diante. A solução aproximada para toda região é fornecida pela equação 5.

(5)

onde N é o número de elementos triangulares nos quais o domínio é dividido.

Comumente utiliza-se como forma de aproximação para no interior de um elemento a aproximação polinomial, da maneira apresentada na equação 6 para um elemento triangular.

(6)

Para um elemento quadrangular, a equação toma a forma descrita na equação 7.

(7)

Dentro do elemento i , o potencial é diferente de zero, enquanto fora dele o mesmo é zero. Assim, é inviável aproximar o contorno do domínio com elementos quadrangulares. Estes elementos só serão úteis para problemas onde os contornos são regulares. Diante disso, utilizam-se elementos triangulares em toda análise no decorrer deste trabalho. O campo elétrico dentro do elemento triangular é uniforme, expresso conforme a equação 8.

(8)

O cálculo dos potenciais no interior de cada elemento é facilitado se o formato do elemento for triangular, como foi visto acima, e, devido a isso, esta é a forma adotada na maioria dos casos, inclusive com a utilização da ferramenta computacional descrita à frente.

A segunda etapa consiste em equacionar o problema para cada elemento considerado. É necessário então definir as grandezas potencial elétrico ou campos elétricos, que se deseja analisar e construir expressões para encontrá-las a partir de um ponto cujo potencial seja conhecido utilizando as equações de Poisson e Laplace. A simplificação do método reside na escolha de elementos de dimensões reduzidas, de modo que a distribuição de potencial e campo possa ser facilmente encontrada. Além disso, geralmente, na resolução dos problemas, há regiões de potenciais conhecidos, de modo que alguns elementos estão totalmente imersos nelas, o que significa dizer que o potencial no interior do elemento será constante.

Sendo assim, considere um elemento triangular onde os potenciais nos nós 1,2 e3, respectivamente, são obtidos utilizando a equação da aproximação de ϕ é da forma expressa na equação 9.

(9)

Os coeficientes a , b e c podem ser encontrados a partir da equação 10.

(10)

De onde se obtém o resultado expresso na equação 11.

(11)

Que pode ser simplificado para a forma expressa na equação 12.

(12)

Através da equação 12 é possível encontrar o potencial em qualquer ponto (x,y) dentro do elemento, desde que os potenciais nos vértices sejam conhecidos. Os valores dos coeficientes podem ser expressos pelas equações 13, 14 e 15.

(13)

(14)

(15)

Observa-se que os ϕ_i são funções lineares de interpolação. Elas são denominadas funções de forma dos elementos e têm as características apresentadas nas equações 16 e 17.

(16)

(17)

E A_i é área do elemento i , isto é, de tal maneira que o desenvolvimento da equação 15 resulta nas equações 18 e 19.

((18)

((19))

A equação 20, a seguir, oferece a energia por unidade de comprimento, associada ao elemento i .

((20))

Onde se assume um domínio bidimensional, livre de cargas (ρ) . Contudo, a partir da equação 12 se obtém o resultado apresentado na equação 21.

(21)

Substituindo a equação (21) na equação (20), se obtém o resultado apresentado na equação 22.

(22)

Nesta, o termo entre colchetes é definido como pelo resultado apresentado na equação 23.

(23)

E a equação da energia é reescrita conforme a equação 24.

(24)

Onde a matriz $[K]$ é expressa conforme a equação 25 e a matriz $[F]$ conforme a equação 26;

*(25)**(26)*

A matriz é denominada de matriz dos coeficientes dos elementos. Onde há um acoplamento entre os nós j e k , e o valor desse acoplamento é dado, por exemplo, conforme expresso na equação 27.

(27)

De maneira similar, se calcula os valores expressos nas equações 28 a 32.

(28)

(29)

(30)

(X)

(31)

(32)

De forma a facilitar os cálculos se adota os valores expressos nas equações 33.

(33)

Com ($j=1, 2, 3$ são os números dos nós locais), cada termo na matriz dos coeficientes dos elementos é determinado conforme a equação 34.

(34)

Onde o valor de A é expresso pelo resultado apresentado na equação 35.

(35)

Dado que e , \dots

A terceira etapa é a conexão de todos os elementos, ou seja, calculada a distribuição de potencial num elemento, são utilizados os valores encontrados para sua região de fronteira no cálculo dos potenciais nos elementos vizinhos, onde as fronteiras coincidem. A energia associada à conexão de todos os elementos na malha é expressa conforme a equação 36.

(36)

Onde os termos da matriz V são apresentados na equação 37.

(37)

Onde n é o número de nós, N é o número de elementos e $[C]$ é denominada de matriz de rigidez global, que representa a conexão das matrizes dos coeficientes dos elementos individuais, sendo seus termos expressos na equação 38.

(38)

Onde, por exemplo, para encontrar \dots deve ser observado que o nó global 1 pertence aos elementos 1 e 2 e que é o nó local 1 a ambos. Assim, o valor de \dots pode ser encontrado conforme a equação 39.

(39)

Para \dots , o nó global 2 pertence ao elemento 1 somente e é o mesmo que o nó local 3. Dessa forma, o valor de \dots pode ser encontrado conforme a equação 40.

(40)

Para , o nó global 4 é o mesmo que os nós locais 2, 3, e 3 nos elementos 1, 2 e 3, respectivamente. Dessa forma, o valor de ϕ_4 pode ser encontrado conforme a equação 41.

(41)

E assim por diante, de acordo com a quantidade de nós. Vale salientar que não há acoplamento (ou conexão direta) entre os nós 2 e 3, de forma que .

Desta forma é obtido o resultado expresso na equação 43.

(43)

A matriz $[C]$ apresenta as seguintes características:

1. A matriz é simétrica da mesma forma que a matriz dos coeficientes do elemento.
2. Devido à inexistência de acoplamento entre o nó j e k , fica evidente que, para um grande número de elementos, $[C]$ torna-se esparsa e de banda.
3. A matriz é singular.

A quarta e última etapa consiste em calcular as derivadas parciais de W , em relação a cada valor nodal do potencial, para que as mesmas sejam zero, uma vez que a equação de Laplace é satisfeita quando a energia total no domínio é mínima, conforme expresso na equação 43.

(43)

Ou conforme a equação 44, a seguir.

(44)

Há ainda uma característica iterativa que consiste em recalculer os potenciais em cada elemento após finalizar o cálculo numa rodada anterior, isso resulta em aproximações cada vez melhores e o resultado é expresso matematicamente na equação 45.

(45)

Onde n é o número de nós na malha. Assim, para todos os nós se obtém um conjunto de equações simultâneas. Isso pode ser feito através da equação de Laplace ou Poisson.

A partir do método iterativo é possível encontrar os potenciais nos nós livres, m , utilizando a equação 46, que se aplica a uma malha com n nós.

(46)

Como , se o nó k não está diretamente conectado ao nó j , somente nós que estão diretamente ligados ao nó k contribuem para . Assim, se os potenciais nos nós conectados ao nó m são conhecidos, pode-se determinar utilizando a equação (47). Desta forma, inicia-se estabelecendo os potenciais nos nós livres iguais a zero ou iguais ao valor médio de potenciais, dado por,

(47)

Onde são os valores mínimo e máximo dos potenciais. Prestabelecidos nos nós fixos para a partir destes valores se calcular os potenciais nos nós livres. Ao término desta iteração estes valores serão os iniciais para encontrar os potenciais da segunda iteração, seguindo esse procedimento até não haja diferença de valores entre duas iterações, ou que a mesma seja desprezível.

Outra maneira de calcular os potenciais é através do método da matriz de banda, onde a equação será escrita de acordo com numeração dos nós livres e fixos, estando os nós livres numerados primeiro e os nós fixos por último, de modo que é expresso conforme expresso na equação 48.

(48)

Sendo os índices f e p referentes aos nós livres e fixos, respectivamente. Pode ser deduzido também o resultado expresso nas equações 49 e 50.

(49)

(50)

Esta equação pode ser escrita conforme exposto nas equações 51 e 52.

(51)

(52)

onde \mathbf{K} é, em geral, não singular, o potencial nos nós livres pode ser encontrado usando a equação (51). Para isso utiliza-se a técnica de eliminação gaussiana ou a inversão de matrizes. Verifica-se que todos os problemas foram restritos a problemas bidimensionais envolvendo a equação de Laplace, podendo se estender à análise por elementos finitos envolvendo a equação de Poisson ou até mesmo a equação da onda (). O método dos elementos finitos apresenta facilidade quando se trata de utilizar um domínio mais complexo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

No capítulo anterior, abordamos os aspectos teóricos relacionados às leis básicas que regem o eletromagnetismo, aspectos importantes relacionados a altas tensões e simulação de campos elétricos. Além disso, foram descritos alguns tipos de transformadores para ensaios utilizados em Técnicas de Alta Tensão, ou Engenharia de Alta Tensão (do inglês *High Voltage Engineering*) para a obtenção de altas tensões em laboratório. Este ferramental teórico possibilitará a compreensão do presente trabalho que trata da análise de um projeto de transformador para ensaios através de simulações de seus campos, ou potenciais, elétricos a partir do método numérico dos elementos finitos (MEF) utilizando o software Comsol Multiphysics.

3.1 PROJETO DO TRANSFORMADOR

O projeto do transformador para ensaios foi realizado pelo aluno Tiago Oliveira de Medeiros, sob a orientação do professor Edson Guedes da Costa, que também orienta o presente trabalho. O transformador deverá ser construído com a finalidade de ser utilizado no Laboratório de Alta Tensão do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande para geração de altas tensões alternadas e alimentação de equipamentos utilizados na geração de altas tensões contínuas e de impulso. No Anexo A é apresentado o resumo do projeto elaborado para a construção do equipamento, onde estão presentes todas as informações necessárias à realização das simulações de campo elétrico. A seguir serão descritos os cálculos necessários à construção do modelo para simulação.

Algumas simplificações foram realizadas para tornar possível a simulação computacional, uma vez que, o aumento da complexidade do modelo requer maior capacidade de processamento, impedindo a realização do trabalho em computadores pessoais de capacidade convencional. As simplificações consistem na representação das camadas dos enrolamentos. Ao invés de serem representados os diversos condutores que compõe cada camada, conforme a Figura B-7, foi utilizada a representação de um único potencial

contínuo que representasse toda a camada. O valor escolhido para o potencial em cada camada foi o valor máximo de potencial atingido, ou seja, o valor do potencial na última espira do enrolamento. Dessa maneira não há prejuízo em relação aos esforços elétricos a que estarão sujeitos os materiais isolantes, objetivo principal deste trabalho. Na Figura 21, a seguir, é detalhada a simplificação realizada. Nesta figura, deve ser levado em conta que $V1 < V2 < V3 < \dots < V18 < V19 < V20$, ou seja, o potencial adotado para cada camada é sempre o maior entre as espiras que a compõe.

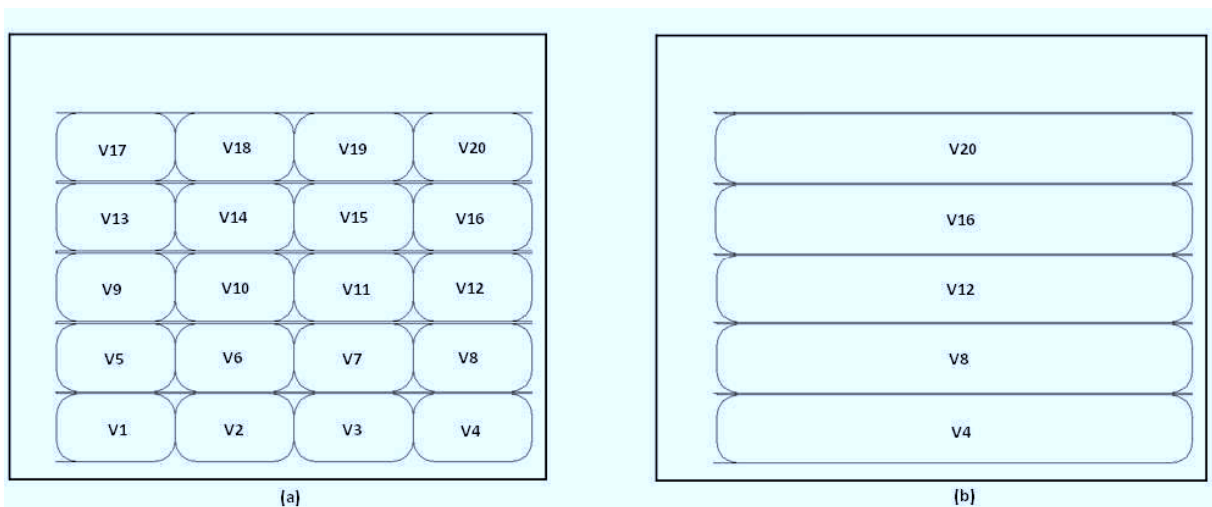


Figura 21. (a) Modelo real dos enrolamentos dispostos em camadas e (b) modelo simplificado utilizado na simulação computacional.

Para o cálculo dos valores dos potenciais descritos anteriormente para os enrolamentos de baixa e alta tensão foram utilizadas as informações das Tabelas B-6 (enrolamento de baixa tensão), B-7 e B-8 (enrolamento de alta tensão).

A partir da Tabela B-6, é calculada a elevação de potencial em cada espira, sempre em relação ao potencial de referência, onde será conectado um dos terminais do enrolamento de baixa tensão (primeira espira da primeira camada). Dado que existirão 204 espiras, dispostas em 5 camadas e que a tensão nominal do enrolamento de baixa tensão é de 220 Volts, conclui-se que cada camada elevará o potencial em 44 Volts. Foram adotados então os potenciais 44, 88, 132, 176 e 220 Volts, respectivamente, para cada camada, a partir da mais próxima do núcleo até aquela mais afastada.

A partir da tabela B-8, é novamente calculada a elevação de potencial em cada espira em relação ao potencial de referência, onde será conectado um dos terminais do enrolamento de alta tensão (primeira espira da primeira camada). Nesse caso, a distribuição

de potenciais não será uniforme em cada camada, é adotado o formato trapezoidal no enrolamento de alta tensão, conforme discutido na seção 2.10. Conhecido o número de espiras em cada camada, é possível calcular a elevação de potencial em cada camada a partir de um procedimento simples: dado que são no total 46.383 espiras (valor calculado a partir da soma do número de espiras em cada camada, obtido a partir da tabela B-8) e que a tensão nominal no enrolamento de alta tensão é de 50.000 Volts, calcula-se que a elevação de potencial em cada espira é de 1,077981 Volts. A partir deste valor é possível preencher a Tabela 1 a seguir, multiplicando-se a elevação de potencial em cada espira pelo número de espiras em cada camada.

Tabela 1. Potencial elétrico na última camada de cada espira do enrolamento de alta tensão.

NC	V_{final}	NC	V_{final}	NC	V_{final}	NC	V_{final}	NC	V_{final}	NC	V_{final}
1	766,44	17	667,27	33	582,11	49	507,73	65	441,97	81	384,84
2	759,98	18	661,88	34	576,72	50	503,42	66	438,74	82	381,60
3	753,51	19	656,49	35	572,41	51	499,10	67	434,43	83	378,37
4	747,04	20	651,10	36	567,02	52	494,79	68	431,19	84	375,14
5	740,57	21	644,63	37	562,71	53	490,48	69	426,88	85	371,90
6	734,10	22	639,24	38	557,32	54	486,17	70	423,65	86	368,67
7	727,64	23	633,85	39	553,00	55	481,86	71	420,41	87	366,51
8	721,17	24	628,46	40	547,61	56	477,55	72	416,10	88	363,28
9	714,7	25	623,07	41	543,30	57	473,23	73	412,87	89	360,05
10	709,31	26	618,13	42	538,99	58	470,00	74	409,63	90	356,81
11	702,84	27	611,95	43	533,60	59	465,69	75	405,32	91	353,58
12	697,45	28	607,00	44	529,29	60	461,38	76	402,09	92	350,34
13	690,99	29	602,06	45	524,98	61	457,06	77	398,86	93	347,11
14	685,60	30	597,20	46	520,66	62	453,83	78	395,62	94	344,95
15	679,13	31	591,81	47	516,35	63	449,52	79	392,38	95	341,72
16	673,74	32	587,50	48	512,04	64	446,28	80	389,15	96	32,34

Onde NC é o número da camada (da mais próxima do núcleo à mais distante) e V_{final} é a elevação de potencial proporcionada pelos enrolamentos daquela camada. A partir destes valores é possível calcular os potenciais máximos em cada camada, somando-se o valor de cada camada ao potencial máximo da camada anterior, de modo que, na última camada seja atingido o valor nominal da tensão no enrolamento de alta tensão. Na Tabela 2 são apresentados tais valores.

Tabela 2. Potencial elétrico na última camada de cada espira do enrolamento de alta tensão.

NC	V _{max}	NC	V _{max}	NC	V _{max}	NC	V _{max}	NC	V _{max}	NC	V _{max}
1	766,44	17	12.171,4 8	33	22.107,9 6	49	30.771,6 9	65	38.324,0 2	81	44.906,1 8
2	1.526,42	18	12.833,3 6	34	22.684,6 8	50	31.275,1 1	66	38.762,7 6	82	45.287,7 8
3	2.279,93	19	13.489,8 5	35	23.257,0 9	51	31.774,2 1	67	39.197,1 9	83	45.666,1 5
4	3.026,97	20	14.140,9 5	36	23.824,1 1	52	32.269,0 0	68	39.628,3 8	84	46.041,2 9
5	3.767,54	21	14.785,5 8	37	24.386,8 2	53	32.759,4 8	69	40.055,2 6	85	46.413,1 9
6	4.501,64	22	15.424,8 2	38	24.944,1 4	54	33.245,6 5	70	40.478,9 1	86	46.781,8 6
7	5.229,28	23	16.05867	39	25.497,1 4	55	33.727,5 1	71	40.899,3 2	87	47.148,3 7
8	5.950,45	24	16.687,1 3	40	26.044,7 5	56	34.205,0 6	72	41.315,4 2	88	47.511,6 5
9	6.665,15	25	17.310,2	41	26.588,0 5	57	34.678,2 9	73	41.728,2 9	89	47.871,7 0
10	7.374,46	26	17.928,3 3	42	27.127,0 4	58	35.148,2 9	74	42.137,9 2	90	48.228,5 1
11	8.077,3	27	18.540,2 8	43	27.660,6 4	59	35.613,9 8	75	42.543,2 4	91	48.582,0 9
12	8.774,75	28	19.147,2 8	44	28.189,9 3	60	36.075,3 6	76	42.945,3 3	92	48.932,4 3
13	9.465,74	29	19.749,3 4	45	28.714,9 1	61	36.532,4 2	77	43.344,1 9	93	49.279,5 4
14	10.151,3 4	30	20.346,5 4	46	29.235,5 7	62	36.986,2 5	78	43.739,8 1	94	49.624,4 9
15	10.830,4 7	31	20.938,3 5	47	29.751,9 2	63	37.435,7 7	79	44.132,1 9	95	49.966,2 1
16	11.504,2 1	32	21.525,8 5	48	30.263,9 6	64	37.882,0 5	80	44.521,3 4	96	50.000,0 0

Onde V_{max} é o valor da tensão máxima na camada, ou seja, a tensão no último enrolamento. A partir das simplificações descritas anteriormente e do conhecimento das dimensões dos condutores que compõe os enrolamentos de baixa e alta tensão é possível calcular as dimensões de cada enrolamento para a construção do modelo computacional. As larguras dos enrolamentos de alta tensão são calculadas a partir da multiplicação do diâmetro do condutor isolado utilizado no enrolamento de alta tensão (0,20 mm) pelo número de espiras por camada (descrito na tabela B-8). Os resultados dessas multiplicações foram utilizados na construção do modelo, posicionando-se sempre o centro de cada enrolamento no ponto médio entre as pernas do núcleo. Há ainda uma simplificação que diz respeito à distribuição de potenciais ao longo dos enrolamentos. Consideramos na simulação, que a

distribuição de potenciais se dá de maneira uniforme ao longo do enrolamento, ou seja, que cada espira estará sujeita a uma diferença de potencial igual a todas as demais. Do estudo das Técnicas de Alta Tensão, se sabe que, na verdade, a distribuição não é uniforme ao longo do enrolamento, no entanto, a presença do anel equalizador que será detalhado à frente permite tal simplificação sem prejuízo aos resultados.

3.2 COMPLEMENTAÇÕES AO PROJETO

A partir do Anexo A e dos cálculos descritos na seção anterior é possibilitada a construção de boa parte do modelo a ser utilizado na simulação computacional. Alguns aspectos relevantes em relação à simulação de campos elétricos não haviam sido abordados no projeto original do transformador, sobretudo, o projeto da bucha de alta tensão. Conforme estudado em relação aos transformadores para ensaios, a ligação dos mesmos consiste na aplicação de uma diferença de potencial pequena no enrolamento de baixa tensão, neste caso específico, 220 Volts e uma diferença de potencial elevada no enrolamento de alta tensão, neste caso, 50.000 Volts, ou 50 kV. O referencial adotado para ambos os enrolamentos será o potencial do núcleo e da carcaça metálica do equipamento, ou seja, o potencial de terra: 0 Volt. Dessa forma, o projeto prevê a presença de quatro terminais no equipamento: os dois terminais do enrolamento de baixa tensão, um dos quais deverá ser ligado à terra, e os dois terminais do enrolamento de alta tensão, um dos quais deverá também ser ligado à terra. Os dois terminais que não serão conectados à terra tem tensões nominais 220 Volts e 50.000 Volts (enrolamentos de baixa e alta tensão, respectivamente). Como a diferença de potencial entre o terminal de baixa tensão sob potencial de 220 Volts e a referência, 0 Volts, é pequena, há necessidade apenas de isolar tal terminal da carcaça com uma pequena bucha de passagem. Quanto ao terminal de alta tensão sob potencial de 50.000 Volts, se faz necessária a utilização de uma bucha de alta tensão que deverá ser confeccionada em resina epóxi. O esquema de construção da bucha de alta tensão e componentes em sua vizinhança é apresentado na Figura 22.

