

Avaliação de Desempenho de um Transformador de Distribuição a Seco em um Barramento Previamente Distorcido Utilizando Método de Elementos Finitos

Fabício M. Silva*, Fernanda H. Costa**, Ivan N. Santos*
 Arnaldo J. P. Rosentino Jr***, Guilherme D. C. Oliveira***

*Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais,
 Brasil (e-mail: fabriciomontes.silva@gmail.com, ivan@ufu.br).

**Instituto Federal de Goiás, Itumbiara, Goiás, Brasil
 (e-mail: fernanda.costa@ifg.edu.br).

***Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais,
 Brasil (e-mail: arnaldoufu@gmail.com, guilhermedaher.eng@hotmail.com).

Abstract: This paper seeks to provide a contribution to the studies of transformers under non-sinusoidal conditions using a finite element based computational tool. The studies used a 1 MVA dry distribution transformer, ANSYS Maxwell® 3D software, studying the influence of the harmonics and their propagation. The results of simulations under sinusoidal conditions were validated, giving conditions to proceed with the analysis under voltage harmonic distortion. The results found in this last analysis, both for the propagation of distortions and for the increase of losses, were consistent with the scientific literature related to the theme.

Resumo: Este artigo tem como finalidade fornecer uma contribuição aos estudos de transformadores sob condições não-senoidais empregando, para tanto, ferramenta computacional embasada em elementos finitos. Os estudos foram realizados em um transformador de distribuição a seco de 1 MVA, utilizando o software ANSYS Maxwell® 3D, objetivando-se, assim, a influência dos harmônicos e sua propagação. Os resultados das simulações em condições senoidais foram validados, dando condições para prosseguir com as análises sob distorção harmônicas de tensão. Os resultados encontrados, nesta última análise, tanto para a propagação das distorções quanto para a elevação das perdas, mostraram-se condizentes com a literatura científica correlata ao tema.

Keywords: ANSYS; Finite Element (FEM); Distribution Transformer; Harmonic Distortion; Loss.

Palavras-chaves: ANSYS; Elementos Finitos (FEM); Transformador de Distribuição; Distorções Harmônicas; Perdas.

1. INTRODUÇÃO

Na contemporaneidade, o setor elétrico mundial se depara com constantes desafios, os quais são provenientes, em geral, das seguintes questões: necessidade de substituição do uso de fontes de energia provenientes de combustíveis fósseis por fontes renováveis, inserção de novas tecnologias ou melhoramentos tecnológicos nos distintos níveis do sistema elétrico (geração, transmissão e distribuição) e obrigação de garantir o fornecimento de energia elétrica de forma contínua e com coeficientes aceitáveis de qualidade. (Santos and dos Santos, 2018)

Na busca de soluções para as questões supracitadas, verifica-se um aumento significativo dos equipamentos eletrônicos no sistema elétrico de potência (SEP). Tais cargas são, via de regra, potenciais causadoras de distorções harmônicas, pois apresentam, em geral, operação caracterizada pela não linearidade, contribuindo assim para a deformação das formas de onda de tensão e corrente. (Khan et al., 2017) Tais equipamentos eletrônicos advêm da difusão das chamadas redes elétricas inteligentes (*Smart Grids*), do aumento do uso das tecnologias em nível de transmissão, tais como: sistema HVDC's (*High Voltage Direct Current*) e FACTS (*Flexible*

AC Transmission Systems). Pode-se citar também, o aumento da automatização industrial que traz consigo o emprego massivo de ASD's (*Adjustable Speed Drives*) para controle de velocidade e torque de motores, os quais usualmente, provêm correntes harmônicas. Além disto, tem-se o advento do veículo elétrico que possui carregamento com potencial geração de distorções harmônicas nas redes de distribuição, além da substituição de sistemas de iluminação e uso cada vez maior de produtos com alto grau de eficiência em ambientes residenciais e comerciais. Outra importante questão é o crescimento quase que exponencial da geração distribuída no Brasil, promovida principalmente por sistemas fotovoltaicos interfaceados com a rede via conversores eletrônicos. Salienta-se, ainda, o surgimento de sistemas armazenadores de energia, os quais são esperados em todos níveis do sistema elétrico, atuando também de modo não linear. Além da inserção de geração eólica diretamente na rede básica

