

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BIANCA RECKZIEGEL VILANOVA

**CONTROLE DE SOBRETENSÕES EM ENROLAMENTOS DE
TRANSFORMADORES**

Porto Alegre

2021

BIANCA RECKZIEGEL VILANOVA

**CONTROLE DE SOBRETENSÕES EM ENROLAMENTOS DE
TRANSFORMADORES**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2021

CONTROLE DE SOBRETENSÕES EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: Porto Alegre, 25 de maio de 2021.

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro (UFRGS)

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich (UFRGS)

Eng. Ito Capinos

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Zenaidi Reckziegel Vilanova e Airton Kord Vilanova, e a minha irmã Gabrielle Reckziegel Vilanova por todo o apoio recebido até aqui, estando sempre ao meu lado em todos os desafios e momentos difíceis ao longo dos anos da graduação, apoiando todas minhas decisões.

Aos meus amigos que (na maioria das vezes) entenderam minha ausência em algum evento ou viagem para a praia porque eu precisava estudar, e mesmo assim se mantiveram ao meu lado, comemorando cada fim de semestre. Em especial, ao Denis Mendes Pires por sempre estar o meu lado me incentivando, a Janyne Martini por me auxiliar muito no processo de escrita deste trabalho, e a Marina Lemos que também me apoiou neste momento.

Agradeço as amizades criadas ao longo do curso, principalmente a Dayane Leal e o Carlos Berlitz, por toda a parceria e ajuda que me deram ao longo de toda essa jornada na Engenharia Elétrica.

Às equipes de trabalho que fiz parte, nas quais encontrei muitos amigos nessa jornada. Agradeço pelo convívio, aprendizados e por me ajudarem a crescer profissionalmente, especialmente a equipe da Engenharia Industrial da GE, onde eu pude aprender e ver na prática muito do que foi apresentado neste trabalho. Também a minha atual equipe na Galapos, pela compreensão e pelo apoio que me deram nessa etapa final.

Aos professores que fizeram parte da minha formação, especialmente ao professor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro pela orientação deste trabalho, pelo aprendizado e por todo o apoio ao longo do curso. Também ao professor Alexandre Balbinot e aos colegas do IEE, tanto pelo aprendizado que me proporcionaram quanto pela diversão nos churrascos.

RESUMO

Este trabalho visa apresentar a utilização de diferentes arranjos para a construção dos enrolamentos como método de controle dos efeitos das sobretensões nos enrolamentos dos transformadores. Para tanto, primeiramente foi apresentado o cálculo das capacitâncias equivalentes formadas ao longo dos enrolamentos, fundamentais para o cálculo da distribuição de tensão nos enrolamentos. Com o objetivo de comparar o desempenho em uniformizar a distribuição inicial de tensão para os diferentes arranjos de enrolamentos apresentados, foi considerada uma bobina hipotética para os cálculos das capacitâncias, sendo assim possível chegar ao cálculo do parâmetro “ α ” que define a distribuição de tensão, plotando então as curvas referentes aos valores de “ α ” obtidos. A partir das curvas, por fim é apresentada a comparação entre os diferentes arranjos, buscando apresentar qual seria a melhor opção para uniformizar a distribuição de tensão inicial nos enrolamentos.

Palavras-chave: Transformador de potência; Distribuição de impulsos de tensão; Capacitâncias em transformadores; Bobina de espiras entrelaçadas; Bobina com blindagem eletrostática.

ABSTRACT

This work aims to show different arrangements for the manufacturing of windings as a method to control the effects of overvoltages in transformers. To achieve this goal, we approach and show the calculation of the equivalent capacitances formed along the windings, since this is fundamental for calculating the voltage distribution in the windings. In order to compare the performance between the standardizing initial voltage distribution for the different winding arrangements, a hypothetical coil was considered for the capacitance calculations, which allowed us to calculate the parameter “ α ” that defines the voltage distribution, and in the end plotting the curves for the α values were obtained. Finally, from the curves we trace the comparison between the different arrangements, seeking to show what would be the best option to standardize the initial stress distribution in the windings.

Keywords: Power transformer; Impulse voltage distribution; Capacitances of transformer windings; Interleaved winding; Intershield winding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema dos transformadores do sistema elétrico	14
Figura 2 - Representação simplificada de um transformador.....	14
Figura 3 - Representação da seção do núcleo.....	16
Figura 4 - Representação de um condutor retangular com isolamento de papel.....	17
Figura 5 - Os dois principais tipos de bobina	18
Figura 6 - Representação de um transformador real.....	21
Figura 7 - Formas de impulso: 1) Impulso pleno, 2) Impulso cortado	26
Figura 8 - Bobina danifica em decorrência a falha do isolamento	29
Figura 9 - Bobina danifica em decorrência a falha do isolamento	30
Figura 10 - Diagrama esquemático da rede de capacitâncias em um par de discos.....	31
Figura 11 - Parâmetros para cálculo da capacitância contra o aterramento	32
Figura 12 - Exemplificação dos parâmetros do disco.....	33
Figura 13 - Exemplo de um espaçador	33
Figura 14 - Representação se um enrolamento de disco contínuo	34
Figura 15 - Representação do circuito equivalente de um enrolamento de disco contínuo	38
Figura 16 - Circuito de distribuição inicial.....	39
Figura 17 - Curvas de distribuição X alfa para.....	44
Figura 18 - Distribuição inicial e final da tensão	47
Figura 19 - Representação de disco intercalado	49
Figura 20 - Bobina de disco cruzado com dois condutores paralelos	50
Figura 21 - Disco de bobina com condutor de blindagem eletrostática	52
Figura 22 - Representação de par de discos com blindagem eletrostática	53
Figura 23 - Distribuição inicial para discos contínuo e com espiras cruzadas	58
Figura 24 - Distribuição inicial para discos contínuo e com duas voltas de condutor de blindagem	59
Figura 25 - Distribuição inicial para discos contínuo e com quatro voltas de condutor de blindagem	59
Figura 26 - Distribuição inicial para discos contínuo e com seis voltas de condutor de blindagem	60
Figura 27 - Comparação de todos os casos para distribuição inicial.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Constantes dielétricas	19
Quadro 2 - Orientação de projeto para valores de gradiente de potencial.....	21
Quadro 3 - Classificação e formas de onda das solicitações de tensões ou sobretensões para ensaio	27
Quadro 4 - Valores de tensão suportável.....	27
Quadro 5 - Valores de referência para cálculos.....	55
Quadro 6 - Resumo das capacitâncias calculadas	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA Corrente Alternada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVOS	12
2	TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	13
2.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	13
2.2	ASPECTOS CONSTRUTIVOS	15
2.2.1	Núcleo	15
2.2.2	Enrolamentos	17
2.2.3	Isolamento	18
2.3	CIRCUITO EQUIVALENTE	21
2.4	ENSAIOS EM TRANSFORMADORES	22
2.5	FALHAS EM TRANSFORMADORES	22
3	TRANSITÓRIOS	24
3.1	IMPULSOS DE TENSÃO	24
3.1.1	Sobretensões por descarga atmosférica e por chaveamento	25
3.2	ENSAIO AO IMPULSO	25
3.2.1	Formas de impulso	25
3.2.2	Ondas de impulsos normalizadas	26
3.3	EFEITOS NO ISOLAMENTO	28
4	CÁLCULO DAS CAPACITÂNCIAS DE TRANSFORMADORES	31
4.1	CAPACITÂNCIA CONTRA TERRA	31
4.2	CAPACITÂNCIA SÉRIE	33
4.2.1	Capacitância entre discos	34
4.2.2	Capacitância entre espiras	36
4.2.3	Capacitância série total	37
5	DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NOS ENROLAMENTOS	38
5.1	CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM ENROLAMENTO	38
5.2	DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE UMA TENSÃO IMPULSO	39
5.3	DISTRIBUIÇÃO FINAL DE UMA TENSÃO IMPULSO	43
5.4	DISTRIBUIÇÃO TRANSITÓRIA DE UM IMPULSO DE TENSÃO	44
6	APRIMORAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO	46
6.1	CONSTANTE DE DISTRIBUIÇÃO	46

6.2	TÉCNICAS DE MANUFATURA	48
6.2.1	Bobina de disco com espiras entrelaçadas	49
6.2.2	Bobina de disco com blindagem eletrostática	51
6.3	CÁLCULOS COMPARATIVOS	55
6.3.1	Bobina de discos contínuos	56
6.3.2	Bobina de discos com espiras cruzadas.....	56
6.3.3	Bobina de disco com blindagem eletrostática	57
6.4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	57
7	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de alta tensão são dispositivos utilizados no sistema elétrico com o objetivo de mudar o nível de tensão, mantendo a frequência constante, possibilitando assim a transmissão e distribuição de energia para o consumidor. Antes da sua utilização, as distâncias para a transmissão de energia eram bem limitadas devido a necessidade de operação em altos níveis de correntes nas linhas. Isso acabava gerando grandes perdas na transmissão, acarretando em uma restrição em relação a área onde era possível transmitir energia, de forma que uma estação geradora atenderia uma área pequena, trazendo a necessidade de inúmeras geradoras, levando a altos investimentos. Com o início da geração de energia em corrente alternada (CA) e com a invenção dos transformadores, este cenário começou a mudar. Além da possibilidade de seccionar a transmissão em CA, com o uso do transformador passou a ser possível a conversão dos níveis de tensão, sem afetar a potência real fornecida. Assim foi possível a geração de energia, transformar em diferentes níveis de tensão, transmitir por longas distâncias e finalmente chegar até o consumidor final de forma mais eficiente e com perdas reduzidas.

Com a evolução dos sistemas de potência, os transformadores de alta tensão passaram a ser um dos principais dispositivos na transmissão e distribuição elétrica, assim se tornando um componente com impactos diretos em aspectos socioeconômicos da sociedade. Além do mais, devido a sua importância, acabam sendo necessários critérios cada vez mais exigentes de projeto, tentando conciliar qualidade, confiabilidade de operação, custos e segurança, tornando-se um dos elementos de maior investimento desse sistema. Deste modo, é fundamental a análise dos eventos que podem vir a causar falhas nos transformadores, bem como controlar seus efeitos, pois além do alto investimento envolvido na produção desses dispositivos, eles são construídos de forma a atender projetos específicos, resultando em equipamentos sem a possibilidade de reposição imediata no caso de falha.

1.1 JUSTIFICATIVA

No final do ano de 2020, o Brasil viu o estado do Amapá enfrentar uma das maiores crises energéticas vistas no país nos últimos tempos. A subestação do Macapá é responsável pelo abastecimento de 90% da população do estado, e devido a ocorrência de um incêndio em um dos transformadores, o estado ficou três dias completamente no escuro, e ao longo dos próximos 19 dias a energia foi sendo recuperada gradativamente, deixando a população em caos devido ao desabastecimento energético e suas consequências. Inicialmente, uma das possíveis

causas apontadas para a falha seria que uma descarga elétrica tivesse causado o sobreaquecimento do dispositivo, causando o incêndio. Essa hipótese acabou sendo descartada, já que o sistema de proteção do sistema não apontou nenhuma anormalidade.

O aumento da demanda de energia nos últimos anos tem sido crescente, a malha de transmissão tenta acompanhar tal crescimento, mas muitas vezes opera em seu limite, sendo possível que eventos como esse se repitam no país. Sabendo que um grande número de falhas em transformadores está associado a efeitos transitórios, como descargas atmosféricas e manobras, é importante analisar seus possíveis efeitos e formas de evitar ou controlar esses fenômenos, sendo possível a realização de projetos de transformadores que ofereçam maior segurança, confiabilidade de funcionamento e proporcionem maior vida útil do dispositivo.

1.2 OBJETIVOS

Devido a importância dos transformadores no sistema de transmissão e distribuição e sabendo das consequências na sociedade moderna no caso de falha desses dispositivos, este trabalho busca apresentar como ocorre a distribuição dos impulsos de tensão que incidem no sistema, abordando quais parâmetros influenciam na distribuição. Além disso, se trata em específico da relação construtiva dos enrolamentos do transformador como forma de controle de sobretensões, com o objetivo de reduzir os possíveis efeitos consequentes da incidência de eventos transitórios no sistema, que poderiam levar a interrupção do funcionamento do dispositivo.

2 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

O desenvolvimento dos transformadores de potência teve seu início a partir dos experimentos de Faraday, realizados em 1831, onde se observou o fenômeno conhecido como indução magnética, que é quando há uma variação do fluxo magnético (indicado por ϕ) através de um condutor, é induzida uma força eletromotriz (fem), o que ficou conhecida como a Lei de Faraday, apresentada na Equação 1.

$$fem = \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Baseado nos trabalhos de Faraday, em 1834 Heinrich Lenz propôs como definir a polaridade da fem, observando que essa polaridade deve ser contrária à variação do fluxo magnético, complementando a Lei de Faraday com um sinal negativo, conforme a Equação 2.

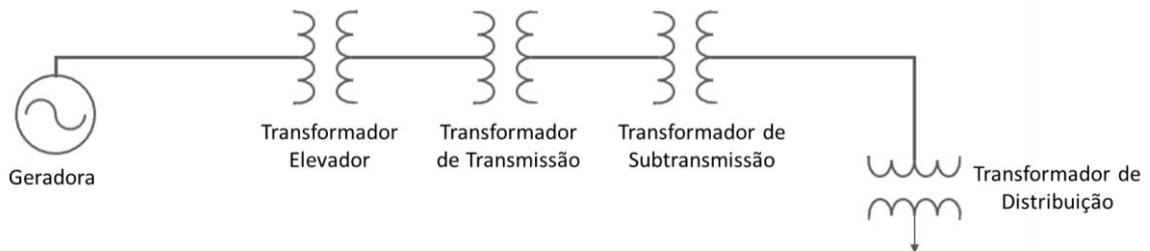
$$fem = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Com o passar do tempo, seguiram novos experimentos baseados nesses estudos, até se chegar na primeira construção de um transformador de núcleo fechado em 1884, utilizando o termo “transformador” pela primeira vez. A partir daí, foram realizados diversos estudos e desenvolvimentos, evoluindo gradativamente as tensões e capacidades limites que os transformadores podiam alcançar, até chegar nos dispositivos utilizados hoje no sistema elétrico de potência (KARSAI, 1987).

2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Ao longo do sistema elétrico, diferentes tipos de transformadores são empregados para elevar e baixar o nível de tensão, conforme representado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema dos transformadores do sistema elétrico



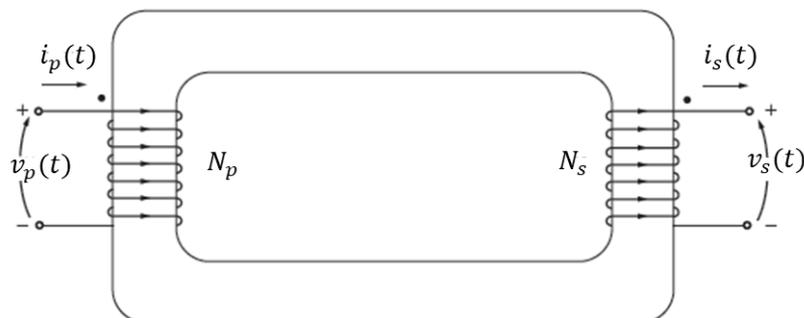
Fonte: adaptado de Bechara (2010)

Apesar desses transformadores representados terem características distintas, eles essencialmente consistem num mesmo dispositivo, tendo um objetivo fundamental: a conversão de energia elétrica em um certo nível de tensão, em outro nível de tensão, por meio da ação um campo magnético. Entretanto, esses dispositivos se diferem de acordo com sua utilização, sendo essas:

- Subestações das usinas geradoras, com o objetivo de elevar a tensão de geração a valores que permitem a transmissão econômica da energia;
- Subestações de interligação de sistemas elétricos;
- Subestações abaixadoras de tensão para alimentação de grandes centros urbanos e industriais;
- Subestações de distribuição em baixa tensão para uso industrial, comercial, domiciliar e público (RIES, 2007).

