

# Seleção de núcleos magnéticos de ferrite para microtransformadores

Gustavo L. Silvestre, Antonio C. C. Telles

{gsilvestre, actelles}@cti.gov.br

**Núcleo de Concepção de Sistemas de Hardware**  
**Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – Campinas/SP**

***Abstract.** This article discusses characteristics of ferrite cores aimed at using magnetic microtransformer cores. Physical, magnetic and electrical properties of the materials will be addressed, aiming at the characteristics that may be better to increase the efficiency of the microtransformer.*

***Resumo.** Este artigo aborda características de núcleos de ferrite voltados para utilização em microtransformadores. Serão abordadas propriedades físicas, magnéticas e elétricas dos materiais, visando as características que possam ser as melhores para aumentar a eficiência do microtransformador.*

## 1. Introdução

O transformador é um dispositivo que opera com corrente alternada e é utilizado para elevar ou diminuir uma determinada tensão elétrica em um circuito por meio de duas ou mais bobinas acopladas em um núcleo de material ferromagnético. É utilizado na distribuição de energia elétrica, e está presente em diversos aparelhos eletrônicos, já que as tensões de alimentação dos mesmos são usualmente menores do que a fornecida pela rede elétrica. Porém transformadores tendem a ter dimensões grandes, o que torna difícil sua utilização em aparelhos compactos.

Com a diminuição dos circuitos e em função da redução do tamanho dos equipamentos eletrônicos, tem havido pressão crescente para o desenvolvimento de tecnologias miniaturizadas conhecidas como fontes de tensão empacotadas (Power Supply in Package – PwrSiP) e em chip (PwrSoC). Em PwrSiP elementos magnéticos são empacotados com o circuito conversor, enquanto que em PwrSoC estes elementos são integrados, levando a realização de fontes de tensão integradas [1]. Contudo, a construção de componentes magnéticos em chip requer técnicas de deposição complexas e caras que limitam seu uso comercial [2].

O CTI tem procurado maneiras de produzir um transformador eficiente e de dimensões milimétricas. Para isso, o primeiro passo é achar um núcleo que possibilite trabalhar nas condições especificadas. O material utilizado nos núcleos analisados nesse artigo é o ferrite.

Núcleos de ferrite são uma alternativa para a construção de PwrSiP, dadas as suas propriedades magnéticas de alta permeabilidade relativa, baixa histerese e alta resistividade. Um exemplo da aplicação destes núcleos é o trabalho de Macrelli et al. [1], que obtém transformadores toroidais de pequenas dimensões utilizando técnicas de wirebonding.

O Núcleo de Empacotamento Eletrônico do CTI vem desenvolvendo microtransformadores em tecnologia MCM, utilizando núcleos de ferrite e construindo as espiras com técnicas de wirebonding [3], [4].

Este trabalho faz uma revisão das propriedades dos núcleos de ferrite e, com base nessas propriedades, recomenda o melhor produto comercial a ser utilizado nos microtransformadores desenvolvidos no CTI.

## 2. Propriedades dos ferrites

O termo ferrite se aplica a muitos tipos diferentes de materiais, cada um com propriedades adaptadas a várias faixas de frequência e aplicações. Como cada tipo diferente de material é feito de combinações específicas de óxidos, é chamado de mistura.

Existem dois tipos principais de ferrite: duro e macio. Os ferrites duros, além de serem materiais cerâmicos com características medianas de remanência, são originados a partir da mistura de óxido de ferro enriquecidos com variados carbonatos. Tem uma alta coercitividade e por isso são difíceis de desmagnetizar.

Já os ferrites macios são elaborados com a união de óxido de ferro e diversos tipos de óxidos complexos. São largamente utilizados na indústria justamente pelo fato de serem capazes de gerar campo magnético sob corrente. Para utilização em microtransformadores iremos abordar os ferrites macios.

O ferrite foi escolhido para ser o material do núcleo magnético por conta da sua alta permeabilidade magnética que confina e guia os campos magnéticos. O campo magnético é geralmente criado por um condutor de corrente em torno do núcleo.