Neste contexto, o aumento das distorções harmônicas no SEP, principalmente no nível da distribuição, tem causado preocupação aos agentes do setor em função de potenciais problemas em elementos do sistema elétrico. Pode-se citar os transformadores de potência, que são parte essencial dos

sistemas elétricos em corrente alternada. O funcionamento dos transformadores sob condições não-lineares pode causar acréscimo das perdas, aumento de temperatura no interior do transformador, degradação do isolamento e redução da vida útil, podendo, então, levar este equipamento ao colapso e, conseqüentemente, ocasionando falta de energia nos sistemas elétricos. (Iskender and Najafi, 2014)

Sabendo da importância do transformador, as indústrias que produzem tais equipamento se empenham em aperfeiçoar este dispositivo a fim de reduzir suas perdas, uma vez que o cenário elétrico está cada vez mais preocupado com a eficiência energética, bem como a não interrupção do fornecimento de energia elétrica. Para isso, é essencial realizar análises computacionais avançadas acerca das condições senoidais e não-senoidais da alimentação, para uma melhor otimização destes equipamentos. Neste cenário, encontra-se o estudo proposto neste artigo. O transformador a ser analisado faz parte de um projeto inovador de uma subestação, a qual tem característica hermética e pressurizada. Portanto, a realização de estudos além da operação nominal é extremamente importante para identificar, especialmente, as dissipações de calor para diferentes cenários. Através desses resultados preliminares é possível projetar de forma adequada o sistema de arrefecimento a ser instalado no interior da subestação.

Buscando estudar a problemática descrita acima, foram feitas simulações computacionais empregando método de elementos finitos (FEM) através do software ANSYS Maxwell 19.2 3D, o qual é capaz de resolver problemas envolvendo análise de campos eletromagnéticos e perdas em uma região finita do espaço. O equipamento modelado é um transformador trifásico de distribuição, a seco, de 1MVA de potência, 13,8kV/380V, delta-estrela, conforme apresentado na seqüência.

2. MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

UTILIZANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

O FEM (*Finite Elements Method*) é uma ferramenta desenvolvida para resolver problemas físicos e de engenharia com métodos numéricos, sendo útil em geometrias complexas e/ou em situações onde uma solução analítica não pode ser obtida tão facilmente.

Inicialmente, para implementação neste software, a geometria do transformador foi construída pela mesma plataforma oferecida pelo ANSYS Maxwell. Para tanto, este modelo foi baseado em dados construtivos reais de um equipamento comercial especificados na Tabela 1.

Em termos de dados de placa, o transformador modelado possui potência nominal de 1 MVA, com tensões nominais de 13,8/0,38 kV e frequência em 60Hz. No que tange os materiais, foram especificados aço silício M4 para o núcleo e alumínio para os enrolamentos. Os principais dados a serem inseridos relativos ao material do núcleo são: a curva da densidade de fluxo magnético (B) em função da intensidade de campo magnético (H) e a curva de perdas a vazio (P) em função da densidade de fluxo magnético (B). Sendo a primeira encontrada em Stalprodukt S.A (2015), fornecida pela fabricante Stalprodukt S.A, e a segunda encontrada em Boyd

and Borst (1984). As Fig. 1 e Fig. 2 ilustram as curvas supracitadas.

Tabela 1. Valores e parâmetros do transformador a seco de 1 MVA

| | | | |
|--------------|------------------------------|----------------|--------|
| Parâmetros | Potência Nominal (MVA) | 1,0 | |
| | Frequência (Hz) | 60 | |
| | Tensão no lado de alta (kV) | 13,8 | |
| | Tensão no lado de baixa (kV) | 0,38 | |
| Núcleo | Material | Aço Silício M4 | |
| | Densidade de Fluxo (T) | 1,7 | |
| Enrolamentos | Material | Alumínio | |
| | Lado | AT | BT |
| | Tipo dos enrolamentos | Disco | Camada |
| | Relação de Transformação | 62 | 875 |



Fig. 1 Curva da densidade de fluxo magnético (B) em função da intensidade de campo magnético (H).

