

# MÉTODO ANALÍTICO PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA CONSIDERANDO DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME DO CAMPO MAGNÉTICO

1<sup>st</sup> Mateus Paiva Stochero  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
 Santa Maria, Brasil  
 mateus.stochero@acad.ufsm.br

2<sup>nd</sup> Leonardo Hautrive Medeiros  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
 Santa Maria, Brasil  
 leohm.29@gmail.com

3<sup>rd</sup> Micael Márcio Oliveira  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
 Santa Maria, Brasil  
 oliveira.micael@acad.ufsm.br

4<sup>st</sup> Patricia Tomalak Liss  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
 Santa Maria, Brasil  
 patricia.liss@acad.ufsm.br

5<sup>st</sup> Vitor Cristiano Bender  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
 Santa Maria, Brasil  
 vitor.bender@ufsm.br

6<sup>st</sup> Tiago Bandeira Marchesan  
*Instituto de Redes Inteligentes*  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
 Santa Maria, Brasil  
 tiago@ufsm.br

**Resumo**—Este trabalho tem como objetivo a apresentação de um método analítico destinado à determinação da distribuição das perdas em transformadores, levando em consideração a presença de uma distribuição não uniforme do campo magnético. A pesquisa propõe uma equação capaz de descrever, de maneira abrangente, o comportamento do campo magnético no interior do transformador, com ênfase nas regiões próximas aos enrolamentos, englobando tanto as suas componentes axiais quanto radiais. O estudo foi conduzido em paralelo com o método de Rabins e aplicado a um transformador em análise no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Ao final deste documento, é apresentada uma comparação entre os valores das perdas axiais e radiais obtidos mediante a aplicação do método de Rabins e da metodologia desenvolvida.

**Index Terms**—Método Analítico, Método de Rabins, Perdas Não Uniforme, Transformador.

## I. INTRODUÇÃO

Os transformadores desempenham um papel fundamental no contexto do sistema elétrico global. Seu desenvolvimento possibilitou a descentralização do fornecimento de energia elétrica, permitindo a distância entre as fontes de energia e as cargas, o que resultou na maior acessibilidade a eletricidade para um público mais amplo.

Ao longo dos anos, inúmeras pesquisas relacionadas aos transformadores foram conduzidas, visando aprimorar a confiabilidade e a durabilidade desses dispositivos. Nessas investigações, foi observado que a avaliação das perdas associadas ao fluxo disperso desempenham um papel de extrema relevância no processo de projeto ou na avaliação da capacidade de operação de um transformador ao longo do tempo, minimizando os riscos a sua integridade [1].

A análise do comportamento do fluxo disperso nos enrolamentos do transformador permite uma avaliação dos pontos críticos na estrutura. Estes pontos críticos, presentes em um transformador, têm o potencial de elevar a temperatura e acelerar o envelhecimento do óleo e papel isolante e causar

a degradação dos materiais isolantes entre as bobinas. O aumento da temperatura é um dos principais fatores limitantes da vida útil do transformador. A temperatura está intrinsecamente relacionada a distribuição das perdas nos enrolamentos. Portanto, é de extrema importância considerar com precisão geométrica os pontos críticos durante o projeto do transformador e monitorar rigorosamente os níveis de temperatura alcançados. Isso, é essencial para garantir o funcionamento adequado do transformador ao longo de sua vida útil operacional [2].

No contexto das ideias anteriormente apresentadas, o presente estudo propõe o desenvolvimento de um modelo matemático com a capacidade de estimar, de maneira tanto quantitativa quanto geométrica, a manifestação de pontos quentes em um transformador sob análise. Esta previsão é alcançada por meio da avaliação das perdas parasitas, considerando uma distribuição não uniforme do campo magnético. Ao identificar os locais de ocorrência dos pontos quentes e quantificar as perdas a eles associadas, a intenção é inferir as regiões no interior do transformador que apresentam uma maior degradação dos materiais isolantes entre as bobinas. Adicionalmente, busca-se garantir a adequada manutenção do sistema de isolamento, uma vez que, como mencionado anteriormente, o aumento da temperatura em um transformador tende a reduzir sua vida útil, acelerando o processo de envelhecimento do óleo isolante e a degradação dos materiais isolantes entre as bobinas.