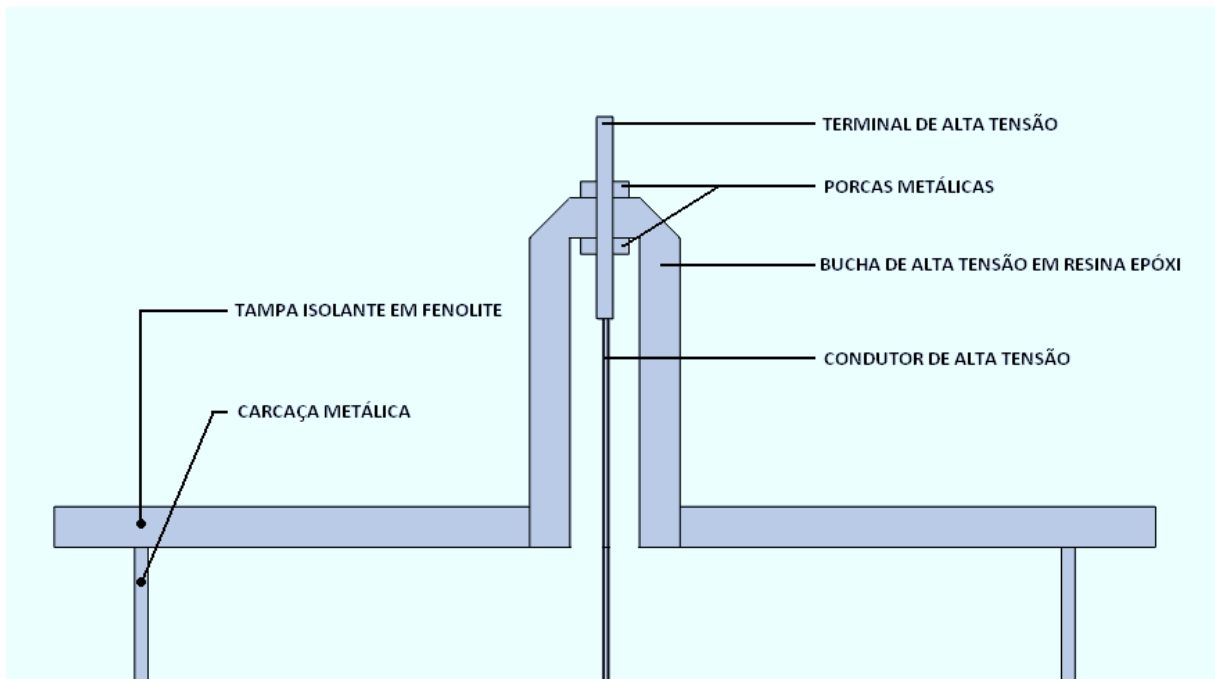


Figura 22. Esquema de construção da bucha de alta tensão.

A configuração adotada para a bucha de alta tensão é baseada num transformador para ensaios de propriedade do LAT cuja tensão nominal no enrolamento de alta tensão é de 50 kV, utilizado para geração de tensões de impulso. A forma construtiva é semelhante à bucha do transformador apresentado na Figura 13.

3.3 PROGRAMA COMSOL MULTIPHYSICS

A ferramenta computacional utilizada na simulação do transformador cujo projeto foi discutido anteriormente foi o *software* Comsol Multiphysics, pacote de programas de análise e resolução de problemas físicos pelo método dos elementos finitos (MEF). O programa é dividido em diversos módulos específicos para a resolução de cada tipo de problema físico a ser simulado, como os módulos acústico, transferência de calor, radiofrequência e módulo engenharia química. Na resolução de um problema, mais de um módulo pode ser utilizado simultaneamente de modo a simular a interação entre diferentes grandezas físicas como corrente elétrica e temperatura. Na simulação do transformador para ensaios descrito a seguir foi utilizado o módulo *Eletrostatics* que atende às necessidades de simulação de campos e potenciais elétricos. No Apêndice A é apresentado um guia para a utilização do programa através da análise de um arranjo simples.

Para a construção, simulação e análise de um modelo físico é necessária a construção detalhada do arranjo físico do modelo e seu entorno, descrição dos materiais utilizados e suas características de interesse (no caso da simulação de campos e potenciais elétricos a grandeza de interesse é a permissividade elétrica), definição dos valores de potenciais conhecidos, ou seja, aqueles aterrados e aqueles sob potencial conhecido. A partir desses dados, é possível realizar simulações de distribuição de potenciais, obtendo gráficos em falsas cores e de linhas equipotenciais, o programa fornece ainda gráficos da distribuição de potencial em função de linhas criadas pelo usuário, conforme será exemplificado nas seções seguintes.

A partir dos resultados obtidos e do conhecimento dos materiais isolantes empregados (rigidez dielétrica e permeabilidade) é possibilitada a análise da variação de potencial elétrico ao longo dos isolantes, permitindo determinar se haverá ruptura elétrica em algum ponto, bem como analisar a presença ou não de regiões de concentrações de campo elétrico. Analisando os resultados fornecidos é possível sugerir alterações que aumentem a qualidade do projeto e conhecer os pontos críticos da construção do equipamento.

No Apêndice B é apresentado um tutorial relativo à utilização do programa Comsol Multiphysics, descrevendo passo a passo a forma de construir, simular e analisar um problema básico utilizando o mesmo módulo e alguns dos materiais utilizados no presente trabalho.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Nesta seção serão descritos o modelo construído no programa Comsol Multiphysics e, em seguida, os resultados obtidos com as simulações. Por último serão analisados os dados obtidos com a finalidade de estudar o esforço elétrico a que estarão submetidos os materiais isolantes e as regiões de concentração de campo elétrico. A partir das análises podem ser sugeridas alterações e melhorias no projeto original.

4.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO

O modelo adotado para simulação do transformador para ensaios descrito nas seções anteriores foi uma vista frontal do equipamento em duas dimensões, sugerindo um corte no ponto médio lateral do equipamento.

Na aba *geometry* são construídos os modelos dos projetos a serem analisados. Os dados necessários à construção do modelo do transformador para ensaios são apresentados no Anexo A e nas seções 3.1 e 3.2. O programa utiliza um sistema de coordenadas cartesianas para posicionamento de cada elemento que compõe o modelo. Inicialmente foram definidos pontos que correspondem ao encontro das arestas internas e externas do núcleo. O canto inferior esquerdo do núcleo foi adotado como origem do sistema de coordenadas. Em seguida foram definidos os retângulos que compõe a estrutura do núcleo. As dimensões apresentadas na Figura B-2 foram utilizadas na elaboração da geometria do núcleo.

Em seguida foram construídas as camadas dos enrolamentos de baixa e alta tensão, além das camadas de papel Kraft (entre camadas) e Presspahn (entre enrolamentos e núcleo). Construiu-se então a geometria da carcaça metálica, tampa e base isolantes e por último, a bucha do transformador e condutor de alta tensão que liga o terminal de alta tensão da bucha à extremidade do enrolamento de alta tensão. Conforme descrito no projeto, foram utilizados anéis equalizadores, além de uma chapa equalizadora e um “duto de subida” por onde parte o condutor de alta tensão. Tal estrutura possibilita a uniformidade de distribuição de campo elétrico ao longo dos enrolamentos, sobretudo no enrolamento de alta tensão.

Para a correta simulação das distribuições de campo elétrico, foram definidas ainda as regiões ocupadas por óleo mineral e a região externa ao tanque do transformador, preenchida com ar atmosférico, estando sua fronteira equipotencializada. O aspecto final do modelo construído é apresentado na

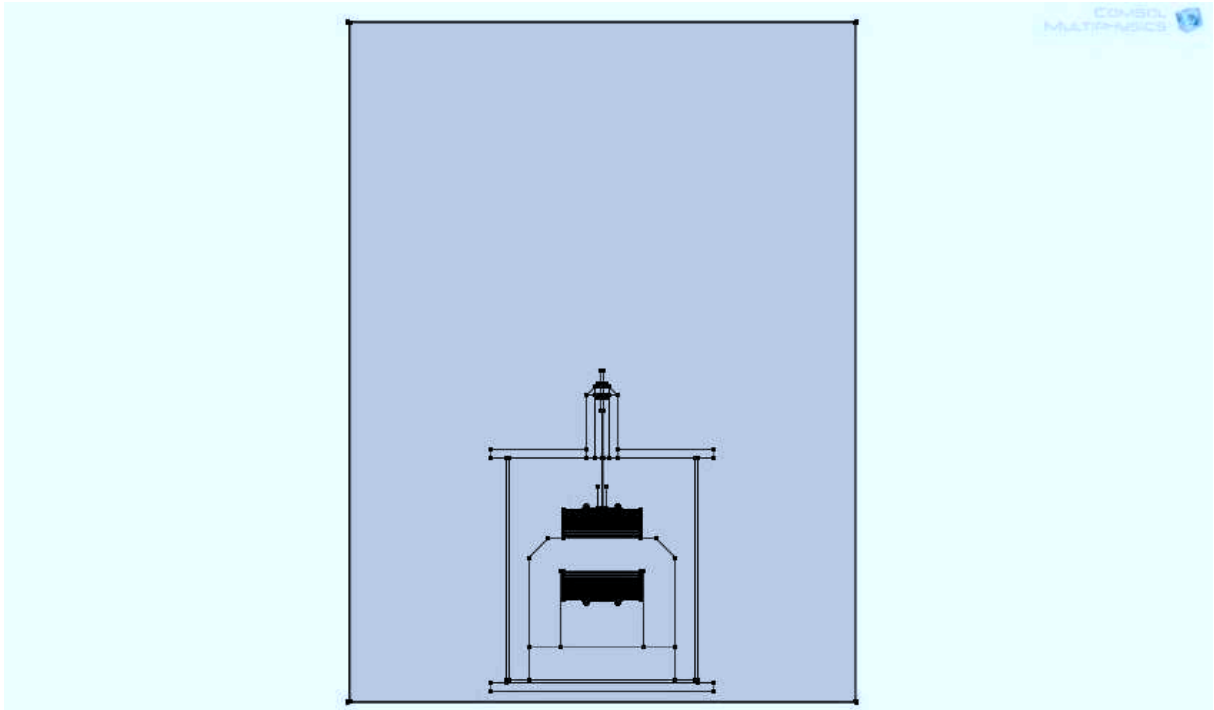


Figura 23. Modelo geométrico construído. (COMSOL).

4.2 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

No estudo das distribuições de campo elétrico em meios materiais, é necessário o conhecimento de três variáveis: arranjo geométrico, permissividade elétrica dos materiais empregados e potenciais elétricos definidos em alguns pontos (como eletrodos ou superfícies aterradas, por exemplo). Na seção anterior definimos a primeira variável do problema, ou seja, o arranjo geométrico do problema. Nesta seção, definiremos a permissividade elétrica dos materiais empregados. No programa Comsol Multiphysics a construção do modelo não requer a definição imediatas dos materiais e potenciais empregados, de modo que foi construído um modelo apenas com objetos geométricos, independente de materiais empregados e potenciais elétricos. Na próxima etapa do projeto são definidos os materiais empregados, ou seja, as características físicas como condutividade,

permissividade, permeabilidade e capacidade térmica de cada ente geométrico construído na seção anterior. Para o presente estudo, a variável de interesse na definição dos materiais é a permissividade elétrica, ou seja, propriedade que o material tem de permitir com maior facilidade a propagação de campos elétricos através de seu interior. Geralmente, materiais condutores apresentam maior permissividade enquanto que os isolantes apresentam baixa permissividade, ou seja, maior oposição à passagem de campo elétrico. Na Figura 24 são mostrados os materiais empregados em cada componente do equipamento.

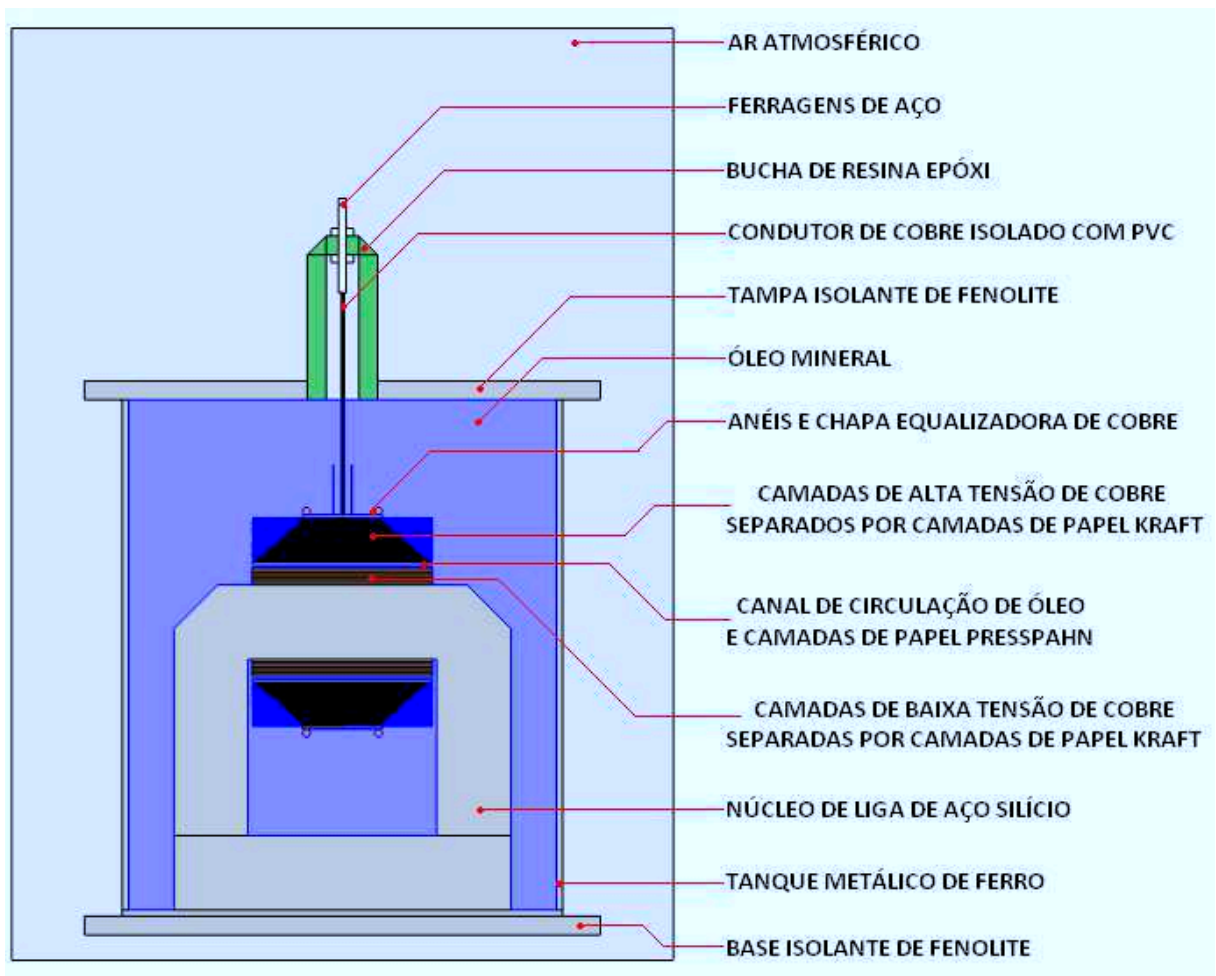


Figura 24. Materiais empregados em cada componente do transformador.

Definidos os materiais empregados, é possível inserir no programa os valores de permissividade elétrica de cada um deles. As medições de permissividade são realizadas em laboratórios e padronizadas sendo, portanto, largamente encontrados na literatura valores padrão para cada tipo de material. É comum utilizar a unidade de permissividade relativa no estudo de propagação de campos elétricos, ao invés da permissividade absoluta. Dessa maneira, o valor de permissividade é expresso em relação a um valor de referência, que é a

permissividade do vácuo. Os valores de permissividade relativa adotados são apresentados na Tabela 3 a seguir. Observe que alguns valores, como as permissividades relativas do papel Kraft e Presspahn dizem respeito à situação a que estarão submetidos durante a utilização, ou seja, impregnados em óleo mineral.

Tabela 3. Permissividade relativa dos materiais empregados na construção do transformador.

MATERIAL	PERMISSIVIDADE RELATIVA
aço	100.000
aço silício	100.000
ar atmosférico	1,0006
cobre	100.000
fenolite	2,1
ferro	100.000
óleo mineral	2,2
papel Kraft	3,6
papel Presspahn	3,6
pvc	2,1
resina epóxi	3,6

4.3 DEFINIÇÃO DOS POTENCIAIS

A última etapa na construção do modelo é a definição dos potenciais elétricos em pontos cujos valores sejam conhecidos, ou seja, cada camada dos enrolamentos e superfícies aterradas, ou conectadas ao potencial de referência.

Para a definição dos potenciais nas camadas do enrolamento de baixa tensão foram utilizados os valores calculados na seção 3.1, baseados na Figura B-6, ou seja, os enrolamentos, a partir do primeiro mais próximo ao núcleo, apresentam potenciais 44, 88, 132, 176 e 220 Volts. Para o enrolamento de alta tensão, os valores de potenciais em cada camada utilizados foram aqueles descritos na Tabela 2. Quanto aos terminais conectados ao potencial de referência, partimos dos conceitos desenvolvidos na introdução referentes aos transformadores para ensaios típicos. A carcaça metálica do tanque e o núcleo magnético

foram definidos com potencial nulo. Os enrolamentos partem ambos do potencial nulo, ou seja, um dos terminais de cada enrolamento também está conectado ao potencial de referência, no entanto, como discutido anteriormente, o valor de potencial utilizado para cada camada é o máximo valor de potencial na camada (o potencial na última espira) de modo que não é definido como nulo o potencial em nenhuma camada. Foram definidas ao todo quatro camadas do enrolamento de baixa tensão, noventa e seis camadas do enrolamento de alta tensão mais o potencial de referência, totalizando assim 101 valores distintos de potencial elétrico definidos na simulação.

Como exemplo da definição de potenciais no Comsol, é apresentada na Figura 25 a definição dos potenciais da camada 95 do enrolamento de alta tensão. Conforme a Tabela 2, o potencial nesta camada é de 49.966,2 Volts, onde são destacados em azul os valores de potencial definidos. Observe que são duas regiões definidas com este potencial, uma acima e outra abaixo da perna do núcleo magnético, isto por que, na verdade, se trata de uma única camada e a vista em corte a divide em duas áreas distintas.

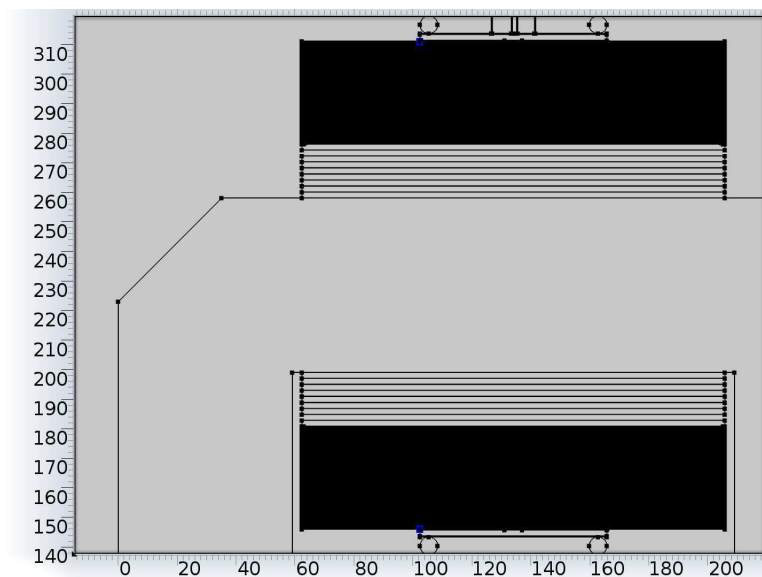


Figura 25. Definição dos potenciais na camada 95 do enrolamento de alta tensão. (COMSOL).

Deve ser levado em consideração que a definição do potencial numa camada metálica requer apenas a definição de uma de suas arestas, conforme mostrado na Figura 25 pois, os materiais metálicos, por apresentarem altíssima permissividade elétrica, permitem a propagação de campos elétricos em seu interior e, dessa forma, definido o potencial numa de suas arestas, a propagação livre do campo elétrico no interior do material metálico garantirá que toda a região esteja sujeita àquele potencial desejado.

Finalizada esta etapa, a definição do problema está completa, os próximos passos são relativos ao método de cálculo utilizado, Método dos Elementos Finitos (MEF) e obtenção de resultados.

4.4 CRIAÇÃO DA MALHA

Esta etapa da simulação é realizada automaticamente pelo programa, sendo necessárias apenas a definição de algumas diretrizes e parâmetros para o cálculo. Podem ser criadas malhas com características pré-definidas, onde é selecionado um entre nove níveis de precisão, que vão de extremamente fino (*extremely fine*) a extremamente grosseiro (*extremely coarse*). Cada nível de precisão acarreta numa solicitação de capacidade computacional distinta. Pode ser definida ainda uma malha com características inseridas pelo usuário, como tamanho máximo de cada elemento da malha ou quantidade de elementos.

Nesta simulação foi criada uma malha com o parâmetro fino definido (*fine*), o que levou a uma execução relativamente custosa do ponto de vista de processamento computacional. Sugere-se portanto, a utilização de computadores com placa de vídeo de alta capacidade instalada. Na Figura 25 é mostrada a malha criada.

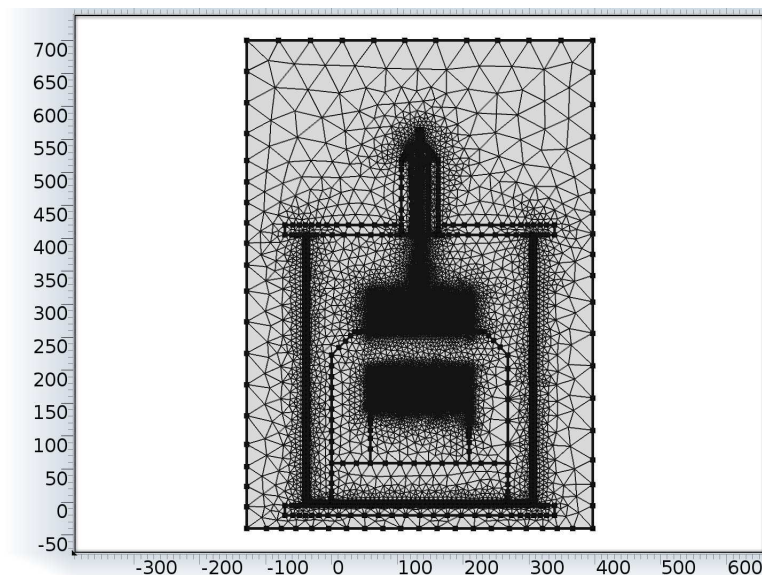


Figura 26. Malha para simulação utilizando Método dos Elementos Finitos. (COMSOL).

Na construção da malha, é realizada uma otimização dos tamanhos escolhidos para os elementos. Em regiões onde não há riqueza de detalhes na construção geométrica ou

definição de potenciais, os elementos criados são maiores, como na parte superior da Figura 25, onde o espaço é preenchido por ar atmosférico e não há nenhum arranjo geométrico ou potencial definido. Já na região dos enrolamentos, onde é máxima a complexidade em termos de arranjo geométrico e são definidos valores de potencial distinto para regiões bastante próximas.