De forma simplificada, um transformador é constituído por dois elementos: um núcleo fechado e dois enrolamentos acoplados magneticamente, como representado na Figura 2, tendo no lado primário as grandezas N_p , o número de espiras, $v_p(t)$, a tensão aplicada no primário, e no lado secundário, N_s e $v_s(t)$.

Figura 2 - Representação simplificada de um transformador



Fonte: Chapman (2012)

A relação entre a tensão aplicada no primário com a tensão no secundário é dada pela Equação 3, onde a representa a relação de transformação deste transformador.

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (3)$$

Basicamente o funcionamento dos transformadores é baseado no acoplamento eletromagnético entre os seus enrolamentos, onde eles apresentam diferentes níveis de tensão e corrente entre si, sendo um o enrolamento primário, onde é recebida a energia, e o outro o secundário que, por sua vez, entrega a energia para uma carga. As correntes que estão circulando pelas bobinas são responsáveis pelos fluxos magnéticos, onde o fluxo total produzido por cada corrente não atravessa todas as “ N ” espiras da bobina. Como nem todas as espiras são atravessadas pelo mesmo fluxo, chama-se de fluxo concatenado a soma do fluxo que está passando através de cada uma das espiras, de forma que fazendo sua soma, chega-se no valor que representa o fluxo concatenado da bobina na qual há uma tensão sendo induzida.

2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Os transformadores de potência são dispositivos cujo projeto é feito de forma específica para sua aplicação, o que o torna um componente caro e de difícil reposição. De forma geral, cada empresa conta com processos próprios para a fabricação desses dispositivos, mas eles são constituídos dos mesmos elementos. Um dos grupos desses elementos é chamado de parte ativa, sendo constituída pelo núcleo, bobinas e isolamento, já os demais componentes formam o grupo de componentes e acessórios, sendo as buchas, tanque, sapatas, armadura, ventiladores, tampa, etc. (RIES, 2007).

2.2.1 Núcleo

Em relação ao seu núcleo, os transformadores presentes no sistema de energia elétrica são construídos com núcleo composto por uma liga de ferrosilício, mais conhecida como aço silício. A concentração de silício pode variar de 3% e 5% (RIES, 2007), sendo essa liga um tipo de aço elétrico, se caracterizando como um material ferromagnético mole, ou seja, materiais facilmente magnetizados e desmagnetizados, apresentando alta permeabilidade, menores perdas por histerese e baixa força coercitiva.

As perdas parasitas ocorrem devido às correntes parasitas circulando no núcleo, que são oriundas das tensões induzidas pela variação do fluxo. Desta forma, como o material ferromagnético do núcleo é um condutor de corrente elétrica e de fluxo magnético, se o mesmo fosse construído como um único bloco sólido acarretaria em altas tensões induzidas e, por consequência, altas correntes circulando no núcleo, elevando assim as perdas parasitas. Sendo assim, o núcleo de um transformador é construído com finas chapas laminadas de aço silício. A Equação 4 apresenta o cálculo das perdas parasitas:

$$p_f = k_f f^2 t^2 B_{máx}^2 \quad (4)$$

Onde:

p_f representa as perdas parasitas;

k_f é uma constante que depende da classe do núcleo de ferro, podendo variar entre 200 e 1000;

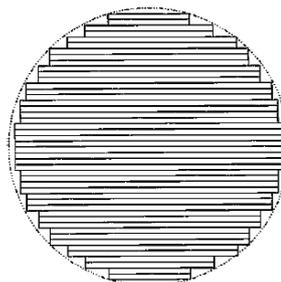
f é a frequência;

t é a espessura da chapa;

$B_{máx}$ é o valor de pico da densidade de fluxo.

Sendo assim, pela Equação 4 é possível verificar que quanto menor a espessura da lâmina, menores serão as perdas parasitas. Essas chapas passam por um processo de laminação a frio seguida de um recozimento com uma temperatura média e revestidas por uma fina camada isolante (RIES, 2007). Após esse processo, a armadura do núcleo é posicionada na mesa de montagem e então as chapas são empilhadas de acordo com o indicado no projeto de cada transformador, formando uma seção arredondada com degraus, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Representação da seção do núcleo



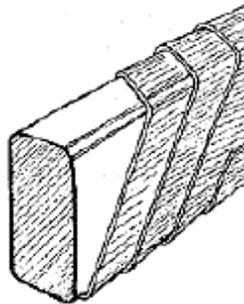
Fonte: Winders (2002)

Após a montagem, é colocada a parte superior da armadura e então o núcleo passa por um processo de prensagem, finalizando assim sua construção.

2.2.2 Enrolamentos

Em transformadores de potência, a construção da bobina é feita através de um processo conhecido como “bobinagem”, onde, com a utilização de um equipamento específico, o condutor que forma a bobina é enrolado ao redor de um cilindro. O condutor utilizado geralmente tem formato retangular, o que ajuda na otimização de espaço e na estabilização física do condutor na construção da bobina. Além disso, as dimensões de espessura, largura e altura do condutor variam entre as máquinas de acordo com o projeto. O condutor ainda conta com uma camada de isolamento, geralmente feita com voltas de papel ao redor do mesmo. Todas essas características podem ser visualizadas na Figura 4.

Figura 4 - Representação de um condutor retangular com isolamento de papel



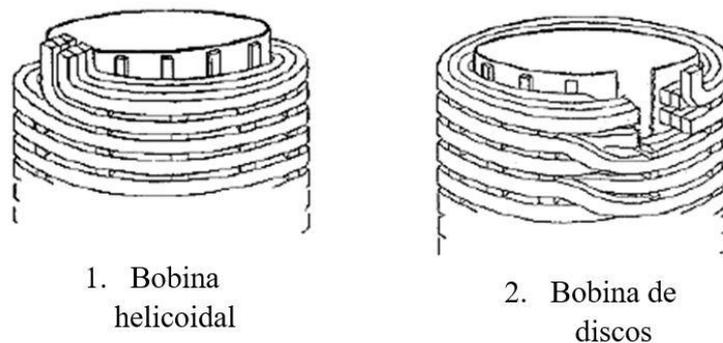
Fonte: ABB (2004)

O tipo de bobina e seus parâmetros vão depender da aplicação, de forma que será feito um projeto específico para tal. Nesse contexto, segundo Ries (2007), a escolha do tipo da bobina vai depender principalmente de alguns fatores como:

- A distribuição da tensão ao longo do enrolamento;
- A rigidez mecânica necessária para suportar curtos-circuitos;
- Custo de fabricação.

Os principais tipos de bobina são a bobina helicoidal, apresentada na Figura 5.1, e a bobina de discos, apresentada na Figura 5.2.

Figura 5 - Os dois principais tipos de bobina



1. Bobina helicoidal

2. Bobina de discos

Fonte: adaptado de ABB (2004)

2.2.3 Isolamento

Em função de partes com diferentes potenciais encontrados no transformador, é feito o projeto de isolamento dessas partes, podendo ser encontrado entre bobinas, entre as espiras, entre bobina e o núcleo, entre a bobina e demais partes metálicas, etc. Para o projeto do sistema de isolamento dos transformadores de potência, é necessário se levar em conta os estresses de tensão dependentes da magnitude das tensões que podem aparecer através dos terminais do transformador. Durante a operação, devido a ocorrência de impulsos de tensão em decorrência de eventos como descargas atmosféricas ou chaveamentos no sistema, podem produzir sobretensões nos terminais do transformador. Nesses casos, a distribuição desses impulsos de nos enrolamentos vai depender das capacitâncias e indutâncias formadas na bobina, e podem resultar em gradientes de potencial bem diferentes ao longo da bobina. (KARSAI, 1987; RIES, 2007)

Os materiais isolantes são também chamados de dielétricos, e nos transformadores são utilizados principalmente materiais a base de celulose impregnados com óleo de transformador, sendo os mais comuns o óleo de transformador, papel crepado e presspan impregnado com óleo. Para garantir boas características dielétricas para o material de isolamento, são feitos alguns processos, onde inicialmente é feita a secagem com vácuo. Ainda em condição de vácuo, após a secagem o material isolante é impregnado com óleo, de forma a ocupar todos os espaços vazios, eliminando quaisquer resquícios de ar e umidade existente no isolante (RIES, 2007).

2.2.3.1 Constante dielétrica e rigidez dielétrica

A Constante dielétrica de um material também é chamada de permissividade relativa (ϵ_r), pois expressa a razão entre a permissividade do material em questão com a permissividade

no vácuo (ϵ_0). A permissividade do material e do vácuo é representada em Farad por metro, enquanto a relativa é adimensional. Para os materiais isolantes mais comuns empregados na construção do transformador, no Quadro 1 são apresentadas suas constantes dielétricas (SADIKU, 2012).

Quadro 1 - Constantes dielétricas

Constante dielétrica no vácuo (ϵ_0)	0,0885
Constante dielétrica relativa do papel Kraft impregnado com óleo (ϵ_i)	3,2
Constante dielétrica relativa do óleo (ϵ_d)	2,3
Constante dielétrica relativa papelão endurecido impregnado em óleo (ϵ_e)	4,5

Fonte: Ries (2007)

Há uma tensão máxima que cada material dielétrico pode suportar, chamada de tensão disruptiva. Conforme esse valor vai sendo superado, o campo elétrico pode chegar numa intensidade onde será possível fornecer a energia necessária para movimentar elétrons desse material, e então o isolante torna-se um condutor, podendo provocar danos irreparáveis ao material. Essa intensidade de campo para a qual ocorre a ruptura do dielétrico é denominada de rigidez dielétrica, sendo específica de cada material. Esse parâmetro não é constante, podendo variar com alguns fatores como a espessura do material, onde a tensão disruptiva não cresce de maneira proporcional com a espessura do dielétrico. A temperatura também pode impactar, onde sua elevação pode ter como consequência a redução da rigidez dielétrica dos isolantes sólidos empregados na construção do transformador, reduzindo aproximadamente num fator de 0,25% para cada grau. Outro fator que também impacta é o tempo, onde a rigidez dielétrica reduz com o tempo (RIES, 2007).

O processo de secagem é fundamental para eliminar umidade e ar presentes no óleo do transformador, pois a presença dos mesmos pode contribuir para a redução da sua rigidez dielétrica. Para o óleo, a tensão de ruptura mínima é equivalente a 30kV, tal tensão é especificada como um limite de segurança de tensão de ruptura para a o transformador, ultrapassando esse limite pode ser necessário o tratamento do óleo. Já para os isolantes sólidos, considerando uma espessura de 2,54mm, para o presspan impregnado tem-se uma tensão de ruptura equivalente a 48kV eficazes, enquanto para o papel crepado, 33kV (RIES, 2007).

2.2.3.2 Isolamento nos enrolamentos

A diferença de potencial entre espiras adjacentes não é muito elevada em relação a potência do transformador, então seu isolamento não necessita ser muito espesso, podendo ser atendido com algumas voltas de papel crepado impregnado. O nível de isolamento varia de acordo com o nível de tensão, respeitando uma espessura mínima de 0,5mm de isolamento bilateral do condutor. Além disso, ele também pode variar de acordo com outros aspectos do projeto, como arranjo utilizado na construção dos enrolamentos e dos condutores. Esses diferentes arranjos são utilizados como forma de controle de sobretensão, visando evitar possíveis danos ao isolamento nos primeiros enrolamentos da bobina causados pela distribuição de tensões não ser uniforme ao longo do comprimento da bobina. Deste modo, nas incidências de impulsos de tensão, o gradiente de tensão pode ser alto nesses primeiros discos, sendo necessário encontrar alternativas para garantir a integridade do sistema de isolamento das bobinas. Já entre os discos, há o isolamento feito pelo óleo que está circulando nos canais de óleo, e que também possui a função de refrigeração; também há o isolamento formado pelos espaçadores e estecas utilizadas na construção da bobina. Por sua vez, entre as bobinas do transformador é feito com óleo e com os cilindros de presspan, tendo uma espessura mínima de 2mm.

Por fim, com a finalidade de validar o sistema de isolamento do transformador, são realizados ensaios para validar o projeto do dielétrico, verificando todos os pontos de isolamento do projeto, sejam entre os enrolamentos, entre os discos, entre as bobinas, entre bobinas e aterramento, etc. O ensaio é realizado de forma diferente dependendo se a bobina possui isolamento uniforme ou não. O teste demonstrará que o projeto de isolamento está adequado se nenhuma falha no dielétrico for verificada ao longo dos testes. (KARSAI, 1987).

O gradiente de potencial aplicado no projeto do transformador deve estar de acordo com o que foi verificado nos ensaios. Eles dependem de vários fatores relacionados ao isolamento. Segundo apresentado por Ries (2007), a orientação para valores admitidos para o gradiente de potencial no projeto do sistema de isolamento está apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Orientação de projeto para valores de gradiente de potencial

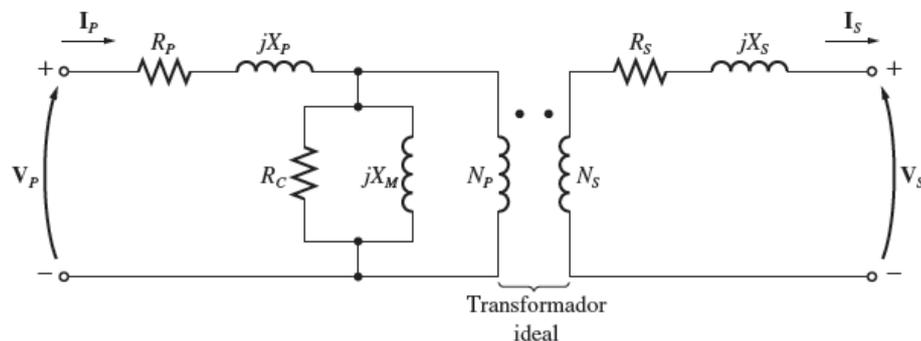
Material	Gradiente de potencial, em kV/mm
Óleo para transformador	7,0
Papel kraft impregnado com óleo	7,0 a 10,0
Presspan impregnado com óleo	10,0 a 15,0
Fenolite em óleo	10,0 a 15,0

Fonte: Ries (2007)

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE

Pensando num modelo que possa representar um transformador de forma aproximada com a realidade, é necessário incluir elementos que representem suas perdas. Primeiramente, deve-se considerar as perdas em decorrência do aquecimento dos enrolamentos devido ao efeito Joule, sendo denominadas de perdas no cobre, representadas por $R \cdot I^2$. Além disso, ocorrem perdas devido ao aquecimento do núcleo do transformador, que por sua vez são proporcionais ao quadrado da tensão e são chamadas de perdas por correntes parasitas. Também deve se considerar as perdas por histerese, sendo esta proporcional à área do laço de histerese, decorrente da energia necessária para orientar o magneticamente o material. Por fim, também há perdas devido ao fluxo de dispersão, que consiste num fluxo que se dispersa do núcleo e passa por um dos enrolamentos do transformador, originando indutâncias de dispersão. A partir da consideração dessas perdas, é possível chegar do diagrama de circuito apresentado na Figura 6 para representar um transformador real.

Figura 6 - Representação de um transformador real



Fonte: Chapman (2012)

Neste circuito, tem-se que as resistências R_p e R_s representam as perdas no cobre para os enrolamentos primário e secundário. Já os elementos X_p e X_s representam a reatância decorrente do fluxo de dispersão cruzando o enrolamento primário ou secundário. Já o ramo de

excitação é modelado por dois fatores, onde primeiro pode ser visto R_c , que está representando as perdas por histerese e por corrente parasita, e pela reatância X_m , devido a corrente magnetizante (CHAPMAN, 2012).

