



XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

FI/GTM/04
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XIII

GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO CURTO-CIRCUITO EM TRANSFORMADORES COM ENROLAMENTOS EM LÂMINAS

Luiz Fernando de Oliveira(*)
WEG

Álvaro Portillo
WEG

RESUMO

Este trabalho apresenta um procedimento que possibilita a modelagem de enrolamentos em lâmina em aplicativos já consolidados para cálculo da distribuição de corrente em condutores retangulares clássicos, utilizando divisões ao longo do sentido axial das lâminas. Da mesma forma, são apresentados problemas típicos na interpretação dos resultados das perdas adicionais, esforços de curto-circuito e cálculo da impedância. Quando aplicável, simulações ou ensaios são utilizadas para validar o procedimento.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, Resistência ao curto-circuito, Enrolamento em lâmina.

1.0 - INTRODUÇÃO

Algumas vantagens da utilização de enrolamentos em lâmina são amplamente conhecidas e aplicadas atualmente na fabricação de transformadores. Contudo, a utilização deste condutor distinto dos clássicos condutores retangulares implica em fenômenos peculiares e algumas vezes de difícil predição, necessitando de análise adicional, tais como: cálculo da distribuição de corrente no interior do condutor, cálculo das perdas adicionais, verificação dos esforços de curto-circuito e o cálculo da impedância. Este trabalho tem por objetivo sugerir critérios básicos para análise de projeto de transformadores com enrolamentos em lâmina.

2.0 - MODELO DE ANÁLISE DOS ENROLAMENTOS EM LÂMINA

Enrolamentos em lâmina utilizam condutores com geometria retangular que apresentam a relação $h \gg e$ (altura muito maior que espessura), esta característica implica em uma distribuição de corrente não uniforme ao longo da seção transversal do condutor [1]. Este fenômeno exige uma análise diferente daquela aplicada a enrolamentos convencionais com fio retangular nos quais a densidade de corrente é uniforme ao longo de todo o enrolamento.

A Figura 1 exibe os componentes básicos de um enrolamento em lâmina: as barras coletoras que levam a corrente até as espiras, os dutos de ventilação que separam as espiras em blocos e as espiras que são isoladas entre si por um filme isolante geralmente pré-impregnado. O efeito das barras coletoras, que não coincide com a geometria tipicamente cilíndrica do enrolamento, não será considerado neste trabalho.

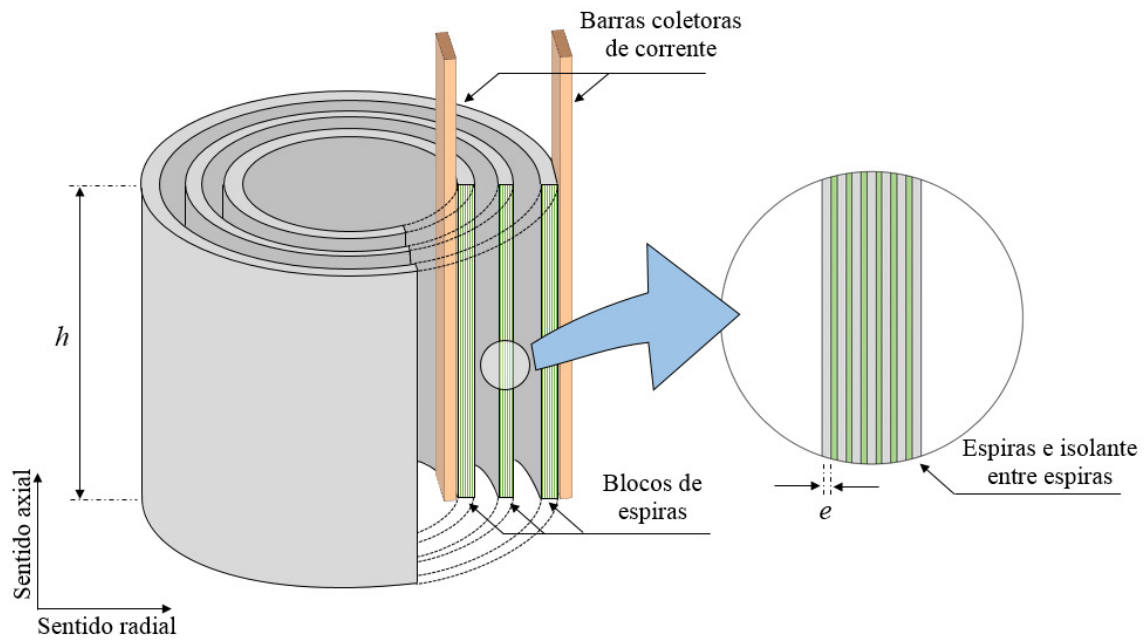


Figura 1 – Lâmina condutora

Lâminas condutoras possuem espessuras típicas entre $0,3$ e $2,5\text{mm}$, como este valor é inferior à profundidade de penetração de campo do alumínio e do cobre supõe-se que não há variação significativa da densidade de corrente ao longo da espessura da lâmina [2], ou seja, no sentido radial. Portanto, os esforços serão concentrados em calcular a distribuição de corrente ao longo da altura da lâmina, ou seja, no sentido axial.

