

METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE INDUTORES COM NÚCLEO TOROIDAL VISANDO APLICAÇÃO EM CONVERSORES CC-CC

MARCELO N. TIROLI¹, FLÁVIO A. S. GONÇALVES²

¹ Doutorando em Engenharia Elétrica, UNESP, Campus Bauru, marcelo.tirolli@unesp.br

² Professor Doutor, Orientador, UNESP, Campus Sorocaba, flavio.as.goncalves@unesp.br
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.00-2 Sistemas Elétricos de Potência.

Apresentado no
4º Congresso de Pós-Graduação do IFSP
27 e 28 de novembro de 2019- Sorocaba-SP, Brasil

RESUMO: Este trabalho apresenta uma metodologia simplificada para o projeto de indutores aplicados a conversores chaveados do tipo CC-CC. É feita uma abordagem com relação as partes que constituem o indutor, como formatos e materiais do núcleo, bem como o tipo do enrolamento. Em seguida é apresentado em etapas um modelamento matemático para executar o projeto de indutores no formato toroidal, passando pela especificação do núcleo, definição e ajustes na quantidade de espiras, definição do tipo de enrolamento, análise das perdas no núcleo e no enrolamento e análise de temperatura. Por fim, a metodologia é aplicada no projeto do indutor toroidal de um conversor *boost*, onde após sua fabricação são realizadas medidas para a verificação de seus parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE: Projeto de indutores; perdas no núcleo e no cobre; conversores CC-CC.

METHODOLOGY FOR DIMENSIONING OF TOROIDAL CORE INDUCTORS WITH FOCUS ON APPLICATION IN DC-DC CONVERTERS

ABSTRACT: This paper presents a simplified methodology to be used in inductors project applied to switched DC-DC converters. It's contains an approach about the parts of the inductor, such as core type and materials, as well as the type of winding. Then a mathematical models is presented to be consider to dimensioning a toroidal inductor, including the core specification, setting and adjusts of the turns quantity, losses analysis (core and winding) and analysis about temperature. Finally, the methodology was applied in the toroidal inductors project of a boost converter, so your parameters could be checked after its manufacture.

KEYWORDS: Inductor design, core and copper losses; DC-DC converters.

INTRODUÇÃO

Sistemas de conversão de energia elétrica usualmente empregam componentes armazenadores de energia nas formas de campo elétrico e magnético. Neste sentido a especificação do indutor é um fator de extrema importância para sistemas de eletrônica de potência, pois garantem a operação de forma eficiente dentro dos critérios pré-estabelecidos, além de apresentarem um volume reduzido e serem economicamente viáveis. Diversos fatores são levados em consideração no projeto de indutores, tais como frequência de chaveamento, potência, corrente média, corrente de ondulação. Assim, tomando os critérios requeridos, pode-se definir a forma geométrica e o tipo de material do núcleo, bem como o enrolamento, para que o indutor apresente as características desejadas com um rendimento condizente com a proposta (McLyman, 2016; Pieniz et al., 2006).

Diversos tipos de conversores CC-CC chaveados, como conversor abaixador (*step-down* ou *buck*), conversor elevador (*step-up* ou *boost*) e conversor abaixador-elevador (*buck-boost*), possuem uma chave semicondutora controlada trabalhando em conjunto com um indutor, que de forma geral tem

por função em um primeiro estágio armazenar energia e na sequência transferi-la para a saída do conversor. Desta forma, o indutor apresenta um papel fundamental na constituição dos conversores. O indutor é composto por um núcleo e espiras com ou sem acoplamento. O núcleo pode apresentar variações no formato, como EE, EI ou toroidal, além do tipo de material que é composto, como ferrite ou ligas metálicas. O enrolamento pode ser composto por uma única malha de cobre ou por múltiplas malhas (fio litz). Além disso existem algumas estratégias adotadas para a definição dos parâmetros mencionados (Coruh, 2011; McLyman, 2016).

Baseado neste contexto, este trabalho apresenta uma metodologia para a especificação de indutores aplicados em conversores CC-CC. São abordados aspectos referentes ao formato e material do núcleo, enrolamento, perdas e temperatura. Também é apresentado um modelamento matemático, e um exemplo aplicado a um conversor CC-CC do tipo *boost*.