2.4 ENSAIOS EM TRANSFORMADORES

Geralmente os transformadores consistem em equipamentos cujo projeto é feito especificamente para cada aplicação e, após concluída sua fabricação, é necessário que o mesmo passe por uma rígida etapa de ensaios. O transformador então passa por uma rotina de testes, previamente validada com o cliente, com o objetivo de validar o projeto, do processo de fabricação e seu funcionamento em condições de operação. Dentre os principais ensaios realizados, é possível citar Ensaio de Impulso, Teste de Tensão Suportável e Teste de Tensão de Longa Duração. Como apresentado no manual Areva T&D (2008), os testes podem ser divididos em três categorias:

- 1) Ensaios de rotina, os quais são realizados em todos os transformadores;
- 2) Ensaios de tipo, os quais são realizados em um transformador que está representando uma série produzida, com o objetivo de verificar se todos os equipamentos dessa série estão em conformidade com alguns requisitos aos quais os testes de rotina não atendem;
- 3) Ensaios especiais, são aqueles testes que as duas categorias anteriores não cobriram, mas que foram exigidos pelo cliente, visando verificar a operação do equipamento em condições específicas.

Devido ao seu tamanho, os ensaios em transformadores de alta potência, são realizados em grandes espaços, chamados de sala de prova ou sala de testes, que contam com uma estrutura completa de equipamentos e requisitos que permitam a execução de todos esses testes de forma segura e eficiente.

2.5 FALHAS EM TRANSFORMADORES

Mesmo que os transformadores passem por testes para avaliar seu desempenho em operação, sua aprovação não garante que o dispositivo seja a prova de falhas, pois nos ensaios são testados valores e formas de onda padrões estabelecidas por normas de ensaio. Entretanto durante a operação podem ocorrer eventos, como por exemplo descargas atmosféricas ou

manobras do sistema, podem ser bem diferentes do que foi simulado, podendo levar o dispositivo a falha.

Para um transformador, falha pode ser definida como perda de desempenho ou até mesmo a perda de sua capacidade de operação após a ocorrência de um evento, podendo até serem catastróficas, ou seja, culminando no incêndio ou até mesmo na explosão do dispositivo. Além desses há diversos outros modos de falha; Pena (2002) identificou 150 modos de falhas, trazendo também recomendações para minimizar seus efeitos ou até mesmo evita-las. Dentre tantas causas de falha, é possível citar os seguintes casos como as falhas e efeitos que são tipicamente encontrados em transformadores:

- Curtos-circuitos no sistema que podem causar a deformações mecânica nos enrolamentos caso ultrapassem os limites suportáveis. Se as correntes de operação que atravessam os condutores estão dentro dos valores nominais, os esforços mecânicos serão baixos. Entretanto em condições de curto-circuito, a corrente circulando se eleva, como os esforços mecânicos são proporcionais ao quadrado da corrente, os esforços passam a ser muito maiores, atuando no sentido do raio ou do eixo do enrolamento, podendo destruir a integridade dos condutores.
- Sobretensões podem danificar ou até levar a ruptura do isolamento devido ao aumento de sollicitação dielétrica. Sobretensões consistem em eventos transitórios originados, por exemplo, devido a descargas atmosféricas, que podem ocasionar tensões acima dos valores nominais de operação dos transformadores. Dependendo da amplitude e do período de duração, podem impactar no desempenho ou em danos ao transformador. (RIES, 2007; BECHARA, 2010).

3 TRANSITÓRIOS

No sistema elétrico há diversas razões que podem causar um transitório, podendo ter como efeitos nos equipamentos eventos de sobrecorrentes, podendo causar esforços mecânicos e sobreaquecimento nos condutores da bobina, ou a ocorrência de sobretensão, podendo culminar em danos no isolamento. As tensões observadas entre os terminais dos transformadores podem ser classificadas de acordo com o período de duração, podendo ter tensões presentes durante todo o tempo de funcionamento em valores próximos da tensão nominal do transformador, se tratando das tensões de operação. Também pode-se observar a ocorrência de tensões com duração muito menor e com alta amplitude, conhecidas como sobretensões, que tratam-se de eventos transitórios onde a amplitude da tensão supera os níveis de tensão nominal e tolerâncias do transformador. Segundo a NBR 6939 (ABNT, 2018), uma sobretensão é caracterizada por quaisquer tensões entre fase e terra que apresentem amplitude maior do que a tensão máxima do sistema dividida por $\sqrt{3}$, ou ainda tensões entre fases que apresentem amplitude maior do que a da tensão máxima do sistema.

Devido seus possíveis efeitos nos transformadores, é necessário que os mesmos consigam suportar esses eventos transitórios sem comprometer suas operações. Sendo assim, é importante o entendimento da origem desse fenômeno, e como é sua passagem ao longo dos enrolamentos do transformador, afim de levantar todas as necessidades de ensaio destes dispositivos, bem como encontrar meios de controlar seus possíveis efeitos no isolamento do transformador (KARSAI, 1987; RIES, 2007).

3.1 IMPULSOS DE TENSÃO

As sobretensões que incidem nos terminais dos transformadores através da linha de transmissão podem ter origens distintas, podendo ser externa ao sistema, devido a descargas atmosféricas, ou podem ser internas a linha de transmissão, originando-se a partir de chaveamentos do sistema. Esses eventos geram tensões elevadas em forma de impulsos, dependendo de sua origem podem ser classificados como impulsos atmosféricos ou em impulsos de manobra.

3.1.1 Sobretensões por descarga atmosférica e por chaveamento

Parte dos distúrbios no sistema elétrico são causados por descargas atmosféricas, que por sua vez podem incidir de forma direta ou de forma indireta, sendo próxima à rede. Essas sobretensões podem ocorrer de formas diferentes, podendo ser devido a uma tensão induzida decorrente de uma descarga elétrica próxima, ou por falha na blindagem no caso da descarga atingir diretamente um condutor de fase, ou ainda por uma descarga de retorno devido a uma descarga recebida pelo sistema de proteção (CAGIDO, 2014).

Ao longo do funcionamento do sistema elétrico, equipamentos de chaveamento ou a ocorrência de falhas podem gerar sobretensões de manobra, podendo ter origem na energização de linhas, manobras em bancos de capacitores, manobras em dispositivos. (BECHARA, 2010) Quando se comparadas as ondas de impulso atmosférico, as ondas de manobra costumam apresentar frente de onda mais lenta, onde, segundo Ries (2007), estão na ordem de $100\mu\text{s}$ e tempos de causa de aproximadamente $1000\mu\text{s}$.

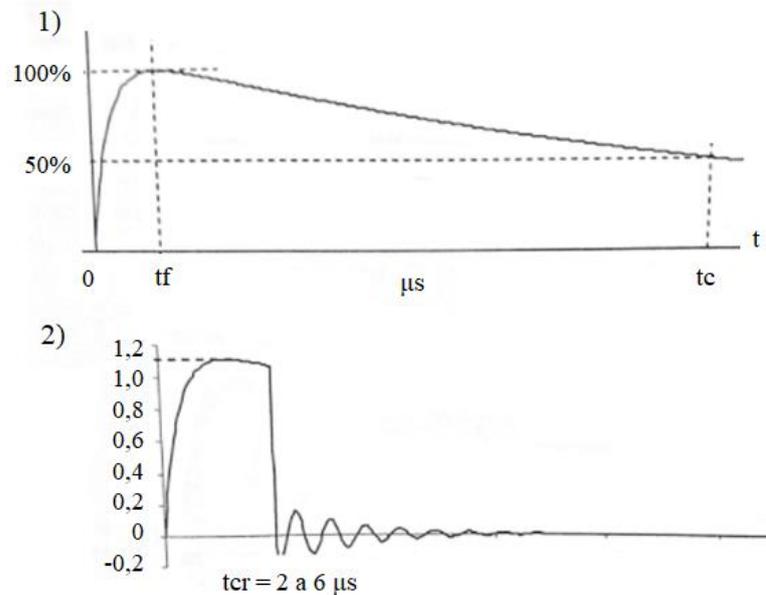
3.2 ENSAIO AO IMPULSO

Entre os testes realizados nos transformadores está o ensaio de impulso, que visa simular uma sobretensão causada por uma descarga atmosférica e/ou manobra, avaliando a tensão suportável pelo dispositivo, sendo dada pelo valor de pico do impulso para o qual se tenha a descarga disruptiva no isolamento. Para a realização deste ensaio são aplicadas sobretensões na forma de ondas de impulso normalizadas, chamadas de tensão de impulso. Estas ondas simulam uma sobretensão causada por uma descarga atmosférica e/ou manobra, visando comprovar a rigidez dielétrica do sistema de isolamento do transformador para sobretensões decorrentes de fontes externas. Nos casos de transformadores com níveis de tensão abaixo de 300kV , esse se trata de um ensaio de tipo, porém se o nível for mais elevado, este passa a ser um teste de rotina (KARSAI, 1987).

3.2.1 Formas de impulso

O impulso de tensão pode ter duas formas diferentes, sendo o impulso pleno e o impulso cortado na cauda, que podem ser vistos na Figura 7.

Figura 7 - Formas de impulso: 1) Impulso pleno, 2) Impulso cortado



Fonte: Ries (2007)

Na Figura 7.1 é apresentada a forma de onda de um impulso de tensão pleno, nesse caso observa-se que não ocorre a interrupção repentina da tensão. O tempo de frente t_f apresentado é definido como um parâmetro que representa 1,67 vezes o valor do intervalo entre os pontos em que o impulso apresenta 90% e 30% do seu valor de pico. Já o tempo de cauda t_c representa o tempo entre a origem e o ponto no qual o impulso decresce a 50% do seu valor de pico. Essa onda é semelhante as ondas padronizadas que são apresentadas a seguir no Quadro 3, e sua forma indica que a falha do isolamento em decorrência de algum evento que tenha acometido o sistema elétrico. Por ter uma duração maior, a onda plena gera grandes solicitações de isolamento do equipamento. Já o impulso cortado representado na Figura 7.2 indica uma interrupção da tensão, podendo ocorrer devido ao rompimento de algum ponto do isolamento. Ao se comparar ao impulso pleno, o impulso cortado apresenta oscilações menores, porém produzem tensões maiores já que sua amplitude é maior, acarretando na interrupção brusca da tensão na cauda desse impulso.

3.2.2 Ondas de impulsos normalizadas

As formas de onda normalizadas utilizadas na realização do ensaio ao impulso são definidas através da norma técnica NBR IEC 60060 (ABNT, 2013). Deste modo ao longo do ensaio são aplicadas ondas de impulso padrões, as quais podem ser caracterizadas de acordo com seus valores de pico, tempos de pico e tempos de duração previamente definidos para o

dispositivo em específico. O formato dessas ondas padrão utilizadas para a realização do ensaio de tensão suportáveis é apresentado no Quadro 3, onde são evidenciados em uma divisão de tensões e sobretensões, com os tempos de frente t_f e o tempo de cauda t_c .

Quadro 3 - Classificação e formas de onda das solicitações de tensões ou sobretensões para ensaio

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Formas de onda das tensões ou sobretensões					
Faixas de formas de onda das tensões ou sobretensões	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz $T_1 \geq 3\,600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3\,600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_{cr} \leq 5\,000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T \leq 0,1 \mu\text{s}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda normalizada das tensões	 $f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz T_1^*	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	 $T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2\,500 \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Ensaio normalizado de tensão suportável	a	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	a

^a A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.

Fonte: NBR IEC 60060 (ABNT, 2013)

Já no Quadro 4 é apresentada a lista dos valores de pico normalizados como tensões suportáveis, também segundo a mesma norma citada acima.

Quadro 4 - Valores de tensão suportável

Lista de valores de crista suportáveis nominais normalizadas de impulso [kV]										
20	30	40	60	75	95	110	125	145	170	200
250	325	350	380	450	550	650	750	850	950	1050
1175	1300	1425	1550	1675	1800	1950	2100	2250	2400	2550
2700	2900	3100								

Fonte: ABNT (2018)

3.2.2.1 Impulso atmosférico

Os impulsos atmosféricos são utilizados para testar a rigidez elétrica do transformador no caso da ocorrência desses eventos em sua operação. Segundo pode ser visto no Quadro 3, a onda do impulso atmosférico pode ser identificada segundo a relação de impulso 1,2/50 μ s. Nessa onda padrão utilizada para a realização dos ensaios, utiliza-se do gerador de impulsos ajustando para os parâmetros especificados de tempos e tolerâncias: $t_p = 1,2\mu s \pm 30\%$ como sendo o tempo de frente e $t_c = 50\mu s \pm 20\%$ como sendo o tempo de cauda.

3.2.2.2 Impulso de manobra

Também com o propósito de testar a rigidez elétrica do transformador, porém agora em relação a sobretensões originadas por chaveamentos, curtos ou defeitos no sistema. São padronizados pela mesma norma citada acima, a qual identifica a relação de impulso 250/2500 μ s. Por sua vez, nessa onda padrão tem-se como tempos e tolerâncias: $t_p = 250\mu s \pm 20\%$ como sendo o tempo frente, e $t_c = 2500\mu s \pm 60\%$ como sendo o tempo de cauda.

3.3 EFEITOS NO ISOLAMENTO

A norma NBR 6939 (ABNT, 2018) define que o nível de isolamento para um equipamento devem ser selecionadas as tensões suportáveis nominais normalizadas mínimas que visem garantir que as tensões suportáveis especificadas sejam de fato atendidas.

Segundo Ries (2007), os materiais dielétricos apresentam rigidez dielétrica mais elevada para tensões de duração bem curta, sendo que quanto menor for o tempo até o valor de pico deste impulso, mais elevada será a tensão de ruptura do material, podendo ser esta rigidez muito maior quando se comparada à sua correspondente em 1 minuto de corrente alternada. Deste modo, a amplitude do impulso de tensão é elevada e, dependendo do nível de isolamento do equipamento, o transformador pode ser capaz de suportar tal amplitude se o tempo de duração deste impulso for curta.

A aprovação do dispositivo no ensaio não elimina a possibilidade de ocorrer falhas, pois podem ocorrer casos onde as solicitações do dielétrico dos enrolamentos pode ser muito alta devido a não uniformidade da distribuição dessa tensão ao longo da bobina, tendo uma concentração alta de tensão nos enrolamentos iniciais. Deste modo, este setor está mais

suscetível ao rompimento do dielétrico. Na Figura 8 é apresentada a parte ativa de um transformador de 155MVA e 500kV, dada sua entrada central, é possível ver que os discos próximos a sua entrada foram danificados, se tratando esses dos primeiros enrolamentos. Neste caso, foram identificados danos devido ao curto-circuito entre as espiras dos discos e, devido as condições, identificou-se que os danos ocorreram devido a distribuição de tensão inicial não uniforme ao longo da bobina.

Figura 8 - Bobina danificada em decorrência a falha do isolamento



Fonte: Bechara (2010)

Outro exemplo também é apresentado na Figura 9, onde é apresentado um transformador de 15MVA e 69kV. Novamente é possível ver que os danos ocorreram na região central da bobina, onde neste caso fica localizada sua entrada, sendo então a região dos discos iniciais. Devido a ruptura do isolamento entre as espiras desses discos, deu-se a ocorrência de um curto-circuito entre as espiras que formam essa bobina.

