



ANÁLISE EXPERIMENTAL DE RESSONÂNCIA EM TRANSFORMADORES PLANOS

Alexandre Alex Silva e Caldas¹, Eduard Montgomery Meira Costa¹

¹ Universidade Federal do Vale do São Francisco, 48902-300 Juazeiro, BA, Brasil.

*Email: alexandrecaldas@hotmail.com.br

Resumo: Este trabalho apresenta resultados de observações dos efeitos da força eletromotriz senoidal induzida em transformadores com núcleo de ar formados por bobinas planas e anelares. Esse sistema é considerado um circuito *RLC*, pois além dos valores de impedância e indutância se encontram, ainda, as capacitâncias parasitas que não podem ser desconsideradas nesses estudos. Nos experimentos do trabalho foram utilizadas bobinas planas e em anel, alternando primário e secundário, e variando a frequência a fim de se observar picos de ressonância, onde esses transformadores apresentam altos ganhos de tensão no secundário. Também foi observado como se comportam as variações de fases e a função de transferência do sistema. Sendo feito ao final uma análise dos resultados.

Palavras-chave: *Força Eletromotriz, transformadores e ressonância.*

Abstract: This paper presents results of observations of the emf effects powered with sinusoidal voltages in transformers, whose coils are presented as planar and ring forms. This system is considered a *RLC* circuit, because besides of reactance and impedance values exist stray capacitances that cannot be ignored in these cases. In the presented experimental analysis were placed planar and ring coils, alternating between primary and secondary, and varying the frequency with purpose of observe resonance peaks of gain transformers, where these transformers present high gain voltages. It was also observed the behavior of these transformers related the changes of phases and system transfer function. Too, at the final are presented an analysis of the results.

Keywords: Electromotive Force, transformers, resonance.

INTRODUÇÃO

Neste artigo são verificadas as respostas de transformadores especiais planos com núcleo de ar, formados por bobinas planas e anelares. Assim, são analisados os níveis de ganho de tensão na ressonância, para várias bobinas formando esses transformadores quando se varia a frequência de entrada no primário. Assim, é estudado o comportamento quanto a cada arranjo de bobinas e seus respectivos níveis de ressonância. Nas faixas de frequências de ressonância, os conjuntos de bobinas apresentam alto ganho nos níveis de tensão no secundário, mesmo com o número de espiras invertido. Ou seja, mesmo o transformador tendo menos espiras no secundário do que no primário há um ganho alto na tensão, o que não é previsto na teoria de transformadores ideais [1,2]. O trabalho desenvolvido utilizou da teoria considerando transformadores ideais, já que nos intervalos de ressonância a reatância capacitiva compensa a reatância indutiva, e apenas é considerada a resistência interna dos enrolamentos, que apresenta baixa impedância devido à dimensão dos transformadores analisados.

Para exemplificação do comportamento do transformador sob ação desse fenômeno de ressonância, quando variada a frequência e mantida a tensão nominal do primário, é calculada a função de transferência do circuito, onde se pode

plotar seus resultados e confirmar os resultados obtidos empiricamente.

Para apresentação gráfica do comportamento dos transformadores é utilizada uma escala logarítmica, em substituição a escala linear (diagrama de *Bode* [3,4]).

Assim, esse artigo tem como objetivo apresentar resultados experimentais realizados com transformadores planos que apresentam altos ganhos de tensão e diferença de fase em faixas de frequência de ressonância, sendo esses transformadores formados por bobinas em anel e disco. Considerando [3-6] onde são apresentadas relações ideais de máquinas de transformação de tensão e corrente elétrica, o artigo apresenta a descrição de novos métodos como em [7-11] de análise que possibilitarão a ampliação da possível implementação de equipamentos específicos que utilizam de altos tensões, ou em casos específicos de estudos de bobinas, com suas propriedades e aplicações [12-16].

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

Os equipamentos utilizados para a realização dos experimentos foram um osciloscópio digital Agilent Technologies DSO3202A com ponta de prova N2862A

de 12pF de capacitância de entrada e um gerador de funções Rigol DG2021A.