MATERIAL E MÉTODOS

Existem no mercado diversos tipos de materiais que são aplicados ao desenvolvimento de núcleos magnéticos, sendo que para isso leva-se em consideração fatores como eficiência, dimensões, temperatura e custo. Para os indutores aplicados em conversores chaveados, núcleos a base de ferrite e de liga metálica são amplamente utilizados (Bossche, Valchev, 2005).

Os núcleos de ferrite são constituídos por um óxido de ferro e um outro elemento (manganês e zinco – MnZn ou níquel e zinco – niZn). Algumas características deste tipo de núcleo são: operam em frequências da ordem de KHz até MHz; possuem alta resistividade elétrica, o que contribui para a redução das perdas no núcleo devido as correntes de Foucault; permeabilidade inicial na faixa de 1.000 a 20.000; baixa saturação de 0,25 a 0,45 T (Bossche, Valchev, 2005; McLyman, 2016).

Os núcleos de liga metálica são constituídos além do metal, por algum outro tipo de material ferromagnético como silício (Si), níquel (Ni), cromo (Cr) e cobalto (Co). Eles ainda podem ser classificados como núcleos de pó de liga metálica (*powder*), amorfos e nanocristalinos. Os núcleos *powder* são constituídos por um pó de ferro e um material amorfo isolante que ao serem prensados resultam no formato do núcleo. Com isso, chega-se a uma estrutura magnética sólida com características de um entreferro (sem gap de ar) distribuído ao longo do núcleo. Algumas características dos núcleos *powder* são: saturação magnética de 0,7 a 1,4 T; permeabilidade relativa inicial baixa, na faixa de 14 a 550 (Bossche, Valchev, 2005; McLyman, 2016).

Com relação a forma geométrica do núcleo, existem diversos formatos, como exemplo, os núcleos “E” e toroidal. Dependendo de condições como, volume, tamanho da janela de enrolamento, nível de oscilação da corrente, entre outros, pode ser mais vantajoso considerar um determinado formato. Outro fator é com relação ao tipo de material, como os *powder* que só possuem no formato toroidal.

Nos núcleos E, pode haver um espaçamento (entreferro) que gera um caminho magnético aberto. Isto é útil para que não ocorra a saturação do núcleo quando o indutor operar com valores elevados de corrente. Por outro lado, dependendo da construção e do espaçamento, pode resultar em perdas por corrente de Foucault (*eddy currente*) em função do efeito de frangeamento (*fringing flux*).

Em núcleos toroidais, considerando que o efeito do entreferro esteja por todo o corpo do núcleo (em função de sua constituição física), também pode existir o efeito de frangeamento. Uma forma de amenizar ou mesmo eliminar o frangeamento em núcleos toroidais é preencher com o enrolamento toda a superfície do núcleo uniformemente. Nas toroides o fluxo magnético é uniforme ao longo de todo o núcleo, havendo uma melhor distribuição da temperatura (McLyman, 2016).

Os enrolamentos nos indutores podem ser feitos com um único condutor ou por múltiplos condutores. Quando uma componente alternada percorre o enrolamento do indutor, surgirá um campo magnético variável. Ao aumentar a frequência, os campos também aumentam, forçando os elétrons para a superfície do condutor, sendo isto denominado de efeito pelicular (*skin*). Este efeito causa um aumento na temperatura do indutor e na resistência do enrolamento (McLyman, 2016). Como está vinculado diretamente a componente CA da corrente, conversores que venham a operar nos modos descontínuos e críticos, estão mais propícios a este efeito. Uma forma de minimizar este efeito é substituir o fio por um cabo com múltiplos condutores (fio litz), porém apresentam um maior custo.

O projeto das partes que constituem o indutor é de extrema importância para se alcançar o equilíbrio entre tamanho e rendimento. Existem várias estratégias para a seleção do núcleo como, pelo produto da área (A_p), pela geometria do núcleo (K_g) (Coruh, 2011; Gonçalves, 2005; McLyman, 2016) e pela energia magnética armazenada no indutor ($L.I_{max}^2$) (Smith, 1964). Quanto maior a energia

armazenada, maior o núcleo e menor a permeabilidade inicial. Adotando-se a estratégia da energia armazenada no indutor, pode-se aplicar as 11 etapas descritas a seguir para projetar um indutor toroidal.

