



# 9º EnPE

## Encontro de Ensino, Pesquisa & Extensão

*Patrocínio, MG, outubro de 2022*

### **MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS PARA ANÁLISE DO ESPECTRO HARMÔNICO DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO**

Wendell Hosed Saran, Camilla de Sousa Chaves, Wesley Cooper  
Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Patrocínio  
Projeto de Pesquisa  
CNPq

#### **Resumo:**

O presente artigo relata sobre possíveis problemas na qualidade de energia devido à geração de harmônicos não característicos de tensão e corrente provenientes do comportamento do material do núcleo de transformadores. Considerando as condições em que o equipamento esteja com baixo carregamento, a corrente de excitação poderá contribuir de forma significativa nas distorções harmônicas de tensão nos barramentos de alimentação dos consumidores, causando uma transgressão dos limites admissíveis de indicadores da qualidade da energia instituídos pelos agentes regulamentadores. Nesse sentido, a pesquisa faz a apresentação de um modelo computacional no programa ATP para um transformador de 15kVA, 220/220 V, sendo analisado o conteúdo harmônico da corrente de magnetização do dispositivo para diferentes situações de saturação magnética do núcleo. Ao final do artigo, são apresentadas as conclusões obtidas até o presente considerando o modelo computacional desenvolvido e análise dos resultados das simulações.

**Palavras-chave:** harmônicos não característicos; material magnético; transformadores.

#### **Introdução**

Os transformadores são equipamentos de suma importância para os sistemas elétricos em geral, visto que, dentre as várias vantagens observadas, pode-se destacar o aumento da eficiência, desempenho e segurança dos circuitos. Inúmeros estudos foram e ainda são realizados a respeito do desempenho e comportamento dos transformadores frente ao funcionamento dinâmico dos sistemas elétricos de potência, podendo destacar as referências (CHAVES, 2009), (CHAVES et al., 2018) e (SARAIVA, 2011).

É de conhecimento geral que a corrente de magnetização, a qual é responsável por estabelecer o fluxo magnético no núcleo, depende da tensão aplicada, material magnético do núcleo e número de espiras dos enrolamentos. Sabe-se que nas condições de baixo carregamento a corrente de magnetização se torna significativa e poderá interferir nas tensões disponibilizadas para os consumidores, conforme a referência (DUGAN et al, 2004). Nesse sentido, o forte conteúdo harmônico e, sobretudo, presença de harmônicas não características na corrente de magnetização poderão impactar de forma negativa nas tensões dos barramentos pertencentes ao sistema de distribuição.

Diante da questão supra posta, este artigo apresenta um estudo relacionado à identificação de possíveis problemas de qualidade da energia frente a transformadores de força e distribuição. Para tanto, foram feitos ensaios laboratoriais em um transformador de 15 kVA, 220/220 V para a análise do espectro harmônico da corrente de magnetização do equipamento. Em seguida, foi iniciada a representação do transformador no programa ATP para a realização de simulações e validação do modelo computacional diante dos resultados obtidos nos ensaios. As considerações feitas até o momento ainda são embrionárias, visto que serão realizados posteriormente estudos de caso considerando o modelo computacional consolidado para diferentes situações do sistema elétrico.