Figura 9 - Bobina danificada em decorrência a falha do isolamento



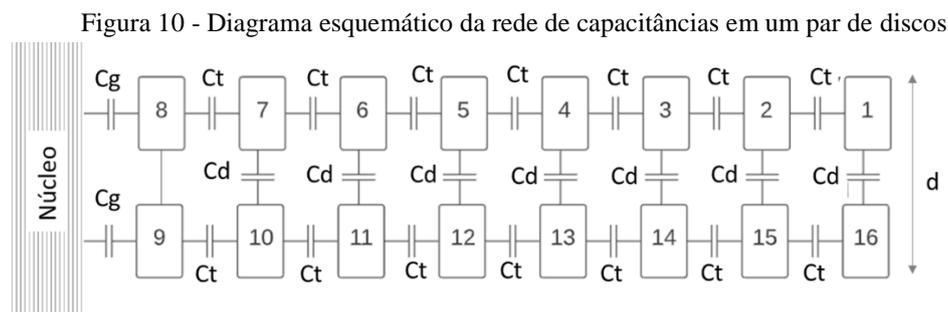
Fonte: Bechara (2010)

Estes danos observados na bobina não possuem uma manutenção rápida, sendo que se o mesmo estiver em campo, o dispositivo necessitará retornar para a fábrica para ter seus enrolamentos reconstruídos, ou pode ainda ser necessário a substituição total do transformador em alguns casos mais severos. Isto pode ser um problema muito grande, pois como já citado, além de serem equipamentos de valor elevado, esses dispositivos são desenvolvidos com base num projeto específico, de forma que não há uma reposição rápida para o mesmo no sistema. Sendo assim, a distribuição de sobretensões nos enrolamentos dos transformadores podem causar danos severos, de forma que alternativas para o seu controle são aplicadas ao projeto desses dispositivos, consistindo em arranjos diferentes de bobina visando permitir uma distribuição uniforme ao longo de todo o enrolamento, evitando maiores solicitações do isolamento nos discos iniciais.

4 CÁLCULO DAS CAPACITÂNCIAS DE TRANSFORMADORES

A distribuição de sobretensões nos enrolamentos dos transformadores depende das capacitâncias formadas no seu comprimento. Ao falar sobre o isolamento dos transformadores, Karsai (1987) aponta que a distribuição de sobretensões nos enrolamentos vai depender da rede de capacitâncias e indutâncias formadas pelos elementos da bobina, dependendo então do número de discos, voltas, comprimento, dentre outras características da bobina. Na distribuição de tensões nos enrolamentos, primeiro é necessário entender quais são essas capacitâncias bem como suas relações com os parâmetros construtivos dos enrolamentos.

Na Figura 10 é mostrada uma representação do enrolamento de um disco contínuo ideal, onde C_d representa as capacitâncias formadas entre os discos, C_t , as capacitâncias formadas entre cada uma das voltas (espiras) do condutor, C_g , a capacitância contra a terra e d representa a distância entre os dois discos.



Fonte: adaptado de Bagheri, Phung e Naderi (2016)

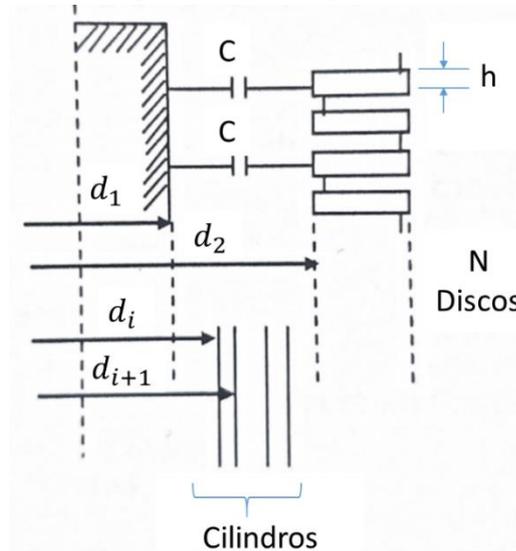
4.1 CAPACITÂNCIA CONTRA TERRA

A capacitância contra o aterramento é formada por duas partes, sendo uma delas referente a capacitância entre a superfície cilíndrica interna dos discos contra o aterramento. Essa parcela pode ser calculada utilizando a relação que aparece na Equação 5, representando a capacitância em cilindros concêntricos, considerando cilindros de comprimento l e com raios de tamanhos distintos.

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{l}{\sum_i \left(\frac{1}{\epsilon_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right)} \mu F \quad (5)$$

Os parâmetros necessários para o cálculo dessa capacitância da Equação 5 podem ser visualizados através da Figura 11. Nesta figura, h representa a altura do condutor principal do enrolamento, d_i o raio diâmetro do dielétrico “i” e d_{i+1} o diâmetro externo.

Figura 11 - Parâmetros para cálculo da capacitância contra o aterramento



Fonte: adaptado de Ries (2007)

Ainda para o cálculo, ϵ_0 é a constante dielétrica no vácuo, equivalente a 0,0885. No caso de um enrolamento qualquer, o comprimento do cilindro representado por l vai ser equivalente a altura axial do condutor sem isolamento que forma o disco. Considerando que este enrolamento é formado por N discos, a capacitância contra o aterramento pode ser representada pela Equação 6.

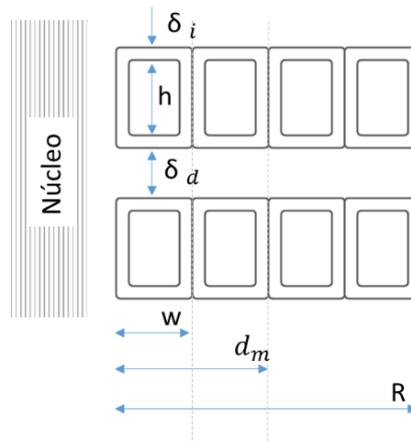
$$C_g = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot 0,0885 \frac{l}{\sum_i \left(\frac{1}{\epsilon_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right)} \text{ pF} \quad (6)$$

A capacitância total contra o aterramento pode ser aproximada pela Equação 6, pois sua segunda parcela se refere a capacitância das cabeceiras do enrolamento contra o aterramento, que apresentam um valor desprezível quando se comparado ao valor da primeira parcela (RIES, 2007).

4.2 CAPACITÂNCIA SÉRIE

A capacitância serie é formada por duas componentes, sendo essas a capacitância entre os discos (C_d) e a capacitância entre as espiras (C_i), conforme já foram representadas na Figura 10. O seu cálculo vai depender das características construtivas desse enrolamento. Na Figura 12 são apresentados parâmetros relacionados ao condutor utilizado na construção da bobina, onde h e W representam respectivamente a altura e largura do condutor, d_m é o diâmetro médio do disco e R representa o raio do disco e δ_i corresponde a espessura do isolamento.

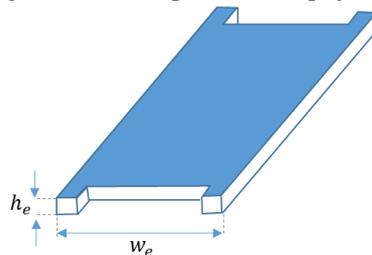
Figura 12 - Exemplificação dos parâmetros do disco



Fonte: adaptado de Bagheri, Phung e Naderi (2016)

O parâmetro δd consiste no canal entre os dois discos, sendo a distância final de disco a disco após a prensagem. Esse parâmetro pode ser calculado multiplicando o número de espaçadores utilizados (η) pela espessura do espaçador (h_e). Um exemplo de espaçador está apresentado na Figura 13 (BAGHERI; PHUNG; NADERI, 2016).

Figura 13 - Exemplo de um espaçador

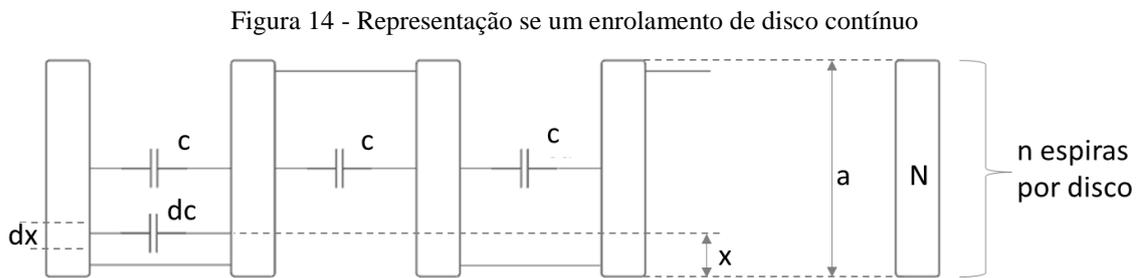


Fonte: adaptado de Bagheri, Phung e Naderi (2016)

Com todos esses parâmetros, e com as relações que serão apresentadas na sequência dessa seção, será possível chegar ao cálculo da capacitância série.

4.2.1 Capacitância entre discos

Tem-se que a diferença de potencial entre duas espiras adjacentes não é constante, de forma que ela depende da altura radial dos discos do enrolamento, representada por a na Figura 14. Desta forma, o efeito capacitivo não será o mesmo para diferentes pares de espiras adjacentes (RIES, 2007).



Fonte: adaptado de Ries (2007)

Sendo x a distância da ponta do disco até um uma certa capacitância elementar entre duas espiras, a qual pode ser definida pela Equação 7.

$$dc = \frac{c}{a} dx \quad (7)$$

Sendo n o número de espiras em um comprimento radial do disco, e sendo a tensão entre as espiras de um disco v , pode-se representar a Equação 8 como sendo a tensão entre os pares de espiras em contato de dois discos.

$$V_x = \frac{2nv}{a} x \quad (8)$$

Neste tipo de enrolamento, utiliza-se do método de somatório da energia armazenada nas capacitâncias ao longo de um par de discos para obter o valor da capacitância série equivalente, igualando esse somatório ao valor equivalente a energia total num enrolamento com dois discos. Sendo assim, para o comprimento dx com m espiras, tem-se que a energia armazenada pode ser representada pela Equação 9. Para obter a energia total armazenada entre

dois discos, se faz a integração da Equação 9 para o comprimento a , chegando na Equação 10 (RIES, 2007).

$$dW_s = \frac{1}{2} \frac{c}{a} dx \left[\frac{2 \cdot m \cdot v}{a} \right]^2 \quad (9)$$

$$W_s = \frac{1}{2} \frac{c}{a} dx \left[\frac{2 \cdot m \cdot v}{a} \right] \int_0^a x^2 dx + \frac{4}{6} m^2 v^2 c \quad (10)$$

Sendo C_d a capacitância entre discos, ou seja, a capacitância entre a espira de um disco e a espira correspondente do seu par. Igualando a Equação 10 ao valor da energia acumulado por C_d , chega-se na Equação 11.

$$\frac{1}{2} C_d (m \cdot v)^2 = \frac{4}{6} m^2 \cdot v^2 c \quad \therefore \quad C_d = \frac{4}{3} c \quad (11)$$

Considerando N como o número total de discos no enrolamento, na Figura 12 observam-se $N-1$ capacitâncias entre os discos (C_d). Sendo assim, é possível obter a relação apresentada na Equação 6 igualando a energia armazenada nessas $N-1$ capacitâncias C_d , obtendo enfim a capacitância série equivalente C_{ds} entre os discos, e a relação da Equação 12 para a capacitância série equivalente entre discos.

$$\frac{4}{6} n^2 \cdot v^2 C_d (N - 1) = \frac{1}{2} C_{ds} (n \cdot v \cdot N)^2 \quad \therefore \quad C_{ds} = \frac{4}{3} C_d \frac{N-1}{N^2} \text{ pF} \quad (12)$$

As capacitâncias C_d e C_t formadas ao longo do enrolamento podem ser tratadas como capacitores de placas paralelas, podendo ser representada então pela Equação 13.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{\sum_j \frac{\delta_j}{\varepsilon_j}} \quad (13)$$

Sendo A a área das placas, δ_j a espessura das camadas do dielétrico, ε_j a constante relativa do dielétrico e ε_0 a permissividade elétrica no vácuo, equivalente. A partir dessa relação, é possível reescrever a relação de C_d como é apresentado na Equação 14.

$$C_d = \frac{\varepsilon_0 \cdot A_e}{\frac{\delta_d}{\varepsilon_e}} + \frac{\varepsilon_0 \cdot (A - A_e)}{\sum_j \frac{\delta_j}{\varepsilon_j}} \quad (14)$$

A Equação 14 é formada por duas parcelas devido a presença dos n_e espaçadores posicionados horizontalmente sobre o disco, sendo A_e equivalente a área ocupada por esse componente e A a área total de um disco contra o outro. Com as constantes dielétricas apresentadas no Quadro 1, juntamente com os parâmetros apresentados anteriormente na Figura 12 e na Figura 13, é possível reescrever a Equação 14, chegando na Equação 15 (RIES, 2007; BAGHERI et al., 2008).

$$C_d = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_i \cdot d_m \cdot \pi \left[\frac{d_m \cdot \pi \cdot \varepsilon_d + n_e \cdot w_e (\varepsilon_e - \varepsilon_d)}{\varepsilon_i \cdot d_m \cdot \pi \cdot \delta_d + 2 \cdot \delta_i (d_m \cdot \pi \cdot \varepsilon_d + n_e \cdot w_e (\varepsilon_e - \varepsilon_d))} \right] pF \quad (15)$$

4.2.2 Capacitância entre espiras

Mais uma vez utilizando-se da Equação 11 de cálculo de capacitância entre duas placas paralelas, considerando a face dos condutores isolados adjacentes, situadas no diâmetro médio d_m do disco, que também tomando os parâmetros apresentados na Figura 12 e no Quadro 1, é possível chegar na relação apresentada na Equação 16 para o cálculo de C_t .

$$C_t = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_i \cdot d_m \cdot \pi \left[\frac{h + 2\delta_i}{2\delta_i} \right] pF \quad (16)$$

Conforme já apresentado na Figura 10, onde são apresentadas oito voltas de condutor por disco, somando-se sete capacitores entre as espiras (C_t) de cada disco, totalizando então $n - 1$ capacitâncias. Utilizando mais uma vez o método de somatório de energia armazenada por capacitor, a capacitância entre as espiras total em um par de discos contínuos pode ser representada pela Equação 17 (BAGHERI et al., 2008).

$$C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v}{2n} \right)^2 \cdot 2(n - 1) = \frac{1}{2} \cdot C_{ts} \cdot v^2 \quad \therefore C_{ts} = \frac{C_t}{2n^2} (n - 1) pF \quad (17)$$

Por fim, para uma bobina com N discos, a capacitância entre espiras equivalente pode ser obtida multiplicando a Equação 17 pelo fator $(2/N)$.