## II. MÉTODO DE RABINS

Um dos primeiros estudos a cerca do fluxo disperso nos enrolamentos dos transformadores e suas consequências foi desenvolvido por Rabins em 1956. Rabins propôs a divisão da janela do transformador em três regiões, conforme apresentado na Figura 1 [3].

Enquanto as regiões 1 e 3 foram consideradas envoltas por ar, a região 2 detém o enrolamento estudado. Rabins propôs

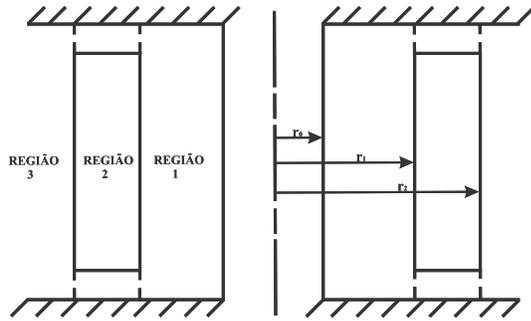


Figura 1. Regiões Método de Rabins.

que a contribuição de cada região no campo magnético total pode ser descrita por (1), (2) e (3), respectivamente.

$$A^1 = \frac{\mu_0 J_o (r_2 - r_1)}{2} r + \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_n}{m^2} [C_n I_1(x) + D_n K_1(x)] \cos(mz) \quad (1)$$

$$A^2 = \mu_0 J_o \left( \frac{r_2 r}{2} - \frac{r_1^3}{6r} - \frac{r^2}{3} \right) + \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_n}{m^2} [E_n I_1(x) + F_n K_1(x) - \frac{\pi}{2} L_1(x)] \cos(mz) \quad (2)$$

$$A^3 = \frac{\mu_0 J_o (r_2^3 - r_1^3)}{6r} + \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_n}{m^2} G_n K_1(x) \cos(mz) \quad (3)$$

Onde:

$$m = \frac{n\pi}{L} \quad (4)$$

Sendo L a altura da janela do transformador.

$$x = mr \quad (5)$$

$$C_n = \int_{x_1}^{x_2} t K_1(t) dt \quad (6)$$

$$E_n = \int_0^{x_2} t K_1(t) dt \quad (7)$$

$$G_n = D_n + \int_{x_1}^{x_2} t I_1(t) dt \quad (8)$$

$$D_n = \frac{I_0(x_c)}{K_0(x_c)} C_n \quad (9)$$

$$F_n = D_n - \int_0^{x_1} t I_1(t) dt \quad (10)$$

As funções  $I_n(x)$  e  $K_n(x)$  são funções remodeladas de Bessel de primeiro e segundo tipo e enésima ordem. Já a função  $L_n(x)$  apresenta-se como a equação modificada de Struve de enésima ordem.

O método de Rabins apresenta resultados extremamente verossímeis, entretanto há uma notória complexidade neste método, sendo utilizado apenas a partir de algoritmos e rotinas de execução. O método analítico proposto no presente trabalho, visa uma menor complexidade tornando-o sua solução mais acessível com assertividade satisfatória.

### III. MÉTODO PROPOSTO

Ao considerar a análise do comportamento do campo magnético disperso nos enrolamentos do transformador, deve-se lançar mão de algumas predefinições específicas. Uma vez que o fluxo disperso se divide em duas componentes distintas, a saber, a componente radial e a componente axial, que contribuem para a formação dos chamados "pontos quentes", é aconselhável abordá-las inicialmente de forma separada.

As perdas magnéticas nos enrolamentos podem ser quantificadas a partir de (11) para as perdas radiais e de (12) para as perdas axiais.

$$W/m^3 = \frac{1}{24\rho} (2\pi f d_a B_r)^2 \quad (11)$$

E,

$$W/m^3 = \frac{1}{24\rho} (2\pi f d_r B_a)^2 \quad (12)$$

Sendo:

$\rho$  a resistividade do material que compõe o enrolamento no valor de  $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  para o cobre;

$f$  a frequência da rede elétrica em Hz;

$d_a$  e  $d_r$  as dimensões do disco em metros;

$B_a$  e  $B_r$  respectivamente, a componente axial e radial do campo magnético em Tesla.