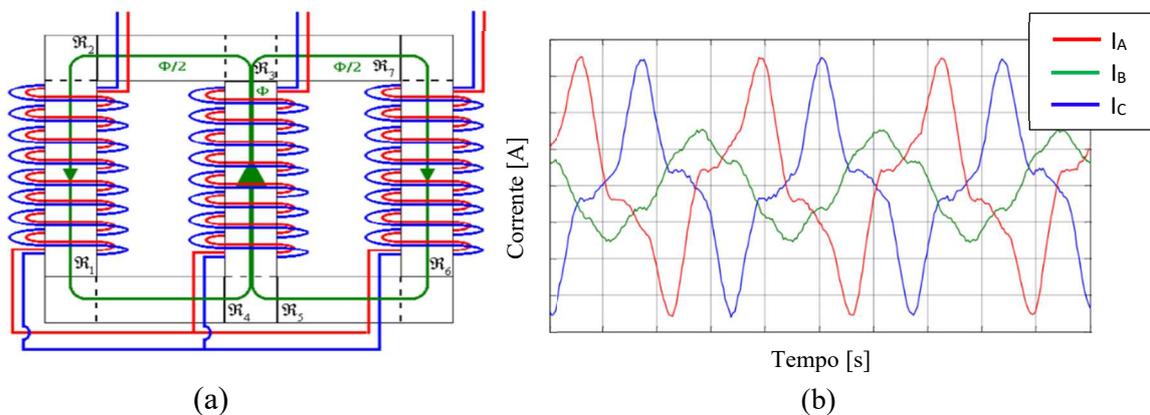
## **Referencial Teórico**

O transformador trifásico é constituído basicamente por um núcleo de três colunas e duas bobinas por fase, as quais são sobrepostas e envolvem uma das colunas do núcleo. Considerando a geometria do núcleo, os caminhos magnéticos estabelecidos para os fluxos, os quais são gerados pelas correntes de cada fase, são diferentes entre si, o que acarreta em correntes de excitação diferentes conforme o local onde a bobina está situada. Em específico, a corrente da fase situada na coluna intermediária é menor, enquanto as correntes das fases situadas nas colunas laterais são iguais e superiores à corrente da fase intermediária. A figura 1 (a) ilustra a vista frontal de um transformador trifásico considerando os caminhos magnéticos encontrados pelo fluxo máximo, retratando o instante em que o fluxo máximo percorre pela coluna central. Já a figura 1 (b) ilustra as respectivas correntes de magnetização de cada fase.

Observa-se na figura 1 (b) que a forma de onda das correntes de magnetização de um transformador trifásico não é senoidal, tendo em vista o forte conteúdo harmônico proveniente da característica não linear do material ferromagnético do núcleo.

Adicionalmente, nota-se que essas correntes não correspondem ao perfil esperado para um sistema trifásico equilibrado, pois é verificado que a corrente da fase B (situada na coluna central) possui magnitude diferente em relação às correntes das fases A e C (colunas laterais). Isso significa que, além de serem observadas as componentes harmônicas ímpares características, também estão presentes as componentes pares que não são características, podendo implicar numa transgressão nas distorções harmônicas totais e individuais de tensão do sistema elétrico.

Figura 1 – (a) Vista frontal de um transformador trifásico e a característica de magnetização do material do núcleo; (b) correntes de magnetização.



FONTE: CHAVES (2009, 92 p.) e SARAIVA (2011, 220 p.) – adaptada.

## Desenvolvimento e Resultados

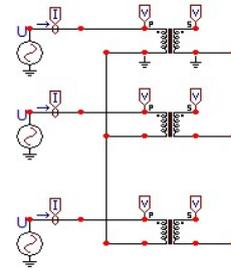
Os estudos foram iniciados por meio da execução do ensaio a vazio e de curto-circuito no laboratório de Qualidade de Energia da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com o intuito de obter os parâmetros do transformador necessários ao seu circuito elétrico equivalente e identificar as distorções harmônicas presentes na corrente a vazio. Para tanto, foi utilizado um transformador de 15 kVA, 220/220 V, 60 Hz e ligação estrela com neutro aterrado tanto no primário e no secundário. As medições foram realizadas com o auxílio de um qualímetro da marca Fluke, uma fonte de tensão regulável e um computador responsável por parametrizar a fonte. Os resultados dos experimentos, como resistências e reatâncias de dispersão, resistência representativa das perdas no núcleo e característica de magnetização do material magnético, foram utilizados para a representação do transformador trifásico no ATP. Cada fase foi representada por um transformador monofásico saturável, o qual já é existente no programa. A figura 2 (a)

mostra o transformador utilizado para a realização dos testes laboratoriais, enquanto a figura 2 (b) mostra o modelo do transformador concebido no ATP.

Figura 2 – (a) ensaio realizado em laboratório no transformador de 15 kVA; (b) modelo computacional concebido no ATP.



(a)

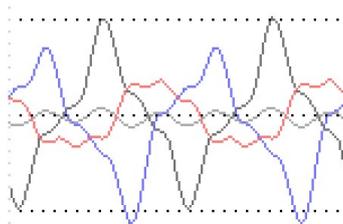


(b)

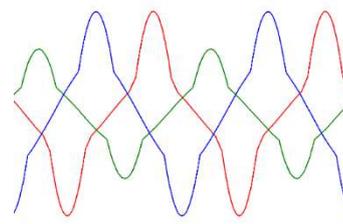
FONTE: Próprio autor.