Considerando que a corrente é injetada na espira interna do enrolamento e segue circulando até a espira mais externa, a seção transversal disponível para passagem da corrente é constante ao longo de todo o trajeto. Devido ao formato retangular da lâmina, já se espera uma distribuição clássica à 60Hz onde a corrente se concentra na extremidade do condutor, contudo, o campo de dispersão imposto pela corrente de carga pode alterar esta distribuição, como mostrado na Figura 2. Para condutores retangulares de pequenas dimensões, assume-se que o campo é constante ao longo da seção transversal, obviamente, pelos motivos citados, não se pode utilizar esta consideração para a lâmina.

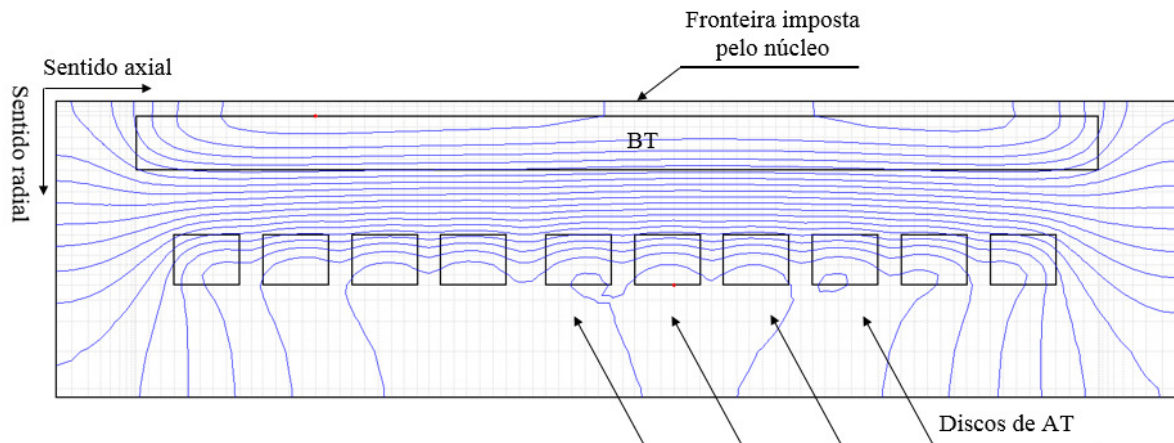


Figura 2 – Linhas de campo impostas pela corrente de carga

A técnica utilizada para modelar adequadamente a lâmina consiste em dividi-la em n seções (elementos) no sentido axial, conforme sugerido por [3]. Considera-se cada elemento ligado em paralelo com seus vizinhos no sentido axial. Ao circular, a corrente dispõe da seção transversal total da lâmina, porém com n caminhos diferentes que podem possuir distintas reatâncias e portanto, pode se distribuir de tal forma que a densidade de corrente seja diferente em cada elemento.

Como observado na Figura 2, fica evidente que o campo de dispersão incide de forma diferente em cada espira do enrolamento de baixa tensão, de acordo com a posição radial da mesma e com possíveis assimetrias ou irregularidades da geometria. Deste fato surge a necessidade de dividir o enrolamento em diferentes regiões radiais, para as quais será usado o índice m . Pode-se dividir o enrolamento, fazendo com que m seja igual ao

número de espiras, porém os recursos computacionais nesta condição são elevados, especialmente para enrolamentos com muitas espiras. Uma alternativa para manter a precisão e reduzir os recursos computacionais simultaneamente é fazer com que m seja igual ao número de blocos de espiras. Estes m blocos, cada um com n seções axiais, são ligados em série. Ao ingressar no enrolamentos, a corrente se distribui inicialmente entre as seções do primeiro bloco, ao deixar este bloco pode se distribuir de forma distinta no próximo e assim sucessivamente. A Figura 3 resume a divisão utilizada nas simulações juntamente com o diagrama de ligação onde os n elementos são ligados em paralelo e os m blocos de espiras são ligados em série. Este esquema também foi sugerido por [4].