4.5 RESULTADOS OBTIDOS

Foram descritos anteriormente todas as etapas da construção do modelo e definição de parâmetros para realização da simulação computacional. A qualidade dos resultados obtidos é consequência da precisão e correta construção do modelo, bem como da escolha de parâmetros adequados. A Figura 27 apresenta o resultado geral obtido com a simulação a partir do modelo e parâmetros utilizados. A escala em falsas cores à direita da imagem corresponde aos valores de potencial elétrico, sendo o menor valor nulo (em azul) correspondendo àquelas áreas conectadas ao potencial de referência e o maior valor 50.000 Volts, correspondendo à tensão nominal máxima do enrolamento de alta tensão e, conseqüentemente, do terminal de alta tensão. As escalas à esquerda e abaixo na imagem correspondem ao sistema de coordenadas retangulares adotado.

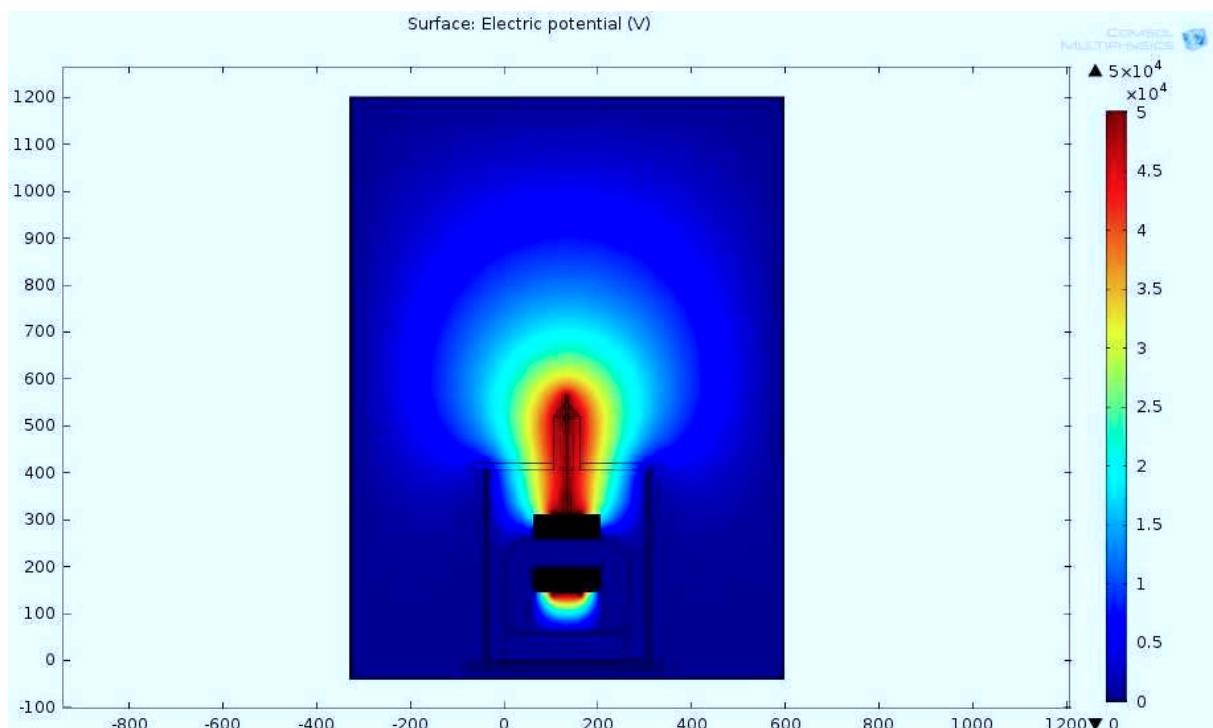


Figura 27. Resultado obtido com a simulação utilizando o software COMSOL Multiphysics. (COMSOL).

O resultado apresentado na Figura 27 fornece uma boa perspectiva qualitativa da distribuição de potenciais, no entanto, não fornece um resultado numérico a ser analisado. A partir dessa imagem, podem ser observados os pontos de maior concentração de campo elétrico e aqueles onde a variação é mais brusca. Uma região que deve despertar preocupação na construção de transformadores de alta tensão para ensaios é a janela do núcleo, mais precisamente, a região entre as pernas do núcleo e o enrolamento de alta tensão. Justamente por isso, os enrolamentos de alta tensão de transformadores para ensaios são construídos em formato trapezoidal. Outra região de interesse na análise do projeto é a bucha de alta tensão, componente que deve ser projetado cuidadosamente para que sejam evitados formatos que favoreçam concentrações de campo. Essas duas regiões serão analisadas em detalhes a seguir.

4.6 ANÁLISE DA BUCHA DE ALTA TENSÃO

O procedimento de análise a partir do resultado fornecido pelo programa consiste em traçar gráficos de potenciais elétricos ao longo de uma reta definida. São apresentadas ainda linhas equipotenciais que facilitam o entendimento do problema. Na Figura 28 é destacada a representação em falsas cores da bucha de alta tensão.

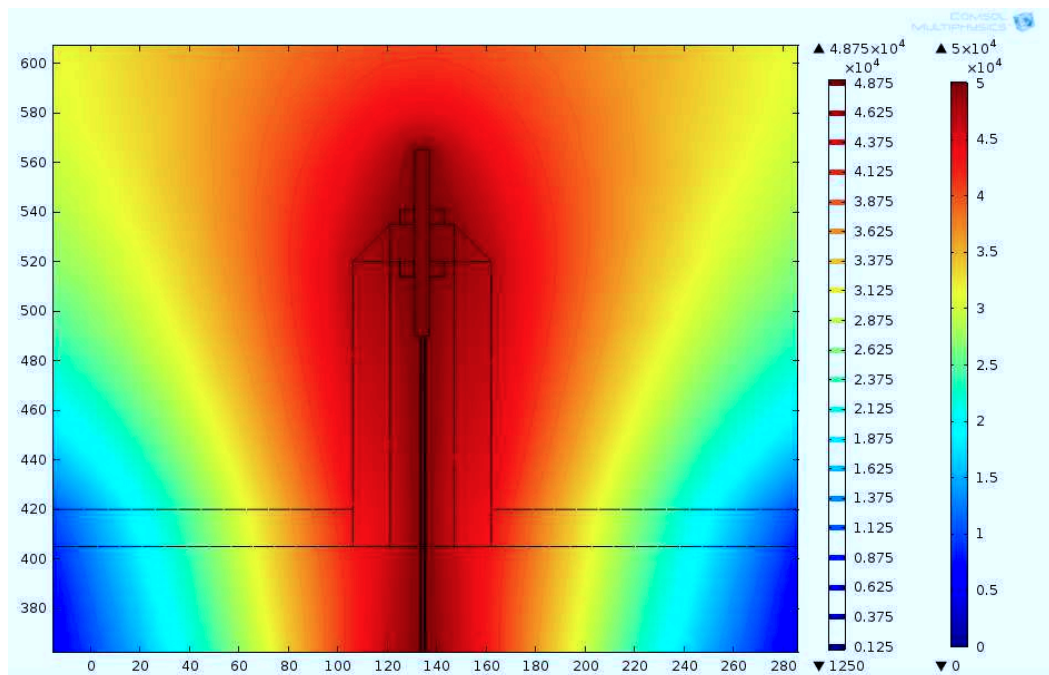


Figura 28. Representação dos potenciais na região da bucha de alta tensão em falsas cores.

Duas linhas serão construídas para análise desta região, a primeira junto à base da bucha, ou seja, a região onde a bucha é encaixada na tampa do tanque. A reta é traçada do centro do condutor de alta tensão até um ponto próximo à base da bucha, na região externa ao equipamento, conforme mostrado na Figura 29.

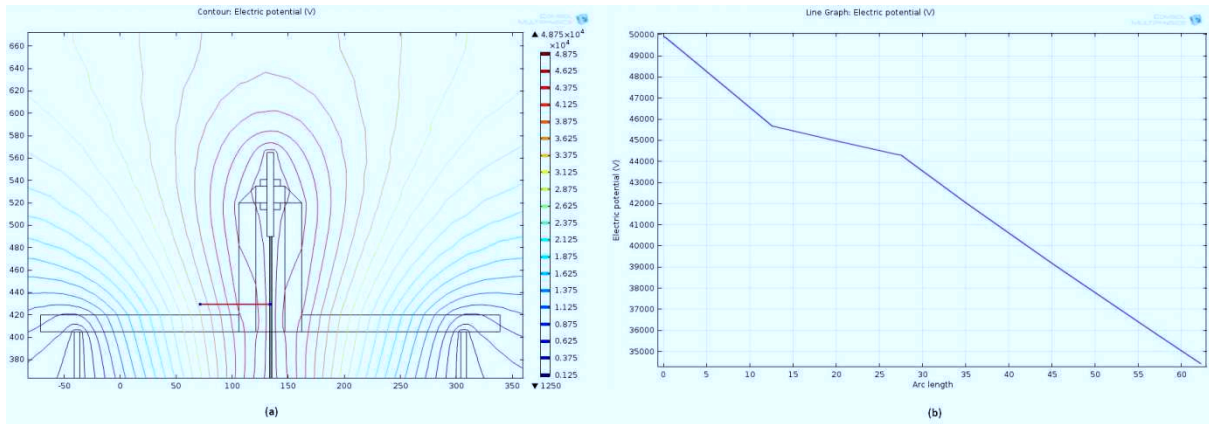


Figura 29. Análise da região próxima à base da bucha de alta tensão: (a) linha de campo traçada e (b) gráfico fornecido para a variação de potencial.

O gráfico apresentado na Figura 29 (b) mostra a variação de potencial elétrico ao longo da reta mostrada em (a). A reta foi traçada com ponto inicial no condutor de alta tensão e ponto final na região preenchida por ar próximo à base da bucha. A reta passa então por três áreas: a região preenchida por ar na parte interna da bucha, a região preenchida por resina epóxi ao longo da parede da bucha e a região preenchida por ar, externa ao equipamento. Isso fica evidenciado ao analisar o gráfico apresentado em (b). O principal interesse na análise dos potenciais é analisar a variação de potencial de acordo com a distância, ou seja, dividiremos a variação de potencial numa região pela distância considerada, calculando assim a variação de potencial em kV por centímetro e comparando o valor obtido com a rigidez dielétrica do material.

Para a primeira região do gráfico (área no interior do equipamento, entre o condutor de alta tensão e a parede da bucha) foi verificada uma variação de potencial da ordem de 3,4 kV, do potencial máximo (50 kV) até o potencial de 46,6 kV a 10 mm de distância do condutor. A variação de potencial foi, portanto, de 3,4 kV/cm na primeira região preenchida por ar. Tal valor é bastante inferior aos valores de rigidez dielétrica do ar encontrados na literatura, que vão de 10 a 30 kV/cm de acordo com as condições do ambiente. Deve ser lembrado ainda que o ambiente neste caso será bastante controlado pois o equipamento é hermeticamente isolado da região externa.

Na segunda região do gráfico (área interna da parede da bucha, preenchida por resina epóxi) foi verificada uma variação de potencial da ordem de 1,1 kV para uma variação espacial de 10 mm, o que resulta numa variação de 1,1 kV/cm. Tal valor é irrisório em comparação com a rigidez dielétrica da resina epóxi, indicando então que não há problemas em relação à variação de potencial nessa região.

Na terceira região do gráfico (área externa do equipamento, preenchida por ar atmosférico), a inclinação da reta é igual à primeira, indicando portanto, uma variação de potencial da ordem de 3,4 kV/cm, resultado que, novamente, é bastante inferior a quaisquer valores de rigidez dielétrica para o ar encontrados na literatura.

Outro estudo realizado ainda em relação à distribuição de potenciais através da bucha e em suas proximidades. O ponto de concentração de campo analisado é localizado nas proximidades do terminal de alta tensão. Na Figura 30 é apresentada a reta cuja variação de potencial será descrita pelo gráfico. O início da reta é localizado no centro axial do terminal de alta tensão, passando pela porca que o sustenta na parte interna da bucha e termina na região externa preenchida por ar e atravessando a espessura da bucha preenchida por resina epóxi.

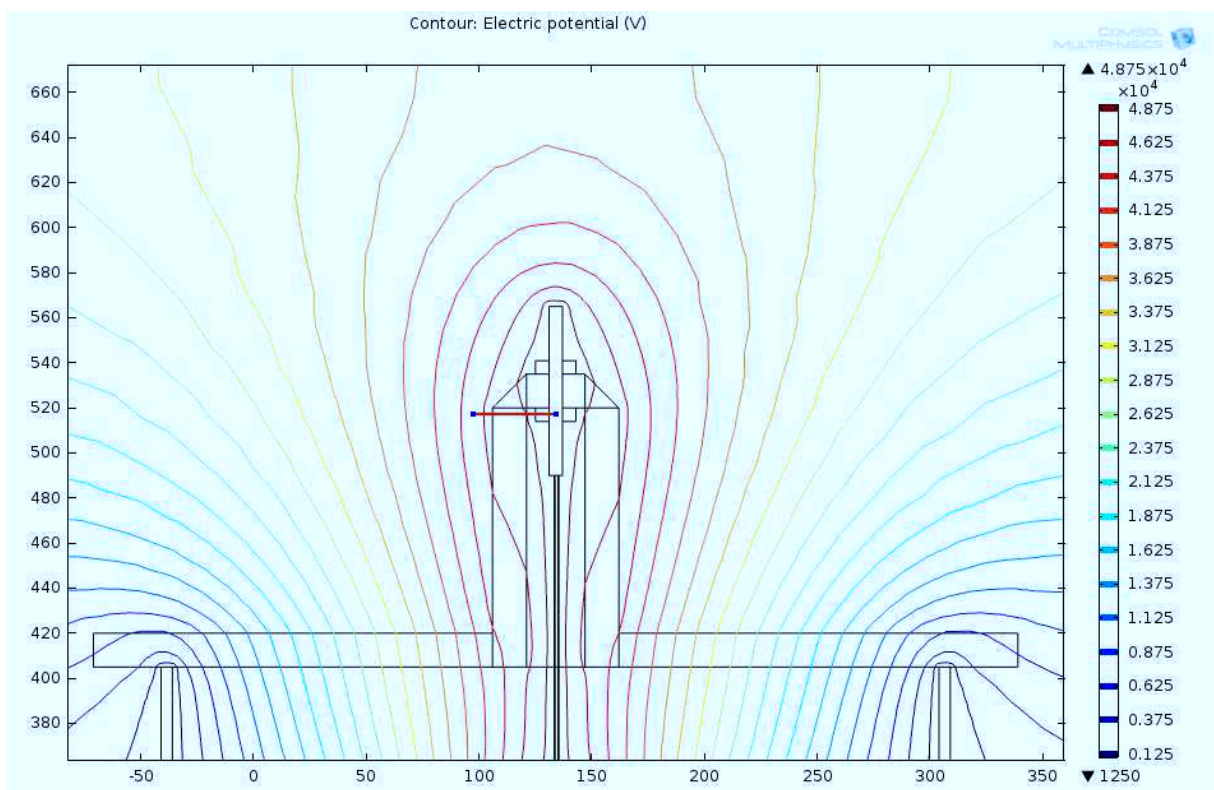


Figura 30. Linhas equipotenciais da região próxima ao terminal de alta tensão e reta traçada para análise da variação de potencial.

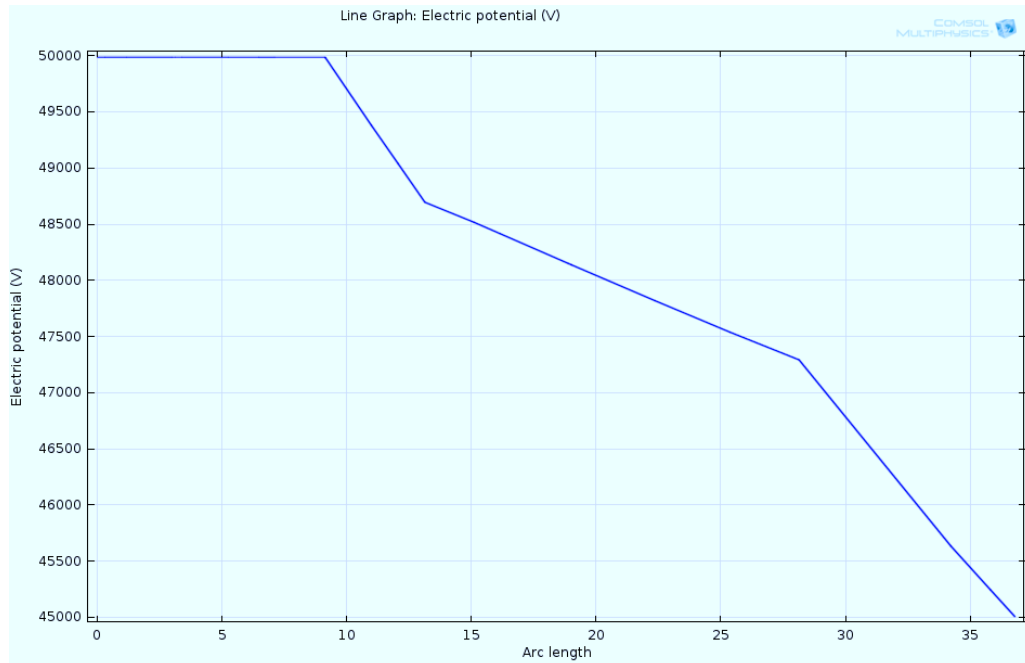


Figura 31. Gráfico de variação de potencial na região próxima ao terminal de alta tensão.

O patamar visto na primeira parte do gráfico mostrado na Figura 31 corresponde à região interna do terminal de alta tensão e da porca de sustentação, como esperado, não há variação de potencial no interior do material metálico, já que este apresenta altíssima permeabilidade relativa, não apresentando praticamente oposição alguma à passagem do campo elétrico. A segunda região do gráfico corresponde à variação de potencial na região preenchida por ar na parte interna da bucha, ou seja, entre o terminal de alta tensão e a parede interna da bucha. Nessa região, a inclinação da reta sugere uma variação de potencial da ordem de 850 Volts em uma variação espacial de quatro milímetros, o que resulta numa mudança de potencial da ordem de 2,125 kV/cm. Novamente, este valor é inferior à rigidez dielétrica do ar, o que indica que não haverá problemas de ruptura nessa área.

A terceira região do gráfico diz respeito à variação de potencial através da parede da bucha de alta tensão, preenchida por resina epóxi. Nessa área foi verificada uma variação média de 500 Volts a cada 5 milímetros, o que indica uma mudança de potencial da ordem de 1 kV/cm, valor que não afetará de maneira alguma a característica dielétrica do material.

A última região do gráfico corresponde novamente a uma área preenchida por ar atmosférico, na região externa à bucha. A inclinação da reta nesta área é inferior à da segunda região, indicando por isso uma variação de potencial inferior a 2,125 kV/cm, inferior à rigidez

dielétrica do ar.

4.7 ANÁLISE DO ENROLAMENTO DE ALTA TENSÃO E JANELA DO NÚCLEO

Os enrolamentos de alta tensão de transformadores para ensaios são confeccionados em formato trapezoidal, de modo que, os potenciais elevados nos enrolamentos de alta tensão não se aproximem do núcleo magnético conectado ao potencial de referência. É então de interesse a análise da variação de potencial na região entre os enrolamentos de alta tensão e o núcleo. Conforme verificado na Tabela 1, a máxima variação de potencial no enrolamento de alta tensão se dá na primeira camada, que é também aquela que apresenta maior número de espiras e, portanto, a que mais se aproxima da perna do núcleo. Faremos então a análise da variação de potencial na região entre a primeira camada do enrolamento de alta tensão e uma das pernas do núcleo.

Na Figura 32 é mostrada a linha que servirá para a construção do gráfico cuja variação de potencial será estudada. Observe que o ponto inicial da linha (à direita da figura) está localizado no interior da primeira camada de alta tensão, a mais próxima do núcleo. São vistas ainda na mesma figura as camadas de material isolante acima (papel presspahn) e abaixo (papel Kraft) do enrolamento.

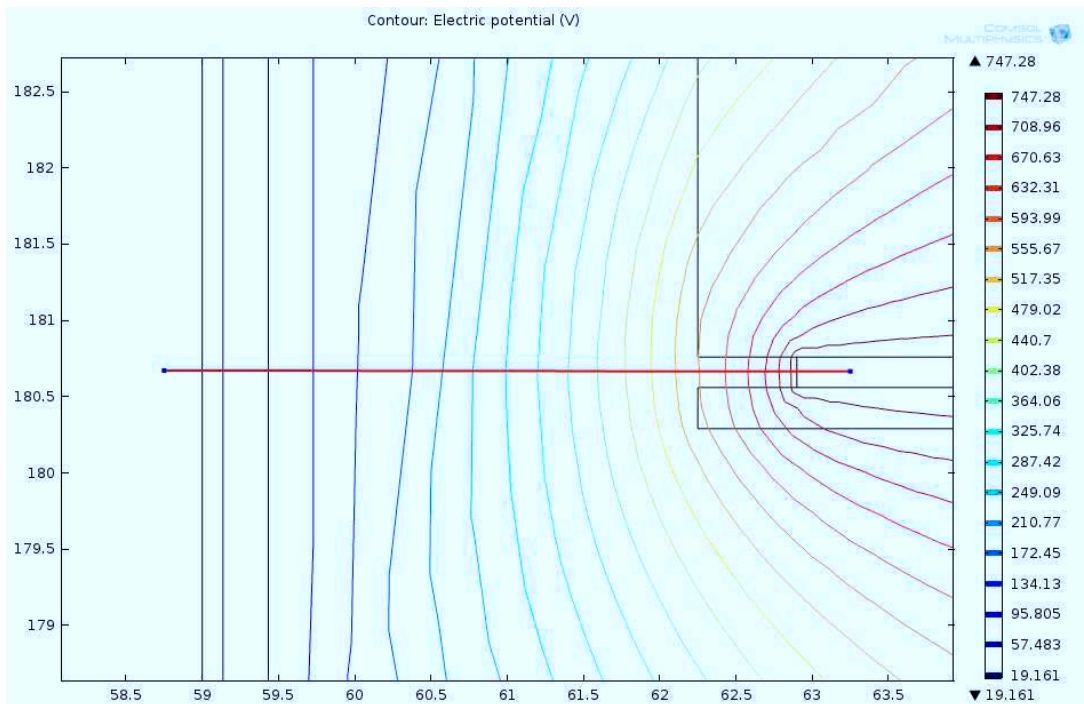


Figura 32. Linha de variação de potencial entre a primeira camada do enrolamento de alta tensão e o núcleo.

A variação de potencial elétrico em função da variação espacial pode ser vista na Figura 33. Neste caso, a variação não é constante ao longo da região, isto porque, as linhas de campo apresentam curvaturas na região em estudo, conforme pode ser visto na Figura 32. Cabe então analisar a região do gráfico onde a variação se dá de forma mais abrupta, que é entre os dois pontos destacados em vermelho. Foi verificada portanto uma variação de 150 Volts em uma variação espacial de 0,5 milímetros, o que resulta numa variação média de 3 kV/cm, valor bastante inferior à rigidez dielétrica do óleo utilizado, que é de 16 kV por milímetro, ou ainda, 160 kV/cm.