A orientação do fluxo, juntamente com as características dimensionais do disco empregado, podem ser visualizadas na Figura 2 [4].

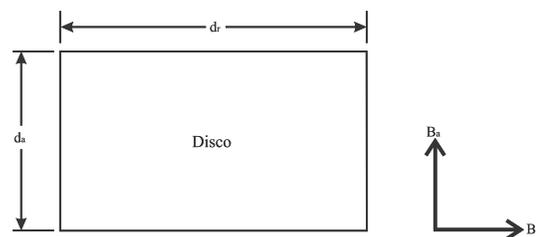


Figura 2. Dimensões do disco e relação com o campo magnético.

Conforme evidenciado em (11) e (12), é notável que, a exceção da componente do campo magnético ( $B$ ), todas as outras são inerentes às características construtivas do material ou a configuração da rede à qual o transformador se encontra conectado. Portanto, o foco principal da análise neste estudo é direcionado a descrição das contribuições do campo magnético radial e axial.

É importante ressaltar que a parcela do fluxo radial é predominantemente manifestada nas extremidades dos enrolamentos, enquanto o fluxo axial concentra-se predominantemente

na região central dos mesmos. Com base nessas observações, foram desenvolvidas duas equações distintas para representar matematicamente esses comportamentos, sendo elas, a (13) para o campo magnético radial e (14) para o campo magnético axial [5].

$$B_r = -0,294 \cdot \ln\left(\left(N_{radial} \cdot \frac{100}{c}\right) + 1\right) + 1 \quad (13)$$

$$B_a = 1 - e^{-\frac{25 \cdot N_{axial}}{c}} \quad (14)$$

Sendo  $c$  o número total de discos que formam o enrolamento,  $N_{radial}$  o número de discos considerados para perdas radiais e  $N_{axial}$  o número de discos considerados para perdas axiais.

Para representar o comportamento previsto do fluxo radial, o valor de  $N_{radial}$  foi reduzido para um terço do número total de discos e considerado axis-simétrico. Da mesma forma, o valor de  $N_{axial}$  também foi considerado axis-simétrico. Devido ao truncamento das equações, alguns discos podem apresentar um campo magnético nulo, resultando em perdas igualmente nulas. Com o objetivo de mitigar essa ocorrência, o valor mínimo das perdas radiais e axiais foi estabelecido como 0,1 W.

O resultado gráfico para as equações (13) e (14), aplicadas ao transformador sob estudo e alinhadas com as considerações anteriores, é apresentado nas Figuras 3 e 4.

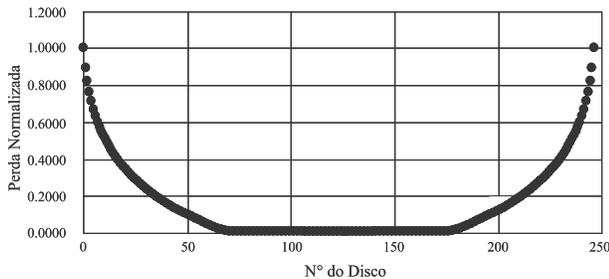


Figura 3. Resultado Gráfico da equação desenvolvida para o comportamento Radial do campo magnético aplicado ao transformador sob estudo.

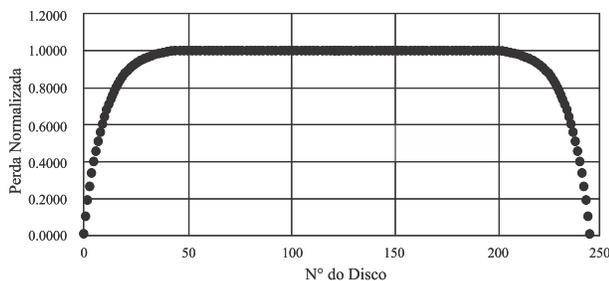


Figura 4. Resultado Gráfico da equação desenvolvida para o comportamento Axial do campo magnético aplicado ao transformador sob estudo.

