

# SIMULAÇÃO DE DISPOSITIVOS MAGNÉTICOS EMPREGADOS COMO ELEMENTOS DE FILTRO EM INVERSORES PWM TRIFÁSICOS

**Abel A. B. Gehm**

Acadêmico do Curso de Eng. Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria – GEPOC  
abelgehm@gmail.com

**Gabriel M. da Rosa**

Acadêmico do Curso de Eng. Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria – GEPOC  
gabrielmarindarosa@gmail.com

**Rafael C. Beltrame**

Professor/Pesquisador do Departamento de Processamento de Energia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria – GEPOC  
beltrame@mail.ufsm.br

**Resumo:** Núcleos magnéticos empregando ligas de materiais magnéticos são usualmente utilizados em na implementação de filtros passivos em inversores alimentados em tensão que operam com elevadas frequências de chaveamento. Já aplicações em médias e altas potências, núcleos de Ferro-Silício (Fe-Si) são indicados. Por outro lado, esta liga apresenta elevada perda quando excitada por frequências superiores à da rede elétrica. Questões como a geometria e o tipo de material têm grande impacto nas perdas por histerese e correntes parasitas do núcleo. Assim, o presente trabalho propõe realizar uma análise matemática (empregando um software de simulação por elementos finitos) para otimizar o projeto de um indutor de filtro empregado em um sistema fotovoltaico de 50 kW conectado à rede elétrica.

**Palavras-Chave:** Elementos Finitos, Eletrônica de Potência, Filtro LCL.

## I. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda de energia elétrica requer investimentos públicos e privados na expansão da matriz energética nacional. Nesse contexto, fontes de energia renováveis, como a eólica e a solar, têm recebido grande interesse da academia e da indústria, principalmente devido aos incentivos governamentais (ANEEL, 2012). De modo geral, a energia elétrica

proveniente das referidas fontes necessita de um processamento para a adequação aos níveis de tensão e frequência empregados no sistema elétrico. No caso da energia solar fotovoltaica, esse processamento envolve o emprego de inversores PWM alimentados em tensão (conversores estáticos cc/ca) para a alimentação de cargas e/ou a injeção de energia na rede elétrica. Salienta-se que um inversor requer o emprego de filtros passivos para a atenuação dos harmônicos de corrente (no caso da injeção de energia na rede) oriundos da estratégia de modulação adotada (MICHELS et al, 2006).

Usualmente, núcleos magnéticos empregando ferrite ou alguma liga de material magnético (e.g., *iron powder*, *coolMu*, *molypermaloy*, entre outros) são utilizados em aplicações com elevadas frequências de chaveamento (na ordem de quilohertz) na implementação dos elementos magnéticos do filtro (indutores). Já aplicações em médias e altas potências (dezenas de quilowatts ou superior), núcleos de Fe-Si (de grão orientado) são indicados. Por outro lado, núcleos de Fe-Si apresentam elevadas perdas quando excitados por frequências muito superiores à da rede elétrica. Assim, nesses casos, inúmeras interações práticas podem ser necessárias, principalmente para limitar a máxima dissipação de energia (devido à geometria e ao tipo de material, que impactam nas perdas

por histerese e correntes parasitas) e/ou a máxima elevação da temperatura do núcleo e dos enrolamentos. Esse processo pode demandar muito tempo de desenvolvimento e elevar os custos de produção.

Nesse sentido, o presente trabalho propõe realizar uma análise matemática (empregando um software de simulação por elementos finitos) para otimizar o projeto de um indutor de filtro empregado em um sistema fotovoltaico de 50 kW conectado à rede elétrica.

## II. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um método de simulação para elementos magnéticos (indutores). Os referidos elementos magnéticos são empregados na implementação de filtros passivos no estágio de saída de inversores alimentados em tensão empregando a modulação PWM (*pulse-width modulation*). O método de simulação proposto busca reduzir o tempo de desenvolvimento e a necessidade de interações práticas para otimizar o projeto. De modo geral, o artigo descreve como realizar a interface entre as propriedades elétricas (obtidas de um software de simulação de circuitos elétricos) e as propriedades magnéticas do elemento de filtro a ser implementado, possibilitando, assim, a simulação sob condições reais de operação.

## III. METODOLOGIA

Nesta etapa são discutidos, de maneira objetiva, os passos para a simulação dos elementos magnéticos utilizados em filtros aplicados a inversores PWM alimentados em tensão. No caso específico, um inversor PWM trifásico a três fios é considerado.