4.2.3 Capacitância série total

Como citado no início da seção 4.1, a capacitância série total é formada por duas componentes. Com os cálculos apresentados até então, finalmente é possível calcular o valor de C_s , que consiste na soma das Equações 12 e 17, chegando na Equação 18 (KARSAI, 1987; BAGHERI et al., 2008).

$$C_s = C_{ds} + C_{ts} = \frac{1}{N} \left(\frac{n-1}{n^2} \cdot C_t + \frac{4}{3} \cdot \frac{N-1}{N} \cdot C_d \right) pF \quad (18)$$

Considerando que na maioria dos casos o projeto da bobina conta com parâmetros de $n > 10$ e $N > 30$, a Equação 18 pode ser simplificada, chegando na Equação 19 para representar a capacitância série equivalente na bobina.

$$C_s = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{n} \cdot C_t + \frac{4}{3} \cdot C_d \right) pF \quad (19)$$

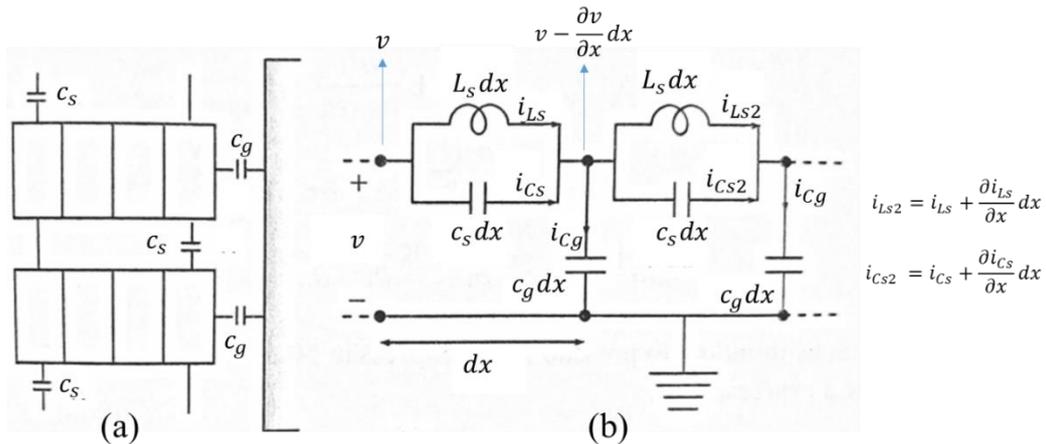
5 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NOS ENROLAMENTOS

É importante entender como é a distribuição de tensão nos enrolamentos bem como conhecer os esforços de tensão nos enrolamentos, pois o isolamento deve ser projetado de forma a permitir que o transformador suporte à aplicação de sobretensões, sem comprometer seu funcionamento. (KULKARNI; KHAPARDE, 2013)

5.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM ENROLAMENTO

O enrolamento do transformador pode ser representado como um circuito com capacitâncias e indutâncias, como mostrado na Figura 15. Considerando uma bobina de disco contínuo como apresentado na Figura 15.1, pode ser representado pelo circuito equivalente apresentado na Figura 15.2.

Figura 15 - Representação do circuito equivalente de um enrolamento de disco contínuo



Fonte: adaptado de Ries (2007)

A distribuição de um impulso de tensão nos enrolamentos vai depender do circuito equivalente de capacitâncias, indutâncias e resistências e, como visto no capítulo anterior, os valores dessas capacitâncias variam ao longo do comprimento dos enrolamentos, pois seu cálculo está atrelado a parâmetros como o número de discos e número de espiras. Deste modo, é possível concluir que quando um impulso de tensão incide nos terminais dos enrolamentos, a distribuição de tensão também vai variar desde a parte inicial do enrolamento até a final, conforme aumenta o número de discos que formam a bobina. Ainda em relação a Figura 15, o parâmetro C_s está representando a capacitância série entre dois discos, enquanto C_g representa a capacitância contra o aterramento de um disco. Como já foi visto na seção anterior, esses

parâmetros estão atrelados as dimensões do disco e do enrolamento, de modo que na Figura 15.2 é representado um elemento dx desse enrolamento, onde C_g , C_s e L_s serão parâmetros por unidade de comprimento. Desta forma, é possível definir a capacidade série equivalente C_s pela Equação 20 e a capacidade contra a terra equivalente C_g pela Equação 21, sendo l equivalente ao comprimento da bobina. (RIES, 2007).

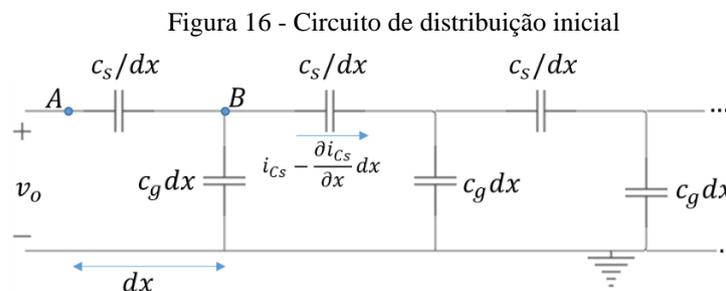
$$C_s = \frac{c_s}{l} \quad (20)$$

$$C_g = c_g \cdot l \quad (21)$$

De acordo com esses parâmetros, a distribuição de tensão vai sofrer variações ao longo do tempo e ao longo do comprimento da bobina, de forma que se terá diferenças entre a distribuição inicial e final da tensão.

5.2 DISTRIBUIÇÃO INICIAL DE UMA TENSÃO IMPULSO

Na incidência de um impulso de tensão nos terminais dos enrolamentos do transformador, ao considerar o instante inicial, tem-se que as indutâncias não vão impactar na distribuição, já que esse elemento se opõe a mudança da corrente elétrica. Como não ocorre uma mudança instantânea, não haverá fluxo de corrente fluindo pelos indutores, de modo que se comportarão como um circuito aberto. Desta forma, conclui-se que a distribuição inicial dependerá apenas da rede de capacitâncias formada, podendo representar o circuito equivalente conforme a Figura 16.



Fonte: adaptado de Ries (2007)

Conforme Ries (2007) apresenta, a partir do circuito apresentado na Figura 16, é possível chegar em algumas relações para então ser possível chegar na equação que representa

a distribuição de tensão. Primeiramente, a diferença de tensão entre os pontos representados por A e B na Figura 16 pode ser representada através da Equação 22.

$$v_{AB} = \frac{\partial v_o}{\partial x} dx \quad (22)$$

Sendo i_{c_s} a corrente que flui de A até B, a mesma pode ser obtida com a equação de corrente para um capacitor, chegando na relação apresentada na Equação 23.

$$i_c = C \frac{dv}{dt} \quad \therefore i_{c_s} = \left(\frac{c_s}{dx} \right) \cdot \frac{d(v_{AB})}{dt} = \frac{c_s}{dx} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial v_o}{\partial x} dx \right] = c_s \cdot \frac{\partial^2 v_o}{\partial x \partial t} \quad (23)$$

E por fim, chega-se a Equação 24 para representar a variação dessa corrente no comprimento dx .

$$- \frac{\partial i_{c_s}}{\partial x} dx = c_g \cdot dx \frac{\partial v_o}{\partial t} \quad (24)$$

Por fim, Ries (2007) apresenta que, ao integrar em relação ao tempo a equação obtida ao substituir a Equação 23 em 24, chega-se na equação diferencial apresentada na Equação 25, que por sua vez apresenta a relação que gere a distribuição inicial da tensão.

$$\frac{\partial^2 v_o}{\partial x^2} + \frac{c_g}{c_s} v_o = 0 \quad \therefore \quad \frac{\partial^2 v_o}{\partial x^2} + \beta^2 \cdot v_o = 0 \quad (25)$$

Onde β representa a raiz quadrada de C_g sobre C_s , levando em conta as relações apresentadas nas Equações 20 e 21, β pode ser reescrito conforme apresentado na Equação 26, chegando numa nova constante representada por α .

$$\beta = \sqrt{\frac{c_g/l}{c_s \cdot l}} = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{c_g}{c_s}} \quad \therefore \quad \alpha = \beta \cdot l = \sqrt{\frac{c_g}{c_s}} \quad (26)$$

Ela apresenta a relação que gere a distribuição inicial da tensão, e a solução para a equação diferencial apresentada na Equação 25 é apresentada pela Equação 27.

$$v_o(x) = A_1 e^{\beta x} + A_2 e^{-(\beta)x} \quad (27)$$

Na Equação 27, os parâmetros A_1 e A_2 são constantes de integração que podem ser definidas através das condições de contorno considerando um enrolamento de comprimento “ l ” com uma de suas extremidades aterrada. Para este caso, no instante inicial $t=0$, tem-se que a tensão de entrada v_o será nula na posição inicial $x=0$. Substituindo esses valores na Equação 27, tem-se:

$$x = 0, t = 0; \quad v_o(0) = A_1 + A_2 = 0; \quad A_1 = -A_2$$

Agora ao final do comprimento do enrolamento, onde $x=l$ e a tensão de entrada $v_o=V$.

$$x = l, t = 0; \quad v_o(l) = A_1 e^{(\beta)l} + A_2 e^{-(\beta)l} = V$$

Com as relações para condição de contorno para o instante inicial $t=0$, sendo $A_1 = -A_2$, é possível chegar na relação apresentada na Equação 28.

$$V = A_1 (e^{(\beta)l} - e^{-(\beta)l}) \quad \therefore \quad A_1 = -A_2 = \frac{V}{e^{(\beta)l} - e^{-(\beta)l}} \quad (28)$$

Substituindo a Equação 28 obtida para A_1 e A_2 na Equação 27, obtém-se a relação representada na Equação 29 para a distribuição da tensão ao longo do comprimento l da bobina, onde as exponenciais podem ser reescritas utilizando a relação de seno hiperbólico.

$$v_o(x) = V \frac{e^{\beta(l-x)} + e^{-\beta(l-x)}}{e^{(\beta)l} - e^{-(\beta)l}} = V \cdot \frac{\text{senh}(\beta(l-x))}{\text{senh}(\beta l)} = V \frac{\text{senh}\left(\alpha\left(1-\frac{x}{l}\right)\right)}{\text{senh}(\alpha)} \quad (29)$$

Derivando a função apresentada na Equação 29 quando $x=0$, tem-se que o gradiente de tensão no final do comprimento da bobina, representado pela Equação 30.

$$\left. \frac{dv_o(x)}{dx} \right|_{x=0} = \frac{V}{\text{senh}(\beta l)} \cdot \beta \cosh(\beta l) = V \cdot \beta \cdot \coth(\beta l) = V \cdot \frac{\alpha}{l} \cdot \coth(\alpha) \quad (30)$$

Como apresentado por Ries (2007) e Kulkarni e Khaparde (2013), se $\beta l > 3$, o valor obtido para $\coth(\beta l)$ será aproximadamente 1, de forma que para a tensão inicial o gradiente máximo, considerando uma tensão impulso unitária ($V=1$), será dado pela Equação 31.

$$\left. \frac{dv_o(x)}{dx} \right|_{max} = V \cdot \beta \cdot \coth(\beta l) = 1 \cdot \beta \cdot \coth(3) = \beta = \alpha \frac{1}{l} \quad (31)$$

Pela Equação 31, como apresentado por Ries (2007), Kulkarni e Khaparde (2013), Bagheri et al. (2008) e Bagheri, Phung e Naderi (2016), “ α ” representa a constante de distribuição, sendo que o gradiente máximo pode ser visto no final da linha. Com α multiplicando o gradiente uniforme dado por $1/l$, tem-se que quanto maior for o valor de α , maior será o valor do gradiente de tensão inicial máximo.

Num segundo caso, onde tem-se a aplicação de um impulso unitário em um extremo enquanto o outro extremo da bobina está livre, tem-se que a distribuição de tensão inicial será diferente. As condições de contorno serão as seguintes:

$$\begin{aligned} \frac{dv_o(x)}{dx} &= 0 \text{ em } x = 0 \\ v_o(x) &= V \text{ em } x = l \end{aligned}$$

Desta maneira, é possível representar a equação da distribuição de tensão inicial ao longo da bobina de comprimento l , na condição de um extremo do enrolamento livre, segundo a Equação 32.

$$v_o(x) = V \cdot \frac{\cosh(\beta(l-x))}{\cosh(\beta l)} = V \cdot \frac{\cosh\left(\alpha\left(1-\frac{x}{l}\right)\right)}{\cosh(\alpha)} \quad (32)$$

Ainda nesta mesma condição, o gradiente máximo de tensão inicial será dado segundo a Equação 33.

$$\left. \frac{dv_o(x)}{dx} \right|_{x=l} = \frac{V}{\cosh(\beta l)} \cdot \beta \sinh(\beta l) = V \cdot \beta \cdot \tanh(\beta l) = V \cdot \frac{\alpha}{l} \cdot \tanh(\alpha) \quad (33)$$

Para $\beta l > 3$, o valor obtido para $\tanh(\beta l)$ também será aproximadamente 1, de forma que para a tensão inicial o gradiente máximo para um impulso unitário também será dado pela Equação 31, concluindo que tanto para o caso com uma extremidade aterrada quanto para a extremidade livre, tem-se o mesmo resultado para o gradiente inicial máximo.

5.3 DISTRIBUIÇÃO FINAL DE UMA TENSÃO IMPULSO

Para a mesma equação diferencial apresentada na Equação 25, para chegar na distribuição final, considerando também uma tensão unitária é necessário anular as componentes da derivada da tensão em relação ao tempo, chegando assim na Equação 34, para a qual a solução será dada no formato da Equação 35 (RIES, 2007).

$$\frac{\partial^2 v_o}{\partial x^2} + \frac{c_g}{c_s} v_o = 0 \quad \therefore \quad \frac{\partial^2 v_o}{\partial x^2} = 0 \quad (34)$$

$$v_f = A_1 \cdot x + A_2 \quad (35)$$

Para a Equação 31, para o primeiro caso de um enrolamento com um extremo aterrado, nas condições de contorno para $x=0$ e $x=l$, considerando uma tensão V unitária aplicada na entrada.

$$x = 0, \quad v_f(0) = A_2 = 1$$

$$x = l, \quad v_f(l) = A_1 l + A_2 = 0; \quad A_1 l + V = 0; \quad A_1 = -\frac{V}{l}$$

Sendo assim, a Equação 35 pode ser reescrita conforme apresentado na Equação 36, representando a distribuição final da tensão ao longo da bobina.

$$v_f = 1 - \frac{V}{l} \quad (36)$$

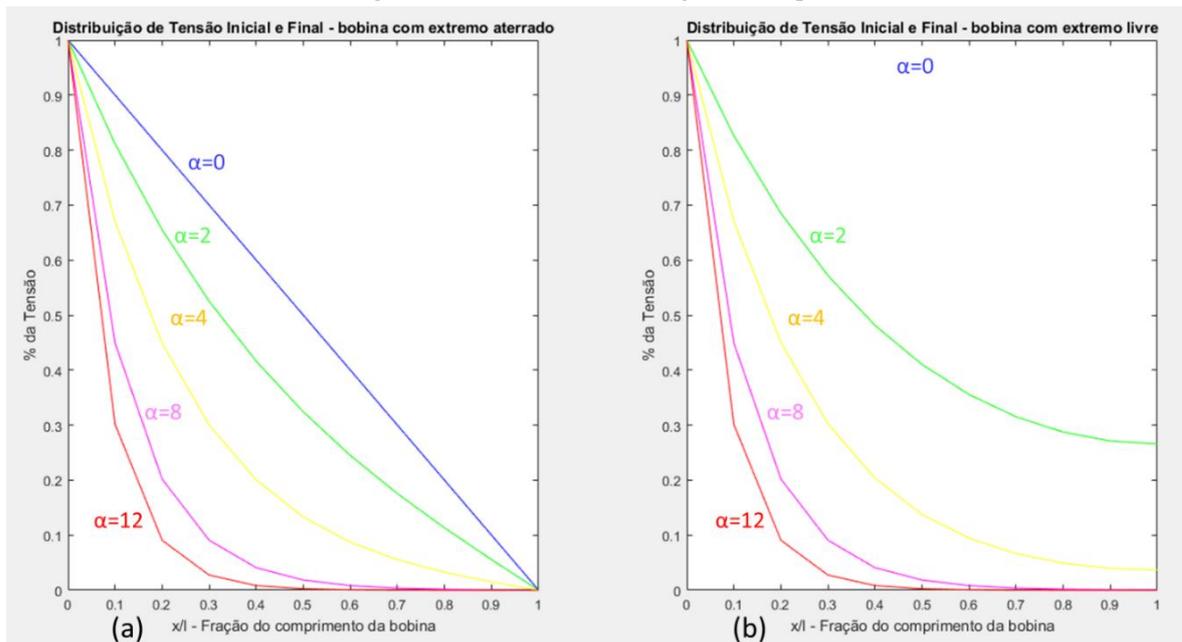
Para o caso de um enrolamento com uma extremidade livre, vai mudar a condição de contorno para $x=l$, que passará a ser 1 ao invés de 0, conforme mostrado abaixo e deste modo, a distribuição final será dada simplesmente por 1, como apresentado na Equação 37.

$$x = 0, \quad v_f(0) = A_2 = 1$$

$$x = l, \quad v_f(l) = A_1 l + A_2 = 1; \quad A_1 l + 1 = 1; \quad A_1 = 0$$

$$v_f = 1 \quad (37)$$

Figura 17 - Curvas de distribuição X alfa para



Fonte: elaborado pela autora

São apresentadas as curvas de distribuição para bobinas com um extremo aterrado na Figura 17.1, e para um extremo livre na Figura 17.2, onde foram plotadas as Equações 29 e 32, respectivamente, para diversos valores de α . Para o parâmetro $\alpha=0$, em ambos os casos é visto uma distribuição linear, representando assim a distribuição final. Conforme o valor desse parâmetro vai aumentando, pelas figuras é possível ver que as curvas ficam cada vez menos lineares, representando a distribuição inicial.