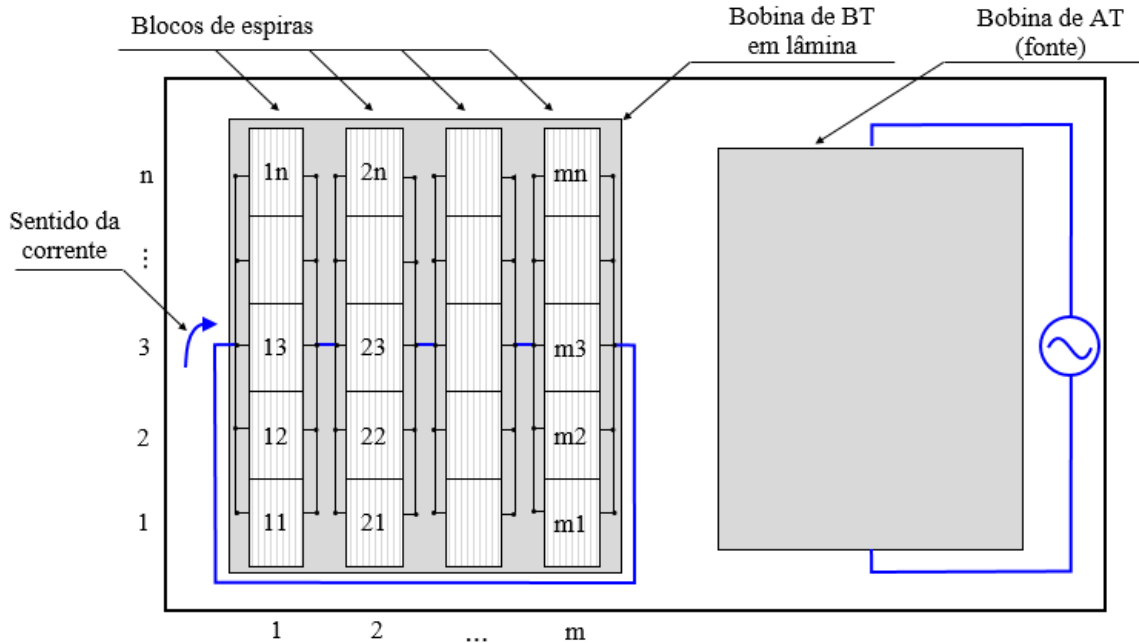


Figura 3 – Esquema de divisão e ligação utilizado para modelar a lâmina

Ainda analisando as linhas de campo da Figura 2, vale notar que as extremidades das bobinas estão expostas às componentes radiais não uniformes de campo magnético, enquanto que a região central das bobinas recebe campo predominantemente axial e uniforme. Para poupar ainda mais recursos computacionais, a região das extremidades (também chamadas de cabeceiras) das bobinas pode ser dividida em elementos menores, aumentando a precisão justamente onde é mais necessário.

3.0 - DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE NO INTERIOR DO CONDUTOR

Utilizando a metodologia definida no item 2.0 um transformador a seco foi modelado de duas maneiras diferentes. Para ambos os casos, foi considerado $m = 2$ porque este transformador especificamente possui apenas um duto de ventilação entre as espiras de BT e $n = 1$ para o caso (a) e $n = 20$ para o caso (b). A Figura 4 exibe as linhas de campo magnético para os casos analisados. Observa-se em (a) que há componentes radiais de campo na parte central das lâminas, o que já não ocorre em (b) devido às 20 divisões. Outra alteração evidente é nas linhas de campo na região das cabeceiras devido à técnica de aumentar as divisões nesta região.

Como o número de divisões n afeta a distribuição das linhas de campo, pode-se esperar também uma distribuição de corrente distinta ao longo do sentido axial da lâmina. Tal efeito se confirma ao observar na Figura 5 o perfil de densidade de corrente relativa (à densidade nominal) que é diferente para cada valor de m , ou seja, cada bloco de espiras. Para melhorar a visualização a escala vertical da Figura 5 foi limitada em 3, porém foram encontrados valores mais elevados.