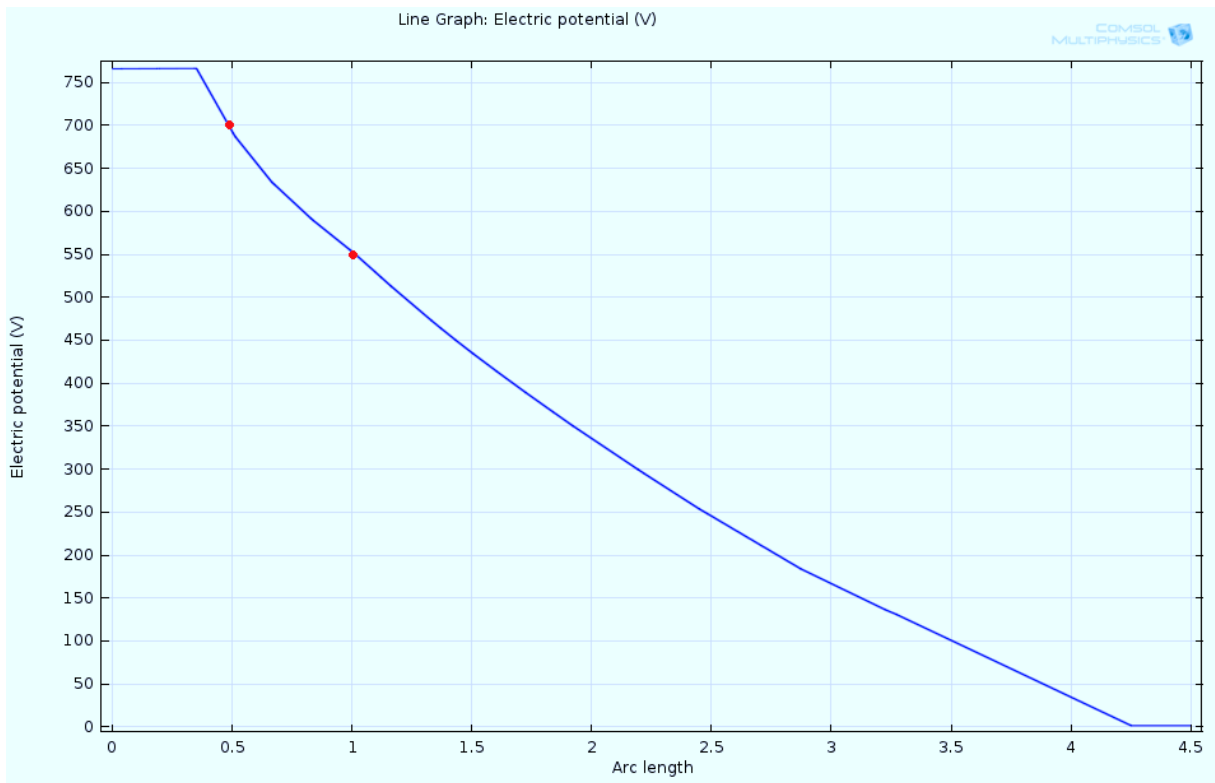


Figura 33. Variação de potencial elétrico ao longo da região entre a primeira camada do enrolamento de alta tensão e uma das pernas do núcleo.

Com a análise das três regiões críticas descritas, é possível concluir que o projeto não apresenta imperfeições em relação ao dimensionamento dos isolantes empregados nem à observância das distâncias mínimas necessárias entre pontos submetidos a diferentes potenciais.

2. CONCLUSÃO

Algumas considerações devem ser destacadas em relação ao projeto e à montagem do transformador para ensaios estudado. A análise das distribuições de potencial elétrico realizada permitiu concluir que não há necessidade de melhorias em relação ao dimensionamento dos materiais isolantes empregados e às distâncias necessárias entre regiões submetidas a diferentes potenciais elétricos. Foi acrescentada a especificação da bucha de alta tensão, que merece ainda um estudo em relação ao seu dimensionamento, de modo que seja possível a redução de suas dimensões, uma vez que o projeto elaborado atende com largo fator de segurança às necessidades de isolamento e distâncias. A redução das dimensões do equipamento, de forma geral, acarreta redução de custos com materiais, além da diminuição do peso, o que facilita a utilização, transporte e armazenamento. Na especificação dos materiais devem ser atendidas com rigor as especificações do projeto original ou ainda, serem selecionados materiais superiores aos especificados de modo que não haja prejuízo ao funcionamento.

Em relação à montagem, o ponto mais crítico diz respeito à confecção dos enrolamentos e sua montagem no núcleo do equipamento, devendo ser garantida a fixação na posição especificada, sendo respeitadas, sobretudo as distâncias em relação às pernas do núcleo. O enrolamento de alta tensão requer cuidado ainda maior já que as camadas apresentam dimensões e número de espiras diferentes. É aconselhável a construção de um gabarito em cada camada de papel Kraft, correspondendo à largura do enrolamento correspondente para orientar a disposição das espiras, conforme ilustrado na Figura 34.

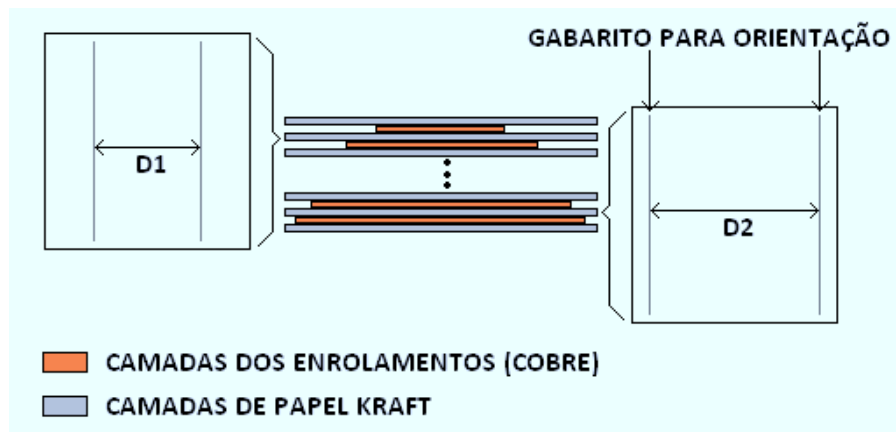


Figura 34. Gabarito para orientar a disposição das espiras no enrolamento de alta tensão.

O projeto do transformador, embora tenha sido avaliado positivamente sob o aspecto da simulação de campos elétricos, abre espaço para aperfeiçoamentos e melhor detalhamento em relação à montagem e acessórios, como bornes, fixação de rodas e especificação completa de materiais.

No que diz respeito à elaboração do presente trabalho acadêmico, houveram ganhos consideráveis em termos de conhecimentos do funcionamento, elaboração de projetos de equipamentos de alta tensão e sua análise. Tal atividade se mostra indispensável à conclusão do curso e obtenção do título de engenheiro eletricista, uma vez que são possibilitadas as aplicações da vasta gama de conhecimentos adquiridos, e ainda não completamente aplicados, durante o curso.

Deve ser destacada também a oportunidade de aprendizado adquirida na elaboração de trabalhos científicos e contato com uma das linhas de pesquisa desenvolvidas no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

BIBLIOGRAFIA

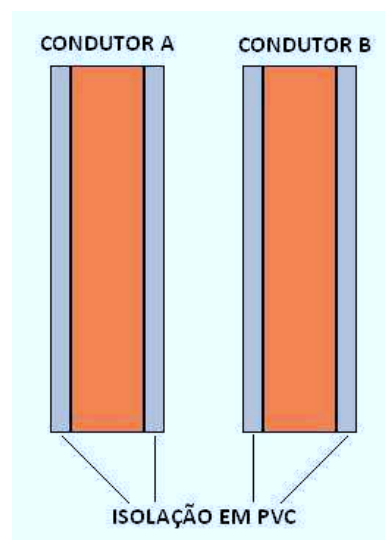
FITZGERALD, A. E. Máquinas Elétricas. Rio de Janeiro: Editora McGraw-Hill do Brasil, LTDA, 1975.FLANAGAN, W. M. Handbook of Transformers Design and Applications. 2ª edição. McGraw-Hill, 1992.GINELLI, F. O cálculo TRANSFORMADOR, AUTOTRANSFORMADOR E COMPENSADOR DE PARTIDA. 1976.HAYT, W. H. J. Eletromagnetismo. 6ª edição. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.KUFFEL, E. High Voltage Engineering: Fundamentals. ed. Butterworth Heinemann, 2000.LUCIANO, B. A. Fundamentos de Circuitos Magnéticos e Transformadores. Campina Grande: UFCG, 2009.MARTIGNONI, A. Transformadores. 8ª edição. ed. São Paulo: Globo, 1991.MEDEIROS, T. O. D. Projeto de um Transformador de Ensaio. UFCG. Campina Grande. 2012.NAIDU, M. S. High Voltage Engineering. 5ª edição. ed. Tata: McGraw-Hill, 1991.SADIKU, M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo. 3ª edição. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

APÊNDICE A – TUTORIAL: COMSOL MULTIPHYSICS

4.3

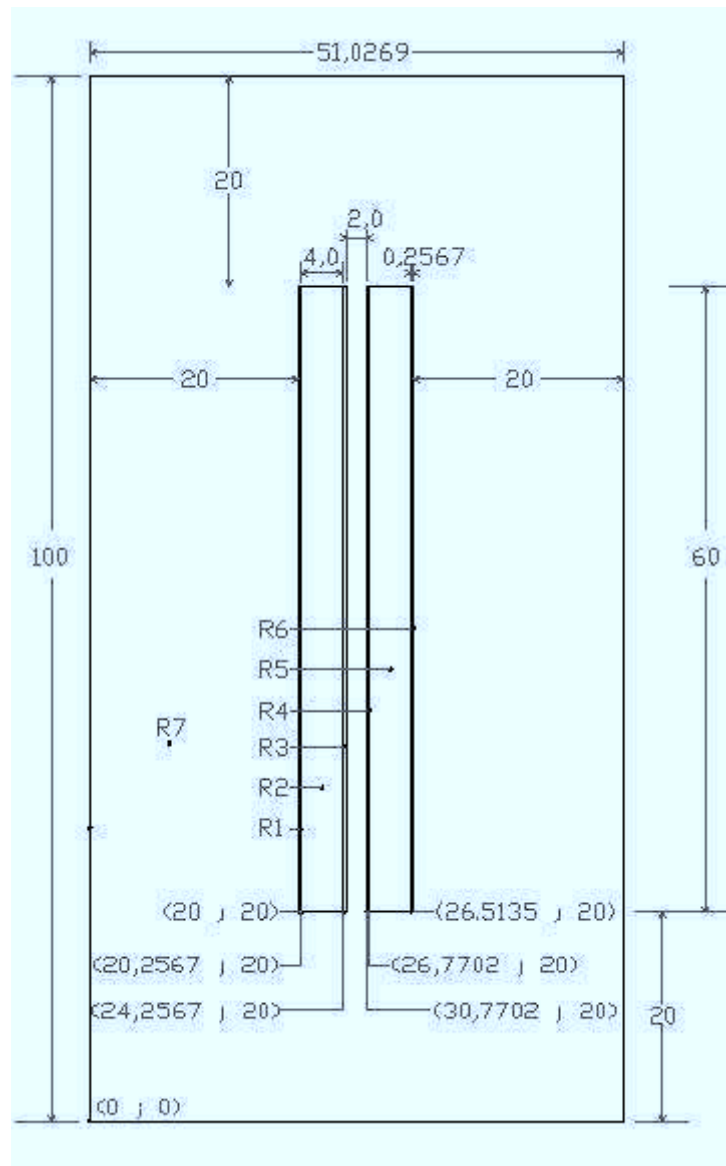
A ferramenta computacional utilizada na realização desse trabalho foi o programa Comsol Multiphysics, versão 4.3. Neste apêndice, ofereceremos um roteiro para situar o leitor na utilização da ferramenta, apresentando passo a passo a construção e análise de um problema simples.

O problema abordado é hipotético: a partir das dimensões de um condutor isolado real, projetado para trabalho em determinado nível de tensão, analisaremos a capacidade da isolação em suportar um nível de tensão mais elevado. O condutor real utilizado na elaboração desse exemplo é um fio de cobre de seção transversal 16 mm^2 isolado em PVC. O diâmetro total do condutor e capa isolante é de $4,5135 \text{ mm}$, sendo de 4 mm o diâmetro do condutor de cobre e $0,2567 \text{ mm}$ a espessura da isolação em PVC. Tal condutor tem classe de isolação 600 V e será analisado o comportamento quando forem utilizados dois condutores próximos, sendo a diferença de potencial entre eles de 2 kV . A Figura A-1 ilustra o problema.



FiguraA-1. Esquemática do problema de dois condutores isolados próximos com diferença de potencial definida.

Para a simulação do problema utilizando o programa indicado, é necessária a construção geométrica do arranjo, detalhando cada dimensão e a criação de uma região externa que constitui o espaço de análise do problema. Para isso, é simulada uma dimensão hipotética para o comprimento dos condutores bem como do espaço preenchido por ar em seu entorno. Na Figura A-2 são apresentadas as dimensões e coordenadas a serem utilizadas na construção do modelo.

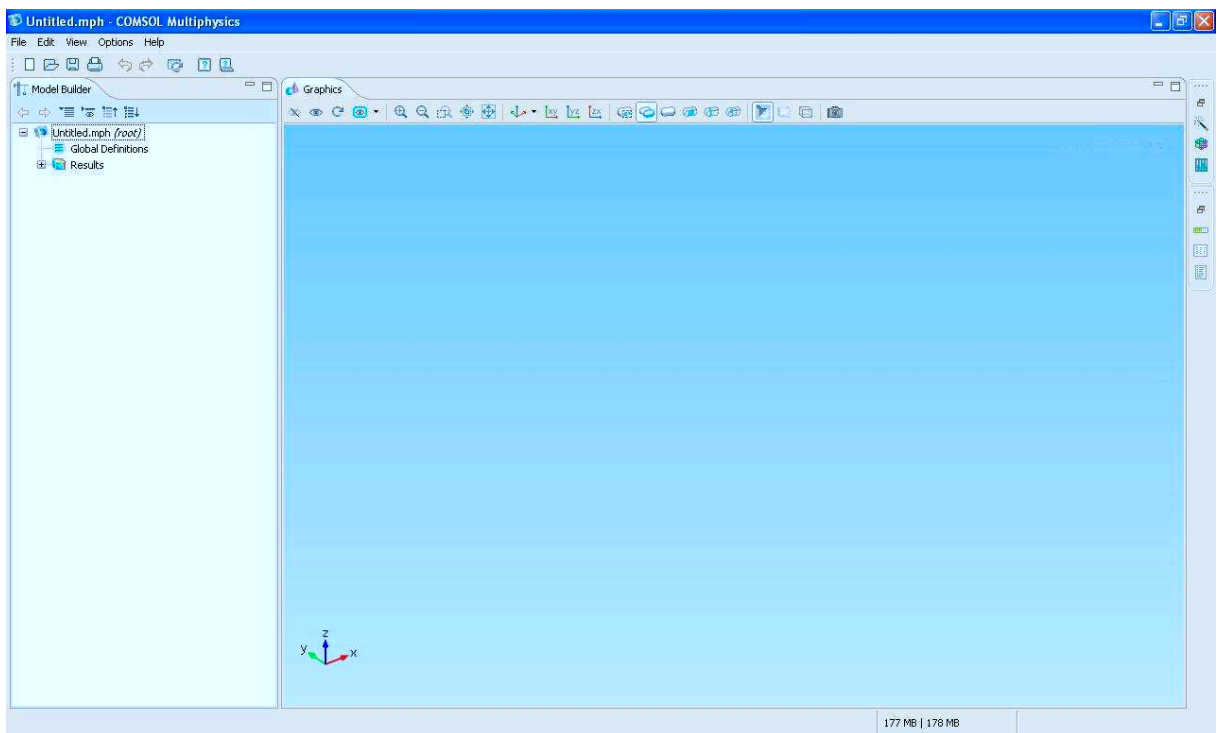


FiguraA-2. Descrição geométrica detalhada do modelo a ser construído.

No programa Comsol, há a possibilidade de construção de modelos utilizando figuras geométricas. Por ter geometria retangular, são utilizados na construção do modelo descrito na Figura A-2 retângulos, onde devem ser informados uma coordenada, nesse caso o canto inferior esquerdo do elemento, e as dimensões de largura e altura. As informações

mostradas na Figura A-2 esgotam os dados necessários à criação do modelo no Comsol. A seguir será descrita em detalhes a seqüência completa de passos a serem seguidos para a construção, simulação e análise do modelo.

A tela inicial de execução do programa é apresentada na Figura A-3 onde pode ser vista a interface principal. O primeiro passo para a construção do modelo é a criação de um novo arquivo, na aba >File, primeira opção: >New, ou no primeiro botão da barra de ferramentas.



FiguraA-3. Tela inicial do programa Comsol Multiphysics.

É aberta, então, uma aba no lado direito da tela onde serão configuradas as características principais do novo modelo a ser construído. Na Figura A-4 são mostradas a seqüência de passos escolhidas na construção do modelo descrito neste apêndice.

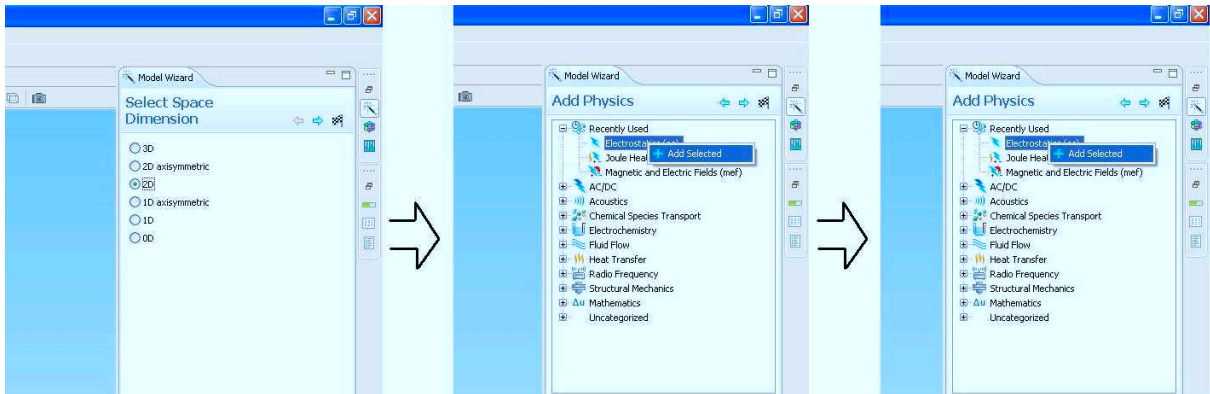
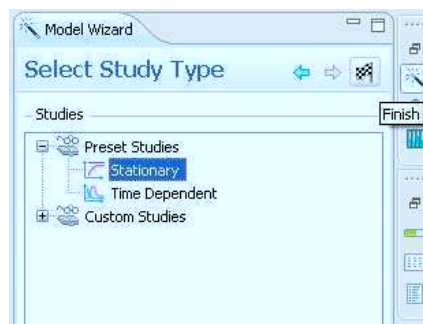


Figura A-4. Seqüência de passos iniciais para configuração do modelo.

O primeiro passo é a seleção sistema de coordenadas a ser utilizado na construção do modelo. Neste caso, é adotado o sistema cartesiano retangular em duas dimensões. Em seguida, o usuário deve clicar na seta azul, na parte superior da aba, passando assim para a próxima etapa da configuração. A segunda etapa diz respeito à escolha dos módulos a serem utilizados na construção e análise do modelo. No exemplo descrito, adotaremos o módulo *Eletrostatics*, isto é feito clicando no sinal (+) do lado esquerdo da pasta AC/DC com o botão esquerdo do *mouse*, ou no caso em estudo, no sinal (+) do lado esquerdo da pasta *Recently Used*, já que o módulo foi usado recentemente em outras simulações. Em seguida, com o botão direito do *mouse* no módulo *Eletrostatics* e escolhendo a opção *Add Selected* com o botão esquerdo do *mouse*. Em seguida, o usuário deve clicar mais uma vez na seta azul, na parte superior da aba que levará à configuração do tipo de estudo (*Select Study Type*), onde deverá ser selecionada a opção *Stationary* com um clique simples. Para finalizar a construção do modelo, o usuário deve clicar no botão *Finish*, conforme a Figura A-5 a seguir.

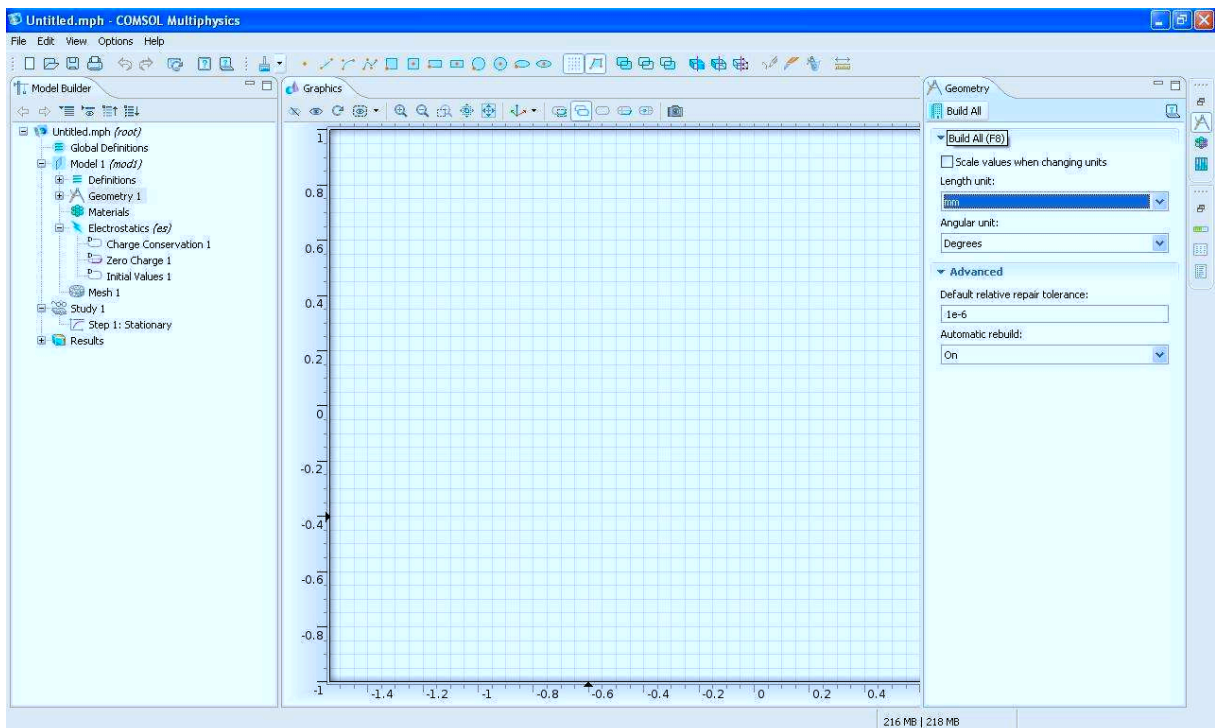


FiguraA-5. Última etapa na configuração do modelo.