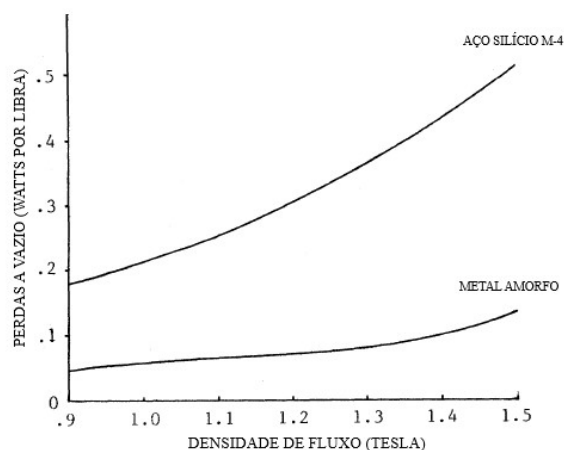


Fig. 2 Curva de perdas a vazio (P) em função da densidade de fluxo magnético (B).

Essas curvas são essenciais para a obtenção dos resultados eletromagnéticos e térmicos próximos aos reais. Tais gráficos fornecem os dados iniciais para o ANSYS calcular os coeficientes k_c , k_h e k_e , que representam o coeficiente de perdas por correntes parasitas (k_c), coeficiente de perdas pelo laço de histerese (k_h) e coeficiente de perdas adicionais (k_e). As perdas do núcleo são dadas por (1). (Ozturk and Celik, 2011)

$$p_v = k_h f (B_m^2) + k_c (f B_m)^2 + k_e (f B_m)^{1,5} \quad (1)$$

Com os materiais e seus equacionamentos definidos, a etapa seguinte foi referente à definição dos dados de entrada na simulação. Para tal foi utilizado uma excitação de tensão no lado de alta tensão (AT). Tal excitação foi feita conforme (2), (3) e (4), correspondendo, respectivamente, às fases A, B e C. Nota-se que o primeiro termo de cada equação refere-se à frequência fundamental, e os demais termos inserem as distorções harmônicas de tensão de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens, funcionando como *background distortion*. Ademais, estes equacionamentos possuem uma componente transitória com objetivo de anular os efeitos da corrente de *inrush*, diminuindo o tempo necessário para a obtenção de resultados em regime permanente. Por último, o valor da tensão de pico é dado diretamente por $V_{peak}=13800\sqrt{2}$.

$$\begin{aligned} v_a(t) = & V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos(2\pi \cdot 60t) + \\ & 0,055 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos(2\pi \cdot 5 \cdot 60t) + \\ & 0,045 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos(2\pi \cdot 7 \cdot 60t) + \\ & 0,030 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos(2\pi \cdot 11 \cdot 60t) + \\ & 0,010 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos(2\pi \cdot 13 \cdot 60t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_b(t) = & V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 60t + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & 0,055 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 5 \cdot 60t + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & 0,045 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 7 \cdot 60t + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & 0,030 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 11 \cdot 60t + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & 0,010 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 13 \cdot 60t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_c(t) = & V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 60t + \frac{4\pi}{3}\right) + \\ & 0,055 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 5 \cdot 60t + \frac{4\pi}{3}\right) + \\ & 0,045 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 7 \cdot 60t + \frac{4\pi}{3}\right) + \\ & 0,030 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 11 \cdot 60t + \frac{4\pi}{3}\right) + \\ & 0,010 \cdot V_{peak}(1 - e^{-50t}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot 13 \cdot 60t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

Já no lado de baixa tensão (BT), emprega-se um circuito externo fornecido pela ferramenta *Maxwell Circuit Editor*, presente no ANSYS Maxwell, onde o arranjo estará conectado em estrela com uma carga resistiva calculada para que o transformador trabalhe em carga nominal quando excitado em

tensão com frequência e magnitude nominais. Este circuito encontra-se ilustrado na Fig. 3.

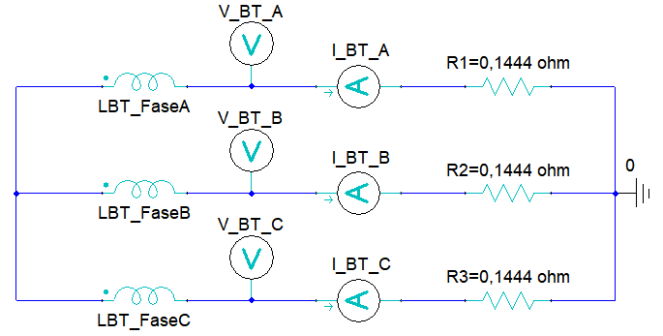


Fig. 3 Circuito externo de excitação para o lado BT.