Ao combinar o resultado gráfico das equações normalizadas (13) e (14), obtém-se a representação gráfica do fluxo magnético disperso nos enrolamentos do transformador como visto na Figura 5. [6]

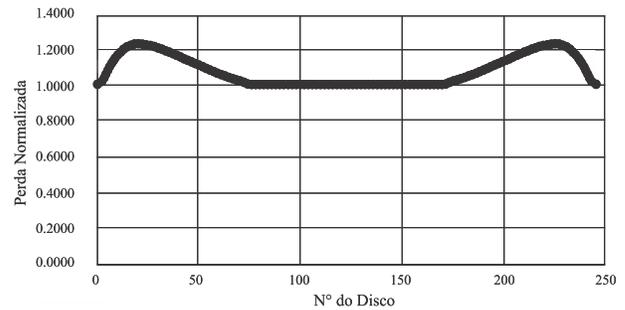


Figura 5. Caracterização gráfica da distribuição do campo magnético nos discos do transformador considerando suas componentes radiais e axiais.

Considerando a característica de dispersão do campo magnético, conforme ilustrado nas Figuras 3 e 4, torna-se possível calcular a área sob o gráfico, tanto para as perdas radiais quanto para as perdas axiais, resultando em uma densidade total de fluxo magnético em cada área específica. O fluxo magnético presente em cada disco pode ser determinado através da integração da equação que descreve o fluxo magnético, seja ele radial ou axial, no ponto onde o disco se encontra. Com a densidade de fluxo magnético regional conhecida, é suficiente multiplicar o valor obtido da integral pela densidade de fluxo magnético na respectiva região do disco.

Embora as equações descrevam o comportamento do campo magnético, é fundamental inicialmente obter a magnitude da dispersão do campo magnético, isto é, o valor do campo magnético que se propaga para além do núcleo do transformador. Para superar essa questão, é essencial possuir informações detalhadas sobre a geometria do núcleo empregado, bem como um conhecimento aprofundado das propriedades, especialmente as dimensionais e de permeabilidade magnética dos condutores, óleo isolante e núcleo magnético.

Com o conhecimento das dimensões e das propriedades dos materiais envolvidos na construção do transformador, torna-se viável a descrição de um circuito magnético resultante. Isso pode ser realizado ao utilizar a relação entre resistência e relutância, fluxo magnético e corrente elétrica.

Para o referido estudo o circuito resultante é apresentado na Figura 6.

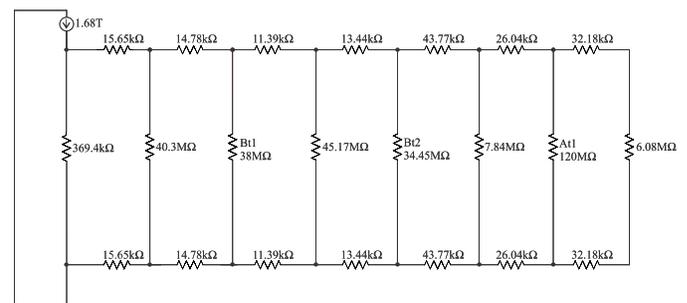


Figura 6. Circuito Resultante do Transformador sobre análise.

Ressalta-se que o valor total do campo magnético de 1,68T

foi disponibilizado pelo fabricante.

As relutâncias presentes na figura 6 foram determinadas a partir de (15).

$$\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu_0 \mu_r A} \quad (15)$$

Sendo:

L: o comprimento do trecho analisado em metros;

A: Área sob efeito do campo magnético em metros quadrados;

$\mu_r$  : A permeabilidade relativa do material;

$\mu_0$  : A permeabilidade do vácuo ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m).

Salienta-se que (15) é apresentada de forma universal, sendo assim, deveria ser aplicada a cada região de interesse a com valores dimensionais extraídos do projeto do transformador e respeitando a permeabilidade do respectivo meio [7].