A próxima etapa diz respeito às definições básicas da geometria do problema: unidades de medida utilizadas e tolerância (precisão). Tal configuração é apresentada automaticamente ao usuário após o passo descrito na Figura A-5. Na Figura A-6 é apresentada

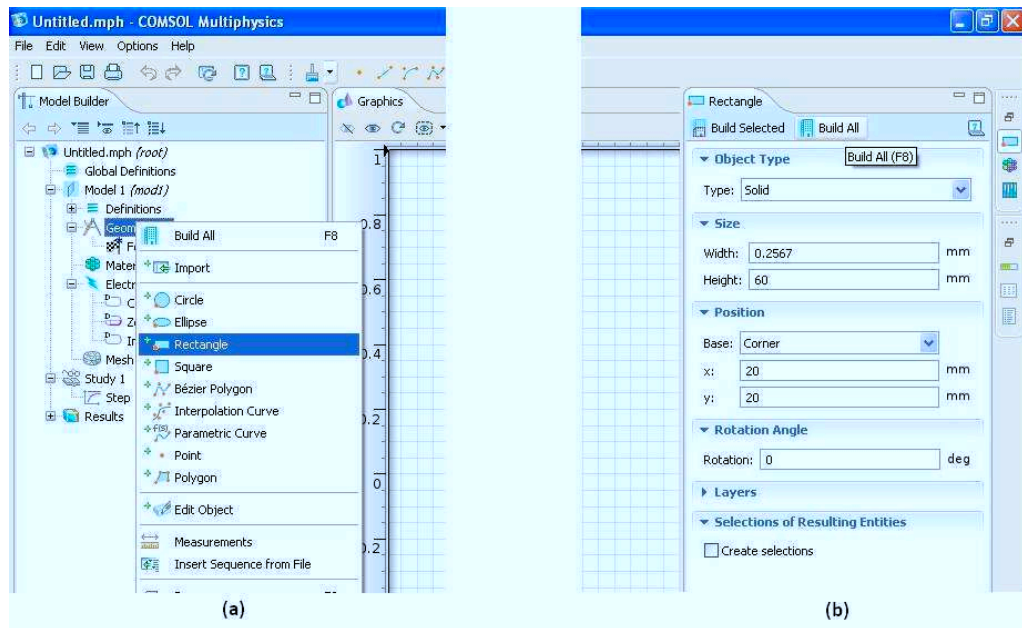
a tela de configuração e a forma de preenchimento dos campos. Definidos todos os campos, o usuário deve clicar no botão *Build All* para confirmar a seleção das definições básicas e iniciar a construção do modelo.

Conforme mencionado anteriormente, a construção será baseada em retângulos, onde devem ser definidas uma coordenada (canto inferior esquerdo) e a largura e altura de cada elemento. Na Figura A-2 foram apresentados os retângulos que deverão ser construídos (R1, R2, R3, R4, R5, R6 e R7) bem como suas coordenadas, entre parêntesis na parte inferior da figura. As dimensões de cada retângulo podem ser calculadas a partir das coordenadas e das cotas fornecidas na Figura A-2. Os retângulos R1, R3, R4 e R6 apresentam 0,2567 milímetros de largura 0,2567 e 60 milímetros de altura. Os retângulos R2 e R5 apresentam 4 milímetros de largura e a mesma altura dos anteriores. O retângulo R7, que corresponde ao ar em torno dos condutores apresenta 51,0269 milímetros de largura e 100 milímetros de altura.



FiguraA-6. Definição das unidades de medida utilizadas na construção do modelo.

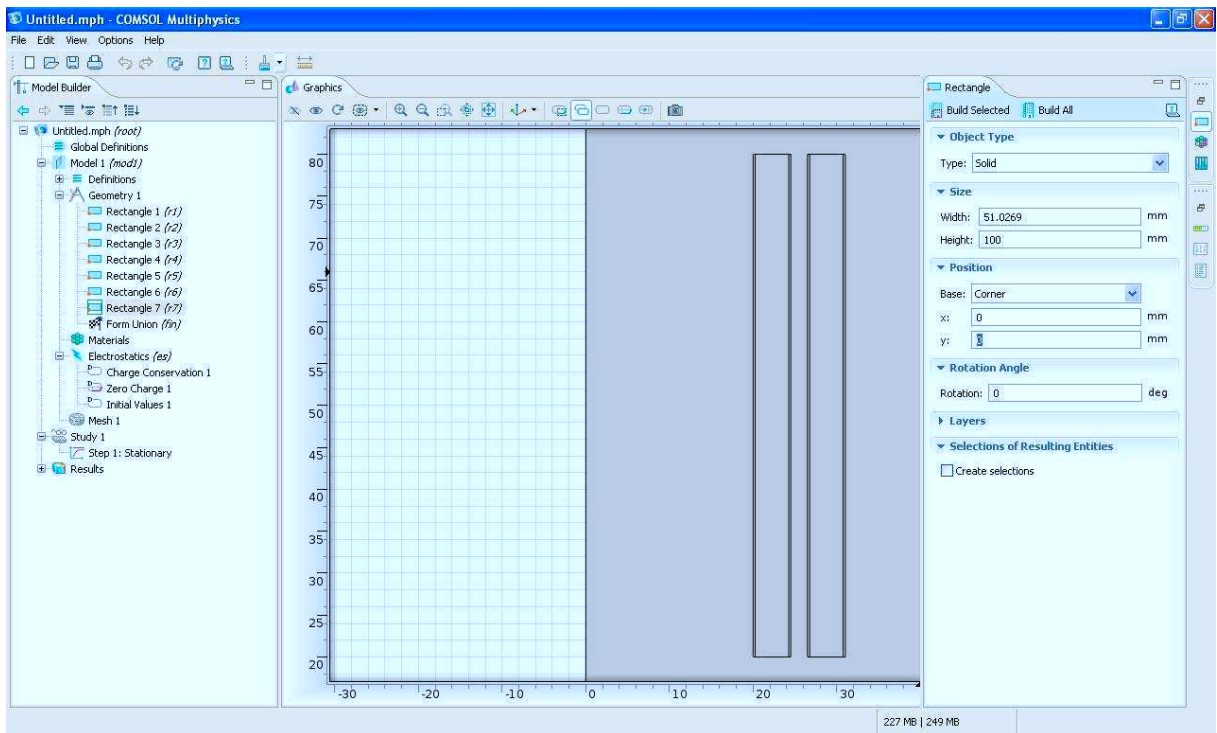
Para a construção de cada retângulo, o usuário deve clicar no sinal (+) do lado esquerdo da pasta *Geometry*, na aba esquerda (*Model Builder*) da tela principal do programa, conforme ilustrado na Figura A-7 (a).



FiguraA-7. Sequencia de passos para criação de um retângulo. (a) Seleção da forma geométrica desejada, (b) definição das dimensões do retângulo.

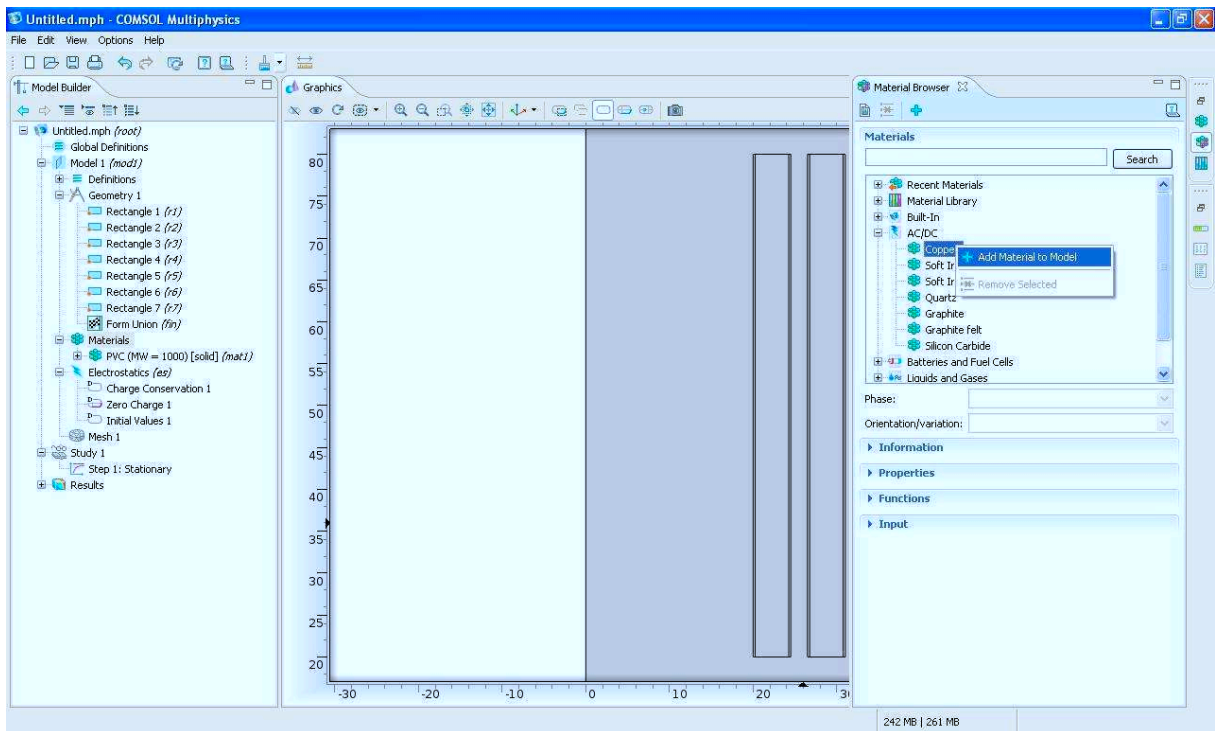
Em seguida, com um clique com o botão direito do *mouse* sobre a pasta *Geometry*, o usuário poderá escolher a forma geométrica desejada, neste caso um retângulo (*Rectangle*), e selecioná-la com um clique no botão esquerdo do *mouse*. Será então aberta automaticamente uma aba do lado direito da tela onde deverá ser configurado o retângulo criado. Na Figura A-7 (b) são apresentados os parâmetros para configuração do retângulo R1: largura (*width*), altura (*height*), *base* (onde deverá ser selecionada a opção: *corner*) e as coordenadas horizontal (x) e vertical (y). Para finalizar a construção do retângulo, o usuário deve clicar no botão *Build All*, na parte superior da aba, ou pressionar o botão F8 no teclado.

O último retângulo construído deverá ser R7, correspondendo à região preenchida por ar no entorno dos condutores. O aspecto final do modelo, e configuração dos parâmetros de R7 são mostrados na Figura A-8.



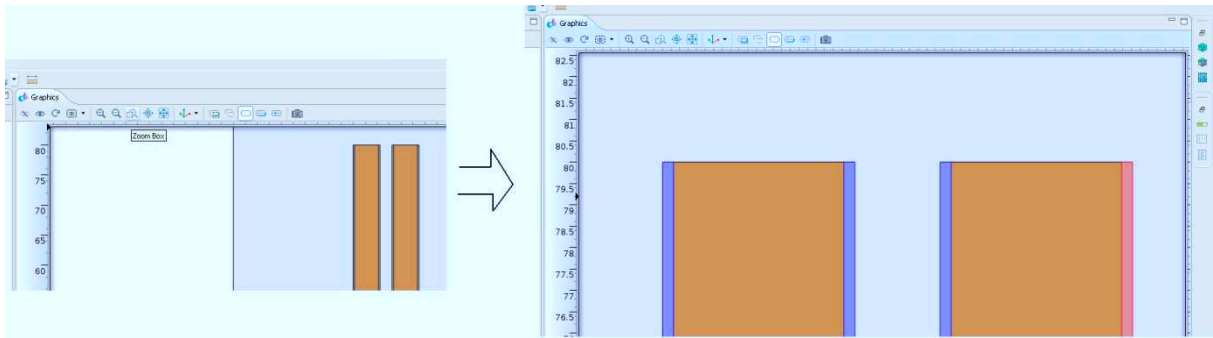
FiguraA-8. Última etapa da construção geométrica do modelo a ser simulado.

Concluída a elaboração do arranjo geométrico do problema, o próximo passo na construção do modelo a ser simulado é a definição dos materiais utilizados em cada elemento geométrico criado. No exemplo em discussão, serão utilizados três materiais: cobre (condutores), PVC (camada isolante dos condutores) e ar (região externa). Para a simulação dos potenciais elétricos no arranjo descrito é necessário definir a permissividade relativa de cada material utilizado. Neste exemplo serão utilizadas as permissividades relativas 10^5 para o cobre, 2,6 para o PVC e 1,0 para o ar. A inclusão de um material no modelo é mostrada na Figura A-8.



FiguraA-8. Inclusão de materiais no modelo.

O primeiro passo é clicar uma vez sobre a pasta *Materials*, na aba *Model Builder*, do lado esquerdo da janela principal. Em seguida, clicando no botão *Material Browser* (destacado na barra de botões mais à direita na Figura A-8) a aba *Material Browser* do lado direito da janela principal será aberta. Para a inclusão do cobre no modelo, deve ser aberta a pasta *AC/DC*, com um clique no botão (+) à sua esquerda e em seguida, com um clique com o botão direito do mouse sobre o material *Cooper*, deverá ser escolhida a opção *Add Material to Model*. Após a inclusão dos três materiais utilizados, a partir da repetição dos passos descritos para o cobre, devem ser relacionados cada elemento geométrico com um dos materiais definidos. Para isso, o usuário deve clicar sobre o material escolhido, na aba *Model Builder*, pasta *Materials* e em seguida dar um clique com o botão esquerdo, seguido por um clique com o botão direito do *mouse* sobre o elemento geométrico desejado. Após primeiro clique, o elemento geométrico apresentará a cor vermelha e após o segundo clique, a cor azul, neste momento, estará relacionado aquele elemento geométrico com o material escolhido. Para os elementos de menor dimensão, o usuário deverá utilizar o botão *Zoom Box*, destacado na Figura A-9 e selecionar com o botão esquerdo do mouse a região desejada.



FiguraA-9. Procedimento para aproximação de regiões do modelo geométrico.

Após o procedimento ilustrado na Figura A-9 é possível a definição dos materiais para os retângulos R1, R3, R4 e R6, conforme procedimento descrito em A-8.

É necessária então a definição das permissividades relativas para cada material empregado. Tal configuração é possível através de um clique sobre o nome do material, na pasta *Materials* da aba *Model Builder*. É aberta então a aba *Material*, do lado direito da tela principal onde a tabela *Material Contents* possibilita a definição das características do material. Na Figura A-10 é exemplificada a definição da permissividade relativa do ar. O mesmo deve ser realizado para o cobre e o PVC.

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Prop	
Relative permittivity	epsilon _{nr}	1		Basic	
Thermal conductivity	k	$k(T[1], \dots)$	W/(m...	Basic	
Heat capacity at constant pres...	C _p	$C(T[1], \dots)$	J/(kg...	Basic	
Density	rho	$\rho(T[1], \dots)$	kg/m ³	Basic	
TD	TD	$TD(T[1], \dots)$	m ² /s	Basic	
Dynamic viscosity	mu	$\eta(T[1], \dots)$	Pa*s	Basic	

FiguraA-10. Exemplo de definição da permissividade relativa de um dos materiais utilizados.

A última etapa na definição do modelo é a inclusão dos valores de potenciais elétricos definidos. Neste problema são definidos os potenciais elétricos nos dois condutores, onde se supõe que cada um deles estará submetido a um potencial. O interesse real na análise do problema neste caso é a diferença de potencial entre as duas regiões, e não os valores absolutos, de tal maneira que adotaremos o potencial de terra (*ground*) num condutor e o potencial elétrico 2.000 Volts no outro. Para isso, deve ser selecionada a pasta *Electrostatics* na aba *Model Builder* e em seguida, com um clique com o botão direito

do mouse, selecionada a opção: *Electric Potential*, conforme a Figura A-11 (a) a seguir. Automaticamente será aberta a aba *Electric Potential*, do lado direito da tela principal, conforme a Figura A-11 (b), onde deverá ser definido o valor do potencial (2.000 Volts), conforme a mesma figura.

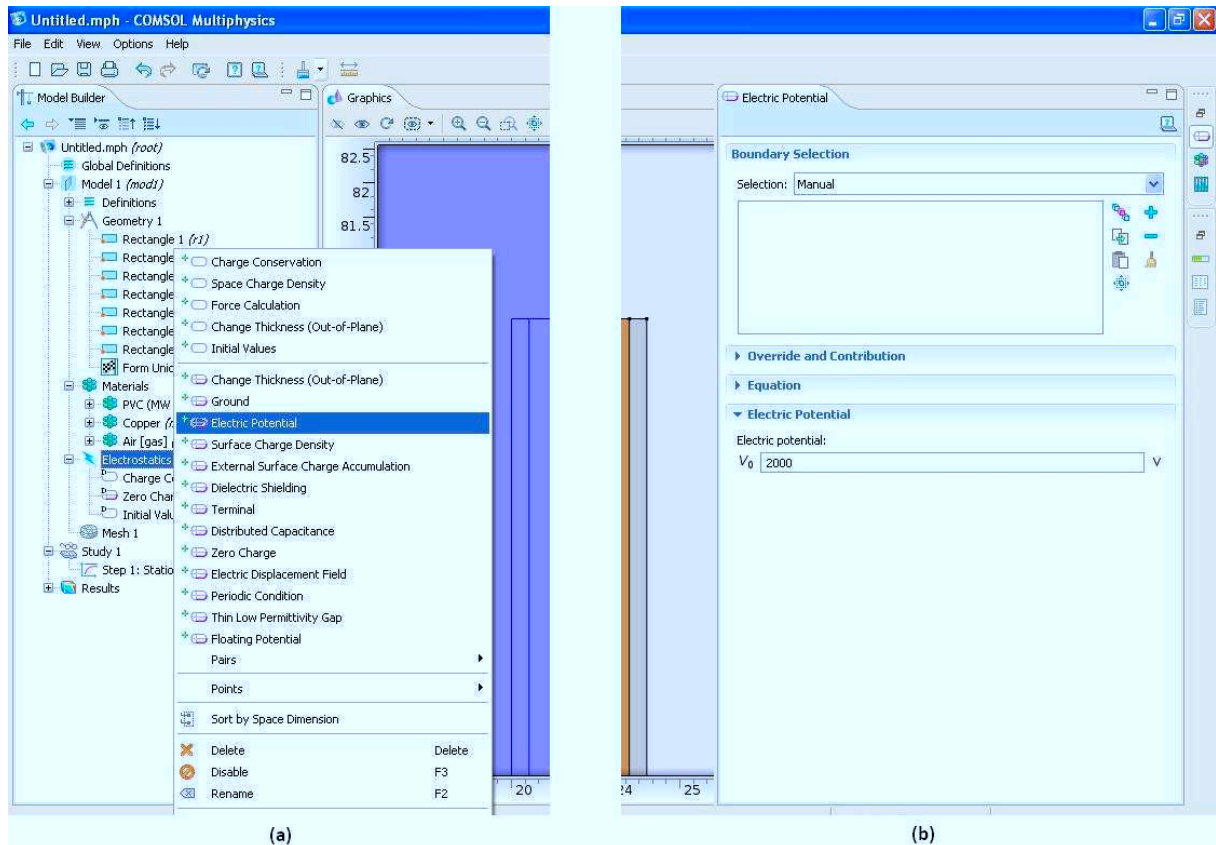


Figura A-11. (a) Criação de um potencial elétrico e (b) definição do valor do potencial.

O próximo passo é a definição de que bordas da figura estarão submetidas a este potencial. No exemplo em questão, escolheremos o condutor à direita para a aplicação do potencial criado, isto pode ser feito selecionando o potencial criado (*Electric Potential 1*) na aba *Model Builder*, pasta *Electrostatics*, em seguida, clicando com o botão esquerdo e em seguida o botão direito sobre a borda desejada. A definição do potencial é necessária apenas em uma das arestas que representam o condutor, foi escolhida neste caso a aresta superior, uma vez que, no material condutor, o potencial elétrico se distribuirá uniformemente ao longo de toda a região.

Em seguida deve ser criado o potencial de referência, isto pode ser feito de maneira semelhante à criação do potencial de 2.000 Volts. Com um clique com o botão direito sobre a pasta *Electrostatics* e em seguida um clique sobre a opção *Ground*. O procedimento

seguinte é bastante semelhante ao anterior, com a diferença de que não será necessário definir nenhum valor para o potencial pois o potencial de terra tem seu valor definido em zero Volt. Há, no entanto, um detalhe que deve ser levado em consideração: ao criar o potencial de terra, o programa define automaticamente todas as bordas do modelo com esse potencial, o que pode ser revertido com um clique no ícone indicado na Figura A-12.

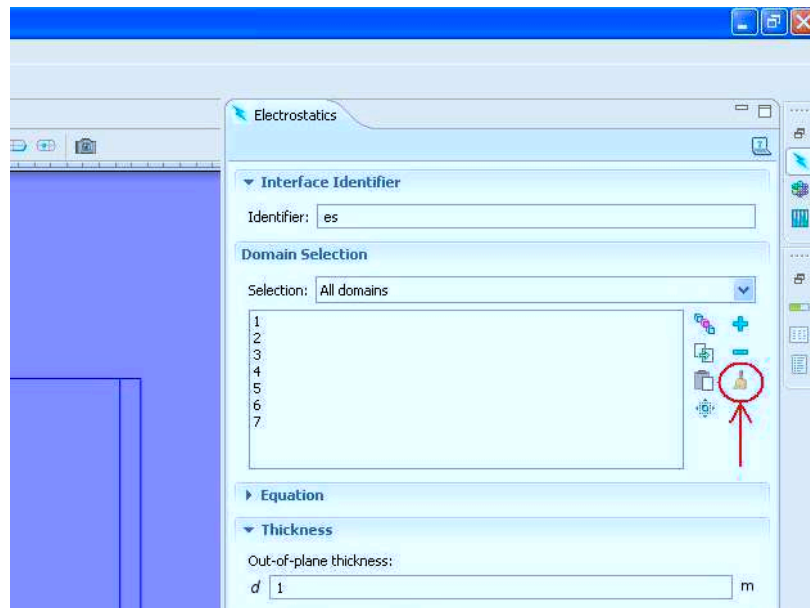


Figura A-12. Botão para limpeza dos campos preenchidos automaticamente.