Para os estudos realizados, ora apresentados neste artigo, foram utilizadas bobinas planas e anel com número de espiras variando entre 2 e 1600. Todas as bobinas foram montadas em uma estrutura de diâmetro de $D = 4.65 \times 10^{-2}$ cm, com fio de cobre esmaltado de diâmetro $d = 2.02 \times 10^{-4}$ cm (32 AWG). Nas bobinas com menos de 200 espiras, as suas alturas eram os próprios diâmetros do fio ($h = d = 2.02 \times 10^{-4}$ cm) e nos casos das bobinas de 200 espiras acima, as alturas foram $h = 5 \times 10^{-4}$ cm. As espiras apresentam suas espiras uniformemente espaçadas na forma espiral do centro para a extremidade, no caso das bobinas planas.

Os experimentos apresentados foram realizados com excitação na bobina primária, sendo ela plana ou anelar, com tensão de pico a pico de 5V senoidal. Nos dados apresentados, essa tensão de entrada varia por causa da impedância interna do gerador de sinais utilizado. As frequências fornecidas pelo gerador de sinais variam de 1 kHz a 25 MHz (com 20 mA de corrente de saída). Assim foram analisadas, quanto à tensão, as respostas do primário e do secundário dos transformadores estudados. Informações de níveis de frequência ressonantes, comportamento das bobinas e mudanças de fase na ressonância serão apresentadas nas seções posteriores.

RESULTADOS OBTIDOS DE GANHO DE TENSÃO EM NÍVEIS DE RESSONÂNCIA

Em frequência de ressonância os transformadores apresentaram altos ganhos de tensão que é consequência do ganho de energia encontrado nessas faixas de frequência, cujo ganho não é previsto pela teoria.

As bobinas de 2, 5, 7 e 9 espiras não estão aqui relacionadas por possuírem níveis de ressonância acima da faixa compreendida dos estudos (25 MHz), que é superior ao limite do gerador de sinais.

Na Figura 1 são apresentados gráficos experimentais da tensão (eixo x) *versus* frequência (eixo y), mostrando o funcionamento do transformador em frequências que variam de 1kHz a 25MHz, onde se evidenciam os picos de ressonância. Observa-se nesses gráficos que as faixas de frequência onde ocorre a ressonância, o secundário apresenta um ganho de tensão muito maior que a relação de transformação do transformador ideal, considerando a relação entre o número de espiras primário/secundário.

