

## **SIMULAÇÃO DAS PERDAS A VAZIO EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE DISTRIBUIÇÃO DA CLASSE 15KV COM MATERIAIS AMORFO E FERRO SILÍCIO**

JEFERSON GONÇALVES FERREIRA<sup>1\*</sup>, MARCO ANTONIO FERREIRA FINOCCHIO<sup>2</sup>,  
OTAVIO DO AMARAL FIGUEIREDO<sup>3</sup>, MARCIO MENDONÇA<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Mestrando em Engenharia Elétrica, UTFPR, Cornélio Procópio-PR, goncalves\_jeferson@outlook.com

<sup>2</sup>MSc. em Engenharia Elétrica, UTFPR, Cornélio Procópio-PR, mafinocchio@utfpr.edu.br

<sup>3</sup>Graduando em Engenharia Elétrica, UTFPR, Cornélio Procópio-PR, otavio\_figueiredo@hotmail.com

<sup>4</sup>Dr. em Engenharia Elétrica, UTFPR, Cornélio Procópio-PR, mendonca@utfpr.edu.br

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016

29 de agosto a 1 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

**RESUMO:** Este artigo aborda as perdas em vazio em transformadores construídos por núcleo de metal amorfo e ferro silício da classe de 15kV, com potências variando de 150kVA a 300kVA. Através de um algoritmo simular as perdas a vazio, que considera os aspectos e características construtivas das ligas utilizadas no núcleo. Realizando a comparação entre os valores simulados e os valores encontrados em ensaios. O que possibilita verificar o desempenho do algoritmo e a eficiência energética do transformador de distribuição de metal amorfo (TDMA), apresentando as perdas no núcleo comparadas ao transformador de distribuição com grão orientado (TDGO).

**PALAVRAS-CHAVE:** Transformador; Núcleo; Perdas; Eficiência Energética.

### **SIMULATION OF LOSSES IN THE EMPTY TRANSFORMERS CLASS DISTRIBUTION THREE PHASE 15KV WITH AMORPHOUS MATERIALS AND SILICON IRON.**

**ABSTRACT:** This article covers the load losses in transformers built by amorphous metal core and ferrosilicon of 15kV class, with powers ranging from 150kVA to 300kVA. Through an algorithm to simulate the losses to empty, which considers aspects and constructive characteristics of the alloys used in the core. Performing the comparison between the simulated values and the values found in tests. This makes it possible to verify the performance of the algorithm and the energy efficiency of amorphous metal distribution transformer (AMDT), with the core loss compared to the distribution transformer with grain oriented (DTGO).

**KEYWORDS:** Transformer; Core; Losses; Energy Efficiency.

### **INTRODUÇÃO**

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas que têm a função de transmitir, mediante um campo eletromagnético alternado, a energia elétrica de um sistema, com determinada tensão, para outro sistema, com a tensão desejada, porém com capacidade e frequência inalteradas (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

As perdas no núcleo são determinadas pelo fluxo estabelecido no circuito magnético e são constantes em uma dada tensão para cada transformador. Elas aparecem sempre que o transformador é ligado à rede e praticamente independem da carga que está sendo alimentada. As características construtivas do transformador e as propriedades magnéticas das ligas de aço-silício interferem diretamente no valor das perdas no núcleo (STINGANT; FRANKLIN, 1973), também conhecidas como perdas em vazio. Essas perdas são decorrentes da histerese no circuito magnético, da magneto-estrição e das correntes parasitas (correntes de Foucault) que circulam no núcleo, contribuindo também as perdas ôhmicas decorrentes da corrente de excitação (BLUME; BOYAJIAN, 1951).

Em 1934, o metalurgista americano Norman Goss desenvolveu uma liga de aço-silício de maior permeabilidade, que seria chamada posteriormente de aço-silício de grão orientado (BACALTCHUK, 2005). O aço-silício de grão orientado possui direções altamente favoráveis de magnetização, atributo muito atrativo para a construção de núcleo de transformadores, sendo que a

permeabilidade no sentido da laminação é muito alta, apresentando pouca resistência à passagem do fluxo magnético.

A evolução de ligas amorfas em núcleos de transformadores teve início em 1975. Porém, a introdução no mercado destes materiais, para fins elétricos, só ocorreu em 1976, quando o primeiro transformador de distribuição com núcleo de material amorfo (TDMA) foi construído no Laboratório Lincoln, do Instituto Tecnológico de Massachusetts (RASKIN; DAVIS, 1981).