1 – Seleccionar um núcleo que atenda a inequação (1), onde L é a indutância teórica em Henry, I_{max} é a corrente máxima no indutor em Ampère, μ_i é a permeabilidade relativa inicial do material do núcleo, A é a secção transversal do núcleo em cm^2 , L_e é o comprimento médio do percurso magnético em cm, e $H\%$ é a força de magnetização em função da variação percentual da indutância adotada.

$$L \cdot I_{max}^2 < \frac{\mu_i \cdot A \cdot L_e \cdot H\%}{0,4 \cdot \pi \cdot 10^8} \quad [J] \quad (1)$$

Outra forma de seleccionar o núcleo é através de curvas que fabricantes disponibilizam, onde a partir da energia armazenada recomendam um núcleo apropriado. A partir da seleção do núcleo, anotam-se os parâmetros dimensionais que serão utilizados nas etapas seguintes, como diâmetros externo e interno (\varnothing_{ext} e \varnothing_{int}), altura (h), área superficial (A_s) e volume (V_e), e o fator de indutância (A_L).

2 – Determinar a quantidade de espiras inicial (N_{ini}) conforme equação 2.

$$N_{ini} = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \quad [espiras] \quad (2)$$

3 – Determinar a indutância efetiva (L_{efet}) a plena carga através da equação 3. A relação entre as permeabilidades efetiva e inicial (μ_{eff}/μ_i) é extraída da curva da variação da permeabilidade versus intensidade do campo (H - força de magnetização CC) representada pela equação 4. Caso não chegue no valor da indutância desejada, aumenta a quantidade de N e recalcula, até chegar no valor desejado.

$$L_{efet} = L \cdot \frac{\mu_{eff}}{\mu_i} \quad [H] \quad (3) \quad H = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot N_{ini} \cdot I_{max}}{L_e} \quad [Oersted] \quad (4)$$

4 – Determinar a densidade de fluxo B através da equação 5, onde μ_r é permeabilidade relativa do material e μ_0 é a permeabilidade do vácuo.

$$B = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I_{max}}{L_e} \times 10^4 \quad [Gauss] \quad (5)$$

5 – Através da curva de densidade de perdas versus densidade do fluxo magnético, e baseado na frequência de chaveamento do conversor, determina-se as perdas no núcleo (P_N) através da equação 6.

$$P_N = V_e \cdot \text{densidade das perdas no núcleo} \quad [mW] \quad (6)$$

6 – Determinar o aquecimento através da equação 7.

$$\Delta T = \left[\frac{P_N}{A_s} \right]^{0,833} \quad [^\circ C] \quad (7)$$

7 – Determinar a seção do condutor (S_{cobre}) através da inequação 8, onde I_{rms} é a corrente eficaz e J_{max} é a densidade de corrente máxima que atravessa o condutor.

$$S_{cobre} > \frac{I_{rms}}{J_{max}} \quad [cm^2] \quad (8)$$

8 – Verificar a necessidade de uso de fio litz em função do efeito pelicular. Para isso, determinar o coeficiente de penetração Δ conforme equação 9, onde f_{sw_max} é a máxima frequência de operação do conversor em hertz, e em seguida verificar a restrição imposta pela inequação 10. Caso não seja satisfeita, deve-se usar fio litz.

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_{sw_max}}} \quad [cm] \quad (9) \quad \Delta > \sqrt{\frac{S_{cobre}}{\pi}} \quad (10)$$

9 – O diâmetro máximo do condutor deve ser igual a 2Δ . Com isso, determinam-se a seção (S_{litz}) através da inequação 11, e a quantidade de condutores (N_{litz}) através da equação 12, para compor o fio litz.

$$S_{litz} \leq \pi \cdot \Delta^2 \quad [cm^2] \quad (11) \quad N_{litz} = \frac{S_{cobre}}{S_{litz}} \quad (12)$$

10 – Determinar a resistência do condutor (R_{cond}) através da equação 13, onde MLT é o comprimento médio de uma volta em torno do núcleo (definido através de \varnothing_{ext} , \varnothing_{int} e h), e R_{AWG} é a resistência do fio adotado por metro.

$$R_{cond} = MLT \cdot N \cdot R_{AWG} \quad [\Omega] \quad (13)$$

11 – Determinar as perdas no cobre através da equação 14.

$$P_{cobre} = R_{cond} \cdot I_{rms}^2 \quad [mW] \quad (14)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando como exemplo um conversor CC-CC *boost* conforme figura 1, com potência máxima de 250 W, ganho estático máximo de 3,15, operando nos modos de condução descontínuo e crítico, e com frequências podendo chegar a valores superiores a 100 KHz, optou-se no material do

núcleo do tipo *powder Kool Mμ – Sendust*, que apresenta baixas perdas com um custo acessível, frente a outros materiais como amorfos e nanocristalinos. Os parâmetros do *boost* para o projeto do indutor são: $L = 440 \mu H$, $\Delta_L = \pm 5\%$, $\Delta I = 4 A$, $I_{rms} = 2,5 A$ e $f_{SW_max} = 130 KHz$. A densidade máxima de corrente adotada (J_{max}) foi de $350 A/cm^2$.