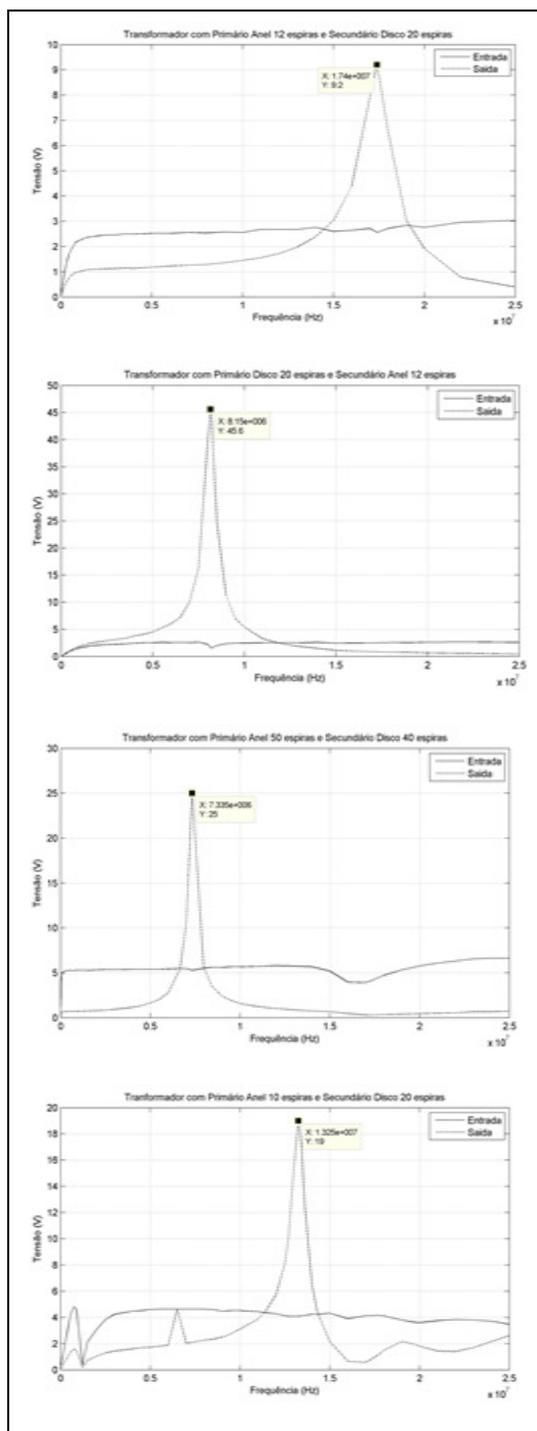


Figura 1 – Tensões de entrada e saída em função da frequência. Dados experimentais de: a) Anel 12 x disco 20, b) disco 20 x anel 12, c) anel 10 x disco 20, d) anel 50 x disco 40.

Na Tabela 1 são apresentadas as relações de transformação dos transformadores estudados, cujos gráficos

tensão x frequência são apresentados na Figura 1, como exemplos que em alguns níveis de frequência as bobinas primárias excitadas com tensão senoidal apresentam um ganho no secundário muito além do esperado pela relação de transformação do transformador ideal.

Deve-se observar nesta Tabela que a codificação da primeira coluna se refere aos tipos de bobinas (a = anel; d = disco) em que o número posterior a letra define o número de espiras da mesma. Por exemplo, o anel 12 x disco 20, indica que o transformador em análise possui doze espiras na bobina primária tendo a forma de anel e vinte espiras na bobina em disco do secundário, ou abreviadamente (a12 x d20).

| Trafo | Freq. Res. (MHz) | Pri. (V) | Sec. (V) | Esp. | Enc. |
|---------|------------------|----------|----------|------|-------|
| a12xd20 | 17,4 | 2,56 V | 9,2 V | 1,67 | 3,6 |
| d20xa12 | 8,15 | 1,68 V | 45,6 V | 0,6 | 27,14 |
| a10xd20 | 13,25 | 4,08 V | 19 V | 2 | 4,66 |
| a50xd40 | 7,33 | 5,28 V | 25 V | 0,8 | 4,74 |

Quando há ressonância, a entrada sofre uma variação, caindo abaixo de $5 V_{pp}$, tensão de pico a pico. Entretanto, os resultados apresentados são calculados considerando que a entrada é mantida em $5 V_{pp}$. Como apresentado nas Figura 1 e 2, na linha contínua que representa o

comportamento da tensão de entrada, a tensão não é igual para toda faixa de frequência analisada, como se pode ver claramente em [7-11], que mostra a correlação dos experimentos realizados.

Além do mais na Figura 1 pode-se comprovar empiricamente que, mesmo em situações com relação de espiras menor que 1 (casos de (b) da Figura 1, (b) e (d) da Figura 2), ou com relação de espiras maiores que 1 (casos (a) da Figura 1, (a) e (c) da Figura 2), pode-se obter um ganho abrupto e atípico de ganho em tensão na frequência ressonante. O que é visto apenas na literatura em [7-11].

Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os diagramas de Bode das combinações de transformadores da Figura 1 e da Figura 2. Nestes, são vistos os comportamentos dos transformadores em relação à amplitude do sinal de saída, apresentando um gráfico de maior valor para o estudo do comportamento de cada um, pois apresenta nas faixas de ressonância uma amplitude menor, mostrando também um comportamento atípico do esperado [7-11].

ESTUDO DA FASE DO SISTEMA EM RESSONÂNCIA

Nos estudos realizados com as bobinas anel-disco ou disco-anel quando esses transformadores entravam em níveis ressonantes, observou-se que sempre ocorre uma

defasagem entre primário e secundário de aproximadamente $\pi/2$ rad (90°). Além do mais, essa defasagem sempre aumenta quando as bobinas saem da ressonância (para a faixa de frequência inferior ou superior), o que é esperado pela análise da função de transferência do sistema. Em valores de frequência aproximados (tanto nas anteriores como nas posteriores) à faixa de frequência ressonante, a defasagem de fase no primário e secundário do transformador eram praticamente as mesmas.