Em seguida deve ser repetido o procedimento anterior para definição de uma borda com potencial de terra: clique sobre o potencial *Ground*, na pasta *Electrostatics* e em seguida, clique com botão esquerdo seguido por clique com botão direito sobre uma das bordas do condutor à direita.

Com isso está concluída a definição do modelo criado. Para retornar ao tamanho original da imagem, deve ser utilizado o botão **Zoom Extends**, indicado na Figura A-13 a seguir.

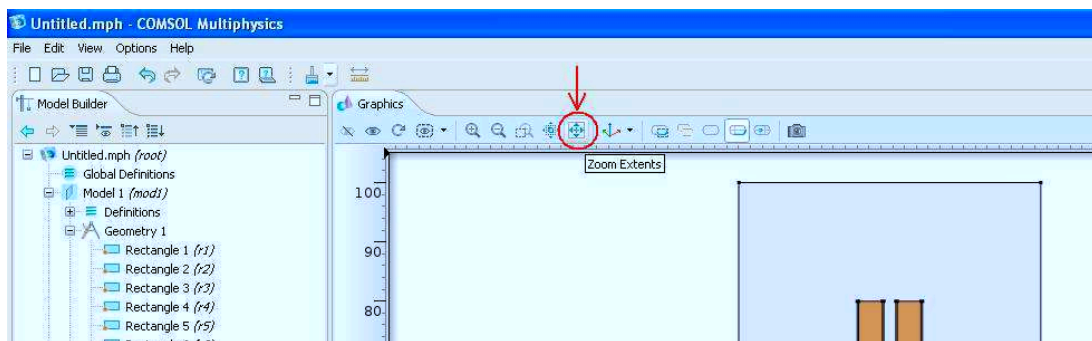


Figura A-13. Botão que permite retornar à vista original da imagem.

As etapas seguintes dizem respeito à simulação do problema utilizando o Método dos Elementos Finitos. A primeira etapa consiste na definição da malha de criação dos domínios. Para tal, deve ser selecionada a pasta *Mesh* na aba *Model Builder*, o que fará com que seja aberta automaticamente a aba *Mesh* do lado direito da tela principal. Nesta aba, deve ser selecionada a opção *Normal* para o campo *Element Size*, indicando que a precisão da simulação, e conseqüentemente, o tamanho dos domínios deverá ser normal, para os parâmetros do programa. Por último, um clique no botão *Buld All*, na parte superior da aba *Mesh* confirma os parâmetros definidos e cria a malha. Os passos descritos neste parágrafo estão destacados na Figura A-14.

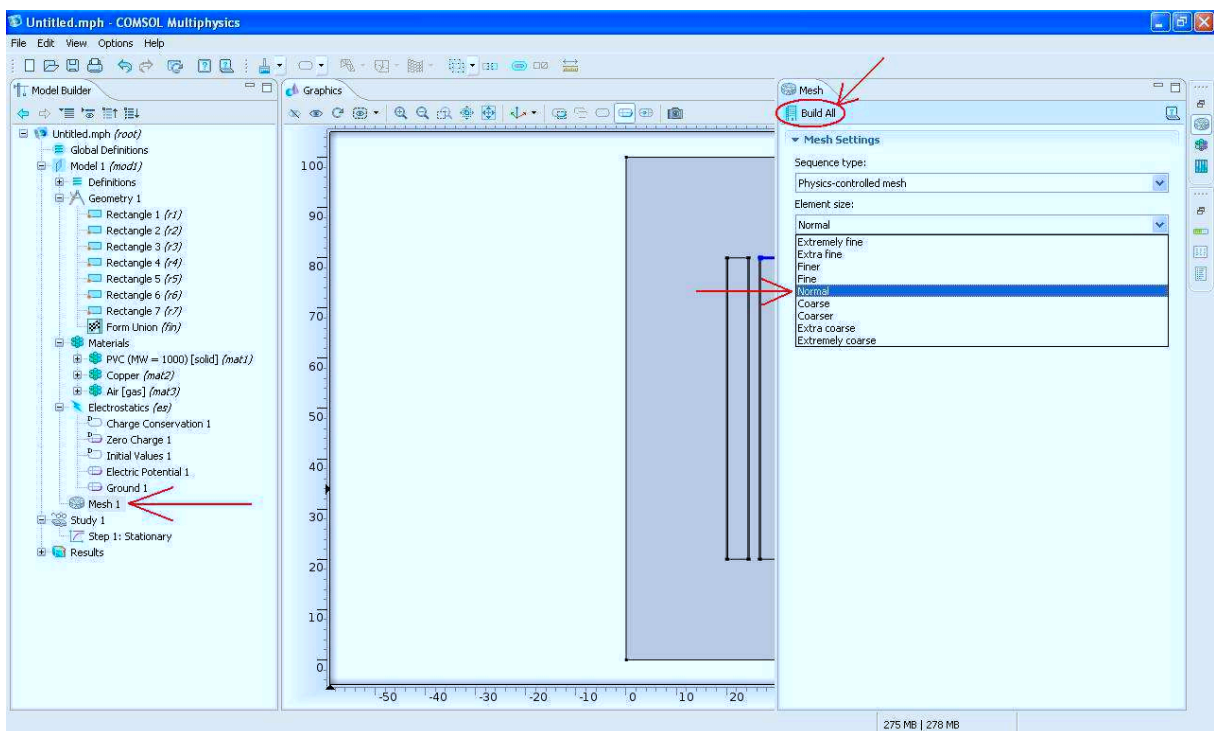


Figura A-14. Passos para a criação da malha de domínios.

Após os passos anteriormente descritos, a malha será automaticamente mostrada sobre a imagem do arranjo criado, na tela principal.

A próxima etapa da simulação é a realização do estudo, ou seja, computação dos cálculos, utilizando Método dos Elementos Finitos, para obtenção dos potenciais em cada ponto da imagem e das linhas equipotenciais desejadas. Para isso, deve ser selecionada a pasta *Study*, na aba *Model Builder*, que resultará na abertura automática da aba *Study*, do lado direito da tela principal. Nesta aba, os campos *Generate default plots* e *Generate convergence plots* estarão automaticamente selecionados e caberá ao usuário apenas clicar no botão

Compute, na parte superior da aba. Os passos descritos estão destacados na Figura A-15 a seguir. Ainda na Figura A-15 pode ser vista parcialmente a malha criada na etapa anterior, sobreposta ao modelo geométrico construído.

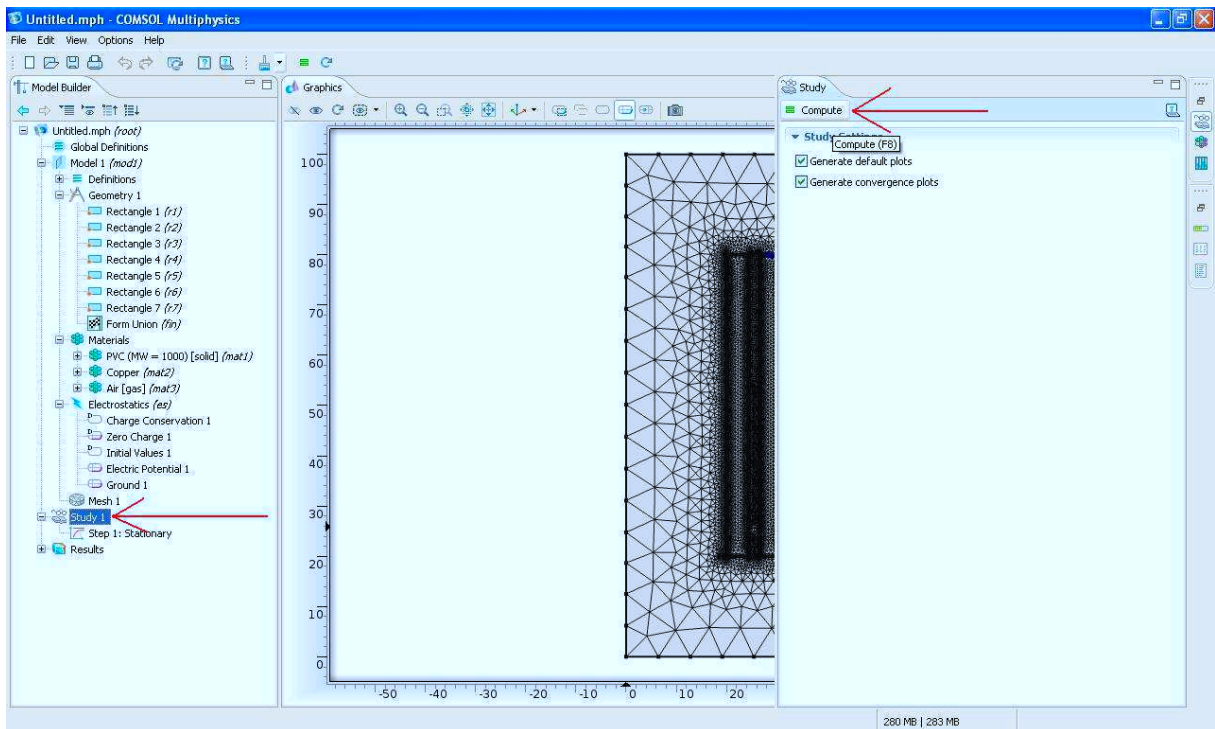


Figura A-15. Passos para a obtenção dos resultados gerados pelo programa.

As próximas etapas dizem respeito às análises que o usuário pode realizar a partir do resultado fornecido pelo programa e ilustraremos apenas um caso genérico. Após a realização do último passo descrito anteriormente, o programa apresentará, na tela principal, a distribuição de potenciais em falsas cores e será criada a pasta *Results* na aba *Model Builder*. Nesta, deve ser dado um clique com o botão direito do mouse sobre a subpasta *Electric Potential*, conforme destacado na Figura A-16, e em seguida selecionada a opção *Contour* para que sejam mostradas na Figura as linhas equipotenciais. Estes passos são mostrados na Figura A-16 (a). Para facilitar a visualização das linhas equipotenciais, deve ser desabilitada a representação em falsas cores. Isto é possível expandindo a pasta *Electric Potential*, com um clique no sinal (+) à sua esquerda e em seguida, com um clique com o botão direito do mouse na subpasta *Surface* seguido pela escolha da opção *Disable*. Estes passos são mostrados na Figura A-16.

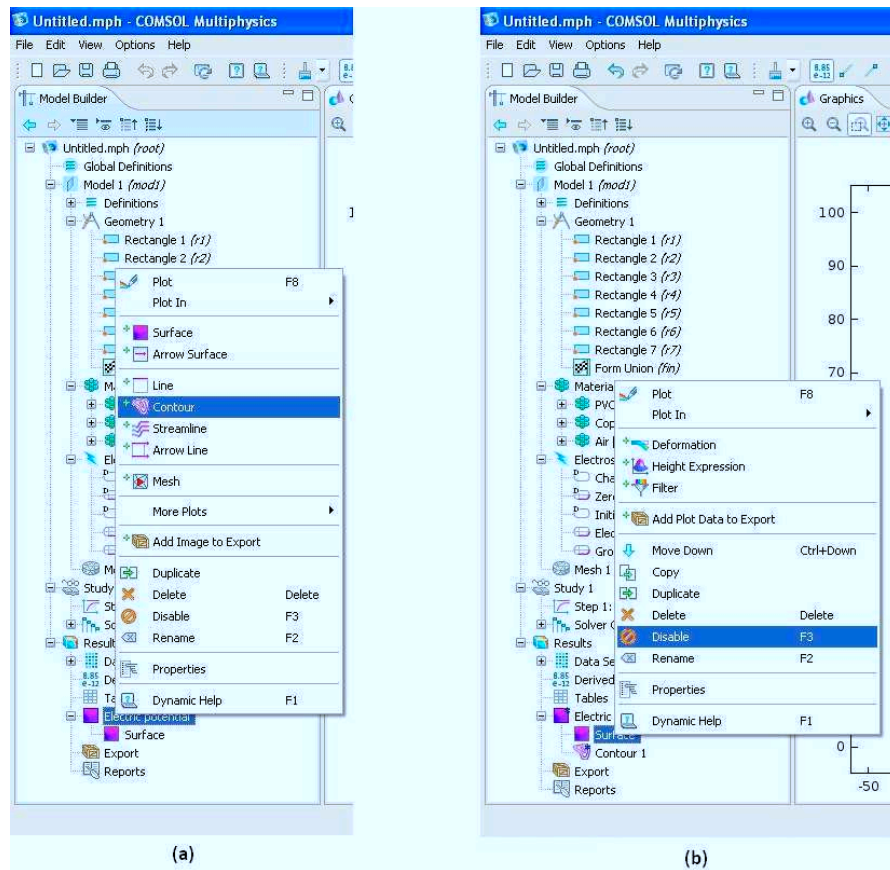


Figura A-16. Alterações na forma de apresentação dos resultados: (a) inclusão das linhas equipotenciais e (b) desabilitação da representação em falsas cores.

Após os passos descritos no parágrafo anterior, o resultado será apresentado na tela principal conforme a Figura A-17.

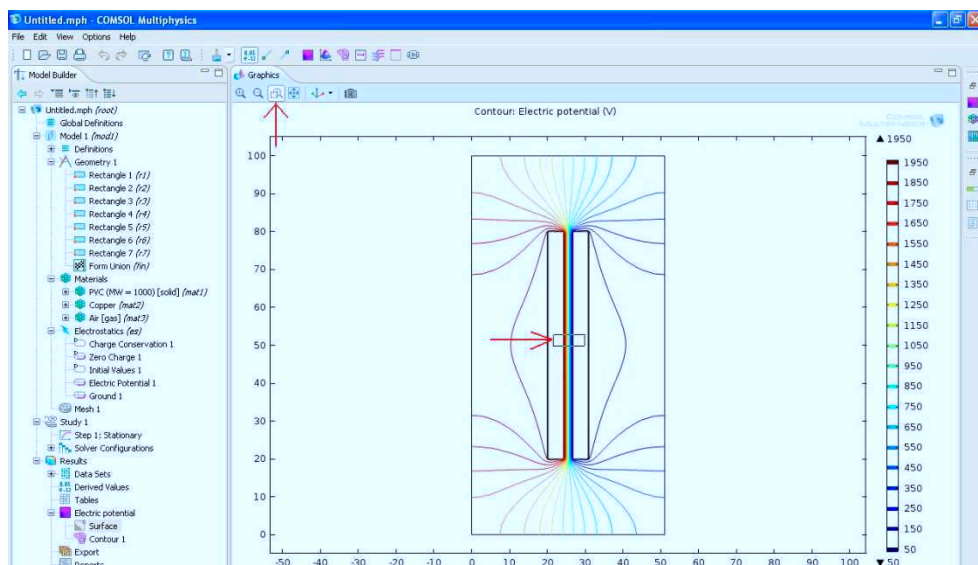


Figura A-17. Apresentação das linhas equipotenciais e destaque para a função *zoom box*.

Na mesma Figura A-17 é dado destaque ao botão *Zoom Box*, na parte superior da aba *Graphics* (tela principal) e à região selecionada para aproximar a visão (retângulo destacado na região central da imagem).

A análise do problema descrita a seguir se baseia em traçar gráficos onde são representados os potenciais elétricos em função das distâncias, a partir de segmentos de reta definidos pelo usuário. Para isso, serão utilizados os botões *Select First Point for Cut Line* e *Select Second Point for Cut Line*, destacados na Figura A-18.

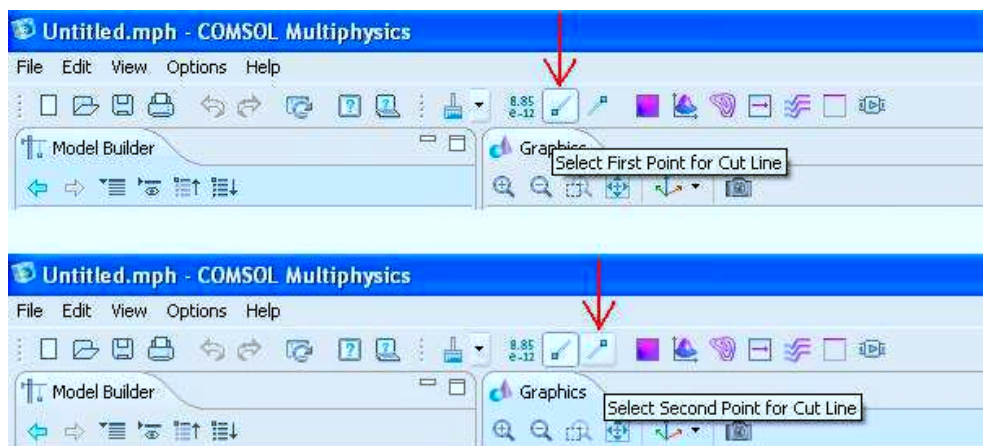


Figura A-18. Destaque para os botões de criação das linhas para análise.

O procedimento para criação do segmento de reta para análise através do gráfico é simples: com um clique no botão *Select First Point for Cut Line* é possível escolher na tela principal um ponto qualquer, que será o ponto inicial do segmento de reta utilizado para construção do gráfico de potenciais *versus* distância. Definido o primeiro ponto, um clique no botão *Select Second Point for Cut Line* permite a escolha do segundo ponto, que será o ponto final do segmento de reta. A ordem de escolha entre o primeiro e segundo ponto é importante devido a forma de apresentação do gráfico, onde o eixo horizontal terá origem no primeiro ponto e fim no segundo ponto. Caso fossem escolhida a ordem inversa dos pontos, o gráfico corresponderia a uma versão refletida em relação à vertical.

Na Figura A-19 pode ser visto o segmento de reta criado (em vermelho no centro da imagem) e no canto inferior esquerdo é destacada a nova subpasta *1D Plot Group 2*, criada automaticamente logo após a definição do segmento de reta. Um clique na nova subpasta permitirá a visualização do gráfico desejado, conforme ilustrado na Figura A-20.

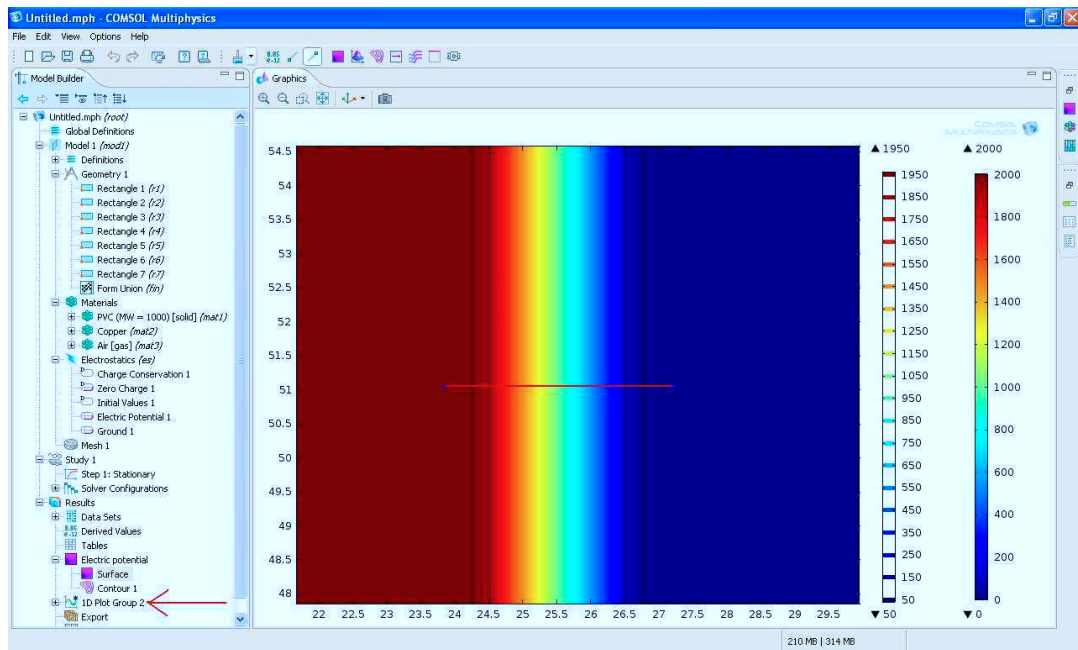


Figura A-19. Aproximação da região central com o segmento de reta utilizado para análise através do gráfico e destaque para a subpasta *1D Plot Group 2*.

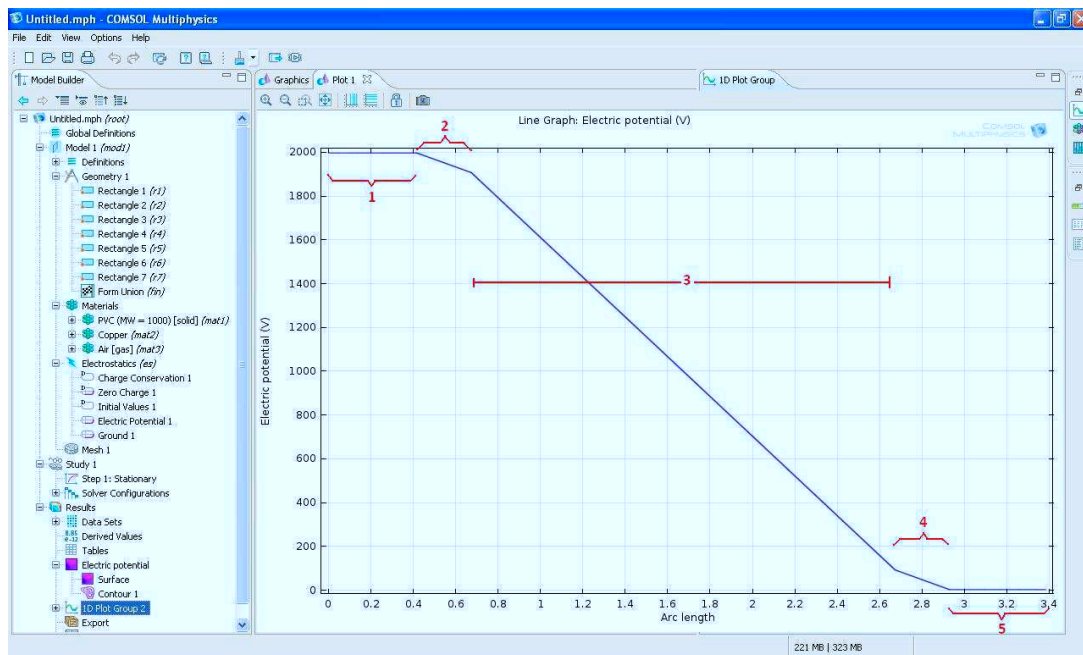


Figura A-20. Gráfico obtido a partir do segmento de reta escolhido e destaque para as regiões com inclinações distintas.