O núcleo magnético pode aumentar a força do campo magnético em uma bobina eletromagnética em várias centenas de vezes o que seria sem o núcleo. No entanto, possuem alguns efeitos colaterais que devem ser levados em conta. Em corrente alternada (AC) ocorrem perdas de energia, chamadas de perdas no núcleo, devido à histerese e correntes parasitas. A histerese pode ser calculada por:

$$B = \mu_0 * \mu_r(H) * H \quad (1.1) \quad [\text{TDK, 2013}], \text{ onde}$$

B = Indução magnética;

$\mu_0$  = Constante de campo magnético;

$\mu_r$  = Permeabilidade relativa;

H = Força do campo magnético.

E a perda por corrente parasita pode ser calculada por:

$$P_e = K_e * f^4 * B^2 \quad (1.2) \text{ [Erickson 2001]}, \text{ onde}$$

$P_e$  = Perda por corrente;

$K_e$  = constante do material;

$f$  = frequência. A impedância do material do núcleo de ferrite é capacitiva. Isso causa perda de potência por corrente e aumenta conforme  $f^4$ .

Temos dois tipos de ferrite mais utilizados: Ni-Zn e Mn-Zn.

Os ferrites de níquel-zinco (Ni-Zn) possuem alta resistividade elétrica e não possuem alta permeabilidade, que varia entre 15–1500. Costuma ser empregado em aplicações de alta frequência, na ordem de 2 MHz até centenas de MHz. Os núcleos toroidais dos ferrites de Ni-Zn possuem uma impedância relativamente alta.

Os ferrites de manganês-zinco (Mn-Zn) são utilizados em aplicações de até 3 MHz. Eles possuem alta permeabilidade, podendo variar de 750-30.000, baixa resistividade elétrica se comparados aos ferrites Ni-Zn e moderada densidade de fluxo de saturação ( $B_s$ ).

### 3. Características adequadas para utilização em microtransformador

1. Materiais magnéticos "macios" com baixa coercitividade e alta resistividade. A baixa coercitividade significa que o material de magnetização pode facilmente inverter a direção sem dissipar muita energia (perdas por histerese). Já a alta resistividade reduz as correntes de Foucault no núcleo.
2. Altos valores de AL (fator de indutância) para diminuir o número de espiras;
3. Alta impedância até as frequências mais altas possíveis;
4. Valores mais altos possíveis para  $B_s$  (Magnetização de saturação);
5. Faixas de frequências altas de utilização, de preferência de 1 MHz a 100 MHz;
6. Alta resistividade.

### 4. Ferrites analisados

Na Tabela 1 temos a comparação dos núcleos de ferrite analisados conforme algumas características adequadas definidas.

**Tabela 1. Características dos ferrites**

Fabricante	Material	Faixa de frequência (MHz)	Resistividade ( $\Omega m$ )	Permeabilidade inicial ( $\mu$ i)	Fator Al*	Saturação $B_s$ (mT)
Ferroxcube	4A20	10 - 300	$10^5$	2000 +- 20%		260
	3E9	2	0.1	20000 +- 20%		380
	4F1	4 - 10	$10^5$	80		320
	4A11	30 - 1000	$10^5$	850 +- 20%	94 +- 25 %	340
	3S4	10 - 300	$10^3$	1700	300 +- 25%	320
	3E28	1 - 10	1	4000 +- 20%	2020 +- 30%	420

Fair Rite	77	0.5 - 50	100	2000	420 +- 25%	500
	79	1 - 12	200	1400	600 +- 25%	460
TDK	K1	1.5 - 12	10 <sup>5</sup>	80		320
	T57	1 - 100	3	4000 +- 25%	530 +- 25%	430
	K10	1 - 100	10 <sup>5</sup>	800 +- 25%	180 +- 25%	320

\*Para as menores dimensões encontradas comercialmente (vide Tabela 2)

Os materiais que possuem valor Al na Tabela 1 são núcleos em formato de toróide analisados a seguir nesse artigo.