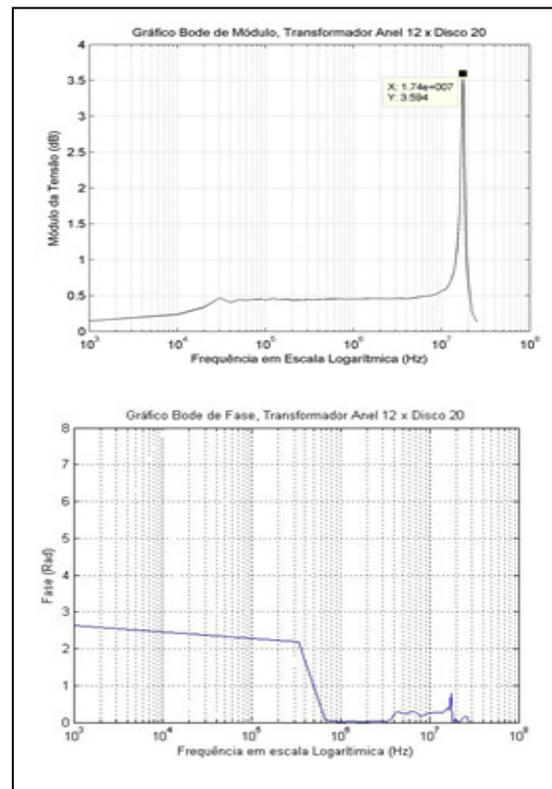


Figura 2 – Diagramas de Bode do Transformador com Primário em Anel com 12 espiras e Secundário em Disco com 20 espiras.

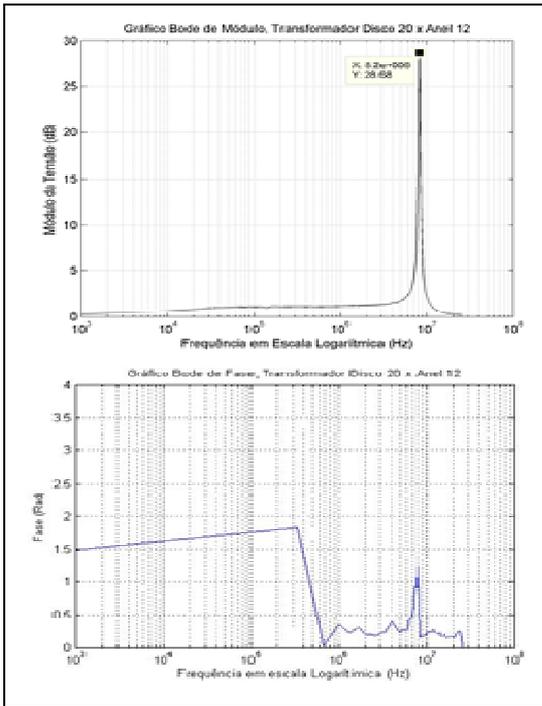


Figura 3 – Diagramas de Bode do Transformador com Primário em Disco com 20 espiras e Secundário em Anel com 12 espiras

Pela teoria dos circuitos magneticamente acoplados [3,4], na ressonância a reatância capacitiva compensa totalmente a reatância indutiva. Assim, apenas a resistência interna dos condutores apresenta. E pela Lei de Ohm [3,4], como a impedância se torna puramente resistiva, a defasagem entre entrada e saída deveria ser nula. Isso pode ser observado também na análise dos gráficos de fase do diagrama de Bode, onde nas frequências de ressonância, a defasagem entre a entrada e a saída do transformador permeia 90° ($\pi/2$), onde o transformador apresenta o maior ganho.