No gráfico apresentado na Figura A-20 são percebidas cinco regiões com inclinações distintas. A observação do segmento de reta criado, visto na Figura A-19 facilita a compreensão dessas regiões.

O primeiro ponto do segmento de reta está localizado no interior do condutor à esquerda (submetido ao potencial de 2.000 Volts), a região 1 do gráfico corresponde então à parte do segmento de reta interno ao condutor, configurando por isso um patamar no gráfico já que a distribuição de potencial no interior de um condutor é constante. A região 2 do gráfico corresponde à variação de potencial elétrico observada no interior da camada isolante de PVC do primeiro condutor. A região 3 do gráfico corresponde à variação de potencial elétrico no espaço preenchido por ar entre os dois condutores isolados. A região 4 corresponde à variação de potencial elétrico observada no interior da camada isolante de PVC do segundo condutor (localizado à direita da figura e submetido ao potencial de terra). A região 5 do gráfico corresponde à parte do segmento de reta interno ao segundo condutor, configurando por isso um patamar no gráfico já que a distribuição de potencial no interior de um condutor é constante.

A análise do gráfico apresentado em A-20 nos permite conhecer a variação de potencial elétrico ao longo de cada material, em especial, o PVC e o ar. Comparando a variação de potencial em função da distância para um dos materiais com a rigidez dielétrica do mesmo, seria possível prever a condição de trabalho a que o material estaria exposto. Caso a variação de potencial por unidade de comprimento observada no gráfico supere a rigidez dielétrica do material, é razoável prever que poderá ocorrer ruptura elétrica caso os valores de potencial utilizados na simulação sejam aplicados no arranjo real.

Na região 3 do gráfico apresentado em A-20 é possível perceber que há variação dos potenciais de 1.800 a 1.600 Volts num intervalo de 0,2 mm e que a inclinação da reta é constante na região, indicando portanto, uma variação de potencial de 1 kV/mm ou ainda 10 kV/cm. É necessário então conhecer as condições atmosféricas na região onde deverá ser realizado o experimento real para prever se a rigidez dielétrica do ar naquelas condições será superior à variação calculada. Na simulação foi utilizado o valor 1,0 para permissividade relativa do ar, em condições reais, o valor da permissividade medido ou estimado com base em parâmetros como temperatura e pressão indicariam um valor diferente de 1,0 que deveria ser utilizado na simulação. No caso ideal de permissividade relativa do ar 1,0 não haveria ruptura já que a rigidez dielétrica nesse caso é em torno de 30 kV/cm.

Para a análise da variação de potencial através das camadas de PVC, é necessário traçar um gráfico mais preciso para tal região. Isso pode ser feito a partir da alteração dos pontos inicial e final do segmento de reta criado para o traçado do gráfico. Uma alternativa

seria adotar o ponto inicial na interface entre o condutor metálico e o PVC e o ponto final na interface entre o PVC e o ar. O gráfico obtido adotando esta solução é mostrado na Figura A-21, onde foi escolhida uma região do PVC isolante do condutor submetido ao potencial 2.000 Volts.

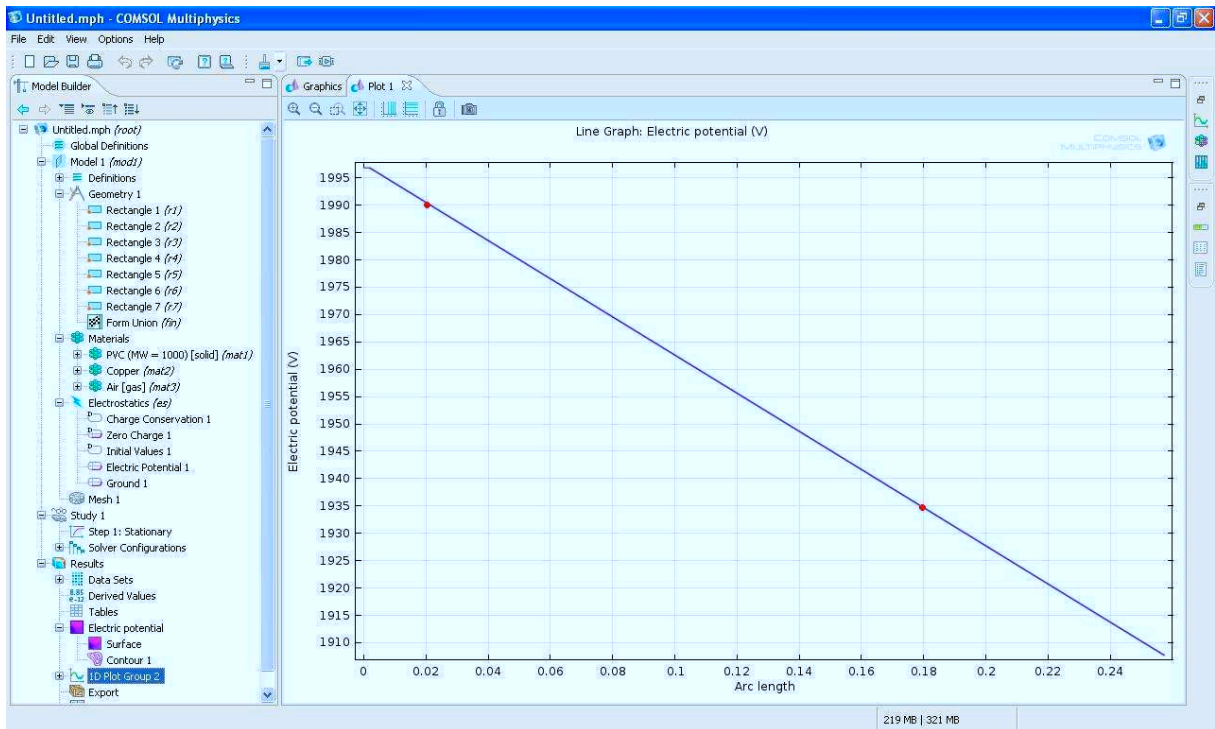


Figura A-21. Variação de potencial elétrico através de uma das camadas de PVC.

São destacados na Figura A-21 dois pontos que servirão de base para o cálculo da variação de potencial ao longo do material. A distância entre os pontos é de 0,16 mm e a variação de potencial no intervalo é de 55 Volts, o que indica uma variação de aproximadamente 0,344 kV/mm, ou ainda, 3,44 kV/cm. Para os valores padrão conhecidos de rigidez dielétrica do PVC, tal variação de potencial por unidade de comprimento não ofereceria risco de ruptura elétrica no interior do material, no entanto, nesse tipo de análise, é importante o conhecimento exato dos parâmetros como permissividade relativa e rigidez dielétrica para o material em estudo. Tais valores podem ser fornecidos pelo fabricante ou calculados em laboratório.

APÊNDICE B – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS CONCEITOS DE ELETROMAGNETISMO.

A LEI DE COULOMB

Neste apêndice são apresentadas as formulações matemáticas da teoria eletromagnética apresentada na introdução ao trabalho.

A Lei de Coulomb descreve a força exercida sobre uma partícula 1, devida à partícula 2, estando as duas separadas por uma distância r_{12} , sendo \hat{r}_{12} o vetor unitário da direção de 1 para 2. Há ainda uma constante de proporcionalidade k , função da unidade de carga elétrica escolhida, conforme discutido a seguir. A expressão matemática da lei de Coulomb é dada pela equação 1.

(1)

A constante k será positiva se q_1 e q_2 têm o mesmo sinal, a força será portanto repulsiva e será negativa se as cargas tiverem sinais opostos, sendo então a força repulsiva.

No Sistema Internacional de Unidades, baseado em metro (m), quilograma (kg), Newton (N), segundo (s) e Ampère (A), a unidade de carga adotada é o Coulomb (C) correspondente à carga que atravessa a seção de um condutor percorrido pela corrente de 1 A em um segundo. Dessa maneira, a constante de proporcionalidade k da equação 1 será dada conforme a expressão (2) a seguir.

(2)

Onde c é o módulo da velocidade da luz no vácuo, (aproximadamente 300.000 km/segundo) e ϵ_0 é a permissividade do vácuo. A Lei de Coulomb é então expressa conforme a equação 3.

(3)

O PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

As forças de atração e repulsão entre cargas elétricas obedecem ao princípio da superposição, ou seja, na presença de várias cargas num arranjo geométrico, a força eletrostática que atua sobre cada uma delas é a resultante (soma vetorial) de suas interações com todas as demais cargas, obtidas aplicando a cada par a Lei de Coulomb. A força que atua numa carga i , será dada então conforme a equação 4.

(4)

O princípio da superposição é particularmente importante devida à possibilidade de descrição das cargas macroscopicamente, em termos de cargas distribuídas sobre volumes, superfícies, ou mesmo arranjos filamentosos. Se um volume v é dividido em porções muito pequenas, com cargas puntiformes, o valor numérico das cargas no elemento de volume será dado pela equação 5.

(5)

Onde ρ é a densidade de carga (carga por unidade de volume) no elemento de volume considerado. Quando Δv é suficientemente pequeno, a soma das cargas em cada elemento de volume será dada por uma integral de volume, conforme a equação (6).

(6)

É interessante aqui a introdução do conceito de carga elementar. Embora sejam consideradas distribuições volumétricas e superficiais de cargas, ou seja, distribuições contínuas, as cargas elétricas são de natureza discreta, havendo um valor mínimo de carga elétrica e : a carga do elétron, que em módulo é o mesmo que a carga do próton. Tipicamente é adotado o valor de e negativo para a carga do elétron e positivo para a carga do próton. Numericamente, o módulo de e é dado pela expressão 7.

(7)

O CAMPO ELÉTRICO

A Lei de Coulomb é uma ferramenta necessária ao entendimento de um conceito importante da teoria eletromagnética: o campo elétrico. Aplicando o princípio da superposição, podemos calcular a força atuante sobre uma carga puntiforme q_i , devida a sua interação eletrostática com outras cargas puntiformes de localização conhecida através da equação 8.

(8)

Onde E_i é dado pela expressão 9.

(9)

As demais cargas são então consideradas fontes de campo elétrico, ou seja, E_i é percebido pela carga q_i devido a presença das demais cargas. O campo é definido formalmente como a força por unidade de carga atuando sobre uma partícula, já que, quanto maior a carga da partícula considerada, maior será a força de interação com as demais.

CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO

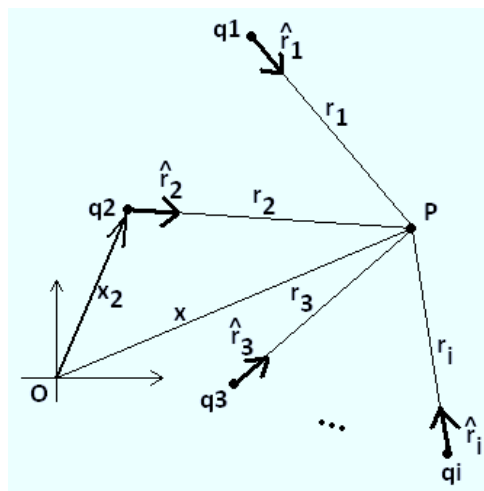


Figura B-1. Campo elétrico no ponto P causado por uma distribuição de cargas.

Seguindo o desenvolvimento exposto anteriormente, o campo elétrico no ponto P de um arranjo exemplificado na Figura B-1 seria dado pela expressão 10.

(10)

Onde r_i é a distância da carga q_i ao ponto P e \hat{r}_i é o vetor unitário da direção que liga a carga a este ponto, apontando no sentido da carga q_i para P (se q_i é negativo, o campo devido a q_i aponta em sentido oposto). Se tomarmos a origem das coordenadas num ponto O, sendo \mathbf{x} o vetor de posição de P e \mathbf{x}_i o da carga q_i , com $|\mathbf{x}-\mathbf{x}_i| = r_i$, teremos o vetor dado pela equação 11.

(11)

Caso exista uma distribuição contínua de cargas, a somatória apresentada na equação 10 será substituída pela integral mostrada na equação 12.

(12)

Onde \mathbf{x} é o vetor de posição do ponto P onde se calcula o campo, conforme a Figura A-1, mas com distribuição de cargas uniforme na região. Para cada elemento infinitesimal de carga dq teremos o vetor de posição \mathbf{x}' cuja contribuição está sendo calculada. As variáveis de integração serão as coordenadas de \mathbf{x}' . Caso a distribuição seja tridimensional, ou volumétrica, o elemento infinitesimal de carga será dado por $dq = \rho dV$, onde ρ é a densidade volumétrica de carga e dV o elemento de volume. Em caso de distribuição superficial, teríamos $dq = \sigma dA$, onde σ é a densidade superficial de carga e dA o elemento de área.

FLUXO DE CAMPO ELÉTRICO E LEI DE GAUSS

O fluxo de campo elétrico através de um elemento de superfície dA é a grandeza $d\Phi$, definida pela equação 13.

(13)

Onde \hat{n} é o vetor normal à superfície, formando um ângulo θ com o campo elétrico que atravessa a superfície. A Figura B-2 ilustra a configuração descrita pela equação 13.

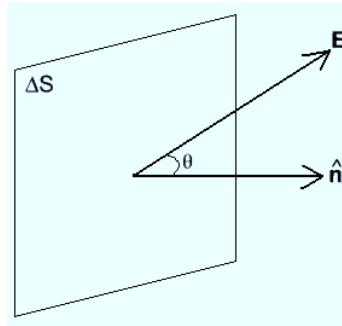


Figura B-2. Fluxo de campo elétrico através de um elemento de área.

Deve ser observado que o elemento de área possui geometria bem definida e orientação vetorial normal dada por \hat{n} , tendo portanto um sentido preferencial. Além disso, \hat{n} pode assumir valores positivos ou negativos, a depender do ângulo entre a normal à superfície e a direção do campo elétrico que a atravessa. Deverá haver então cancelamento entre contribuições positivas e negativas, de modo que há um fluxo líquido resultante.

A lei de Gauss é expressa matematicamente como o fluxo de campo elétrico total através de uma superfície fechada S , causado por uma distribuição de cargas Q contida no interior desse volume. A equação 14 é a forma mais utilizada para expressar a lei de Gauss.

$$(14)$$

Onde dS é o elemento de superfície orientado associado à normal externa \hat{n} . É possível assim, detectar a presença de carga no interior de uma superfície fechada calculando o fluxo de campo elétrico através desta superfície. As cargas são, portanto, consideradas fontes de campo eletrostático.

EQUAÇÃO DE POISSON

No estudo do comportamento dos campos elétricos, se deseja exprimir o estado do campo \mathbf{E} num ponto P em termos de seu comportamento da vizinhança imediata, ou seja, o interesse é maior na distribuição de campo do que no cálculo de um valor absoluto num ponto específico. A lei de Gauss é um indicador da presença de cargas (fontes de campo elétrico) no volume interno a uma superfície fechada. É desejado, no entanto, um indicador local

que sinalize a presença de fontes num ponto P , em outras palavras, se procura conhecer a distribuição de cargas no interior da superfície fechada ou mais especificamente, num ponto P interno a esta superfície.

Para encontrar uma forma matemática de resolução desse problema, se considera uma superfície fechada envolvendo o ponto P que cria um volume muito pequeno, contendo uma carga q , onde ρ é a densidade volumétrica de carga em P . O resultado da aplicação da lei de Gauss ao volume V é apresentado na equação 15.

(15)

Foi feita a consideração de que o volume limitado pela superfície fechada deveria ser muito pequeno, podendo ser expressa a equação 15 em termos do limite $\lim_{V \rightarrow 0}$, cujo resultado é apresentado na equação 16.

(16)

O resultado expresso em 16 caracteriza a densidade de fontes de campo no ponto P , uma vez que o volume é infinitesimal em torno do ponto P . Tal densidade define uma característica local do campo elétrico \mathbf{E} no ponto P e é conhecida por divergência, sendo representada pela notação $\text{div } \mathbf{E}$. Para um vetor \mathbf{v} qualquer, o divergente é definido pela equação 17.

(17)

Onde V é um volume arbitrário que envolve o ponto P e $d\mathbf{S}$ é o elemento de superfície orientado segundo a normal externa à superfície de V . A partir deste resultado e da lei de Gauss definida anteriormente, se define a equação de Poisson que é a forma local da lei de Gauss. A equação de Poisson é comumente expressa conforme a equação 18.

(18)

Cabe neste ponto apresentar a expressão do divergente de um vetor em coordenadas cartesianas. Dado que a definição de $\text{div } \mathbf{v}$ apresentada na equação 17 é independente da forma do elemento de volume, é escolhido um elemento em forma de paralelepípedo retângulo

de lados infinitésimos , com o ponto $P(x,y,z)$ situado em seu centro. Dessa forma, os vértices do paralelepípedo terão coordenadas (). O fluxo de \mathbf{v} através das faces laterais do paralelepípedo resultarão na equação 19.

(19)

Onde as derivadas parciais são todas calculadas no ponto $P(x,y,z)$

TEOREMA DE GAUSS

Para um volume infinitésimo, limitado por uma superfície a aplicação da equação 17 resulta na equação 20.

(20)

Qualquer volume V decomposto em elementos infinitesimais , aos quais pode ser aplicado tal resultado. Somando as contribuições de cada um desses elementos infinitesimais através de uma operação de integração é obtido o fluxo total através da superfície S do volume . As contribuições ao fluxo de elementos de superfície internos se cancelam duas a duas, restando somente o fluxo sobre a superfície externa S do volume V , a soma dos fluxos resulta na equação 21.

(21)

Esse resultado se aplica a qualquer campo vetorial \mathbf{v} e é conhecido como teorema de Gauss, onde V é o volume limitado por uma superfície fechada S . No caso específico do campo eletrostático E , usando a equação de Poisson, se obtém o resultado expresso na equação 22, que é a própria lei de Gauss definida anteriormente.

(22)

Assim, se conclui que a equação de Poisson é equivalente à lei de Gauss

POTENCIAL ELÉTRICO

Vimos que o campo devido a uma carga puntiforme q na origem pode ser expresso conforme a equação 23.

(23)

Tal campo representa a força sobre uma carga de prova unitária e é conservativo. O trabalho correspondente sobre a carga de prova unitária, levada de um ponto P1 para P2 é independente do caminho e é calculado pela equação 24.

(24)

Este valor define a diferença de potencial elétrico entre os pontos P1 e P2, ou seja, a diferença de potencial entre dois pontos é o trabalho que tem que ser realizado contra a força exercida pelo campo para levar uma carga unitária de um ponto ao outro. O potencial num ponto P qualquer é expresso por $V(P)$. Se entre os pontos P1 e P2 se verifica a relação $V(P2) > V(P1)$, a energia potencial de uma carga positiva é maior em P2 do que em P1. O potencial elétrico relaciona trabalho por unidade de carga (carga de prova), sendo no SI, expresso por Joules por Coulomb. A partir desta relação se define a unidade de potencial elétrico denominada Volt, conforme a equação 25.

(25)

Para uma carga puntiforme q localizada na origem, a equação 24 fornece o resultado apresentado na equação 26.

((26)

A escolha do nível zero para V (potencial de referência) é arbitrária. Para uma distribuição de carga toda contida numa região finita do espaço, se convencionamos $V = 0$ no infinito. Com isso a equação 26 é simplificada e o resultado é apresentado na equação 27.

((27)

O cálculo dos potenciais elétricos é particularmente importante pois fornece uma maneira simplificada de cálculo dos campos elétricos conforme será descrito a seguir. Não obstante a isso, o potencial elétrico é ferramenta importantíssima para a Engenharia Elétrica e particularmente para os estudos em Técnicas de Alta Tensão. O próprio termo tensão expressa a diferença de potencial entre dois pontos.

O conceito de gradiente é utilizado para expressar o campo elétrico em função do potencial elétrico conforme a equação 28.

((28)

No caso de uma carga pontual localizada na origem, a uma distância r do ponto medido, a equação 28 é resulta na equação 29.

((29)

Este resultado permite o cálculo do potencial a partir da equação 27, resultando no mesmo valor encontrado para campo elétrico calculado a partir da lei de Coulomb. O resultado é expresso na equação 30.

((30)

O princípio da superposição, válido para a lei de Coulomb, permanece válido para o cálculo do campo elétrico, já que este deriva diretamente de expressões obtidas a partir da lei de Coulomb. Para uma distribuição de cargas puntiformes, o potencial elétrico num ponto P é dado pela equação 31.

((31)

Onde r_j é a distância da carga q_j ao ponto P. Para distribuições contínuas de carga, com elementos infinitesimais de carga dq a uma distância r do ponto P, o resultado é generalizado através de uma integral, conforme apresentado na equação 32.

((32))

Conforme discutido anteriormente, as distribuições de carga, que fisicamente são necessariamente volumétricas, podem ser muitas vezes aproximadas por distribuições superficiais ou lineares. Em 33 são apresentados os elementos infinitesimais de carga para cada tipo de distribuição considerada.

((33))

ANEXO A – RESUMO DO PROJETO

Neste texto, é mostrado um resumo dos resultados finais do projeto, de forma que o executor tenha mais fácil acesso a tais dados. Na Tabela B-1, são listados dados de placa. Na Figura B-1, são mostradas vistas do transformador, bem como as dimensões do tanque.

Tabela B-1. Características gerais.