## 5. Toróides

Um toróide é uma figura de revolução de uma superfície fechada em torno de um eixo. Indutâncias construídas em núcleos toroidais possuem expressão analítica. Algumas vantagens dos núcleos toroidais são:

- Alta indutância por volume.
- Nenhuma interação ou acoplamento com componentes adjacentes (ao contrário de enrolamentos com núcleo de ar e outros indutores).
- Permeabilidades diversas.
- Valores excepcionais de “Q” quando enrolados corretamente com núcleos selecionados.

Algumas desvantagens dos toróides:

- É quase impossível fazer um ajuste “variável” de indutância.
- São sujeitos a alguma variação térmica.

Os núcleos toroidais dos ferrites de Ni-Zn são especialmente adequados para a supressão de interferências de alta frequência, devido à alta resistência ôhmica desses materiais (ca. 10<sup>5</sup> Ωm).

## 6. Menores toróides para aplicações em alta frequência

Escolhendo toróides para fabricar o microtransformador, analisamos os toróides de menores dimensões que pudessem atuar em uma faixa de frequência mais alta (de preferência acima de 1 MHz) observadas na Tabela 2.

**Tabela 2. Dimensões dos toróides**

Material do núcleo do toróide	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro externo (mm)	Altura (mm)	Peso (g)
4A11	1.3	2.5	0.8	0.012
3S4	1.3	2.5	1.3	0.022
3E28	1.8	3.9	2.5	0.12
77	3.05	5.95	1.65	
79	9.5	4.75	3.2	

T57	1.5	2.5	1.30	0.02
K10	2.24	3.9	2.30	0.09

De acordo com as Tabelas 1 e 2, o toróide mais promissor é utilizando o material 3S4 por suas características médias de permeabilidade e resistividade. Sua perda de indutância em função da frequência se mantém mais estável do que os demais materiais. E o respectivo toróide tem uma das menores dimensões dentre os materiais da tabela 2. Sua desvantagem é o baixo valor Al.

O material 3S4 é um ferrite do tipo Mn-Zn, utilizado geralmente em supressão de EMI de banda larga especificado em impedância e otimizado para frequências de 10 a 300 MHz. A sua temperatura máxima de operação é de 90 °C. Seu datasheet a seguir foi medido em um toróide com dimensões  $\varnothing 5 \times \varnothing 2 \times 10$  mm.

A Fig. 1 apresenta características gerais do material 3S4.

SYMBOL	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$\mu_i$	25 °C; $\leq 10$ kHz; 0.25 mT	$\approx 1700$	
B	25 °C; 10 kHz; 1200 A/m 100 °C; 10 kHz; 1200 A/m	$\approx 320$  $\approx 170$	mT
$ Z ^{(1)}$	25 °C; 3 MHz 25 °C; 30 MHz 25 °C; 100 MHz 25 °C; 300 MHz	$\geq 25$ $\geq 60$ $\geq 80$ $\geq 90$	$\Omega$
$\rho$	DC; 25 °C	$\approx 10^3$	$\Omega m$
$T_C$		$\geq 110$	°C
density		$\approx 4800$	kg/m <sup>3</sup>

**Figura 1. Características do material 3S4[Ferroxcube,2008].**

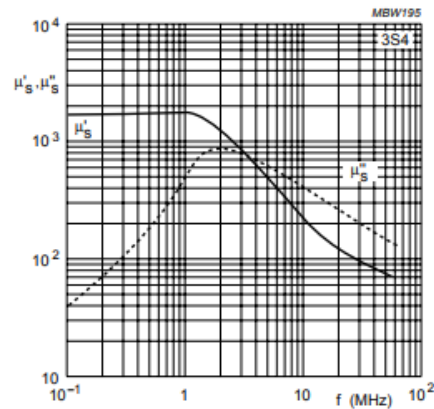
A Fig. 2 apresenta a permeabilidade complexa do material 3S4 em função da frequência até aproximadamente 100 MHz, que pode ser calculada por:

$$\overline{\mu} = \mu s' - j * \mu s'' \quad (1.3) \quad [TDK,2013], \text{ onde}$$

$\overline{\mu}$  = permeabilidade complexa

$\mu s'$  = componente real relativo (indutância) de  $\mu$ ;

$\mu s''$  = componente imaginário relativo (resistência) de  $\mu$ .