5.4 DISTRIBUIÇÃO TRANSITÓRIA DE UM IMPULSO DE TENSÃO

Nas seções 5.2 e 5.3 foi apresentado como ocorre a distribuição de tensão ao longo de um enrolamento para dois casos, sendo um a bobina com uma extremidade aterrada e o outro, com uma extremidade livre. Para esses dois casos, a distribuição de tensão inicial foi

representada pelas Equações 29 e 32, respectivamente. Já em regime permanente, a distribuição foi representada pelas Equações 36 e 37.

Saindo do estado inicial até chegar ao regime ao longo da bobina, há uma resposta transitória. Desta forma, a resposta completa da equação diferencial apresentada na Equação 25, será dada pela soma da resposta transitória com a resposta em regime permanente, conforme apresentado na Equação 38.

$$v(x, t) = v_t(x, t) + v_f(x, t) \quad (38)$$

Essa resposta transitória é representada através da soma de ondas estacionárias harmônicas com frequência temporal equivalente a ω_n , e espacial equivalente a β_n , formadas ao longo do comprimento da bobina. Sendo assim, ela pode ser obtida através da equação 39.

$$v_t(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(\beta_n x) + a_n \cdot \text{sen}(\beta_n x)) \cos(\omega_n x) \quad (39)$$

6 APRIMORAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO

Com a evolução das tecnologias de materiais e projetos dos transformadores de potência, buscava-se soluções e melhorias que possibilitassem maiores rendimento, segurança e vida útil desses dispositivos. Como já citado anteriormente neste trabalho, as sobretensões, decorrentes de eventos de descargas atmosféricas e de chaveamentos, podem causar danos no isolamento do transformador devido aos estresses decorrentes da distribuição dos impulsos de tensão na bobina. Sendo assim, ao longo do tempo buscou-se formas de aprimorar a distribuição dos impulsos de tensão nos enrolamentos, buscando controlar os efeitos das sobretensões, mantendo a integridade do isolamento e elevando a vida útil dos transformadores.

Ao longo da evolução do projeto das bobinas, foram desenvolvidas algumas tecnologias para aplicação em altas tensões buscando melhorar a distribuição de tensão. Nas seções do capítulo anterior foi apresentado que o parâmetro α representa a constante de distribuição de tensão nos enrolamentos. De acordo com a Equação 26, fica claro que essa constante depende das capacitâncias C_s e C_g , de modo que uma forma de alterar a constante de distribuição é alterar os valores dessas capacitâncias. Conforme apresentado no capítulo 2, essas capacitâncias presentes ao longo da bobina estão atreladas ao projeto construtivo desse dispositivo, onde foram apresentadas as capacitâncias entre espiras, entre discos e contra o aterramento. Por fim, se chegou no cálculo da capacitância total contra o aterramento C_g , representada pela Equação 6, e a capacitância série total C_s , representada pela Equação 19.

Já no capítulo 3, foi trazida a representação do circuito equivalente da bobina de um transformador, demonstrando como essa rede de capacitâncias e indutâncias é formada ao longo do comprimento do enrolamento. Sabendo da relação dessa constante com as capacitâncias que, por sua vez, estão relacionadas ao projeto construtivo da bobina, conclui-se que há algumas alternativas de melhorar a distribuição de tensão nos enrolamentos através de algumas técnicas construtivas.

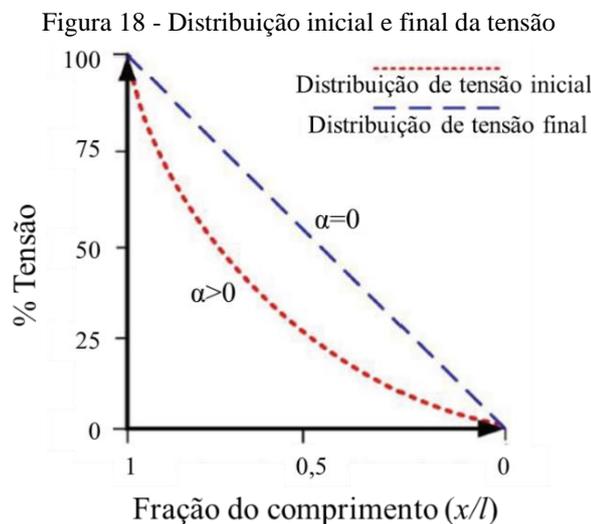
6.1 CONSTANTE DE DISTRIBUIÇÃO

Na incidência de um impulso de tensão, inicialmente tem-se que as indutâncias se comportarão como um circuito aberto, e o circuito equivalente será representado apenas pelas capacitâncias. Pelas equações de distribuição inicial de tensão, representadas pelas Equações 29 e 32, respectivamente, para os casos de um enrolamento com extremo aterrado e com extremo livre, vê-se a dependência dessas equações com o parâmetro α , sendo esse conhecido

como a constante de distribuição. Nas Equações 36 e 37, pra um enrolamento com extremo aterrado e com extremo livre respectivamente, não se observa a presença de α , de forma que as duas equivalem as Equações 29 e 32 quando $\alpha=0$.

Como foi apresentado na Equação 26, a constante de distribuição α vai depender das capacitâncias C_s e C_g . Sabendo que essas capacitâncias variam ao longo do comprimento da bobina, verifica-se que α também irá variar. Conforme o valor de α aumenta, a curva de distribuição inicial de tensão (que pode ser traçada com as Equações 29 e 32) torna-se cada vez menos linear, e quando seu valor é nulo, tem-se uma distribuição linear, o que pode ser confirmado frente as equações de distribuição em regime permanente. Frente a esse comportamento, para aprimorar a distribuição de tensão e reduzir o gradiente de tensão máximo entre os discos, é necessário tornar a constante de distribuição α inicial para um valor mínimo possível, onde num caso ideal a mesma seria igual a 0, onde teria a distribuição inicial também com característica linear (BAGHERI et al., 2008)

Na Figura 18 são apresentadas as curvas de distribuição, onde em vermelho pode-se observar a representação da distribuição inicial, sendo que quanto maior o valor de α , a distribuição será menos uniforme e a curvatura da curva será maior. Já em azul está representada a distribuição final, mostrando o comportamento linear com $\alpha=0$.



Fonte: adaptado de Bagheri, Phung e Naderi (2016)

Buscando uma distribuição mais uniforme, ou seja, um aspecto que se aproxima do linear desde as primeiras seções da bobina, deseja-se que o parâmetro de distribuição α seja o menor possível. Deste modo, pode-se concluir que para atingir uma distribuição inicial mais uniforme, se as capacitâncias ao longo do comprimento da bobina fossem iguais, de modo que

o resultado da Equação 26 fosse o mesmo em todo o comprimento. Com isso, seria reduzido o gradiente de tensão nas espiras iniciais da bobina, o que auxiliaria na manutenção da integridade do isolamento. (KULKARNI; KHAPARDE, 2013)

Num primeiro momento, pode-se pensar em aumentar a espessura da camada de isolamento dos primeiros discos da bobina, evitando que a mesma sofra devido as características da distribuição de tensão inicial, entretanto essa não seria uma solução eficiente, já que isso faria com que a capacitância série entre as espiras fosse reduzida, agravando ainda mais os efeitos da distribuição inicial. Sendo assim, a forma adotada para se chegar nesse resultado desejado é trabalhando diretamente no projeto de manufatura da bobina, com técnicas feitas com o objetivo de tornar a distribuição mais uniforme ao longo de toda a bobina, reduzindo as diferenças encontradas entre a distribuição inicial e final, como foi apresentado na Figura 17. Como o parâmetro de distribuição pode ser alterado de acordo com as capacitâncias C_s e C_g , mais uma vez pela Equação 26 fica claro que para reduzir o valor de α há duas opções: reduzir o valor de C_g ou elevar o valor de C_s .

6.2 TÉCNICAS DE MANUFATURA

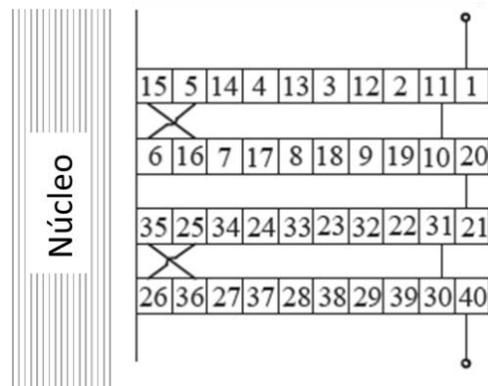
Reduzir o valor de C_g teria como consequências mais correntes circulando através das capacitâncias série, o que tornaria mais uniforme a tensão entre os discos ao longo do enrolamento mais uniformes. Num caso ideal, a corrente através das capacitâncias contra o aterramento seria nula, chegando numa distribuição inicial uniforme. Entretanto há limitações construtivas que impedem esse resultado, pois como visto no capítulo de cálculo de capacitâncias, o valor de C_g depende da área de contato entre os dois discos, e as geometrias são fixadas a partir de considerações do projeto elétrico do transformador (KULKARNI; KHAPARDE, 2013). Desta maneira, o mais comum é tentar elevar o valor de C_s com o uso de diferentes formas construtivas de bobina.

Conforme apresentado no capítulo 2, o cálculo dessas capacitâncias está atrelado ao comprimento do enrolamento, do número de espiras e de do número de discos. Logo, visando melhorar a distribuição inicial, devido a essa dependência com fatores construtivos foram desenvolvidas e implementadas diferentes construções de bobinas, com técnicas de manufatura que visam a redução do valor do parâmetro de distribuição de tensão inicial α .

6.2.1 Bobina de disco com espiras entrelaçadas

Na tentativa de diminuir o valor de α através do aumento do valor C_s , foi desenvolvida a bobina de disco contínua com espiras entrelaçadas (*interleaved*) em 1945. Na construção desse disco espiras adjacentes são intercaladas, cruzando as mesmas conforme é apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Representação de disco intercalado

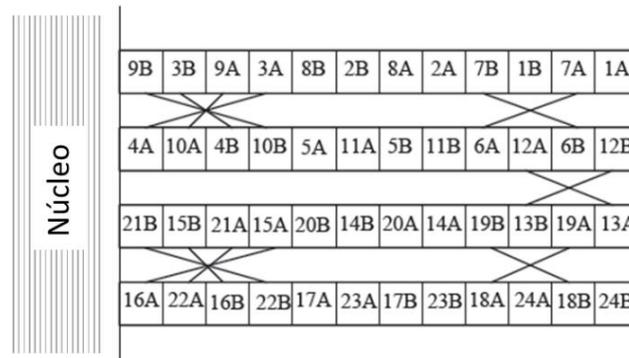


Fonte: adaptado de Kulkarni e Khaparde (2013)

Esse modelo é utilizado em transformadores de potência de altas e extra alta tensão, onde a intercalação dos condutores ajuda a aliviar os efeitos da distribuição de impulsos de tensão principalmente nos primeiros discos da bobina. Nessa construção é feita uma troca de posição dos condutores ao cruzá-los, fazendo com que espiras que estão geometricamente adjacentes fiquem distanciadas eletricamente. Para tanto, em um disco se chega até uma certa espira definida por projeto, localizada no diâmetro mais interno da bobina, próxima ao cilindro da bobina. Então nesse ponto específico se faz o cruzamento das espiras, indo para o próximo disco e então retornando para o primeiro novamente por outro cruzamento, passando por fim pelos condutores restantes e assim formando um circuito único com esses dois discos (KULKARNI; KHAPARDE, 2013; KARSAI, 1987).

Não há uma única maneira de fazer esse tipo de construção, dependendo do projeto específico do transformador, havendo diversas formas de intercalar as espiras, conforme é apresentado na Figura 20, uma bobina de discos com dois condutores paralelos.

Figura 20 - Bobina de disco cruzado com dois condutores paralelos



Fonte: adaptado de Kulkarni e Khaparde (2013)

Esse tipo de estrutura tem como efeito o aumento da capacitância série de forma considerável, podendo tornar a distribuição inicial de tensão mais uniforme. Devido ao distanciamento elétrico das espiras adjacentes, a tensão entre elas acaba se elevando, sendo também necessário que o projeto do isolamento seja adequado para esse aumento. Deste modo, apesar de melhorar a distribuição inicial, esse modelo tem algumas desvantagens quando se comparado a uma bobina de disco contínuos, pois em estado de regime permanente, o isolamento deverá para resistir a estresses mais elevados. (BAGHERI et al., 2008). Além disso, por ser utilizado em transformadores de alta e extra alta tensão, pode ser necessária a utilização de condutores paralelos devido ao aumento da corrente que irá circular, chegando a um caso semelhante ao esquema da Figura 11. Deste modo, o processo de manufatura dessa bobina será bem complexo e demorado, além de aumentar o uso de materiais para reforçar o isolamento, podendo acarretar num custo mais elevado (BAGHERI et al., 2008; KULKARNI; KHAPARDE, 2013).

6.2.1.1 Cálculo da capacitância série

Na Figura 19, observam-se $(n-1)$ capacitâncias entre espiras adjacentes por disco e $2(n-1)$ para o par, sendo n o número de espiras em cada um dos discos. Verifica-se ainda que a bobina representada conta com 10 espiras por disco, sendo que entre a primeira espira (espira no diâmetro mais externo) e a segunda, que está geometricamente adjacente a ela, eletricamente há 10 espiras. Já entre a segunda e a terceira, eletricamente há 9 espiras. No caso da Figura 19 então, entre as espiras com 10 espiras eletricamente próximas há 10 capacitâncias. Já entre as espiras com nove espiras eletricamente próximas há oito.

Considerando v uma tensão uniformemente distribuída aplicada entre esse par de discos, como um impulso unitário por exemplo, e voltando para as Equações de 10 à 12, apresentando

a energia armazenada entre as capacitâncias de dois discos. Havendo $2(n-1)$ capacitâncias no par, n capacitâncias para as com maior número de espiras eletricamente próximas, e a tensão através destas será $(v/2)$. Já para as $(n-2)$ espiras com o menor número, a tensão será dada por $((n-1)/n \cdot v/2)$. Por fim, levando em conta essas duas parcelas com diferentes tensões, a energia armazenada nesse par de discos pode ser representada pela Equação 40. (KULKARNI; KHAPARDE, 2013)

$$W_s = \frac{1}{2} \cdot n \cdot C_t \cdot \left(\frac{v}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot (n-2) \cdot C_t \cdot \left(v \cdot \frac{n-1}{2n}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot C_{ts} \cdot v^2 \quad (40)$$

No caso desse tipo de bobina, o valor da capacitância encontrada entre os discos vai ser desprezível quando se comparada a capacitância entre espiras, de forma que a capacitância série pode ser representada pela Equação 41.

$$C_s = C_{ts} \quad pF \quad (41)$$

Deste modo, pelas Equações 40 e 41, e considerando uma bobina formada por N discos, é possível chegar na Equação 42 para o cálculo da capacitância série em uma bobina de discos contínuo com espira cruzadas.