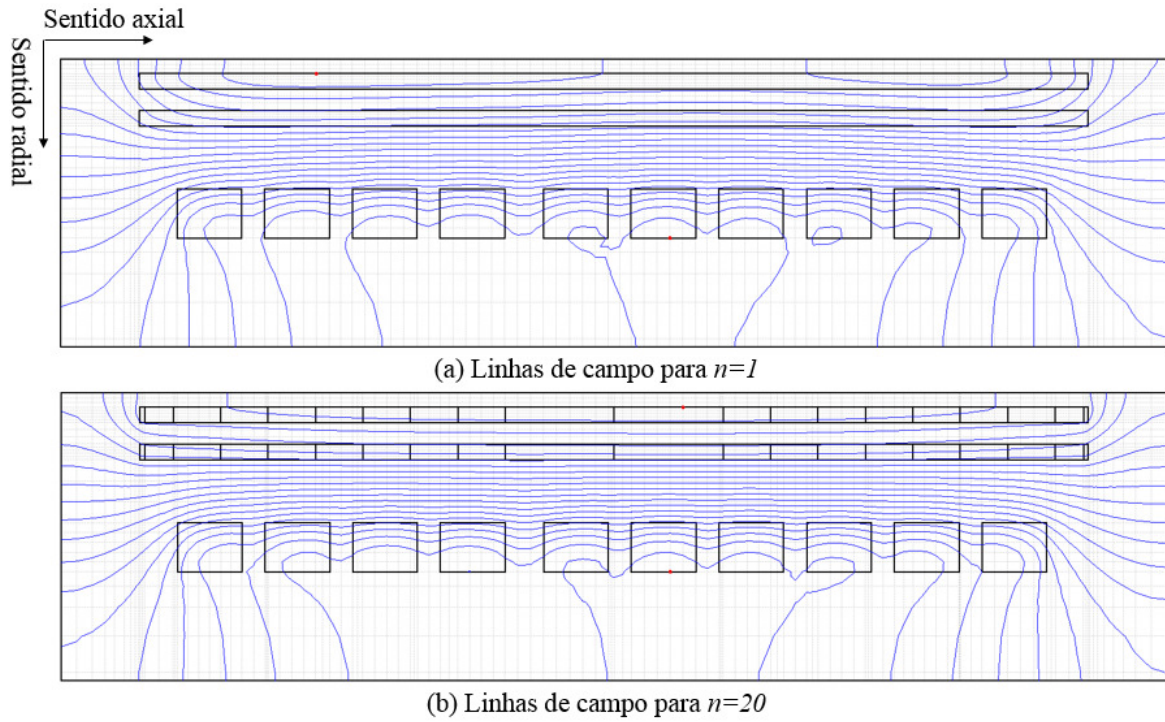


Figura 4 – Disposição do campo magnético para as situações analisadas

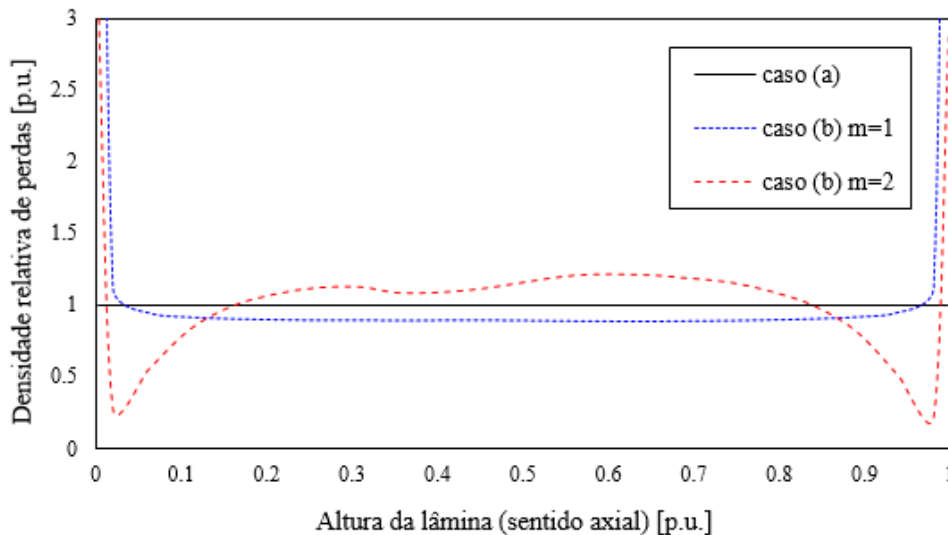


Figura 5 – Distribuição de corrente nos elementos para $m=1$ e $m=2$

4.0 - PERDAS RESISTIVAS E ADICIONAIS

Para calcular as perdas adicionais nos condutores dos enrolamentos é necessário conhecer as componentes de campo axial e radial. As componentes axiais de campo magnético incidem sobre os condutores de forma que quanto maior for a dimensão radial destes, maior será a perda adicional. De forma análoga, a perda adicional que as componentes radiais de campo vão gerar dependem da dimensão axial dos condutores. Pode ser provado que as dimensões dos condutores alteram dramaticamente as perdas adicionais.

Observando o caso (b) na Figura 4, fica claro que as componentes radiais de campo são muito reduzidas de forma que a dimensão axial dos elementos não interfere no valor das perdas adicionais, também por este motivo se pode utilizar elementos maiores na parte central das bobinas. Por sua vez, as componentes axiais de campo estão presentes em toda a extensão da bobina de BT, mas como as lâminas possuem espessuras (dimensão radial) tipicamente pequenas, espera-se que as perdas adicionais devido ao campo axial também sejam muito baixas.