Com auxílio de um *software* de simulação elétrica, pode-se extrair os valores do fluxo disperso que percorrem os enrolamentos do transformador vide tabela I.

Tabela I  
RESULTADOS DO CAMPO MAGNÉTICO EM CADA ENROLAMENTO.

BT1 (T)	1,40108 <sup>-2</sup>
BT2 (T)	1,52072 <sup>-2</sup>
AT (T)	4,21824 <sup>-3</sup>

Resumidamente, o procedimento desenvolvido segue os seguintes passos: primeiro, o valor do campo magnético obtido a partir do simulador é empregado nos estágios anteriores. Isso implica que, a partir do campo magnético em cada enrolamento, esse valor é dividido pela área radial e axial, determinada com base nas áreas sob as curvas de (13) e (14). Consequentemente, obtém-se uma densidade de campo magnético. O valor do campo magnético em cada disco, tanto na direção radial quanto na direção axial, pode ser calculado mediante a integração das equações (13) e (14) na posição de cada disco.

Posteriormente, conhecido o campo magnético em cada disco, são novamente aplicadas as equações (11) e (12) para determinar as perdas em cada disco do transformador.

#### A. Parâmetros de correção

Foram definidos dois parâmetros de correção, um relacionado ao campo magnético radial e outro ao campo magnético axial, com o objetivo de atenuar o impacto da distância entre os enrolamentos e o núcleo do transformador no comportamento do campo magnético disperso.

No que concerne ao campo magnético radial, a densidade do seu valor nos enrolamentos  $BT_2$  e  $AT_1$  foi corrigida mediante a relação entre as dimensões radiais do enrolamento de interesse e do enrolamento adjacente.

Para o campo magnético axial, a densidade do seu valor nos enrolamentos  $BT_1$ ,  $BT_2$  e  $AT_1$  foi corrigida levando-se em consideração a média aritmética dos enrolamentos e o espaçamento entre eles, vinculada ao raio médio do enrolamento em referência ao núcleo magnético.

## IV. DESCRIÇÃO DO TRANSFORMADOR

O transformador elevador trifásico sob estudo com tensão 230 +2/-2x5,0 / 13,8 kV – 73,6 MVA apresenta seus enrolamentos trifásicos organizados em três colunas distintas. Cada coluna compreende dois enrolamentos de baixa tensão, denominados  $BT_1$  e  $BT_2$ , além de um enrolamento de alta tensão denominado  $AT_1$ . Com relação as bobinas de baixa tensão, o subíndice numérico indica a disposição espacial em relação ao núcleo do transformador, sendo  $BT_1$  a bobina mais próxima do núcleo em comparação com a bobina  $BT_2$ . O núcleo circular do transformador é construído a partir de chapas de silício de grão orientado, conferindo-lhe uma alta permeabilidade magnética.

Os enrolamentos, compostos de cobre, estão imersos em óleo vegetal isolante e possuem suas dimensões especificadas pelo fabricante, tanto para os enrolamentos de baixa tensão quanto para os de alta tensão. Além disso, a quantidade de discos/condutores presente em cada enrolamento está detalhada na Tabela II.

Tabela II  
DADOS DO TRANSFORMADOR SOB ESTUDO.

	Discos	Espiras/Disco	Altura da Janela (mm)	Raio(mm)
Núcleo	-	-	2290	300
BT1	248	12	2100	320
BT2	248	12	2100	376
AT1	132	20	2080	454

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela III apresenta a comparação dos resultados entre o método desenvolvido e o método de Rabins aplicados ao transformador sob estudo.

Tabela III  
COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE O MÉTODO DESENVOLVIDO E O MÉTODO DE RABINS.

Perdas nos Enrolamentos (kW)	Radial	Axial
Método de Rabins $BT_1$ <sup>a</sup>	1.777	0.233
Método Proposto $BT_1$	1.668	0.248
Método de Rabins $BT_2$ <sup>a</sup>	1.372	1.826
Método Proposto $BT_2$	1.307	1.874
Método de Rabins $AT_1$ <sup>a</sup>	10.515	9.739
Método Proposto $AT_1$	9.475	8.692

<sup>a</sup>Disponibilizados pela fabricante.