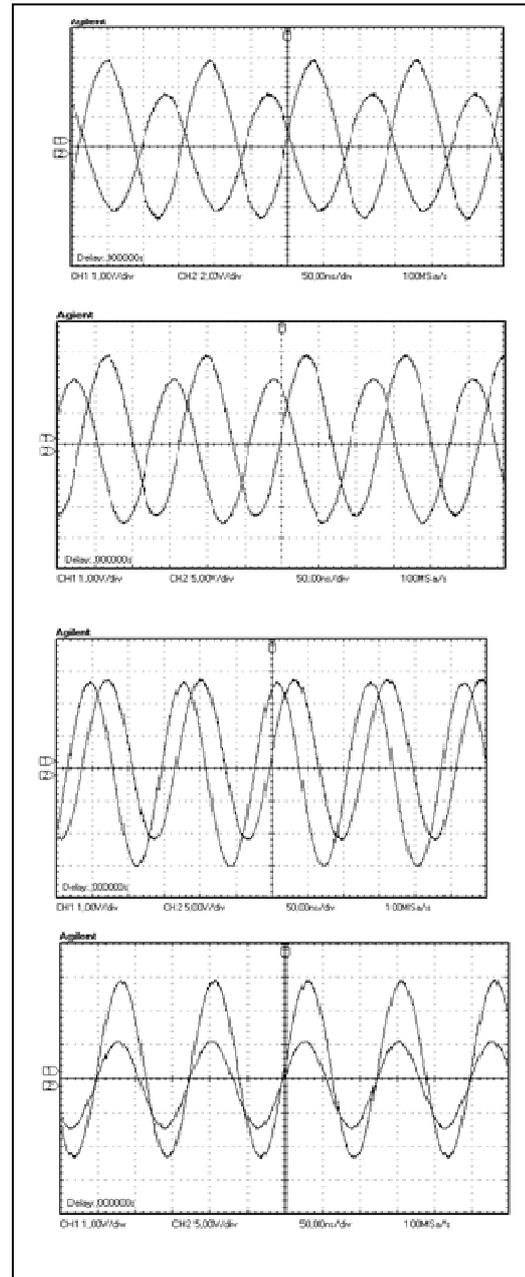


Figura 4 – Defasagem das tensões do transformador com primário formado por bobinado em Anel de 30 espiras e secundário com bobinado em Disco de 40 espiras, em faixas de ressonância.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conceito de ressonância aplica-se aos transformadores estudados já que todos possuem indutância, capacitância (parasita) [15,16], além da impedância interna. Uma das principais características comprovadas é que nas faixas de frequência de ressonância ocorre um ponto de amplitude máxima, quando os valores de capacitância compensam os valores de indutância, e assim o valor da impedância assume apenas o valor da resistência interna dos condutores. Assim o transformador apresenta um ganho expressivo no secundário, que é quando a impedância se encontra puramente resistiva, apresentado ganhos não considerados na literatura [1-6], conforme pode ser visto em [7-11], para os casos de excitação do primário em onda quadrada, e [21] para o caso de onda senoidal.

Nos circuitos acoplados apresentados foram verificadas mudanças de fase nas frequências de ressonância onde o transformador obtinha um alto ganho de tensão no secundário, como ocorre nos transformadores de pulso (como o de Tesla) [17-20], quando comparado com o ganho previsto pela relação do transformador ideal. O ganho do circuito descreve a relação entre as amplitudes das senoides de saída e de entrada. O efeito de ressonância ocorre justamente quando as frequências do

primário e do secundário assumem mesmo valor [12-13].

Este trabalho apresentou análises de resultados experimentais do comportamento de transformadores com bobinas planas *versus* anelares, ou anelares *versus* planas, onde se demonstrou a evidência de resultados atípicos dos dados extraídos, como relações de transformação invertidas e aumento na defasagem entre tensões do primário e secundário.

Neste artigo comprova-se empiricamente uma discrepância, frente à literatura de circuitos analisada [1-4,12-14,20], em relação à defasagem das tensões do primário e secundário nas faixas de frequências de ressonância. Nas faixas das frequências ressonantes há sempre um ganho expressivo de tensão do secundário em relação ao primário [3,4,12-14,20, 21].

Este estudo se torna uma importante ferramenta para mostrar o comportamento de transformadores com bobinas planas e anelares em amplas faixas de frequência (1KHz a 25MHz). Podendo esse estudo ser uma referência para trabalhos futuros com novas configurações para a bobina de Tesla [17-20], utilizando transformadores em cascata, objetivando um ganho expressivo com menor porte que o normal de uma bobina de Tesla, além de outras possibilidades de aplicações, como a possibilidade de expansão desses estudos à transmissão de energia sem fio, utilizando

esse alto ganho dos transformadores em ressonância.