Em posse da distribuição de corrente nos diversos ($m \times n$) elementos, calcular as perdas resistivas e adicionais torna-se simples. Como a distribuição de corrente no interior da lâmina foi calculada em um passo anterior e a informação agora reside no valor de corrente de cada um dos elementos, as perdas adicionais causadas pela

distribuição axial da corrente serão contabilizadas como perda resistiva. A Figura 6 exibe o perfil de densidade de perda relativa (à total) ao longo das lâminas do caso (b) em ambos os blocos ($m=1$ e $m=2$). Nas extremidades a densidade de perda chega à superar muito a escala atingindo valores de 11 vezes a densidade nominal, mas esta foi restringida à 3 para preservar a visibilidade da região central.

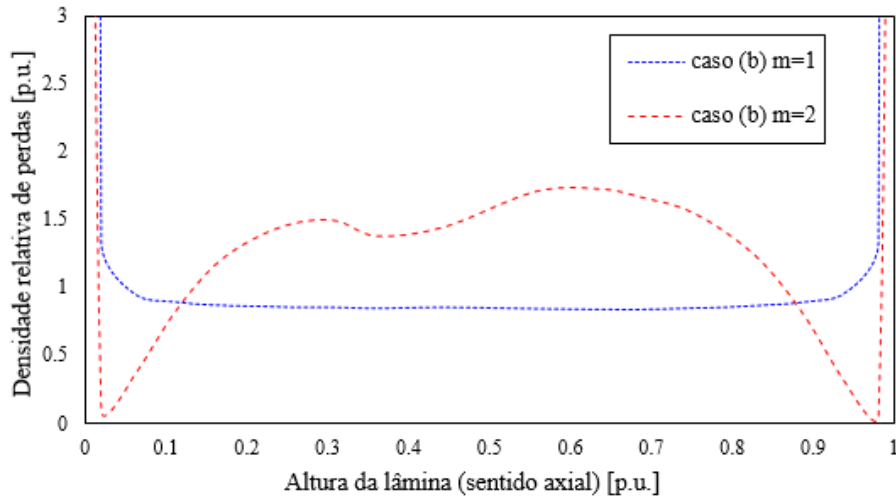


Figura 6 – Distribuição de corrente nos elementos para $m=1$ e $m=2$

5.0 - ESFORÇOS DE CURTO-CIRCUITO

As elevadas correntes de curto-circuito que se estabelecem durante uma falta no sistema produzem forças que atuam sobre as espiras dos enrolamentos. Para calcular as forças é necessário conhecer a distribuição de corrente e as componentes de campo magnético em cada condutor, para tal utiliza-se as técnicas estabelecidas nos itens 2.0 e 3.0. Assim como as componentes de campo magnético, as forças resultantes atuam no sentido radial e axial gerando esforços e tensões internas também nestes sentidos [5], como exibido na Figura 7. A condição principal para que o transformador suporte tais esforços é que as forças provenientes do evento de curto-circuito não provoquem a perda de estabilidade mecânica dos enrolamentos.

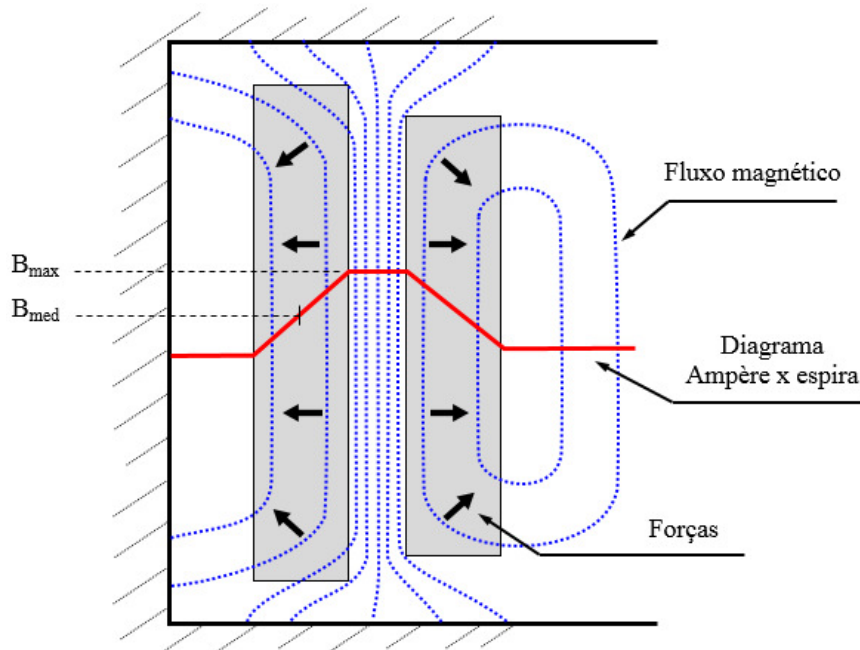


Figura 7 – Direção das forças exercidas devido às correntes de curto-circuito em um transformador convencional