Em seguida, os valores obtidos na Tabela III serão discutidos e comparados com o propósito de corroborar a metodologia exposta ao longo deste estudo.

#### A. Distribuição das perdas ao longo do enrolamento $BT_1$

Dada a proximidade dos valores apresentados na tabela III, pode-se aprofundar a análise destes. A Figura 7 descreve quantitativamente em escala de cores as perdas nos discos do enrolamento de baixa-tensão  $BT_1$ .

Os dados expostos na Figura 7 corroboram com o esperado de que as maiores perdas estão localizadas nas cabeceiras dos enrolamentos e vão decaindo a medida que se aproxima

**Distribuição das perdas (W) do enrolamento BT1**

n°62	26.014	n°124	0.740	n°186	0.742	n°248	0.740
	21.615		0.740		0.742		0.740
	18.451		0.740		0.742		0.740
	16.099		0.741		0.742		0.740
	14.233		0.741		0.742		0.740
	12.715		0.741		0.742		0.740
	11.466		0.741		0.742		0.739
	10.388		0.741		0.742		0.739
	9.496		0.741		0.742		0.738
	8.678		0.741		0.742		0.738
	7.988		0.741		0.742		0.737
	7.386		0.741		0.742		0.737
	6.835		0.741		0.742		0.776
	6.334		0.742		0.742		0.811
	5.878		0.742		0.742		0.854
	5.489		0.742		0.742		0.899
	5.114		0.742		0.742		0.947
	4.776		0.742		0.742		0.996
	4.472		0.742		0.742		1.047
	4.179		0.742		0.742		1.109
	3.916		0.742		0.742		1.165
	3.682		0.742		0.742		1.232
	3.456		0.742		0.742		1.302
	3.256		0.742		0.742		1.375
	3.063		0.742		0.742		1.451
	2.876		0.742		0.742		1.529
	2.712		0.742		0.742		1.622
	2.553		0.742		0.742		1.706
	2.416		0.742		0.742		1.806
	2.283		0.742		0.742		1.922
	2.154		0.742		0.742		2.029
	2.029		0.742		0.742		2.154
	1.922		0.742		0.742		2.283
	1.806		0.742		0.742		2.416
	1.706		0.742		0.742		2.553
	1.622		0.742		0.742		2.712
	1.529		0.742		0.742		2.876
	1.451		0.742		0.742		3.063
	1.375		0.742		0.742		3.256
	1.302		0.742		0.742		3.456
	1.232		0.742		0.742		3.682
	1.165		0.742		0.742		3.916
	1.109		0.742		0.742		4.179
	1.047		0.742		0.742		4.472
	0.996		0.742		0.742		4.776
	0.947		0.742		0.742		5.114
	0.899		0.742		0.742		5.489
	0.854		0.742		0.742		5.878
	0.811		0.742		0.742		6.334
	0.776		0.742		0.741		6.835
	0.737		0.742		0.741		7.386
	0.737		0.742		0.741		7.988
	0.738		0.742		0.741		8.678
	0.738		0.742		0.741		9.496
	0.739		0.742		0.741		10.388
	0.739		0.742		0.741		11.466
	0.740		0.742		0.741		12.715
	0.740		0.742		0.741		14.233
	0.740		0.742		0.740		16.099
	0.740		0.742		0.740		18.451
	0.740		0.742		0.740		21.615
n°61	0.740	n°123	0.742	n°185	0.740	n°247	26.014

Figura 7. Distribuição da perdas (W) no enrolamento de Baixa Tensão ( $BT_1$ )

do centro da bobina. Ressalta-se que os dados apresentados referem-se as perdas totais em cada disco, ou seja, perda axial somada as perdas radiais [8].

### B. Comparação disco a disco das perdas ao longo dos enrolamentos

A seguir, apresentam-se as Figuras 8, 9 e 10, que correspondem a distribuição das perdas ao longo dos enrolamentos  $BT_1$ ,  $BT_2$  e  $AT_1$ , respectivamente. Os dados expostos demonstram uma comparação entre os resultados das perdas disco a disco entre o método de Rabins, indicado em laranja, e o método proposto, destacado em azul.