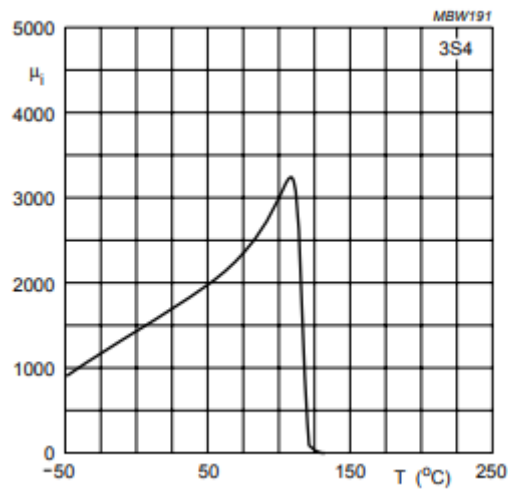


**Figura 2. Permeabilidade complexa em função da frequência do material 3S4 [Ferroxcube,2008].**

A Fig. 3 apresenta a permeabilidade inicial do material 3S4 em função da temperatura. A permeabilidade inicial pode ser calculada por:

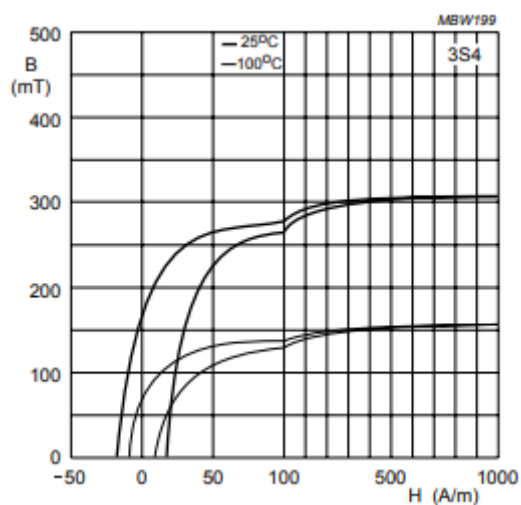
$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} * \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1.4) \quad [\text{TDK},2013], \text{ onde}$$

$\mu_i$  = Permeabilidade inicial.



**Figura 3. Permeabilidade inicial em função da temperatura do material 3S4 [Ferroxcube,2008].**

A Fig. 4 apresenta a curva B-H do material 3S4.



**Figura 4. Curva B-H do material 3S4 [Ferroxcube,2008].**

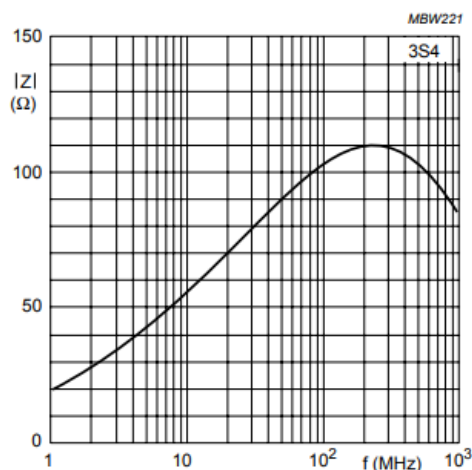
A Fig. 5 apresenta a impedância em função da frequência do material 3S4, que pode ser calculada por:

$$Z_x = \sqrt{X_L^2 + R^2} \quad (1.5) \quad [\text{TDK, 2013}], \text{ onde}$$

$Z_x$  - é a impedância equivalente do enrolamento primário ou secundário em ohm;

$X_L$  - é a reatância indutiva do enrolamento em ohm;

R - é a resistência ôhmica do enrolamento em ohm.