5.1 Esforços axiais

Os diversos esforços axiais são oriundos das forças geradas pelas componentes radiais de campo magnético (tais componentes podem ser observadas na Figura 2). Em transformadores convencionais, cuja os enrolamentos são confeccionados com fios retangulares, os esforços axiais tendem a danificar os próprios condutores entre separadores radiais ou a isolação entre estes condutores, causar a perda de estabilidade em alguns tipos de

enrolamentos ou ainda danificar os elementos de prensagem. Possíveis assimetrias causadas durante a produção do transformador que façam com que os enrolamentos não fiquem perfeitamente centralizados no sentido axial fazem com que as componentes radiais de campo se intensifiquem e as forças de reação para a armadura, que afetam os elementos de prensagem, aumentem demasiadamente. Na maioria dos casos quando um destes efeitos ocorre durante um curto-circuito as consequências são destrutivas.

Considerando enrolamentos em lâminas, foi constatado que as componentes radiais de campo magnético são muito reduzidas e portanto não geram forças axiais consideráveis como as exibidas na Figura 7. Mesmo quando há assimetria na montagem dos enrolamentos a corrente de distribui de tal forma que as componentes radiais de campo continuam sendo ínfimas. Assim, a força de reação para as vigas de sustentação é praticamente nula quando se utiliza enrolamentos em lâmina e robustos calços de prensagem podem ser dispensados.

5.2 Esforços radiais

Como pode ser observado nas Figura 2 e Figura 7, as componentes axiais de campo magnético são plenas tanto no enrolamento de baixa tensão em lâmina quanto no enrolamento de alta tensão. No enrolamento de BT, as forças radiais tendem a comprimir cada bloco de espiras contra o bloco mais interno e por fim contra o núcleo, fenômeno que será analisado em seguida. Já no enrolamento externo, geralmente de AT, as forças tendem a exercer tração pura no sentido de expandir o enrolamento no sentido radial, contudo, este não é o foco deste trabalho.

Para verificar se o enrolamento em lâmina poderá suportar os esforços de curto-circuito é necessário conhecer dois parâmetros: o esforço de compressão resultante (σ) das forças radiais incidentes e o esforço crítico (σ_c) que leva em conta o material e as características construtivas da bobina. Para que o transformador não sofra deformações plásticas a compressão não deve ultrapassar o valor crítico, ou seja, deve-se satisfazer: $\sigma < \sigma_c$.

As forças podem ser calculadas utilizando (1), extraída de [6], onde NI é o ampere-espira do enrolamento e B é a densidade de fluxo média no bloco de espiras considerado, ressaltado na Figura 7. Para calcular B utiliza-se (2) onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo e h [m] é a altura do enrolamento, no caso, da lâmina condutora. Substituindo (2) em (1), chega-se a equação resumida (3). Então, calcula-se a compressão resultante σ utilizando (4), sendo r_m [m] o raio médio do bloco de espiras, N_{cond} o número de condutores e S_{cond} [m²] a seção transversal dos condutores. Finalmente, calcula-se a máxima compressão admissível σ_c utilizando (5), onde $R_{p0,2}$ [N/mm²] é a tensão de escoamento típica para o material da lâmina.

$$F \left[\frac{N}{m} \right] = NI B \quad (1)$$

$$B[T] = \mu_0 \frac{1 NI}{2 h} \quad (2)$$

$$F \left[\frac{N}{m} \right] = \frac{\mu_0 (NI)^2}{2 h} \quad (3)$$

$$\sigma \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \frac{F r_m}{2 N_{cond} S_{cond}} \quad (4)$$

$$\sigma_c \left[\frac{N}{mm^2} \right] = 0,35 R_{p0,2} \quad (5)$$

Aplicando tal análise a um transformador com as características contidas na Tabela 1:

Tabela 1 – Características transformador avaliado

Potência	1000 kVA	Espessura da lâmina de BT	1,2 mm
Impedância	5,44 %	Diâmetro médio primeiro bloco	295 mm
Fator de assimetria	1,8 p.u.	Diâmetro médio segundo bloco	348 mm
Corrente de BT	1519,3 A	Altura da lâmina	1060 mm
Número de espiras de BT	7 + 7	$R_{p0,2}$ do alumínio	35 N/mm ²

Obtém-se o valor do esforço de compressão para o primeiro bloco $\sigma_1 = 2,65 \text{ N/mm}^2$ e para o segundo bloco de espiras o valor é de $\sigma_2 = 7,95 \text{ N/mm}^2$. Sendo o valor crítico de compressão $\sigma_c = 12,25 \text{ N/mm}^2$. Analisando o texto na norma IEC 60076-5:2006 [7]:

“No caso de duas camadas iguais, o esforço de compressão médio é igual a média aritmética dos respectivos esforços. No caso de três ou mais camadas, o esforço citado é assumido como 1,1 vezes a média aritmética dos esforços calculados para cada camada.”