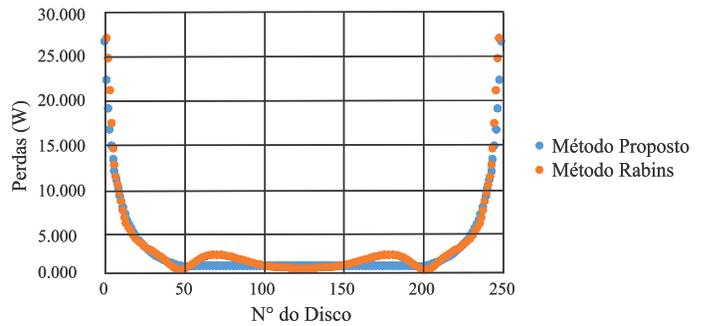


Figura 8. Comparação da distribuição das perdas (W) disco a disco no enrolamento de Baixa Tensão ( $BT_1$ )

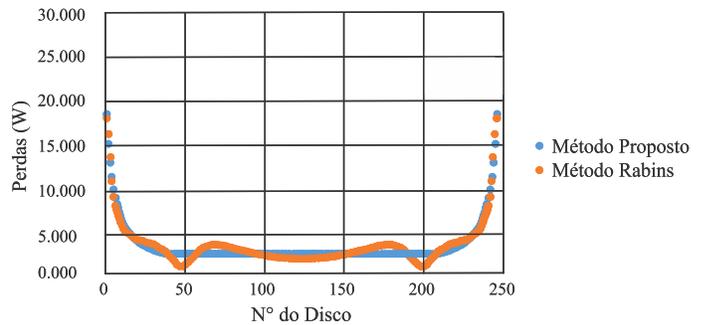


Figura 9. Comparação da distribuição das perdas (W) disco a disco no enrolamento de Baixa Tensão ( $BT_2$ )

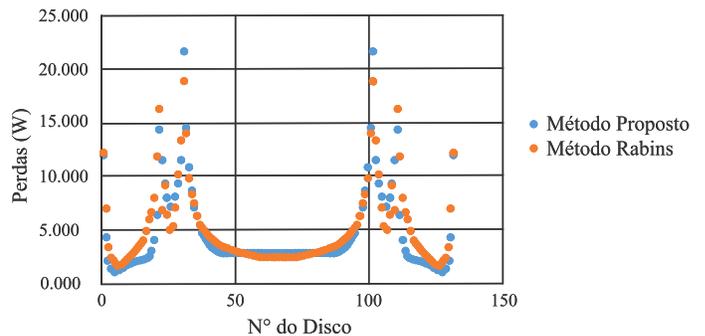


Figura 10. Comparação da distribuição das perdas (W) disco a disco no enrolamento de Alta Tensão ( $AT_1$ )

Ao examinar as Figuras 8, 9 e 10, é evidente, principalmente nos enrolamentos de baixa tensão, que o método elaborado neste estudo foi capaz de descrever com precisão satisfatória as perdas em cada disco do transformador, tanto quantitativamente quanto geometricamente, quando comparado com os resultados obtidos pelo método de Rabins [9] [10].

### C. Influência da geometria do transformador no método proposto

Os resultados obtidos no enrolamento de alta tensão, conforme ilustrado na Figura 10, exibiram uma maior diferença tanto nos valores quanto nas localizações das perdas em relação aos resultados observados nos enrolamentos de baixa tensão. Essa disparidade pode ser atribuída, em parte, a configuração não convencional dos enrolamentos do transformador em estudo.

O enrolamento de alta tensão ( $AT_1$ ) é caracterizado por possuir uma derivação central, com seus TAP's dispostos ao longo do enrolamento, especificamente nos discos de número 22 ao 29 e de 102 ao 109. Na configuração em que as perdas foram quantificadas, o transformador encontra-se no menor valor de TAP de tensão, resultando em um enrolamento descontínuo, o que, por conseguinte, impacta na aplicabilidade do método proposto.