O dimensionamento da malha é de fundamental importância para a garantia da aproximação necessária que gere resultados condizentes com a realidade, pois ela determina em quantos trechos será quebrado a geometria para aplicar as equações eletromagnéticas individualmente no arranjo. O ANSYS não possui ferramenta inteligente para malhas em simulações no regime transitório, porém foi determinado um refinamento de malha de 1000 novos itens por passo para o núcleo e 5000 novos itens por passo para os enrolamentos. Tal refinamento garante, a partir da malha inicial gerada pelo ANSYS, que os resultados se aproximam cada vez mais do real, exibindo resultados coerentes. A Fig. 4 exibe a malha no instante 169 milissegundos no núcleo e nos enrolamentos.

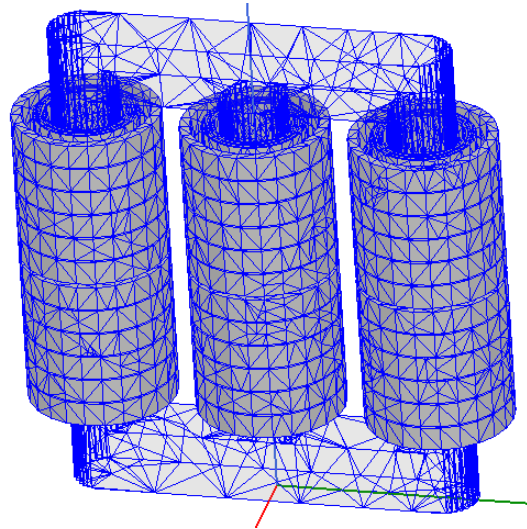


Fig. 4 Distribuição da malha após 169ms.

3. ESTUDOS DE CASO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o intuito de apresentar uma aplicação da modelagem em elementos finitos do transformador e de sua utilização para fins de estudos de propagação de harmônicos, assim como para analisar desempenho deste modelo implementado, foram simuladas duas condições distintas, a saber: a primeira com a rede de suprimento do transformador puramente senoidal (Caso I), ou seja, ideal, e a segunda com a rede contendo harmônicas de tensão (Caso II), ou seja, com *background distortion*.

3.1 Estudo de Caso I – Comportamento do modelo do transformador diante uma rede senoidal

Os resultados obtidos por esta simulação inicial têm o objetivo, de apresentar as grandezas elétricas e magnéticas do modelo computacional implementado para fins de validação do mesmo e, na sequência, servir para comparação de desempenho do dispositivo em condições adversas.

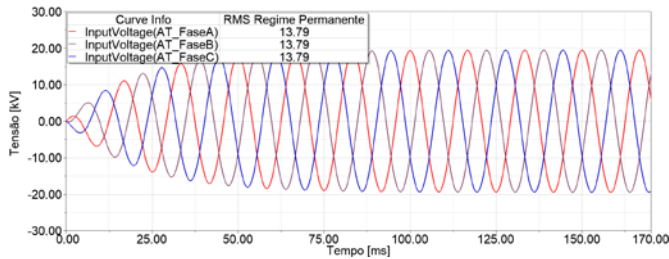


Fig. 5 Tensões trifásicas do lado de AT – Estudo de Caso I.

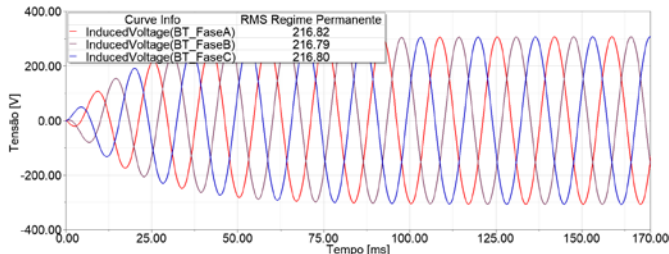


Fig. 6 Tensões trifásicas do lado de BT – Estudo de Caso I.

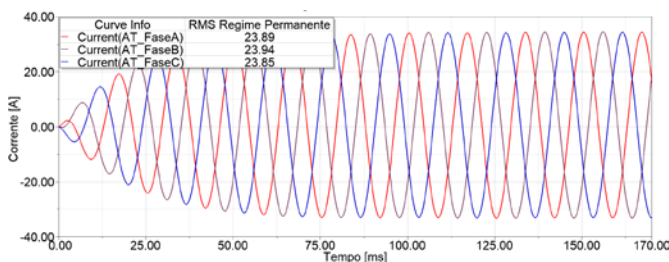


Fig. 7 Correntes trifásicas do lado de AT – Estudo de Caso I.