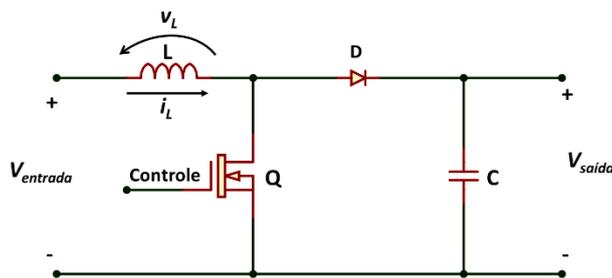


Figura 1 – Conversor *Boost*.

Aplicando a metodologia descrita anteriormente, optou-se pelo núcleo da fabricante nacional Magmatec, conforme especificações da tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do primeiro núcleo.

Parâmetros do Núcleo:

A_L	37	nH/esp ²
\varnothing_{ext}	46,7	mm
\varnothing_{int}	28,7	mm
h	15,2	mm
L_e	11,6	cm
A	1,34	cm ²
A_s	83,2	cm ²
V	15,6	cm ³
μ_i	26	

Parâmetros Calculados:

$N_{ini} = N$	109	espiras
L_{efet}	418	μH
B	1228	Gauss
P_{N_130KHZ}	23,4	W
Δ_T	115	°C

Como pode-se observar, o indutor apresentará uma elevada temperatura quando estiver operando na frequência máxima. Com isso, optou-se por um segundo núcleo com dimensões maiores e mantendo o mesmo A_L , conforme consta na tabela 2. Através dos parâmetros calculados, pode-se notar uma considerável queda na temperatura em altas frequências.

Tabela 2 – Parâmetros do segundo núcleo.

Parâmetros do Núcleo

A_L	37	nH/esp ²
\varnothing_{ext}	77,8	mm
\varnothing_{int}	49,2	mm
h	15,9	mm
L_e	20	cm
A	2,27	cm ²
A_s	180	cm ²
V	45,3	cm ³
μ_i	26	

Parâmetros Calculados

$N_{ini} = N$	109	espiras	
L_{efet}	435	μH	
B	713	Gauss	
P_{N_130KHZ}	25	W	
Δ_T	61	°C	
S_{cobre}	8,228	cm ² (10 ⁻³)	AWG18
Δ	20,801	cm (10 ⁻³)	
S_{litz}	1,28	cm ² (10 ⁻³)	AWG26
N_{litz}	7		
R_{cond}	127	m Ω	
P_{cond}	790	m W	

Após a fabricação dos indutores conforme especificações determinadas anteriormente, algumas medições foram realizadas para comprovar a efetividade da implementação do projeto realizado. A figura 2 apresenta o indutor fabricado e os resultados das medidas da indutância realizadas nas frequências de $10 KHz$ e $100 KHz$. Por fim, a figura 3 apresenta as formas de ondas da corrente (i_L) e da tensão (v_L) no indutor do conversor CC-CC *boost* para dois níveis de tensão de entrada ($30 e 50 V$), onde a partir da equação 15 pode-se chegar nos valores aproximados de $457 \mu H$ e $438 \mu H$.