É perceptível que nos intervalos dos discos mencionados anteriormente, ocorre uma alteração substancial no padrão das perdas, conforme ilustrado na Figura 10. Ademais, esse efeito pode ser observado com uma amplitude consideravelmente reduzida nos enrolamentos de baixa tensão ( $BT_1$  e  $BT_2$ ), especialmente na região que se alinha espacialmente com os intervalos dos discos previamente mencionados.

## VI. CONCLUSÃO

Concomitantemente com o método de Rabins, o método proposto se apresenta como uma abordagem mais simplificada e interativa para a avaliação do campo magnético nos enrolamentos do transformador. No entanto, é necessário ressaltar que o sistema desenvolvido requer um maior controle em suas etapas devido a sua subdivisão de eventos e respectivas interligações. Essas etapas englobam o cálculo das reatâncias, a montagem do circuito resultante, a determinação da área de interesse nos gráficos de perdas, entre outros. Até o momento, ainda não foi implementada uma rotina que permita a inserção de valores e a coleta direta dos resultados, como é possível pelo método de Rabins.

Dado que as perdas obtidas pelo método proposto demonstraram uma notável correspondência, tanto em termos de distribuição quanto em termos de magnitude, com o método de Rabins, há indícios de que o primeiro seja capaz de identificar os pontos críticos em um transformador. Portanto, é plausível antever que esse método, de forma alternativa ao método de Rabins, possa prever os locais com maior probabilidade de contribuição para o envelhecimento prematuro do óleo isolante e para uma maior degradação dos materiais isolantes entre as bobinas.

Após a confirmação da eficácia da aplicação do método proposto no transformador em questão, planeja-se estender sua aplicação a outros transformadores com o propósito de validar sua utilidade.

## VII. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001 e do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do CNPq. Os autores também gostariam de agradecer à Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM, ao Programa de Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT) divisão de Geração Distribuída (GD) e ao Instituto de Redes Inteligentes - INRI pelo apoio técnico e financeiro deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Walter Ries, Transformadores – Fundamentos para o projeto e cálculo. Aрева 2007
- [2] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, Transformer Engineering: Design and Practice. New York, NY, USA: CRC Press, 2004.
- [3] RABINS, L. Transformer reactance calculations with digital computers. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, v. 75, n. 3, p. 261–267, 1956.
- [4] O. W. Andersen, "Transformer Leakage Flux Program Based on the Finite Element Method," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-92, no. 2, pp. 682–689, March 1973, doi: 10.1109/TPAS.1973.293773.
- [5] R. Altay, P. J. Quintanilla, A. Ortiz, F. Delgado and A. K. Koseoglu, "100MVA Non-Uniform Heat Losses Study," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 798–801, doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991711.
- [6] J. Wijaya, Wenyu Guo, T. Czaszejko, D. Martin, N. Lelekakis and D. Susa, "Temperature distribution in a disc-type transformer winding," 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Singapore, 2012, pp. 838–843, doi: 10.1109/ICIEA.2012.6360841.
- [7] M. C. Hlatshwayo, The Computation of Winding Eddy Losses in Power Transformers Using Analytical and Numerical Methods. Johannesburg, 2013
- [8] Xiaoling Yu, Youbo Tan, Haotian Wang, Xiaolin Wang, Ying Zang, Penghong Guo, Thermal analysis and optimization on a transformer winding based on non-uniform loss distribution, Applied Thermal Engineering, Volume 226, 2023, 120296, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120296>.
- [9] Marianne Waagan, Eddy current losses in transformer windings. Norwegian University of Science and Technology Faculty of Information Technology and Electrical Engineering Department of Electric Power Engineering May 2020
- [10] Y. Li, X. Yan, C. Wang, Q. Yang and C. Zhang, "Eddy Current Loss Effect in Foil Winding of Transformer Based on Magneto-Fluid-Thermal Simulation," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 7, pp. 1–5, July 2019, Art no. 8401705, doi: 10.1109/TMAG.2019.2897503.