Naquela ocasião, o desempenho de um protótipo de transformador de 30kVA, confeccionado com núcleo de material amorfo, foi confrontado com um transformador comercial com núcleo de aço-silício de igual potência nominal. Nos ensaios, os resultados obtidos foram amplamente favoráveis ao transformador com núcleo de material amorfo, pois as perdas a vazio e da corrente de excitação foram reduzidas de 2,5A para 0,12A

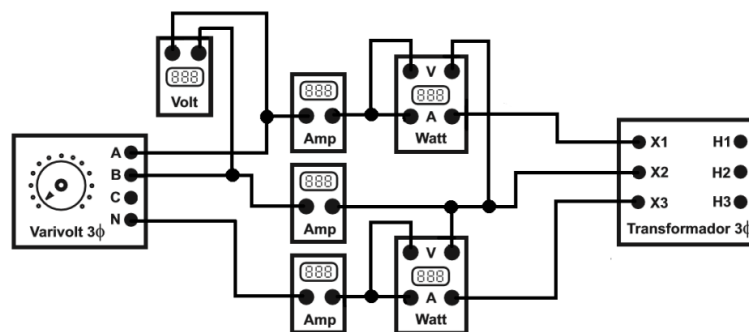
No Brasil, os primeiros estudos e ensaios experimentais sobre a aplicação de ligas amorfas em núcleos de transformadores tiveram origem no ambiente acadêmico, passando, em seguida, para a montagem em unidades industriais em fábricas de transformadores e instalações em sistemas de distribuição de energia elétrica (LUCIANO; ROCHA, 1998).

Metais amorfos admitem fabricação de laminas com espessuras de até 0,025mm, aproximadamente 10 vezes mais finas que as laminas feitas a partir de materiais comerciais. Contudo, estão entre os materiais mais duros já produzidos, sendo de 4 a 5 vezes mais duros que os aços usados como materiais elétricos convencionais (NG ET AL, 1991). As perdas em transformadores com núcleo de material amorfo são em torno de 60% a 70% inferiores quando comparado a transformadores de mesmo porte feitos com núcleo de aço-silício (NG ET AL, 1991).

## PERDAS A VAZIO

As perdas no núcleo são encontradas executando-se o ensaio a vazio, no qual o transformador esta em circuito aberto. É usual e mais seguro realizar este ensaio através do enrolamento de mais baixa tensão existente (KOSOW, 2005). A Figura 1 representa o esquema de ligação para executar um ensaio a vazio num transformador de distribuição trifásico.

Figura 1. Montagem para realizar o Ensaio em Vazio.



E as duas principais perdas em vazio são: perdas por histerese as quais são provocadas pela propriedade das substâncias ferromagnéticas de apresentarem um atraso entre a indução magnética e campo magnético e as perdas por correntes parasitas.

A Tabela 1 estabelece os valores de perdas máximas a vazio permitida pela NBR 5440/2014 para transformadores de distribuição trifásicos da classe 15kV imersos em óleo, em função da potência nominal.

Tabela 1: Valores das perdas a vazio em transformadores de distribuição trifásicos da classe 15kV.

Potencia [kVA]	Perdas em vazio máxima [W]
150	540
225	765
300	950

Fonte: NBR 5440/2014.

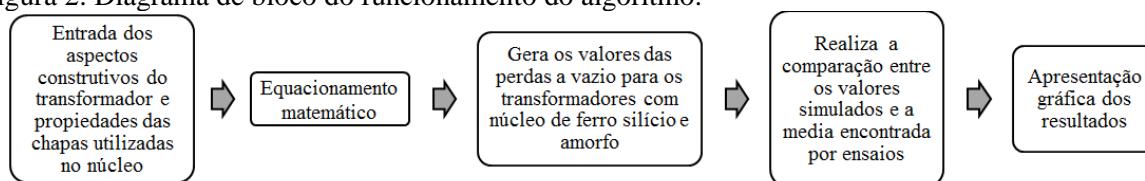
## METODOLOGIA

Os ensaios e simulações foram realizados em 3 classes de transformadores trifásicos de distribuição com potência de 150kVA, 225kVA e 300kVA com classe de tensão de 15kV.