Obtém-se o esforço médio $\sigma = 5,3 \text{ N/mm}^2$ que é inferior ao limite de $12,25 \text{ N/mm}^2$. O transformador deverá portanto suportar os esforços de curto-circuito sem sofrer deformações no enrolamento de BT em lâmina. Tal transformador foi fabricado e submetido ao teste de suportabilidade ao curto-circuito na Universidad Nacional de Río Cuarto na Argentina sem qualquer deformação nos enrolamentos ou alteração significativa na impedância.

6.0 - CÁLCULO DA REATÂNCIA INDUTIVA

Em posse da distribuição do campo magnético que pode ser obtida utilizando métodos numéricos como o de Rabins ou Roth ou ainda o método dos elementos finitos torna-se simples calcular a energia E dispersa pelo campo magnético. Dessa forma, utilizando (6) calcula-se a reatância indutiva relativa a potência nominal P [VA] considerada para transformadores trifásicos, onde f [Hz] é a frequência de operação da rede elétrica em que o transformador será instalado.

$$X[p.u.] = 3 \frac{2\pi f E}{P} \quad (6)$$

Mesmo no cálculo da impedância, a utilização de enrolamentos em lâminas pode implicar em considerações particulares, como o caso dos transformadores destinados a alimentar retificadores multi-pulsos, cujo a construção típica incorpora vários grupos de enrolamentos como se fossem diferentes andares. A Figura 8 exibe a geometria clássica de um transformador para retificador 12 pulsos cujo enrolamento de AT é composto de 18 discos divididos em dois enrolamento com 9 discos cada, ligados em paralelo.