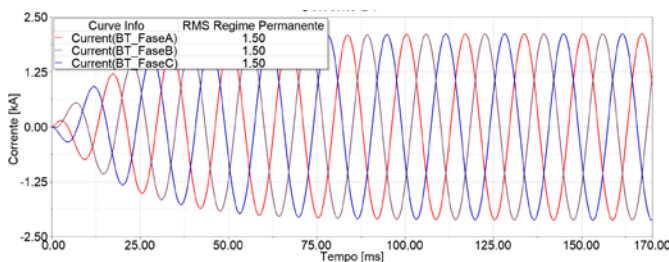


Fig. 8 Correntes trifásicas do lado de BT – Estudo de Caso I.

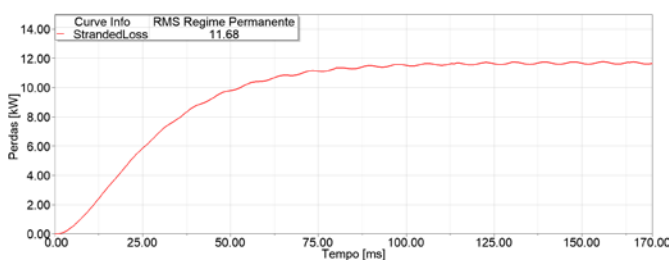


Fig. 9 Perdas nos enrolamentos – Estudo de Caso I.

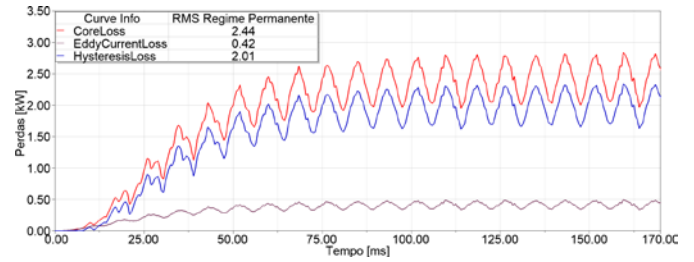


Fig. 10 Perdas no Núcleo – Estudo de Caso I.

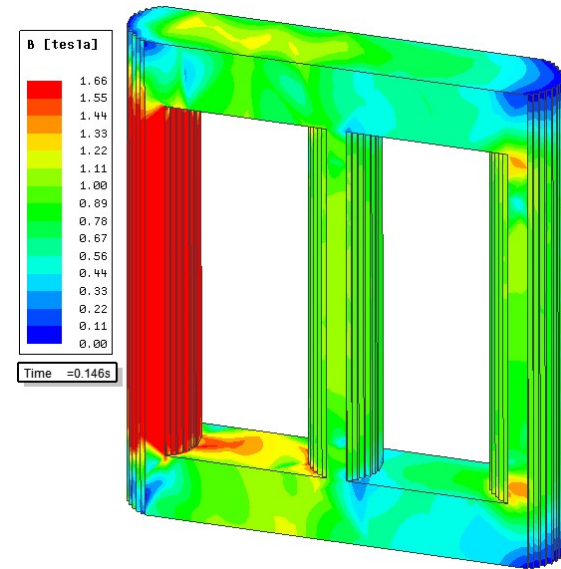


Fig. 11 Densidade de fluxo magnético no núcleo – Estudo de Caso I.

Como pode ser verificado pelas figuras relativas à simulação do Estudo de Caso I, os resultados se mostram coerentes com aquilo que se era esperado. As perdas ficaram em 1,17% (dado de placa 1,09%), enquanto os níveis de tensão e suas respectivas correntes se apresentaram lineares (senoidais). Ressalta-se que as correntes encontradas estão em consonância com a carga imposta. Isto nos permite avançarmos para a próxima etapa dos trabalhos (Estudo de Caso II) dispondo de uma base comparativa sólida. Destaca-se também o valor da densidade de fluxo magnético igual a 1,66 T na coluna da fase A, o qual encontra-se próximo do valor nominal fornecido pelo fabricante. Ressalta-se que esta magnitude ocorre nas três colunas do núcleo. Porém, uma vez que foi desenvolvido uma simulação no domínio do tempo, a distribuição de densidade de fluxo magnético ilustrada na Fig. 11 refere-se a um instante específico, qual seja: aquele de maior corrente na fase A.