Com a implementação do algoritmo via *Matrix Laboratory* (MATLAB), utilizou-se como valores de entrada os aspectos construtivos dos transformadores, e especificações técnicas das chapas do núcleo, para realizar as simulações e gerar os valores das perdas a vazio. Ao mesmo tempo exibindo para cada transformador um grupo de trinta valores de perdas encontradas em ensaios realizado pelo fabricante e as medias dos mesmos. Tornando possível realizar a comparação entre o valor simulado e o valor médio encontrado através dos ensaios, ficando possível verificar a eficiência do algoritmo. E por fim realizar a comparação entre as perdas a vazio dos transformadores com núcleo de Grão Orientado FeSi e os transformadores de núcleo amorfo composto por Fe<sub>78</sub>B<sub>13</sub>Si<sub>9</sub>.

Na Figura 2 é apresentado o funcionamento do diagrama de bloco do algoritmo utilizado neste trabalho

Figura 2. Diagrama de bloco do funcionamento do algoritmo.

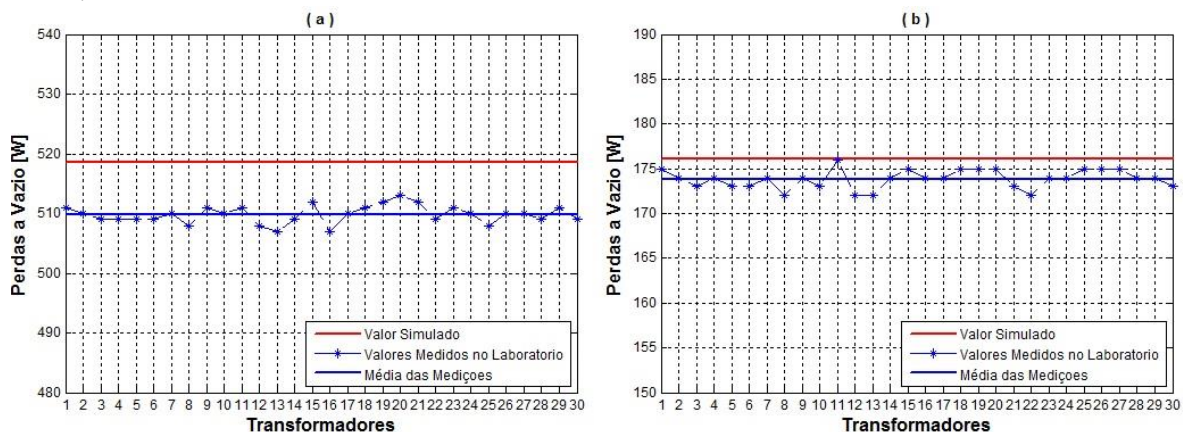


\* Equacionamento matemático e algoritmo não apresentados devido à proteção da propriedade intelectual

## ANALISE E RESULTADOS

Na Figura 3 são apresentados os resultados das simulações e os valores encontrados nos ensaios realizados pelo fabricante para os transformadores de (a) 150kVA com núcleo de aço silício e (b) 150kVA com núcleo amorfo.

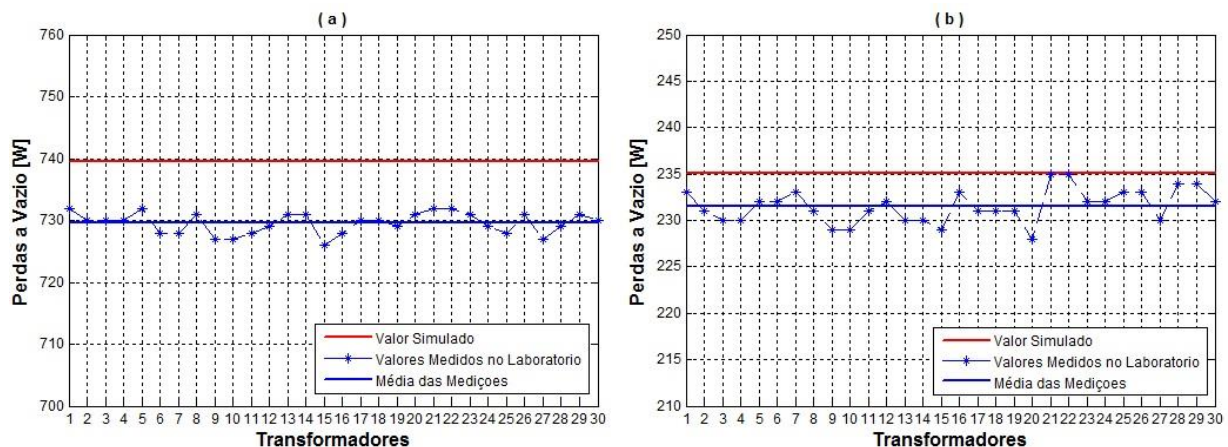
Figura 3. Valores das perdas a vazio para os transformadores de (a)150kVA – TDGO e (b)150kVA - TDMA.