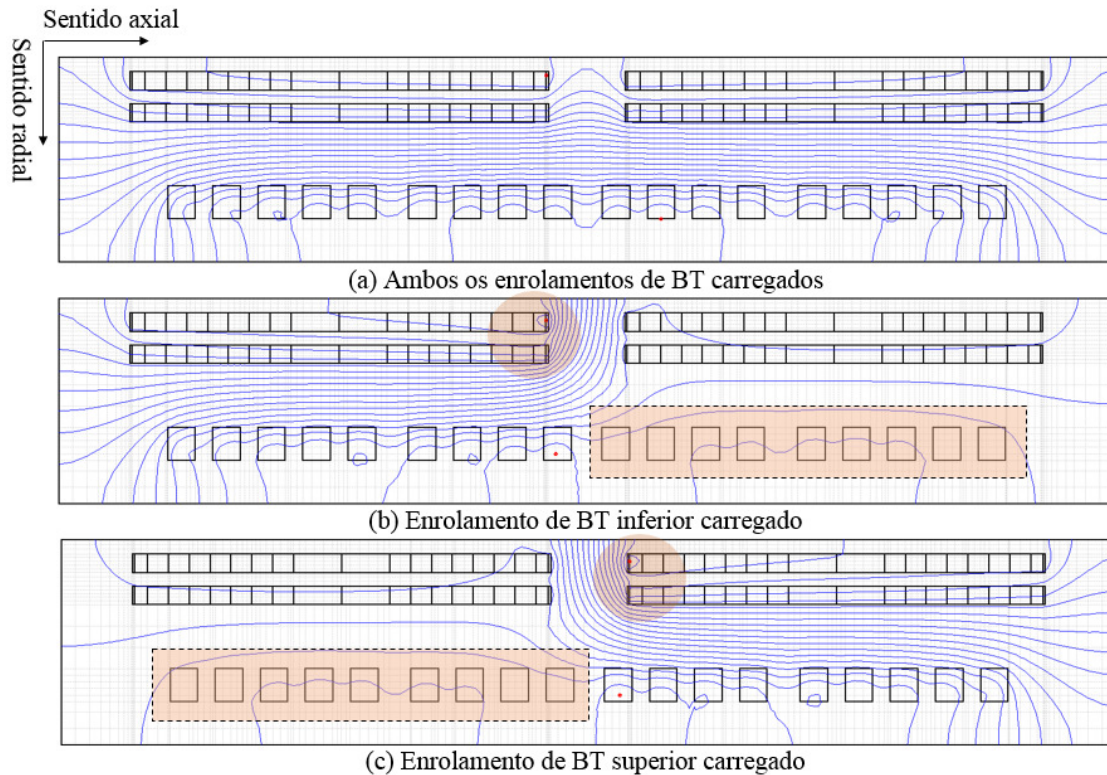


Figura 8 – Distribuição de campo típica de um transformador 12 pulsos

A impedância calculada para o caso (a) é de 5,78% na base de 500kVA. Para o caso (b) onde apenas o enrolamento inferior encontra-se carregado há também corrente induzida no enrolamento de AT superior (destacado pelo retângulo), pois permanece conectado ao enrolamento de AT inferior, este efeito faz com que haja um aumento da densidade de corrente na cabeceira do enrolamento de BT (destacado pelo círculo) e termina aumentando a altura magnética equivalente do conjunto, resultando em uma impedância de 4,8% na base de 250kVA. O efeito análogo, porém geometricamente inverso acontece para o caso (c). O importante é ressaltar que essa redução na impedância dos casos (b) e (c) não seria tão severa se os enrolamentos fossem fabricados com fios retangulares.

Estes resultados foram verificados e confirmados com base nos ensaios de rotina realizados em um transformador real fabricado pela WEG. Verificou-se também que os resultados são mais precisos quando o enrolamento é dividido radialmente em m blocos de espiras.

7.0 - CONCLUSÃO

Foi verificada a eficácia da técnica citada pelas referências que consiste em dividir o enrolamento em lâmina em diversas seções axiais para estudo e projeto de transformadores, resultando em valores convergentes com os verificados em medições de transformadores reais. A técnica de divisão do enrolamento em múltiplas seções radiais trouxe comportamentos que ainda não haviam sido observados nas referências citadas e que trouxeram ainda mais precisão ao método.

A análise da distribuição do campo magnético não é viável de forma puramente analítica justificando o uso de métodos computacionais. Uma vez que a distribuição de corrente tenha sido calculada de forma precisa, características como perdas adicionais, esforços de curto-circuito e impedância puderam ser calculados com precisão.

Justificou-se com clareza o já conhecido efeito da ausência de forças axiais em transformadores que possuem enrolamentos de BT em lâmina. Conclui-se que calços de prensagem destinados exclusivamente para este fim podem ser dispensados.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Mullineux, J. R. Reed e I. J. Whyte, "Current Distribution in Sheet- and Foil-Wound Transformer," *PROC. IEE*, pp. 127-129, 1 Janeiro 1969.
- [2] M. El-Missiry, "Current Distribution and Leakage Impedance of Various Types of Foil-Wound Transformers," *PROC. IEE*, pp. 987-992, Outubro 1978.
- [3] M. El-Missiry, "Calculation of Current Distribution and Optimum Dimensions of Foil-Wound Air-Cored Reactors," *PROC. IEE*, pp. 1073-1077, Novembro 1977.
- [4] P. Evans e K. Augla, "High-Frequency Losses in Multiturn Foil-Wound Air-Cored Inductors," *IEE Proceedings*, pp. 31-36, Janeiro 1987.
- [5] W. McNutt, W. Johnson, R. Nelson e R. Ayers, "Power Transformer Short-Circuit Strength - Requirements, Design and Demonstration," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 1955-1969, Novembro/Dezembro 1970.
- [6] P. Bailey, W. Dietrich e W. Evenepoel, "Calculation of Short-Circuit Forces in Transformers," *ELECTRA*, pp. 29-67, 1978.
- [7] IEC - International Electrotechnical Commission, *Power Transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit*, Geneva: IEC, 2006.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Luiz Fernando de Oliveira nasceu em Blumenau-SC, Brasil em 1988. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Regional de Blumenau (FURB) em 2013. Trabalha na WEG T&D desde 2007, onde passou pelas áreas de produção e técnica, entre 2009 e 2013 trabalhou diretamente com cálculo e dimensionamento de transformadores e desde 2013 exerce atividades no departamento de pesquisa e desenvolvimento com foco em pesquisa, simulações numéricas e desenvolvimento de softwares para engenharia.



Álvaro Portillo nasceu no Uruguai em 1954. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidad de la República del Uruguay em 1979. Trabalhou na companhia elétrica uruguaia (UTE) até 1985 em atividades relacionadas a aprovação, instalação e manutenção de transformadores. De 1985 a 1999 trabalhou na MAK AS (fabricante uruguaio de transformadores, até 20MVA, 72,5kV), de 2000 a 2007 como consultor na TRAFIO (fabricante brasileiro de transformadores, até 500MVA, 500kV). É professor na Universidad de la República del Uruguay desde 1977, sendo atualmente responsável pelos cursos de pós-graduação em transformadores (especificação, projeto, operação, manutenção, etc.), é também membro sênior da IEEE e membro do Cigré, tem participação ativa em vários grupos de trabalho dessas entidades.