3.2 Estudo de Caso II – Comportamento do modelo do transformador diante uma rede distorcida

No que tange à rede de suprimento do transformador, neste Estudo de Caso, adotou-se uma tensão distorcida com as seguintes ordens harmônicas: 5ª (5,5%), 7ª (4,5%), 11ª (3,0%) e 13ª (1,0%), *background distortion*. Estas, uma vez compostas, levam à uma distorção harmônica total de tensão (DTT%) de 7,78%. Este valor de DTT% está dentro dos limites aceitáveis referenciados nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.

As Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 e Fig. 15 apresentam os resultados advindos da simulação do sistema implementado, com as condições ora impostas. Pode-se verificar nestas figuras a propagação dos harmônicos de tensão no transformador e o surgimento, em consequência disto e conforme esperado, das distorções harmônicas de corrente em ambos lados do transformador.

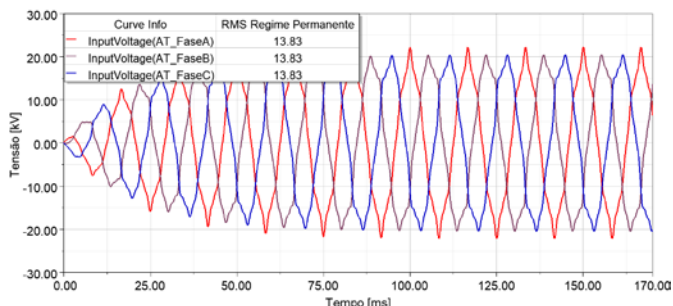


Fig. 12 Tensões trifásicas do lado de AT – Estudo de Caso II.

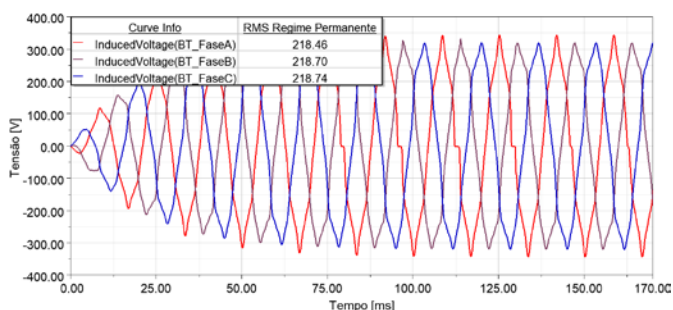


Fig. 13 Tensões trifásicas do lado de BT – Estudo de Caso II.

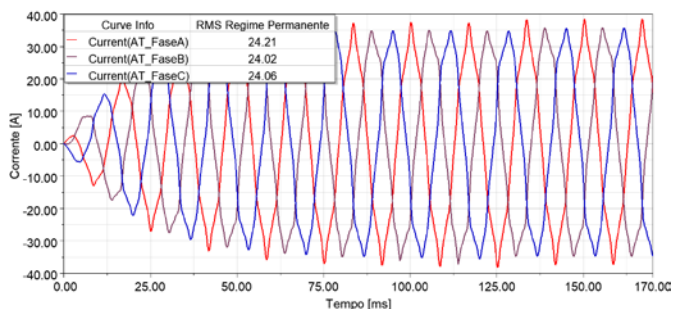


Fig. 14 Correntes trifásicas do lado de AT – Estudo de Caso II.

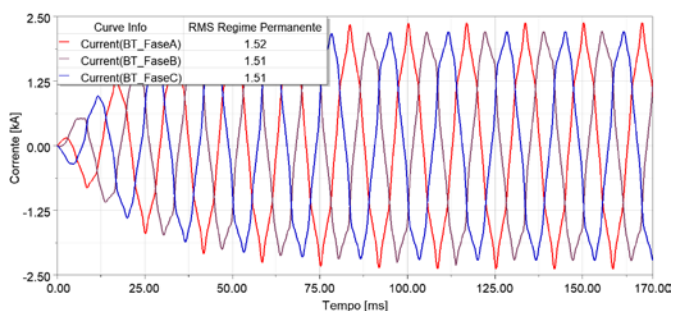


Fig. 15 Correntes trifásicas do lado de BT – Estudo de Caso II.