$$L = v_L \cdot \frac{dt}{di} \quad [H] \quad (15)$$

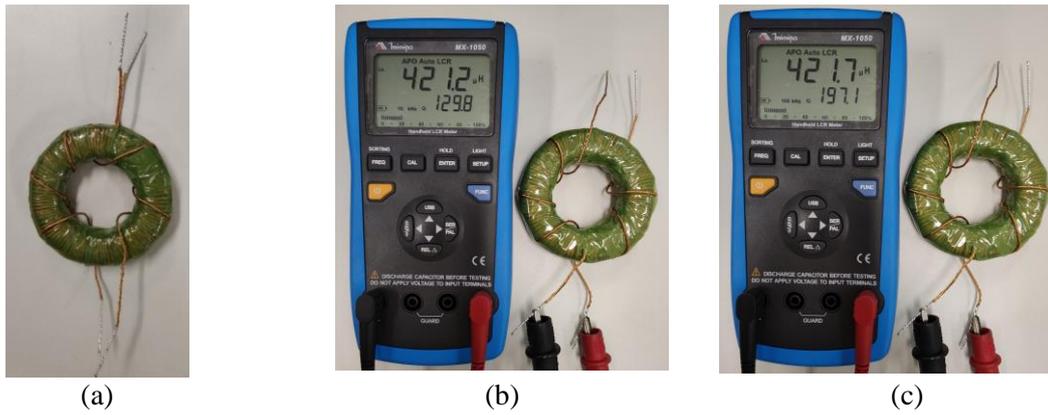


Figura 2 – (a) Indutor; medida da indutância em (b) 10 KHz; (c) 100 KHz.

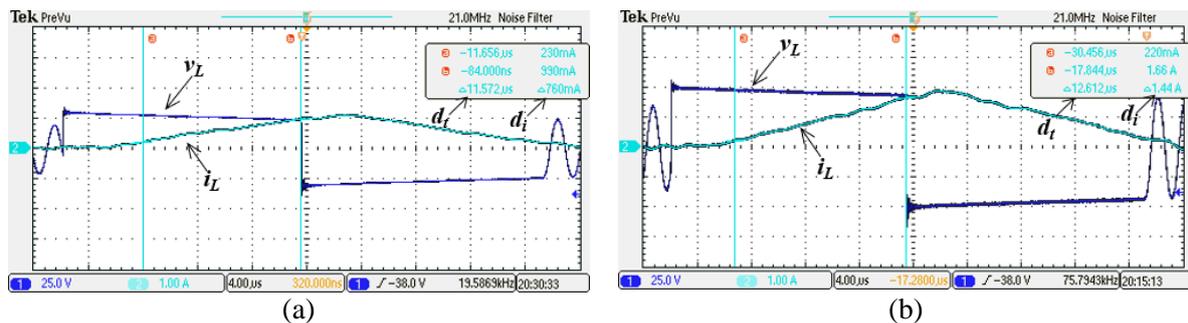


Figura 3 – Medidas da tensão e da corrente no indutor do conversor *boost*; (a) 30 V; (b) 50 V.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para o projeto de indutores com núcleo toroidal aplicados em conversores CC-CC. Partindo do parâmetro da energia armazenada no indutor é possível selecionar um núcleo, e de posse das características dimensionais e do tipo de material são realizadas análises para a validação da escolha. No exemplo apresentado, foi utilizado um núcleo de material *sendust* que possui baixa permeabilidade. Durante as análises constatou-se uma possível elevação de temperatura no indutor quando o conversor vier a operar em frequências acima de 100 KHz. Assim, optou-se em utilizar um outro núcleo, mantendo o material e o parâmetro fator de indutância, porém com dimensões maiores, o que resultou em uma redução de praticamente 50% na temperatura. Após a fabricação do indutor, medidas foram realizadas comprovando a efetividade da metodologia adotada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado financeiramente pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através dos processos 2016/08645-9 e 2018/24331-0.

REFERÊNCIAS

- CORUH, Nasir et al. A simple and efficient implementation of interleaved boost converter. In: 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2011. p. 2364-2368.
- GONÇALVES, Flávio Alessandro Serrão. Pré-regulador retificador entrelaçado (Interleaved) ZCS-FM boost, com controle digital através de dispositivo FPGA e linguagem VHDL. 2005.
- KROICS, Kaspars; BRAZIS, Ugis SIRMELIS1 Viesturs. Design of coupled inductor for interleaved boost converter. *diM*, v. 3, n. 2, p. 2, 2014.
- MCLYMAN, Colonel Wm T. Transformer and inductor design handbook. CRC press, 2016.
- PIENIZ, Marlon; PINHEIRO, José R.; HEY, Hélio L. An investigation of the boost inductor volume applied to PFC converters. In: 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE, 2006. p. 1-7.
- SMITH, Gail D. Designing toroidal inductors with dc bias. 1964.
- VAN DEN BOSSCHE, A.; VALCHEV, V. C. Transformers and inductors for power electronics. 2005.