Transformador de ensaio	
Tipo	Elevador
Número de fases	1
Número de enrolamentos	2
Tensão nominal	0,22/50 kV
Potência nominal	5 kVA
Corrente nominal	22,7/0,1 A
Frequência nominal	60 Hz
Corrente de magnetização	3,6%
Tensão de curto-circuito	21%
Polaridade	Subtrativa
Tipo de resfriamento	LN
Perdas	315 W

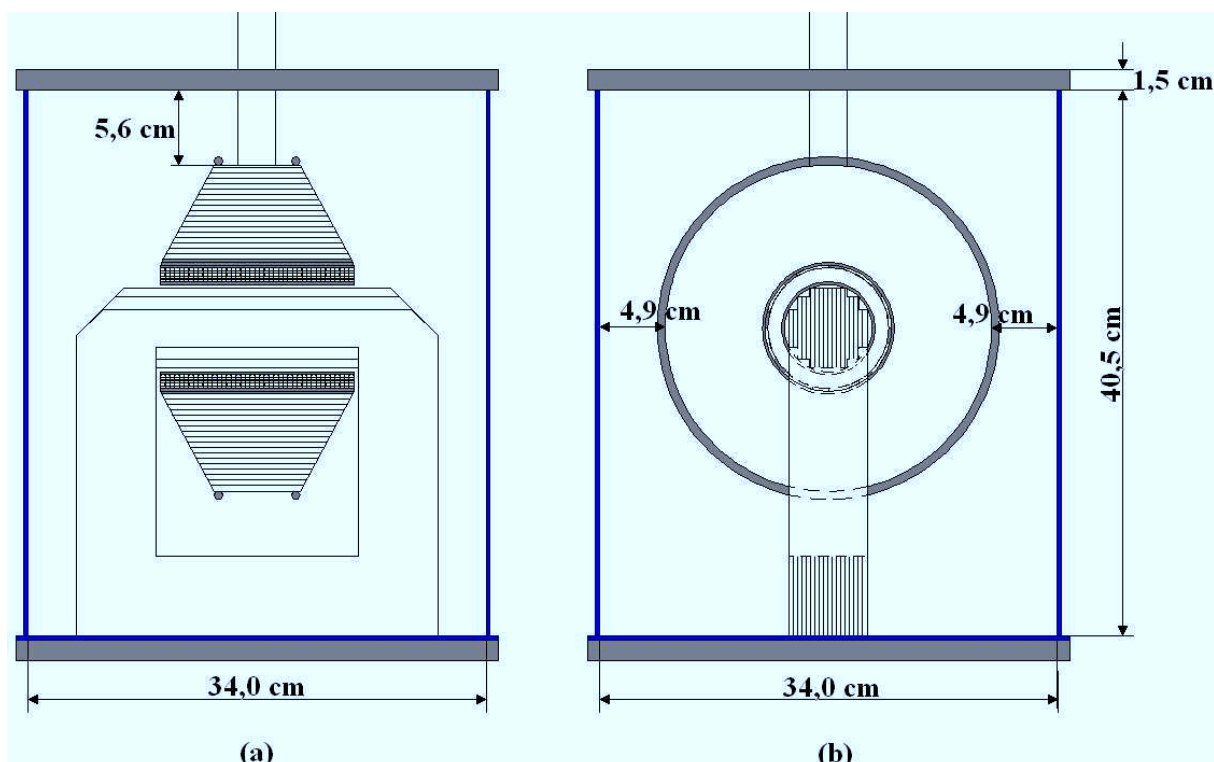


Figura B-1. Vistas do transformador em corte transversal. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral.

NÚCLEO

O núcleo é montado pelo empilhamento de três tipos de chapas, vistas nas Figura B-2, Figura B-3 e Figura B-4. Para o degrau central, de número 1, as chapas são todas empilhadas juntas. Para os degraus laterais, de número 2 e 3, o número de chapas é dividido igualmente entre os dois lados do degrau central. Um esboço do resultado final do núcleo pode ser visto na Figura B-5. Nas Tabela B-2 e Tabela B-3, são mostrados alguns dados da placa escolhida, e os resultados finais do cálculo das dimensões das chapas.

Tabela B-2. Características garantidas das placas para núcleo de transformador da Aperam.

Referência	M150-35
Espessura	0,35 mm
Fator de Empilhamento Mínimo	0,96

Fonte: (APERAM, 2012)

Tabela B-3. Cálculo dos degraus.

Número de degraus	3		
Espessura do núcleo	5,87 cm		
Total de chapas	161		
	Degrau		
	1	2	3
Largura (mm)	59	46	28
Número de chapas	75	50	36

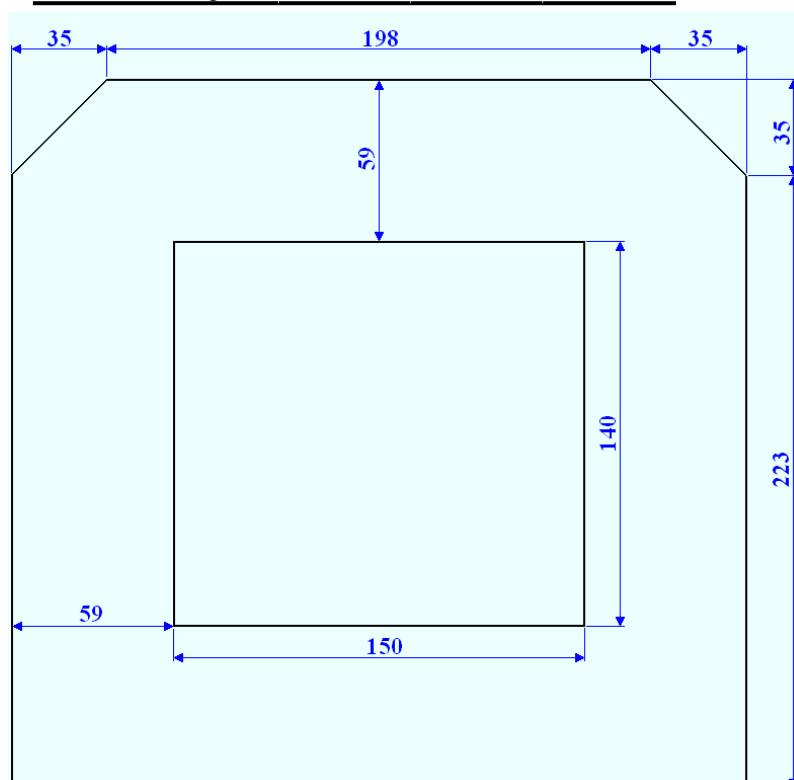


Figura B-2. Vista da chapa 1.

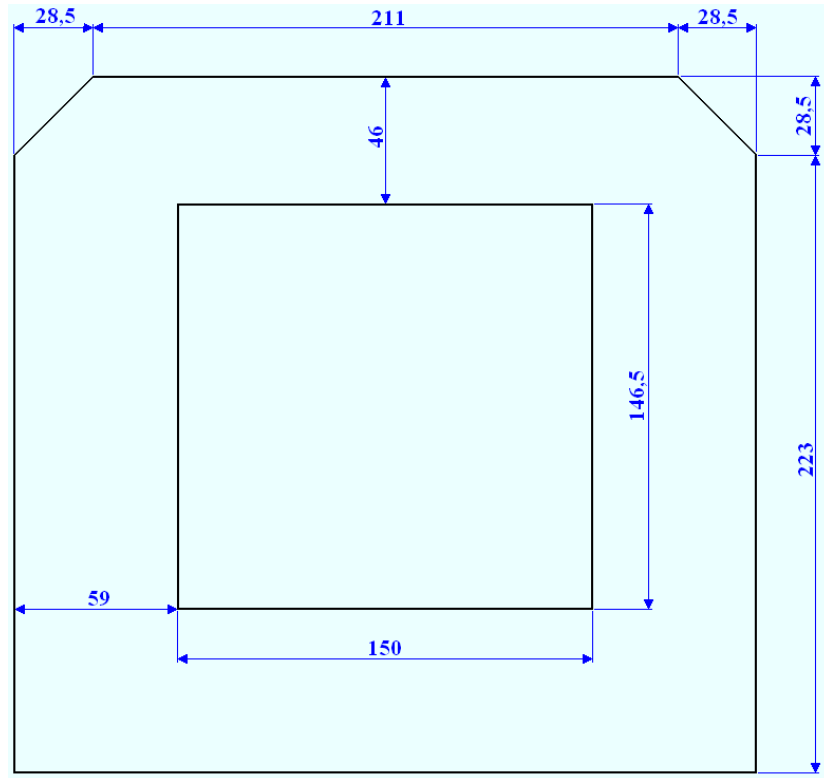


Figura B-3. Vista da chapa 2.

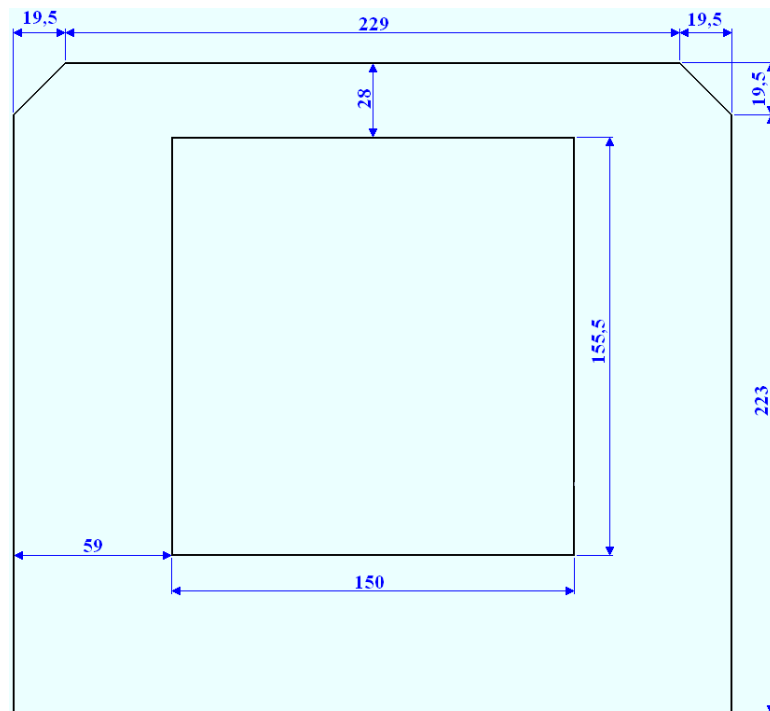


Figura B-4. Vista da chapa 3.

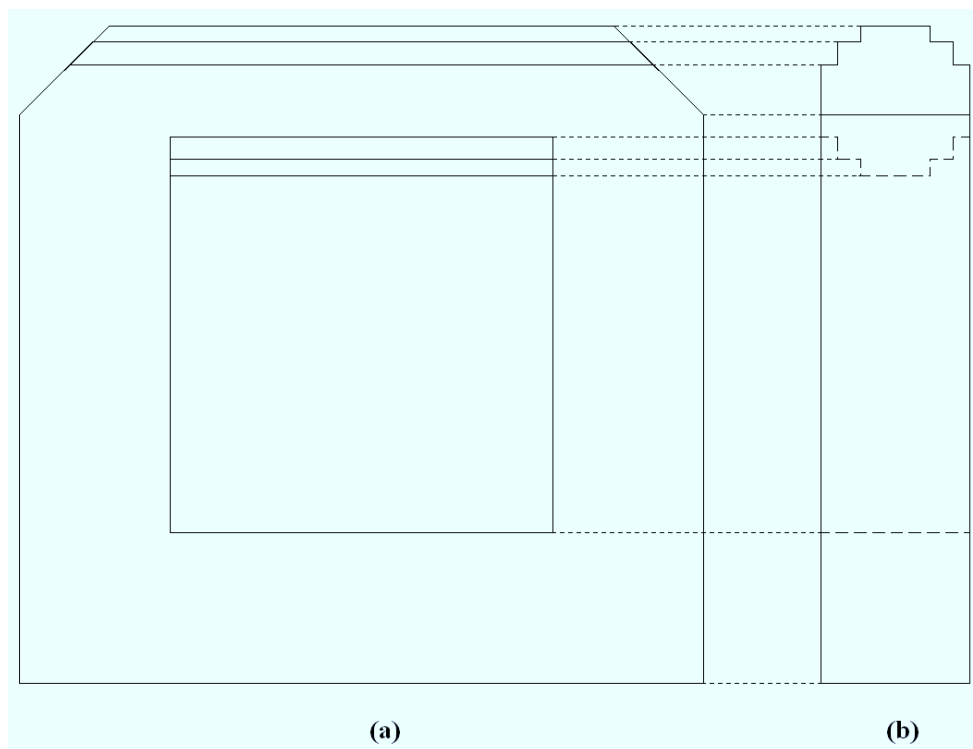


Figura B-5. Vistas frontal e lateral do núcleo do transformador. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral.

BOBINA DE BAIXA TENSÃO

A bobina de baixa tensão tem seção reta com formato retangular. O condutor tem secção reta com formato também retangular, mas com as pontas arredondadas, o que pode ser visto na Figura B-6. Na Figura B-7, pode-se ver em detalhe a configuração espacial da bobina. Nas Tabela B-4, Tabela B-5 e Tabela B-6, pode-se ver as características gerais do condutor, do isolamento e da bobina, respectivamente.

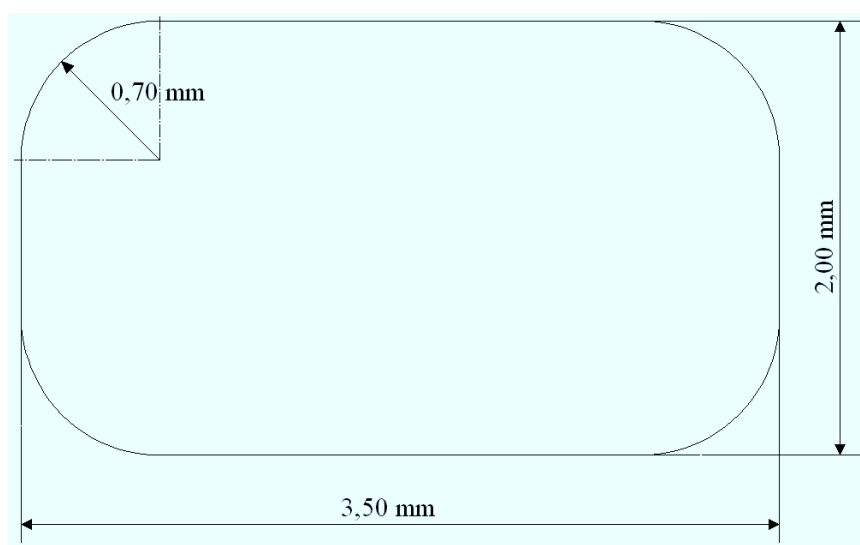


Figura B-6. Vista da seção reta transversal do condutor do primário isolado.

Tabela B-4. Características gerais do condutor do primário.

Largura isolado (esmalte)	3,50 mm
Espessura isolado (esmalte)	2,00 mm
Raio de arredondamento	0,64 mm
Área transversal	6,00 mm ²

Tabela B-5. Isolamento da bobina de baixa tensão.

Isolamento	Material	Quantidade	Espessura por Unidade (mm)	Espessura Total (mm)
Entre bobina e núcleo (radial)	Papel Presspahn	1	2,00	2,00
Entre camadas	Papel Kraft	2	0,03	0,06

Tabela B-6. Configuração da bobina de baixa tensão.

Número de espiras	204
Número de camadas	5
Número de espiras por camada	41
Largura da bobina	14,35 cm
Espessura da bobina	1,024 cm
Massa	2,714 kg

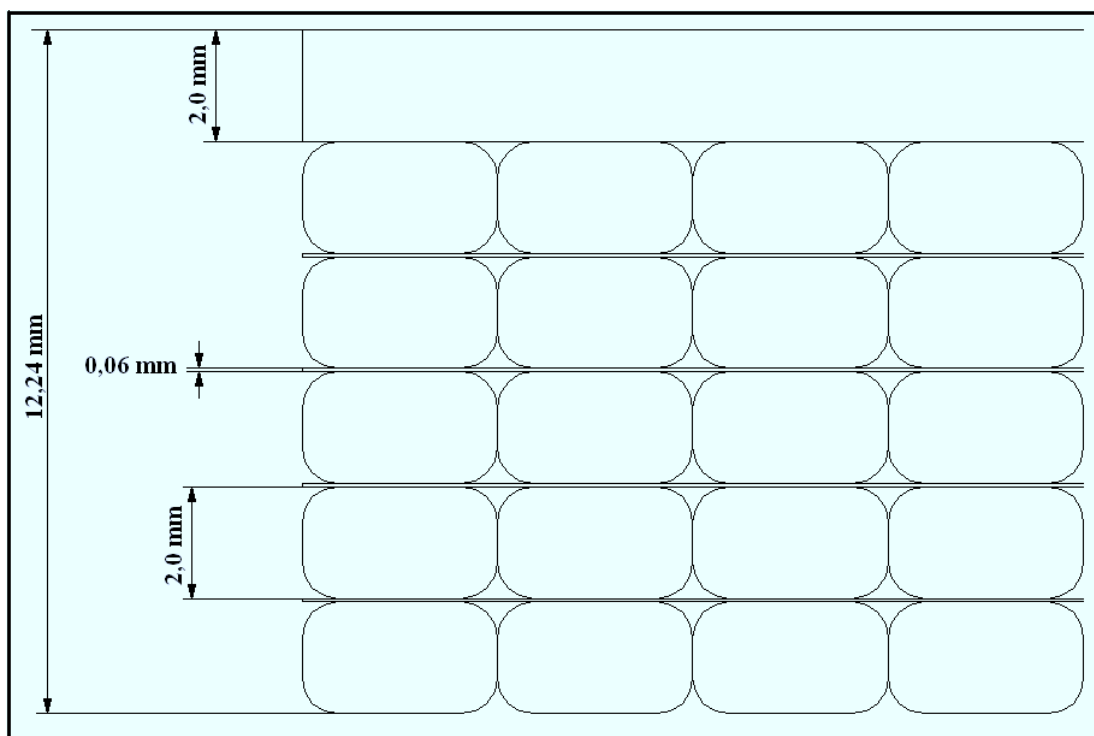


Figura B-7. Detalhes da bobina de baixa tensão.

BOBINA DE ALTA TENSÃO

A bobina de alta tensão tem seção reta com formato trapezoidal, como pode ser visto na Figura B-7. O condutor tem seção reta com formato circular. As características gerais do condutor são listadas na Tabela B-7. Na Tabela B-8, são mostrados o número de espiras em cada camada. O isolamento entre as bobinas é feito através de um canal de óleo de espessura de 2,00 mm, mantido aberto por calços de madeira, e de uma camada de papel Presspahn, também de 2,00 mm. Entre as camadas, são usadas folhas sobrepostas de papel Kraft de 0,1 mm, cada. Na Tabela B-9, são relacionados o número da camada e o número de folhas de papéis Kraft sobrepostas entre esta e a próxima camada. E na Tabela B-10, são mostradas os dados gerais da bobina. Na Figura B-7, pode-se ver um esboço da seção transversal da bobina.

Tabela B-7. Características do condutor do enrolamento secundário.

Formato da seção reta	Circular
Bitola (AWG)	33
Diâmetro isolado (esmalte)	0,20 mm
Área da seção reta	0,0254 mm ²
Massa	5,631 kg
Comprimento	24,5 km

Tabela B-8. Número de espiras por cada camada da bobina de alta tensão. (NC: número da camada. NS: Número de espiras da camada).

NC	NS	NC	NS	NC	NS	NC	NS	NC	NS	NC	NS
1	711	17	619	33	540	49	471	65	410	81	357
2	705	18	614	34	535	50	467	66	407	82	354
3	699	19	609	35	531	51	463	67	403	83	351
4	693	20	604	36	526	52	459	68	400	84	348
5	687	21	598	37	522	53	455	69	396	85	345
6	681	22	593	38	517	54	451	70	393	86	342
7	675	23	588	39	513	55	447	71	390	87	340
8	669	24	583	40	508	56	443	72	386	88	337
9	663	25	578	41	504	57	439	73	383	89	334
10	658	26	573	42	500	58	436	74	380	90	331
11	652	27	568	43	495	59	432	75	376	91	328
12	647	28	564	44	491	60	428	76	373	92	325
13	641	29	559	45	487	61	424	77	370	93	322
14	636	30	554	46	483	62	421	78	367	94	320
15	630	31	549	47	479	63	417	79	364	95	317
16	625	32	545	48	475	64	414	80	361	96	30

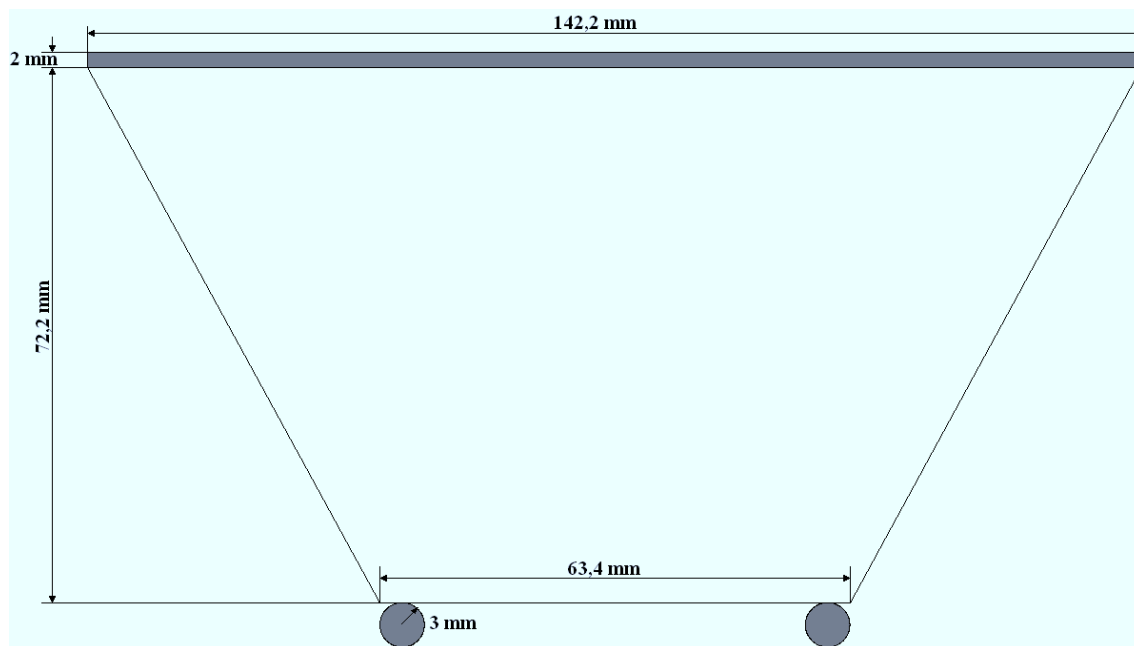


Figura B-8. Esboço da bobina de alta tensão.

Tabela B-9. Número de folhas de papel Kraft sobrepostas entre cada par de camadas de fio adjacentes. (NC: número da camada; NP: número de folhas de papéis sobrepostos entre a camada NC e a próxima).

NC	NP	NC	NP	NC	NP	NC	NP	NC	NP	NC	NP
1	9	17	7	33	6	49	5	65	4	81	4
2	9	18	7	34	6	50	5	66	4	82	4
3	9	19	7	35	6	51	5	67	4	83	4
4	8	20	7	36	6	52	5	68	4	84	4
5	8	21	7	37	6	53	5	69	4	85	4
6	8	22	7	38	6	54	5	70	4	86	4
7	8	23	7	39	6	55	5	71	4	87	4
8	8	24	7	40	6	56	5	72	4	88	4
9	8	25	7	41	6	57	5	73	4	89	4
10	8	26	7	42	6	58	5	74	4	90	4
11	8	27	7	43	5	59	5	75	4	91	4
12	8	28	7	44	5	60	5	76	4	92	3
13	8	29	7	45	5	61	5	77	4	93	3
14	8	30	7	46	5	62	5	78	4	94	3
15	8	31	7	47	5	63	5	79	4	95	2
16	7	32	6	48	5	64	5	80	4		

Tabela B-10. Dados gerais do enrolamento secundário.

Número de espiras	46.383
Número de camadas	96
Base maior da bobina (axial)	14,22 cm
Base menor da bobina (axial)	6,34 cm
Dimensão radial da bobina	7,22 cm
Diâmetro do fio isolado (esmalte)	0,20 mm