A figura 3 (a) mostra os resultados experimentais e a figura 3 (b) os resultados computacionais, sendo identificadas as diferenças entre as respectivas formas de onda. A tabela 1 apresenta os resultados computacionais e experimentais das correntes em pu considerando o espectro harmônico até a 7ª ordem. Adicionalmente, verifica-se o desvio do valor obtido em simulação em relação ao valor encontrado experimentalmente.

Figura 3 – Formas de onda das correntes trifásicas: (a) resultados experimentais; (b) resultados computacionais.



(a)



(b)

FONTE: Próprio autor.

Tabela 1 – Resultados computacionais, laboratoriais e o respectivo desvio entre os valores.

Harmônica	Resultados de simulação			Ensaio Laboratorial			Desvio (%)		
	Ia [pu]	Ib [pu]	Ic [pu]	Ia [pu]	Ib [pu]	Ic [pu]	A	B	C
1	3,38E-02	2,28E-02	3,62E-02	4,70E-02	2,72E-02	4,75E-02	28,17	16,38	23,77
2	5,20E-06	2,10E-06	5,20E-06	2,84E-03	2,92E-03	4,29E-03	99,82	99,93	99,88
3	1,14E-02	5,64E-03	8,65E-03	5,81E-03	1,27E-02	6,95E-03	-95,78	55,54	-24,45
4	5,30E-06	3,15E-06	5,30E-06	8,12E-04	7,36E-04	1,17E-03	99,35	99,57	99,55
5	3,56E-03	2,24E-03	3,48E-03	6,62E-03	4,01E-03	6,35E-03	46,19	44,21	45,22
6	3,58E-06	2,55E-06	3,58E-06	2,03E-04	2,03E-04	4,31E-04	98,24	98,74	99,17
7	5,21E-04	5,82E-05	6,94E-05	3,55E-04	2,54E-04	4,31E-04	-46,70	77,08	83,92

FONTE: Próprio autor.

## Considerações Finais

Ainda que a pesquisa esteja em estágio embrionário, os resultados obtidos até o presente são promissores, visto que as formas de onda das correntes ilustradas na figura 3 seguem tendências semelhantes. Ainda é preciso refinar a característica de magnetização implementada no programa ATP para que as correntes de fase estejam mais condizentes com os valores experimentais, no que diz respeito à magnitude tanto da componente fundamental quanto das harmônicas observadas. Para tanto, será preciso fazer mais medições no transformador estudado, de modo a obter maiores informações para a construção mais fidedigna da característica tensão x corrente. Adicionalmente, será necessário verificar o grau de influência das perdas no ferro na corrente de magnetização.

## Referências

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª edição. Tradução: Anatólio Laschuk. -Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHAVES, Camilla de Sousa. **Análise de fenômenos eletromagnéticos em transformadores utilizando o programa computacional FEMM**. Orientador: José Roberto Camacho. 2009. 92 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CHAVES, Camilla de Sousa et al. Análise da correlação entre as perdas adicionais e os fluxos de dispersão em transformadores sob distintos níveis de saturação magnética. **IX WORKSPOT- International workshop on power transformers, equipment, substations and materials**, Foz do Iguaçu, 26 nov. 2018.

DUGAN, Roger et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2ª edição, 2004.

FANDI, Juliana. **Modelagem de Transformador de 3 colunas no ATP**. 2003. 250 f. Dissertação De Mestrado (Pós-graduação) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003

SARAIVA, Elise. **Um estudo das alterações dos parâmetros de transformadores oriundas de deformações nos enrolamentos**: uma contribuição para o diagnóstico de vida útil. Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães. 2011. 220 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SARAIVA, Elise; CHAVES, Marcelo Lynce Ribeiro; HERIVELTO DE SOUZA, Bronzeado. Proposta de metodologia para implementação do ciclo de histerese no modelo de transformadores trifásicos no programa ATP. **XVIII SNPTEE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**, Curitiba, p. 1-8, 17 out. 2005.