A Figura 3(a) representa o TDGO de 150kVA, que exibe um valor simulado de 518,5[W] e o valor médio das medições 509,8[W] com uma diferença de 8,7[W], apresentando uma diferença de 1,68 % entre o valor simulado e o real. A Figura 3(b) representa o TDMA de 150kVA, que exibe um valor simulado de 176,1[W] e o valor médio das medições 173,8[W] com uma diferença de 2,2[W], apresentando uma diferença de 1,24 % entre o valor simulado e o real. Com isso foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório.

Na Figura 4 são exibidos os resultados das simulações e os valores encontrados nos ensaios realizados pelo fabricante para os transformadores de (a) 225kVA com núcleo de aço silício e (b) 225kVA com núcleo amorfo.

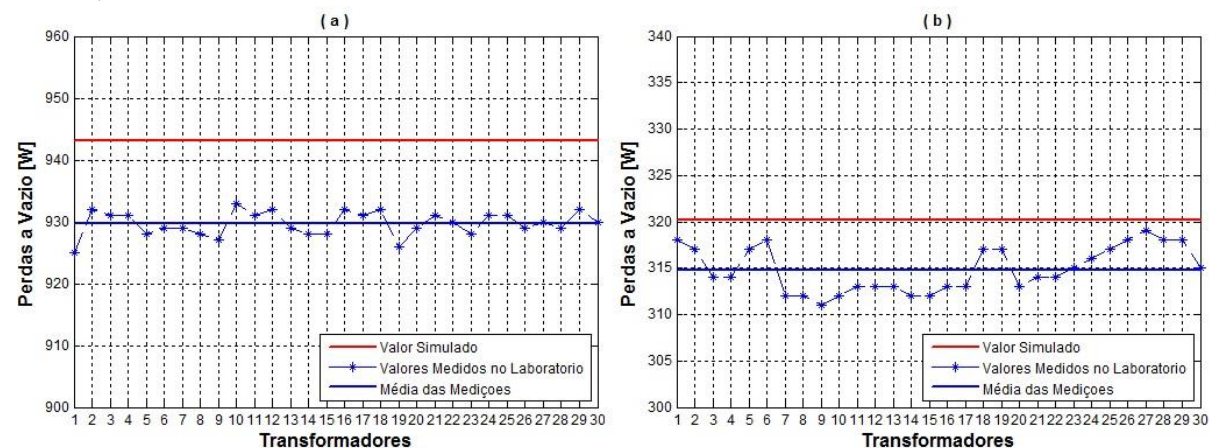
Figura 4. Valores das perdas a vazio para os transformadores de (a)225kVA – TDGO e (b)225kVA - TDMA.



A Figura 4(a) representa o TDGO de 225kVA, que exibe um valor simulado de 739,5[W] e o valor médio das medições 729,6[W] com uma diferença de 9,9[W], apresentando uma diferença de 1,34 % entre o valor simulado e o real. A Figura 4(b) representa o TDMA de 225kVA, que exibe um valor simulado de 235,1[W] e o valor médio das medições 231,5[W] com uma diferença de 3,6[W], apresentando uma diferença de 1,53 % entre o valor simulado e o real. Com isso foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório.

Na Figura 5 são expostos os resultados das simulações e os valores encontrados nos ensaios realizados pelo fabricante para os transformadores de (a) 300kVA com núcleo de aço silício e (b) 300kVA com núcleo amorfo.

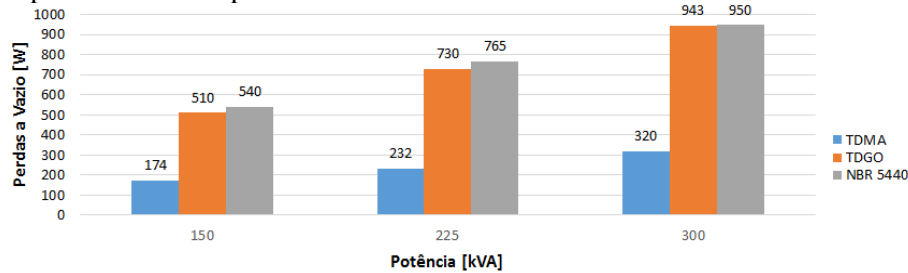
Figura 5. Valores das perdas a vazio para os transformadores de (a)300kVA – TDGO e (b)300kVA - TDMA.