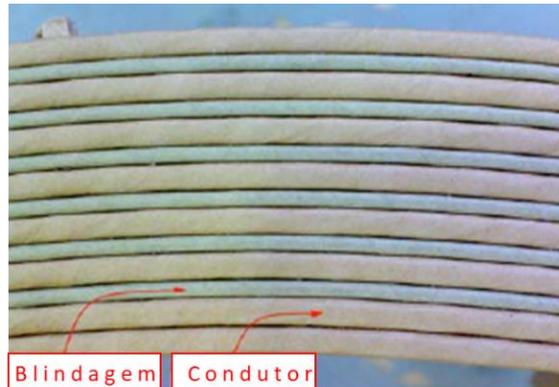
$$C_{ts} = \frac{C_t}{4} \left[n + \left(\frac{n-1}{2n}\right)^2 (n-2) \right] \quad (42)$$

6.2.2 Bobina de disco com blindagem eletrostática

Também na evolução de tecnologias que visam auxiliar no controle dos efeitos das sobretensões, nos Estados Unidos foram desempenhados estudos que resultaram em algumas patentes a partir dos anos 1970. Como nos estudos apresentados por Ohta, Kurita e Morita (1974); Hinton, Doughty e Kennedy (1977); e Degeneff e Crouse (1981), onde todos trazem inventos com a utilização de um condutor para blindagem eletrostática (também conhecido como *intershield* ou *electrostatic shield*) na construção de bobinas de discos contínuos. Esses inventos foram desenvolvidos com o objetivo de aumentar a capacitância série equivalente da bobina, buscando reduzir o valor do parâmetro de distribuição inicial α para melhorar a distribuição da tensão inicial.

Esse condutor é então inserido entre os primeiros discos da bobina, onde seus dois extremos ficam livres no disco posicionadas em locais determinados no projeto. Considerando uma bobina de discos contínuo, no par de discos o primeiro é chamado de disco esquerdo e o seu par, disco direito. Uma das pontas do condutor de blindagem é colocado numa posição específica do disco esquerdo, entre dois condutores da bobina, então o mesmo vai sendo inserido na circunferência o número de voltas que for indicado no projeto. Em outra posição determinada é feita uma dobra desse condutor, também chamada de transposição, para chegar até ao disco direito, onde são dadas o mesmo número de voltas entre os condutores até a sua segunda ponta ser colocada numa posição também determinada. Na Figura 21 é apresentado um disco.

Figura 21 - Disco de bobina com condutor de blindagem eletrostática

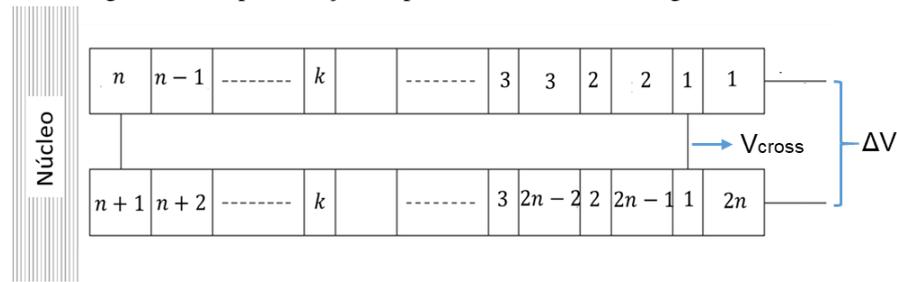


Fonte: adaptado de Bagheri et al. (2008)

Esse condutor geralmente é constituído de cobre ou alumínio, e também conta com camadas de isolamento de papel. Suas duas extremidades ficam livres dentro da bobina numa posição determinada por projeto, sem ter ligação direta com os condutores que formam o enrolamento, ou seja, nenhuma corrente irá atravessar esse condutor, formando assim um circuito aberto. Como suas extremidades estão abertas esse condutor conta com algumas particularidades e cuidados especiais em sua produção e isolamento de suas extremidades, onde esse isolamento especial da extremidade tem como função principal controlar o campo elétrico, evitando sua concentração nessa extremidade aberta do condutor de blindagem para não ocorrer ruptura do isolamento entre a bobina e o condutor de blindagem. (DEGENEFF; CROUSE, 1981)

Na Figura 22 é representado esse arranjo, apresentado um disco com n espiras e k voltas do condutor de blindagem, onde ΔV será a tensão aplicada entre esse par de discos.

Figura 22 - Representação de par de discos com blindagem eletrostática



Fonte: adaptado de Kulkarni e Khaparde (2013)

Como no par há um total de $2n$ voltas, considerando a tensão uniforme entre as voltas dos discos, onde a tensão para cada espira será dada pela divisão de ΔV por esse total de voltas. Também se assume que a tensão nas voltas do condutor de blindagem como sendo iguais.

6.2.2.1 Cálculo da capacitância série

O condutor de blindagem, isolado dos condutores que formam a bobina, é inserido nos discos, passando pelo par. Ele se encontra na mesma posição nos discos do par, de forma que o condutor do disco superior está conectado com o do disco inferior como pode ser visto também na Figura 22, onde condutor de blindagem no disco superior entre as espiras 1 e 2 está conectado com a volta entre as espiras $(2n-1)$ e $2n$ do disco inferior.

Segundo Kulkarni e Khaparde (2013), a tensão de qualquer espira do primeiro disco é obtida pela Equação 43.

$$v_t(i) = \Delta V - (i - 1) \frac{\Delta V}{2n}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (43)$$

Considerando que o condutor de blindagem apresenta k voltas no disco, a primeira volta recebe a tensão média, ou seja, $\Delta V/2$. Já a tensão para uma dada volta deste condutor pode ser representada pela Equação 44.

$$v_b(i) = \frac{\Delta V}{2} - (i - 1) \frac{\Delta V}{2n}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, k \quad (44)$$

Como o condutor foi inserido entre as espiras do disco, serão formadas novas capacitâncias entre os condutores que formam a bobina e de blindagem adjacentes, aqui representada como C_{tb} . Deste modo, considerando as Equações 43 e 44, pode-se representar a

energia armazenada no capacitor formado entre esses dois condutores adjacentes através da Equação 45.

$$W_{ds1} = \frac{1}{2} \cdot C_{tb} \left[(v_t(i) - v_b(i))^2 + (v_t(i+1) - v_b(i))^2 \right] \therefore = \frac{1}{2} \cdot C_{tb} \left[\left(\frac{\Delta V}{2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{2} - \frac{\Delta V}{2n} \right)^2 \right] \quad (45)$$

Considerando o segundo disco do par, as Equações 43 e 44 devem ser reescritas, chegando nas Equações 46 e 47 para a tensão de uma espira nesse disco do par e para a tensão de uma dada do condutor de blindagem, respectivamente.

$$v_t(i) = \Delta V - (2n - i + 1) \frac{\Delta V}{2n}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (46)$$

$$v_b(i) = \frac{\Delta V}{2} + (i - 1) \frac{\Delta V}{2n}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, k \quad (47)$$

E também, para obter a equação da energia armazenada na capacitância entre esses dois diferentes condutores neste segundo disco, com as Equações 46 e 47 é possível chegar na relação apresentada na Equação 48.

$$W_{ds2} = \frac{1}{2} \cdot C_{tb} \left[\left(\frac{-\Delta V}{2} \right)^2 + \left(-\frac{\Delta V}{2} + \frac{\Delta V}{2n} \right)^2 \right] \quad (48)$$

Além disso, ainda devido a inserção de k voltas do condutor de blindagem em discos da bobina, tem-se que para obter o número de capacitâncias entre as espiras formadas apenas pelo condutor que forma o disco, deve-se reduzir essas k voltas. Sendo assim, para um par de discos com condutor de blindagem, haverá $2(n-k-1)$ capacitâncias entre as espiras do disco.

Mais uma vez, para o somatório de energia é considerado o cálculo das energias armazenadas trazidas pelas Equações 45 e 48, bem como a energia armazenada nas capacitâncias entre as espiras do disco e também na capacitância entre dois discos adjacentes. Deste modo, a energia total armazenada em um par de discos pode ser obtida pela Equação 49.

$$W_n = k \cdot W_{ds1} + k \cdot W_{ds2} + 2 \cdot (n - k - 1) W_{st} + W_d \quad (49)$$

A partir da soma das energias, é então possível chegar na Equação 50, que por sua vez representa a capacitância série total para um par de discos.

$$C_s = 2 \cdot k \cdot C_t \left(\frac{1}{4n^2} - \frac{1}{2n} + \frac{1}{2} \right) + \frac{2(n-k-1)}{4n^2} C_t + \frac{n}{6} C_d \quad (50)$$

A Equação 50 mostra que o valor de C_s irá aumentar com o parâmetro k , ou seja, com o número de voltas de condutor de blindagem no disco. Deste modo, quando comparado a uma bobina de discos contínuos e com espiras cruzadas, a aplicação desta forma construtiva em algumas seções da bobina proporciona um grande aumento do valor da capacitância série equivalente, tendo como resultado a redução do valor de α e, por consequência, uma distribuição mais uniforme ao longo do comprimento. Nos primeiros discos, há mais voltas desse condutor, então o número de voltas vai diminuindo até chegar na chamada zona reta, onde não é mais inserido nenhum condutor de blindagem entre os condutores principais da bobina.

A manufatura de bobinas de disco contínuo com condutor de blindagem é mais simples quando se comparada a construção com espiras cruzadas. Desta forma, consiste em uma opção que possibilita a redução dos efeitos distribuição inicial de sobretensões nos enrolamentos da bobina, causados por eventos transitórios no sistema. Além disso, esse resultado é obtido de forma mais eficiente quando se comparado aos outros métodos construtivos, além de possibilitar um processo de fabricação mais rápido e simplificado.

6.3 CÁLCULOS COMPARATIVOS

A partir de todas as equações para capacitância série apresentadas anteriormente, sendo para os casos de uma bobina de discos contínuos comum, bobina de discos contínuos com espiras cruzadas e para bobina de discos contínuos com blindagem eletrostática, é possível então fazer uma comparação para verificar o desempenho de cada uma dessas formas construtivas. A partir dos dados apresentados no Quadro 5, tirada como referência nos experimentos realizados nos estudos de Bagheri, Phung e Naderi (2016), foram calculadas as capacitâncias séries equivalentes para cada uma.

Quadro 5 - Valores de referência para cálculos

Número de discos na bobina (N)	10
Número de condutores por disco (n)	10

Altura do condutor (sem isolamento) (h), em mm	8,5
Largura do condutor (sem isolamento) (w), em mm	3,15
Espessura do isolamento do condutor (de um lado) (δ_i), em mm	0,5
Espaçamento entre os discos (δ_d), em mm	4
Altura do condutor de blindagem (sem isolamento) (h_b), em mm	8,5
Largura do condutor de blindagem (sem isolamento) (w_b), em mm	1,4
Espessura do isolamento do condutor de blindagem (de um lado) (δ_b), em mm	0,5
Diâmetro médio do disco (d_m), em mm	610
Número de espaçadores (n_e), em mm	24
Altura do espaçador (h_e), em mm	2
Largura do espaçador (w_e), em mm	30

Fonte: Bagheri, Phung e Naderi (2016)

6.3.1 Bobina de discos contínuos

Para o caso de uma simples bobina de discos contínuos, para o cálculo da capacitância série equivalente, primeiramente é necessário o cálculo das capacitâncias entre dois discos próximos, através da Equação 15. Essa equação depende basicamente de parâmetros geométricos do projeto da bobina e de características do dielétrico, que podem ser encontradas no Quadro 1 e no Quadro 5. Deste modo, é obtido $C_d = 106,4 \text{ pF}$. O próximo passo é o cálculo da capacitância entre duas espiras consecutivas, apresentada anteriormente pela Equação 16, novamente com o uso dos mesmos quadros, obtém-se $C_t = 5,15 \text{ nF}$.

A partir desses valores, e sabendo que a capacitância série desse tipo de bobina pode ser calculado pela Equação 18, para os parâmetros utilizados, chega-se ao resultado de $C_s = 59,18 \text{ pF}$ para toda esta bobina hipotética. Ainda com a mesma equação, considerando $N=2$, tem-se que para um par de discos desta mesma bobina, a capacitância série é dada por $C_{se} = 267,52 \text{ pF}$.

6.3.2 Bobina de discos com espiras cruzadas

Num segundo caso, os cálculos da capacitância serão repetidos para uma bobina de discos contínuos com espiras cruzadas. A capacitância série equivalente para esse tipo de bobina, como apresentado na seção anterior, a capacitância entre os discos vai ser muito pequena quando se comparada a capacitância entre as espiras, podendo assim resumir esse cálculo pela Equação 42. Como o valor da capacitância entre duas espiras adjacentes depende apenas da geometria dos condutores e do disco, o valor de C_t será o mesmo obtido anteriormente. Por fim, considerando uma bobina com espira cruzada como a apresentada na

Figura 19, e considerando os mesmos parâmetros do Quadro 5, o cálculo da capacitância série equivalente de um par de discos será equivalente a $C_{ts} = 14,97 \text{ nF}$.

6.3.3 Bobina de disco com blindagem eletrostática

Por fim, o cálculo da capacitância série será repetido para este terceiro tipo de bobina de discos, que conta com o condutor de blindagem eletrostático. O cálculo da capacitância série neste caso fica um pouco mais extenso, pois como é inserido um condutor de blindagem entre as voltas do condutor principal do enrolamento, é necessário além de calcular também a capacitância entre esses dois condutores. Como foi considerado um condutor de mesma altura e mesma espessura de isolamento, e também considerando que o raio da bobina se mantém o mesmo (dentro de uma pequena tolerância) mesmo com a inserção desse novo condutor, o valor dessa capacitância foi considerado igual ao valor de C_t .

Pela Equação 50 já é apresentada a relação do cálculo dessa capacitância com o número de voltas do condutor de blindagem por disco, desde modo para os cálculos serão considerados $k=2$, $k=4$ e $k=6$. Com isso, quando $k=2$, o valor obtido para a capacitância série do par de discos é de $C_{ts} = 14,97 \text{ nF}$, para $k=4$ $C_{ts} = 14,97 \text{ nF}$ e para $k=6$ $C_{ts} = 28,25 \text{ nF}$.

6.4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A fim de comparar os resultados que os valores distintos da capacitância série calculados para pares de discos com diferentes formas construtivas, primeiro é necessário o cálculo da capacitância contra o aterramento C_g , através da Equação 6, onde obtém-se $C_g = 7,69 \text{ nF}$. Com todos esses valores, é finalmente possível calcular o da constante de distribuição α para cada caso através da relação apresentada na Equação 26. No Quadro 6 é apresentado um resumo de todas as capacitâncias calculadas anteriormente e do valor de α para cada um dos casos.