### *Interface entre o PSIM<sup>®</sup> e o Ansoft Maxwell<sup>®</sup>*

A simulação elétrica do circuito (para avaliação da topologia, dimensionamento dos dispositivos semicondutores e correta operação do sistema de controle do inversor) é realizada no software PSIM<sup>®</sup>. Após a

simulação, exportam-se os dados relevantes ao circuito magnético, como a tensão e a corrente sobre os indutores do filtro. O Ansoft Maxwell<sup>®</sup> é um software que faz a simulação de elementos magnéticos empregando o método de elementos finitos. Este aplicativo requer dados como o formato físico do elemento magnético, características do material (curva de histerese e de perdas) e excitações envolvidas (Ansoft, 2010). Os dados de excitação podem ser obtidos diretamente do PSIM<sup>®</sup>, porém devem ser pré-processados para gerar um *script* SPICE compatível com o Ansoft Maxwell<sup>®</sup>.

No SPICE, a modulação PWM senoidal do inversor de tensão pode ser reconstruída utilizando-se fontes de tensão ou corrente do tipo *piece-wise linear source* (PWL). A fonte PWL usa uma interpolação linear para calcular os valores intermediários aos pontos especificados. No Ansoft Maxwell<sup>®</sup> existe a limitação de especificar, no máximo, 20 pontos em uma fonte PWL. Esta limitação pode ser contornada utilizando-se diversas fontes de tensão PWL em série, cada qual com informações relativas a uma fração do período da forma de onda PWM completa.

Para gerar o circuito de excitação dos enrolamentos do dispositivo magnético, realizou-se uma simplificação do circuito elétrico simulado no PSIM<sup>®</sup> para possibilitar a redução do número de elementos na simulação SPICE: todo o arranjo de chaves semicondutoras foi substituído por um conjunto de fontes de tensão PWL com forma de onda equivalente à sintetizada pelo inversor de tensão. O modelo tridimensional do indutor pode ser visualizado na Fig. 1. No *script* SPICE do simulador de elementos finitos, a fonte PWL é periódica. Portanto, todas as fontes devem começar com o mesmo tempo inicial e terminar com o mesmo tempo final, ou seja, começar no tempo zero e terminar com o tempo  $T = 1/f$ , onde  $f$  é a frequência da rede (60 Hz).

O processo de organização das fontes PWL foi executado computacionalmente, através de um *script* desenvolvido em MATLAB<sup>®</sup>, a partir de dados exportados pelo

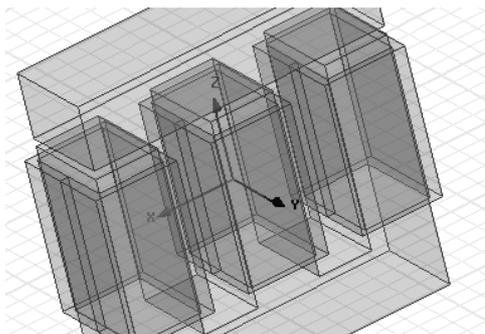


Fig. 1. Modelo tridimensional do indutor.

PSIM<sup>®</sup>. O número de fontes é proporcional à frequência do sinal PWM, que por sua vez é muito maior que a frequência do sinal modulado (frequência da rede elétrica). Como exemplo, um trecho *script* SPICE gerado pode ser visualizado no Quadro 1.

Quadro 1. *Script* SPICE para definição das fontes PWL (gerado com o MATLAB<sup>®</sup>).

```
VAB4 n4 n5 PWL(0 0 0.0070 ...
0.0071 0 0.0166 0)
```

Outra forma de simular os elementos magnéticos é aplicar a expansão de Fourier na tensão sintetizada pelo inversor (Fig. 2). Pode-se dividir a simulação em um conjunto de simulações para diferentes frequências. Essa solução é especialmente adequada para a determinação das perdas no núcleo magnético que compõe o elemento de filtro.

Para as simulações em diferentes frequências, foram escolhidos os harmônicos com magnitude superior a 5% do valor da magnitude da corrente na frequência fundamental (60 Hz). No caso da simulação apresentada, as frequências significativas (múltiplas da frequência de chaveamento do conversor, 7,680 kHz) estavam abaixo de 80 kHz, resultando em 47 simulações, com uma frequência discreta cada (incluindo as bandas laterais do espectro).

Nas simulações com frequências isoladas, foram informados os dados da curva  $P \times B$  (perdas no núcleo versus densidade de fluxo) de cada faixa de frequência e o circuito de excitação dos enrolamentos foi alterado para usar apenas fontes de tensão senoidais, na faixa de frequência analisada.

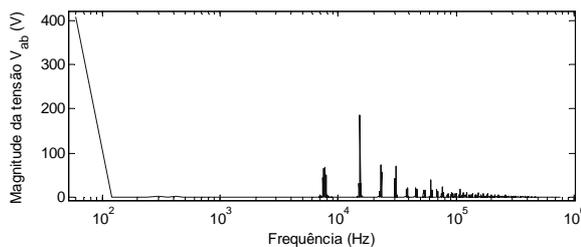


Fig. 2. Detalhe da expansão de Fourier da tensão PWM.