A Figura 5(a) representa o TDGO de 300kVA, que exibe um valor simulado de 943,2[W] e o valor médio das medições 929,7[W] com uma diferença de 13,5[W], apresentando uma diferença de 1,43 % entre o valor simulado e o real. A Figura 5(b) representa o TDMA de 300kVA, que exibe um valor simulado de 320,2[W] e o valor médio das medições 314,8[W] com uma diferença de 5,4[W], apresentando uma diferença de 1,67 % entre o valor simulado e o real. Com isso foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório.

Na Figura 6 é possível visualizar as perdas a vazio máximas permitidas pela NBR 5440 e compará-las aos resultados médios das medições realizadas no laboratório para os TDMA e TDGO.

Figura 6. Comparativo entre as perdas a vazio.



A Figura 6 expõe o comportamento médio das perdas a vazio dos transformadores segundo suas potências nominais. Mostrando que as perdas no TDMA ficam próximas a 1/3, do valor alcançado pelos TDGO. Não foram realizados cálculos de variância, devido a os resultados serem ainda iniciais e desse modo ainda possuir uma pequena massa de dados, entretanto, pode-se observar pelo comportamento das curvas que a variação em torno da média é bem pequena.

## CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi associar os valores das perdas a vazio para os TDMA e os TDGO, possibilitando apresentar graficamente os respectivos valores e mostrar a eficiência entre os mesmos.

O algoritmo proposto considerou aspectos construtivos dos transformadores, e especificações técnicas das chapas do núcleo, para realizar as simulações. Posteriormente realizou-se a comparação entre os valores simulados e a média dos valores reais fornecidos pelo fabricante.

O que possibilitou constatar que o algoritmo proposto alcançou um resultado satisfatório, proporcionando uma diferença máxima de 1,68% entre os valores das perdas a vazio simuladas e os reais, e ainda foi possível observar que em todos os casos estudados o algoritmo teve o valor simulado sempre superior ao valor real.

Ao mesmo tempo mostrando que as perdas a vazio nos TDMA ficam próximas a 1/3, do valor alcançado pelos TDGO. Em seguida realizou-se a comparação entre os valores reais e simulados, o que permitiu verificar que todos transformadores avaliados, apresentaram valores dentro dos exigidos pela NBR 5440/2014.

Como a eficiência energética objetiva a redução de perdas, o emprego extensivo de TDMA, por apresentam menores perdas a vazio que os transformadores tradicionais. Podendo desempenhar um papel importante tanto para a conservação de energia, como a preservação do meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5440: Transformadores para redes aéreas de distribuição. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BACALTCHUK, C. M. B. Effect of Magnetic Annealing on Texture and Microstructure Development in Silicon Steel. 2005. 115f. Tese (Doutorado) - Florida State University, College of Engineering. Florida, 2005.
- BLUME, L. F., BOYAJIAN, A., CAMILI, G., LENNOX, T. C., and MINNECI, S., Transformer Engineering, 2o edição, 1951.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles J.; UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas – com introdução a Eletrônica de Potência. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- KOSOW, I.L. Máquinas Elétricas e Transformadores. 15ª ed. São Paulo: Globo, 2005.
- LUCIANO, B. A.; ROCHA, P. M. C. Transformador com núcleo de material amorfo: uma experiência conjunta universidade empresas. In: Anais do III Congresso Latino-Americano de Distribuição de Energia Elétrica, pp. 349-353, 1998.
- NG, H. W.; HASEGAWA, R.; LEE, A. C.; LOWDERMILK, L. A. Amorphous Alloy Core Distribution Transformer. Proceedings of the IEEE, Vol. 79, No.11, p. 1608-1623, 1991.
- RASKIN, D.; DAVIS, A. L. Metallic glasses: a magnetic alternative. IEEE Spectrum, vol. 18, N° 11, p. 28-33, Nov. 1981
- STIGANT, S. A., and FRANKLIN, A. C., The JP Transformer Book, A practical technology of the power transformer, vol.3, 1973.