REFERÊNCIAS

1. KOSOW, Irving L., “Máquinas Elétricas e Transformadores”. 15ª Edição, Editora Globo. São Paulo, 2005.
2. ARAUJO, G. de A., VASCONCÉLOS JUNIOR, C. A. V., Costa, E. M. M., “Desenvolvimento de um Transformador Experimental para Estudos em Eletromagnetismo”, *Diálogos & Ciência*, 163-176, 2010.
3. NILSSON, J. W., RIEDEL, S. A. “Circuitos elétricos”. 6ª edição. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2003.
4. ALEXANDER, Charles K; SADIKU, Matthew N. “*Fundamentos de Circuitos Elétricos*”. 3ª Edição. Editora Bookman. Porto Alegre, 2003.
5. OGATA, K. “Engenharia de Controle Moderno”, 4ª Edição. Editora Prentice Hall, São Paulo 2005.
6. DORF, R. C. e BISHOP, R. H., “Sistemas de Controle Modernos”, 8ª Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro 2001.
7. COSTA, E. M. M., “Responses in transformers built with planar coils inner ring coils excited by square waves,” *Progress In Electromagnetic Research B*, Vol. 18, 43-58, September 2009.
8. COSTA, E. M. M., “Resonance between planar coils vs ring coils excited by square waves,” *Progress In Electromagnetic Research B*, Vol. 18, 59-81, September 2009.
9. COSTA, E. M. M., “Resonance On Transformers Excited By Square Waves And Explanation Of The High Voltage On Tesla Transformer.” *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 18, 205-224, 2009.
10. COSTA, E. M. M., “Planar Transformers Excited By Square Waves” *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 100, 55-68, 2010
11. COSTA, E. M. M., “A basic analysis about induced EMF of planar coils to ring coils,” *Progress In Electromagnetic Research B*, Vol. 17, 85-100, August 2009.
12. ANIOIN, B. A., et al., “Circuit properties of coils” *IEE Proc.-Sci. Mes. Technol.*, Vol. 144, No. 5, 234-239, September 1997.
13. BARLEVY, A. S. e RAHMAT – SAMII, Y. “On The Electrical And Numerical Properties Of High Q Resonances In Frequency Selective Surfaces.” *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 22, 1–27, 1999.
14. KURS, A. et al. “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”. *Science Express*. Vol. 317. no. 5834, pp. 83 – 86, 7 June 2007.
15. HOLE, M. J. and L. C. APPEL, “Stray capacitance of a two-layer air-cored inductor,” *IEE Proc. Circuits Devices Syst.*, Vol. 152, No. 6, 565-572, December 2005.

16. COSTA, E. M. M. “Parasitic Capacitances On Planar Coil”. *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol. 23, 2339–2350, 2009.
17. COSTA, E. M. M. “Resonance on Coils Excited by Square Waves: Explaining Tesla Transformer”. *IEEE Transactions On Magnetism*, Vol. 46, No. 5, May 2010.
18. DENICOLAI, M., “Tesla transformer for experimentation and research.” Licentiate Thesis, Helsinki University of Technology, May 2001.
19. BABIC, S. I. e AKYEL, C. “New Analytic-Numerical Solutions for the Mutual Inductance of Two Coaxial Circular Coils With Rectangular Cross Section in Air”. *IEEE Transactions On Magnetism*, Vol. 42, No. 6, June 2006.
20. AKYEL, C, BABIC, S. I. e KINCIC S. “New and Fast Procedures for Calculating the Mutual Inductance of Coaxial Circular Coils (Circular Coil–Disk Coil)”. *IEEE Transactions On Magnetism*, Vol. 38, No. 5, September 2002.
21. COSTA, E. M. M., Resonance Analysis of Induced EMF on Coils. In: Sadik Kara. (Org.). *Electromotive Force and Measurement in Several Systems*. 1ed. Rijeka, Croácia: InTech - Open Access Publisher, 2011, v. 1, p. 153-174.