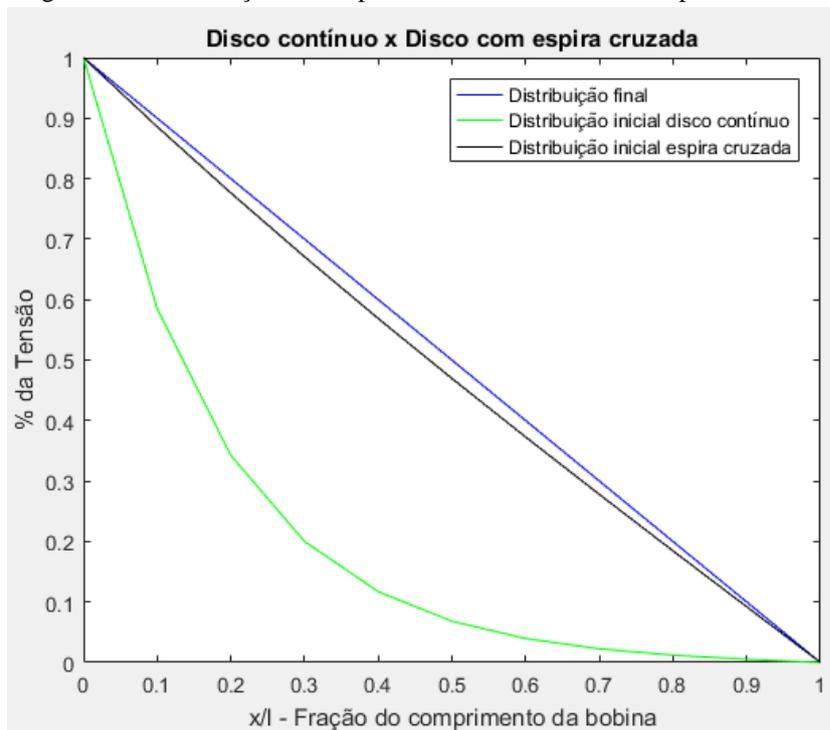
Quadro 6 - Resumo das capacitâncias calculadas

Capacitância	C_s calculado	α
Capacitância entre duas espiras adjacentes (C_i)	5,15 nF	-
Capacitância entre dois discos (C_d)	106,4 pF	-
Capacitância para um par de discos contínuos	267,52 pF	5,36
Capacitância para um par de discos com espira cruzada	14,97 nF	0,71
Capacitância para um par de discos com blindagem eletrostática k=2	9,69 nF	0,89
Capacitância para um par de discos com blindagem eletrostática k=4	18,9 nF	0,63
Capacitância para um par de discos com blindagem eletrostática k=6	28,25 nF	0,52

Fonte: elaborado pela autora

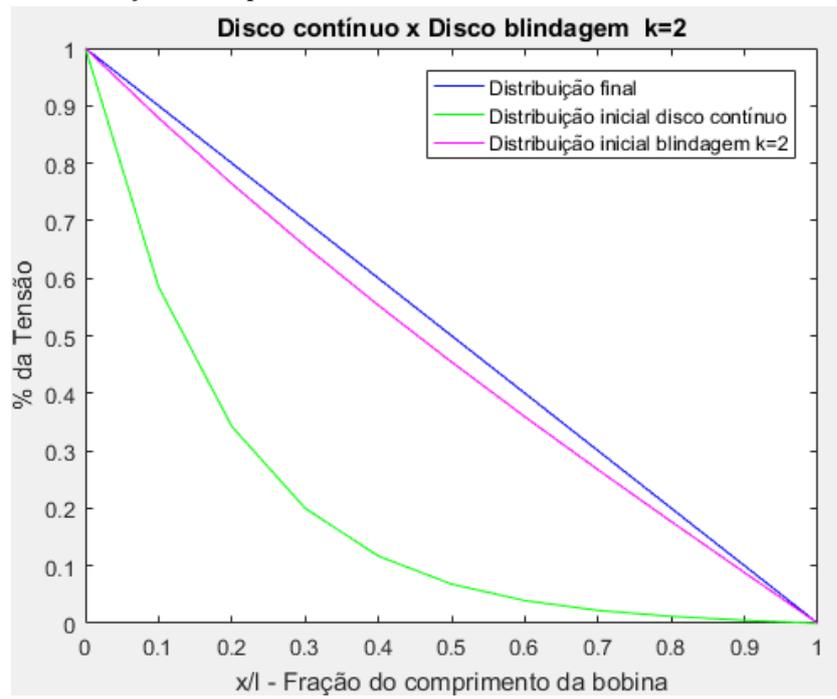
A partir disso, com o uso da ferramenta MATLAB, foram plotados gráficos que trazem as curvas de distribuição inicial para discos contínuos, a distribuição final e cada um dos outros casos para os quais se vai fazer a comparação. Nas Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26 são apresentadas as curvas para visualizar cada uma das curvas de distribuição. Para uma melhor comparação entre os casos, na Figura 27 foram plotadas todas as curvas juntas.

Figura 23 - Distribuição inicial para discos contínuo e com espiras cruzadas



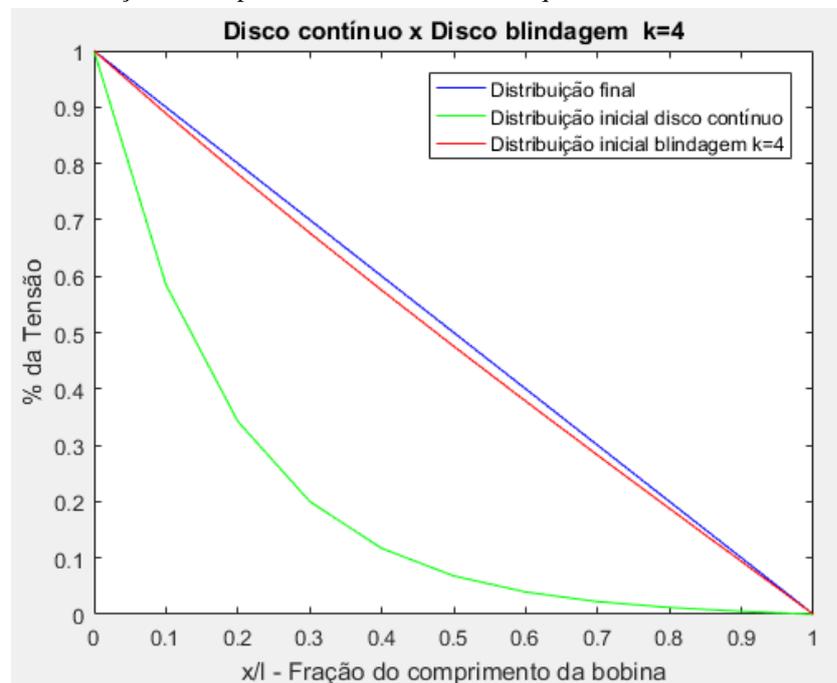
Fonte: elaborado pela autora

Figura 24 - Distribuição inicial para discos contínuo e com duas voltas de condutor de blindagem



Fonte: elaborado pela autora

Figura 25 - Distribuição inicial para discos contínuo e com quatro voltas de condutor de blindagem



Fonte: elaborado pela autora

Figura 26 - Distribuição inicial para discos contínuo e com seis voltas de condutor de blindagem

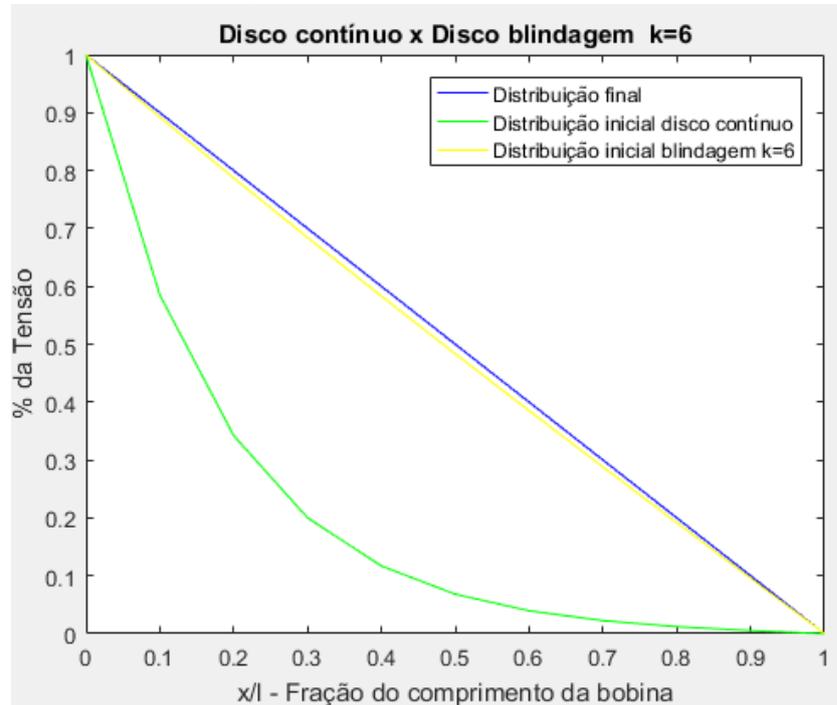
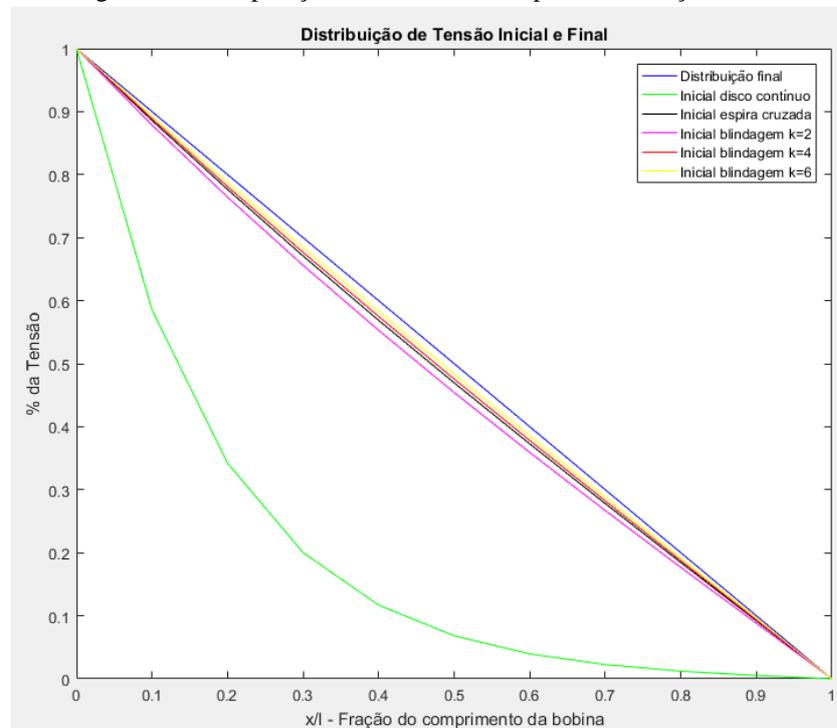


Figura 27 - Comparação de todos os casos para distribuição inicial



Pelo Quadro 6, é possível perceber o aumento da capacitância série das bobinas com espiras cruzadas e com blindagem quando comparadas a bobina comum de discos contínuos.

Como abordado nos capítulos anteriores, o objetivo de aumentar C_s era reduzir o valor de α , na tentativa de uniformizar a distribuição inicial, como também visto no mesmo quadro, foi atendido.

Nas Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26 já foi possível identificar a diferença entre a distribuição inicial para um par de discos contínuos e as demais formas. Já na Figura 27 fica mais claro o desempenho de cada uma em relação as demais. Neste gráfico, em verde tem-se a curva que representa a distribuição inicial para o par de discos contínuos, apresentando um comportamento linear, e em azul escuro a curva que representa a distribuição final, apresentando comportamento linear. Em relação ao par de discos com espiras cruzadas, se tem um resultado muito mais uniformizado, já se aproximando do comportamento linear apresentado pela curva de distribuição final, e ao se comparar com o par de discos com blindagem, ele só apresenta um valor de α menor em relação ao caso onde $k=2$. Já para o caso com blindagem eletrostática, é possível comprovar que para os demais valores de k apresentado, é apresentado um desempenho melhor, verificando-se que quanto maior o valor de k , mais a curva se aproximará da curva de distribuição final.

7 CONCLUSÃO

Para otimizar a distribuição de tensão nos enrolamentos, foram apresentadas duas diferentes formas construtivas: bobina com espiras entrelaçadas e bobinas com condutor para blindagem eletrostática. Ambas tem conceitos de manufatura bem diferentes, porém o objetivo é o mesmo: auxiliar no aumento do valor da capacitância série equivalente, tendo como consequência a diminuição de α , o que torna a distribuição de tensão mais uniforme nos primeiros discos da bobina.

Ao se comparar essas duas formas construtivas, ambas apresentaram uma grande melhora no cálculo de α . Além disso, observa-se que a utilização de espiras entrelaçadas apresentou um resultado melhor apenas quando se comparado a inserção de duas voltas ($k=2$) do condutor de blindagem eletrostática. Conforme o valor de k foi sendo aumentado, o segundo passou a ter um desempenho melhor. Além disso, ao se comparar o processo de manufatura, a produção de uma bobina com espiras entrelaçadas é bem complexa, podendo ter impactos no *lead time* desta etapa de processo da linha de fabricação de transformadores. Deste modo, como alternativa para elevar o valor de C_s , a utilização de blindagem condutora se mostra com uma melhor opção que, além de também reduzir bastante o valor de α , conta com um processo de manufatura mais simples.

REFERÊNCIAS

ABB. **Transformer Handbook**. Zurique, Suíça: ABB 2004.

AREVA T&D. **Power Transformers Expertise**. Vol. 2. Paris, França: Areva T&D, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão. Parte 1: definições gerais e requisitos de ensaio. ABNT NBR IEC 60060-1**. São Paulo: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Coordenação do isolamento – Procedimento. ABNT NBR 6939**. São Paulo: ABNT, 2018.

BAGHERI, M.; HEKMATI, A.; HEIDARZADEH, R.; NADERI, M. Impulse Voltage Distribution in Intershiield Disk Winding VS Interleaved and Continuous Disk Winding in Power Transformer. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY, 2, 2008, Johor Baharu, Malásia. **Anais [...]**. Johor Baharu, Malaysia: 2008.

BAGHERI, M.; PHUNG B. T.; NADERI, M. S. Impulse Voltage Distribution and Frequency Response of Intershiield Windings. **IEEE Eleltrical Insulation Magazine**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 32-40, set. 2016.

BECHARA, R. **Análise de Falhas de Transformadores de Potência**. 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2010.

CAGIDO, M. C. **Impulso Atmosférico em Laboratório – Aplicação, Medição e Interpretação**. 2014. 133 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5ª ed. Nova Iorque, EUA: The McGraw-Hill Companies Inc., 2012.

DEGENEFF, R. C.; CROUSE, J. C. **Electrostatic shielding of nonsequential disc windings in transformers**. United State Patent, Patente nº 4.243.966. Jan. 1981.

HINTON, R. A.; DOUGHTY, K. W.; KENNEDY, W. N. **Electrostatic shielding of disk winding**. United State Patent, Patente nº 4.042.900. Ago. 1977.

KARSAI, K. **Large Power Transformer (Studies in electrical and electronic engineering; 25)**. Amsterdã, Países Baixos: Elsevier Science Publishers, 1987.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer Engineering: Design, Technology and Diagnostics**. 2ª ed. Londres, Reino Unido: Taylor & Francis, 2013.

OHTA, K.; KURITA, K.; MORITA, S. **Shielded conductor for disk windings of inductive device**. United State Patent, Patente nº 3.820.048. Jun. 1974.

PENA, M. C. M. **Falhas em transformadores de potência: uma contribuição para análise, definições, causas e soluções.** 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, 2002.

RIES, W. **Transformadores – Fundamentos para projetos e cálculo.** 1ª ed. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2007.

SADIKU, M. **Elementos de Eletromagnetismo.** 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

WINDERS, J. **Power Transformers Principles and Applications.** Nova Iorque, EUA: Marcel Dekker Inc., 2002.