Na Tabela 2 tem-se os valores das distorções harmônicas individuais de tensão e corrente, assim como as distorções harmônicas totais, nos enrolamentos de AT e BT do transformador.

Tabela 2. Distorções Harmônicas Individuais e Distorção Harmônica Total (DHT)

| Distorção Harmônica | 1° | 5° | 7° | 11° | 13° | DHT (%) | |
|---------------------|----|--------|--------|--------|--------|---------|------|
| a | | | | | | | |
| Tensão (pu) | AT | 0,9965 | 0,0535 | 0,0448 | 0,0273 | 0,0122 | 7,60 |
| | BT | 0,9894 | 0,0467 | 0,0397 | 0,0213 | 0,0053 | 6,58 |
| Corrente (pu) | AT | 1,0 | 0,0507 | 0,0365 | 0,0188 | 0,0069 | 6,56 |
| | BT | 1,0 | 0,0507 | 0,0366 | 0,0189 | 0,0068 | 6,57 |

Ressalta-se que, a partir da aplicação da Série de Fourier, foi verificada uma pequena discrepância entre os valores impostos na fonte distorcida e valores encontrados. Esta discrepância é devida ao passo de integração utilizado na simulação ser de 0,2ms, que é bem coerente com aplicações de elementos finitos, porém relativamente alto para análise harmônica.

De uma forma geral, notou-se uma pequena redução das distorções harmônicas de tensão do lado de AT para o de BT, o que também já era esperado nesta situação simulada. Pois o transformador, por possuir uma impedância equivalente de característica RL, tende a mitigar as distorções harmônicas, funcionando como um filtro do tipo Choke. Isto é mais evidente, conforme observado, com o aumento das frequências.

Por outro lado, os valores das distorções harmônicas individuais das correntes na alta e na baixa do transformador se mostram coerentemente iguais. Este desempenho também já era esperado, uma vez que as harmônicas geradas são de sequência positiva ou negativa, e se propagação pelo transformador trifásico.

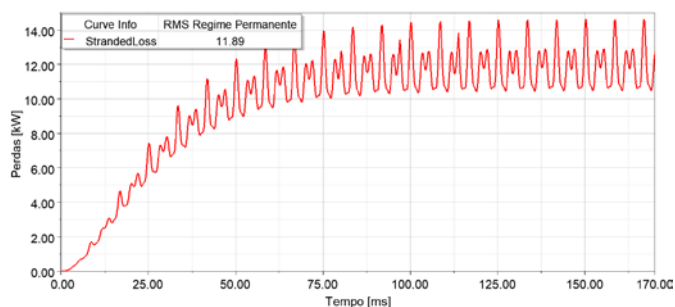


Fig. 16 Perdas nos enrolamentos – Estudo de Caso II.

Analisando a Fig. 16, observa-se um aumento de 210W, ou seja, uma elevação de 1,8% nas perdas joulicas. Este incremento é consequência do aumento da corrente RMS que circula pelos enrolamentos devido, por sua vez, à existência das componentes harmônicas no circuito.

4. CONCLUSÕES

O presente artigo teve como finalidade realizar estudos sobre o comportamento de transformadores de distribuição a seco sob condições senoidais e não-senoidais empregando elementos finitos no contexto da qualidade da energia elétrica. Complementarmente, buscava-se evidenciar as diferenças de resposta deste equipamento nestas duas situações de operação, em termos de propagação de tensão e corrente, bem como análise dos campos magnéticos e comportamento das perdas. Os resultados encontrados, nos dois estudos de caso apresentados, tanto para a propagação quanto para a elevação das perdas, mostraram-se condizentes com a expectativa e coerentes com as condições impostas. Assim sendo, pode-se concluir que o método de elementos finitos, empregado em transformadores de distribuição, pode se tornar uma ferramenta robusta e confiável para estudos diversos de qualidade da energia, avaliação de perdas joulicas e investigação de propagação harmônica.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Projeto de P&D UFU/TCE-CEB (PD-05160-1803/2018) pelo suporte financeiro concedido, à TRAEI Transformadores Elétricos e à ANSYS pelo apoio técnico dado à pesquisa em questão.