**Figura 5. Impedância em função da frequência do material 3S4 [Ferroxcube,2008].**

Temos as características físicas, de acordo com a Fig. 6, e elétricas do respectivo toróide, mostradas na Figs. 7 e 8:

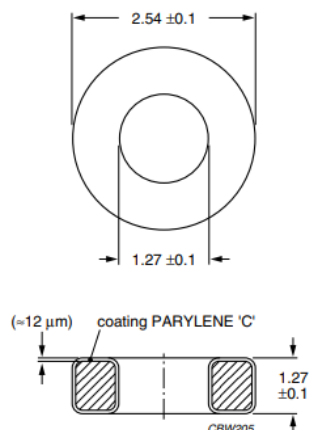


Figura 6: Dimensões do toróide TC2.5/1.3/1.3 [Ferroxcube,2013].

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma(l/A)$	core factor (C1)	7.14	mm <sup>-1</sup>
$V_e$	effective volume	4.29	mm <sup>3</sup>
$l_e$	effective length	5.53	mm
$A_e$	effective area	0.76	mm <sup>2</sup>
$m$	mass of core	≈ 0.022	g

Figura 7: Parâmetros do núcleo eficaz para o toróide utilizando o material 3S4 [Ferroxcube,2013].

GRADE	$A_L$ (nH)	$\mu_i$	TYPE NUMBER
3S4 des	300 ± 25%	≈ 1700	TC2.5/1.3/1.3-3S4

Figura 8: Fator  $A_L$  e permeabilidade inicial do núcleo do TC2.5/1.3/1.3 [Ferroxcube,2013].

## 7. Conclusões

Há dificuldades para se encontrar materiais que possuam todas as características necessárias para funcionamento eficiente do microtransformador.

Os ferrites são materiais abundantes no mercado, de diversas características e que são bons materiais para serem utilizados em núcleos magnéticos. O interessante para se utilizar em um microtransformador seria uma mistura dos dois tipos de materiais de ferrites, Mn-Zn e Ni-Zn. O mais próximo que temos de um material assim é o 3S4.

Suas características médias de permeabilidade permitem um valor razoável em indutância. A média resistividade reduz as perdas por corrente de Foucault no núcleo. Sua perda de indutância em função da frequência se mantém mais estável por conseguir trabalhar com frequências muito altas, de 10 a 300 MHz. O respectivo toróide tem uma das menores dimensões entre os fabricados comercialmente. Este produto é uma das escolhas mais interessantes dentre as analisadas para se utilizar em um núcleo de um microtransformador.



O próximo passo é construir novos protótipos dos microtransformadores com o núcleo recomendado e caracterizá-los.

## Referências

- [1] Macrelli, E. et al. (2015) “Modeling, Design, and Fabrication of High-Inductance Bond Wire Microtransformers with Toroidal Ferrite Core”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 10, pp. 5724-5737.
- [2] Ó Mathúna, C; Wang, N.; Kulkarni, S. e Roy, S. (2012) “Review of Integrated Magnetics for Power Supply on Chip (PwrSoC),” IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4799–4816.
- [3] Rocha, M. M.; Telles, A. C. C. e Teixeira, R. C. (2017) “Development of Micro-Trafos Using MCM and Electronic Packaging Technologies”, In: XII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology - SEMINATEC 2017, São Paulo (SP).
- [4] Rocha, M. M.; Telles, A. C. C. e Teixeira, R. C. (2018) “Prototypes of Microtransformers in MCM Technology”, In: XIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology - SEMINATEC 2018, São Bernardo do Campo (SP).
- [5] TDK (2013) “Ferrites and accessories – EPCOS Data Book 2013”, 620 páginas, Germany, July
- [6] Ferroxcube (2013) “Soft Ferrites and Accessories – Data Book”, 1106 páginas, July
- [7] Ferroxcube (2008) “Data Sheet 3S4 Material specification”, 3 páginas, September
- [8] Erickson, R. W. (2001) “Fundamentals of Power Electronics”, Springer, 2ª edição - 883 páginas, January 2001