REFERÊNCIAS

- Boyd, E. and Borst, J. (1984). Design Concepts for an Amorphous Metal Distribution Transformer. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, [online] PAS-103(11), pp.3364-3372. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4112451>.
- Iskender, I. and Najafi, A. (2014). Evaluation of transformer performance under harmonic load based on 3-D time stepping finite element method. *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, Romania, 25-28 May, 2014, pp 224-228, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6842827>.
- Khan, S., Escarela-Perez, R., Olivares-Galvan, J., Jimenez-Mondragon, V. and Espino-Cortes, F. (2017). Finite element analysis of distribution transformer under harmonics condition: A review. *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 8-10 Nov. 2017, Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6842827>.
- Ozturk, N. and Celik, E. (2011). Application of genetic algorithms to core loss coefficient extraction. *Progress In Electromagnetics Research M*, [online] 19, pp.133-146. Available at: <http://www.jpier.org/PIERM/pierm19/11.11051310.pdf>.
- Santos, I. N. and dos Santos, C. A. (2018). Uma forma de onda cada vez mais distorcida - *O Setor Elétrico*. [online], available at: <https://www.osetoreletrico.com.br/uma-forma-de-onda-cada-vez-mais-distorcida/> [accessed 15 Dec. 2019].
- Stalprodukt S.A (2015). *Grain Oriented Electrical Steel*, available at: <https://www.stalprodukt.com.pl/offer/cold-rolled-electrical-steel> [accessed 23 July 2019].

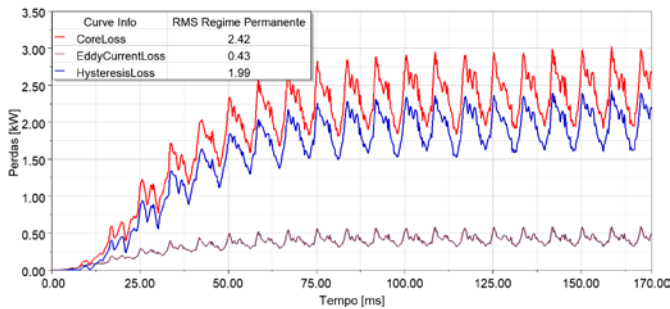


Fig. 17 Perdas no Núcleo – Estudo de Caso II.

Já as perdas no núcleo (Fig. 17), compostas pelas perdas por histerese e perdas pelas correntes de Foucault, praticamente se mantiveram constantes, havendo um pequeno aumento nas perdas por histerese.

Outro ponto passível de destaque foi o aumento da variação dos picos de máximo e mínimo nos valores das perdas do transformador. Enquanto as perdas nos enrolamentos para o Estudo de Caso I (Fig. 9) se mantiveram praticamente constante em regime permanente, esta condição não foi verificada para o Estudo de Caso II (Fig. 16). O mesmo fenômeno ocorreu com as perdas no núcleo, que apresentaram uma oscilação maior para a condição distorcida (Fig. 17) em relação a rede sem distorções (Fig. 10), apesar de seu valor RMS ter se mantido praticamente o mesmo para os dois casos analisados no presente artigo.

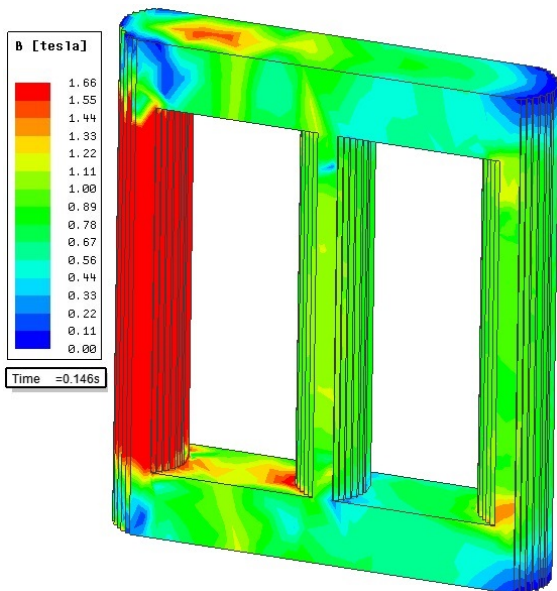


Fig. 18 Densidade de fluxo magnético no núcleo – Caso II.

Comparando as Fig. 11 e Fig. 18, nota-se que, para um mesmo instante de tempo (0,146s), houve uma distribuição ligeiramente maior do valor máximo do fluxo magnético para a condição distorcida, o que é altamente compreensível diante das discussões feitas, mostrando a solidez do modelo implementado.