### *Estimativa das perdas no elemento magnético*

Basicamente, o Ansoft Maxwell<sup>®</sup> exige que se especifique o tipo de análise e o tipo de estrutura física do dispositivo magnético.

No caso de indutores e transformadores, geralmente se pode utilizar uma simulação bidimensional para simplificar o processo, já que, na maioria das vezes, esses elementos são simétricos.

Na simulação bidimensional, deve-se especificar a profundidade do espaço bidimensional, que pode ser calculada mantendo-se a mesma área de secção transversal do núcleo. No caso do estudo das perdas no núcleo de indutores ou transformadores, faz-se o uso da simulação magnetostática do elemento a ser estudado. Outras informações precisam ser incluídas no Ansoft Maxwell<sup>®</sup>, como as curvas  $B \times H$  (densidade de fluxo versus indução magnética) e  $P \times B$  do material magnético do núcleo. Além disso, um circuito para excitar o(s) enrolamento(s) deve ser fornecido (*script* SPICE, nesse caso).

Os dados das curvas de indução magnética e de perdas no núcleo podem ser obtidos das folhas de dados dos fabricantes. No caso da análise em várias frequências, como quando se emprega modulação PWM senoidal, pode-se obter a curva  $P \times B$  através da Eq. (1), conforme proposto em (MCLYMAN, 2004), a partir da definição dos coeficientes  $k$ ,  $m$  e  $n$ . Esses dados são, então, informados ao Ansoft Maxwell<sup>®</sup>.

$$P = k \times f^m \times B^n \quad (1)$$

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das simulações realizadas, obteve-se uma estimativa do valor das perdas no núcleo do indutor de filtro, conforme sumarizado na Tabela 1. Assim, pode-se utilizar a Eq. (2), conforme apresentado em (Magnetics, 2013), para estimar a elevação da temperatura do indutor ( $^{\circ}\text{C}$ ), onde  $P_{\text{Ferro}}$  são as perdas no núcleo (W),  $P_{\text{Cobre}}$  são as perdas nos enrolamentos (W),  $A_t$  é a superfície útil de dissipação do dispositivo magnético ( $\text{m}^2$ ) e 0,147 é um fator para o ajuste de unidades. Apesar de não abordado, foi feita uma análise das perdas nos enrolamentos ( $P_{\text{Cobre}}$ ).

$$\Delta T = 0,147 \times \left( \frac{P_{\text{Ferro}} + P_{\text{Cobre}}}{A_t} \right)^{0,833} \quad (2)$$

Considerando que a área de dissipação do indutor seja de  $0,2995 \text{ m}^2$ , a elevação de temperatura  $\Delta T$  estimada é de  $106,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### V. CONCLUSÕES

Processando adequadamente os dados obtidos de uma simulação numérica de circuitos elétricos para a utilização nas ferramentas de simulação magnética,

Tabela 1 Perdas simuladas no indutor de filtro.

Frequência considerada (Hz)	$P_{\text{Ferro}}$ (W)	$P_{\text{Cobre}}$ (W)
60	66,871	280,3782
7680	13,390	3,8620
15.360	49,026	
23.040	24,763	
30.720	49,912	
38.400	76,924	
46.080	27,877	
61.440	33,258	
69.120	50,979	
76.800	84,254	
Total	477,254	

\*Considerou-se, as perdas devido à resistividade CC.

demonstrou-se ser possível estimar as perdas e a elevação de temperatura do elemento magnético.

Resultados experimentais deverão ser obtidos para validar a metodologia de simulação desenvolvida. Salienta-se que o resultado obtido neste trabalho,  $106,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , é conservativo, uma vez que considera-se, na Eq. (2), apenas o efeito da convecção natural. Nesse sentido, análises detalhadas, considerando ventilação forçada, serão consideradas no decorrer da pesquisa.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482/2012: Condições para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição.** Brasília: ANEEL, 2012.

Ansoft. **user's guide – Maxwell 3D**, v. 15, Ver. 6, p. P1-1–P1-15, Ansoft, Mar. 2010.

Magnetics. **Magnetics Powder Core Design Manual.** Magnetics. [Acessado em 11 de junho de 2013] <http://issuu.com/magnetics/docs/powdercoredesignmanual>.

MICHELS, L. et al. **Generalised design methodology of second-order filters for voltage-source inverters with space-vector modulation.** IEE Proc. Electric Power Applications, v. 153, n. 2, p. 219–226, Mar. 2006.

MCLYMAN, C. W. T. **Transformer and inductor design handbook.** New York: Marcel Dekker, 2004.

QUARLES, T., et al. **The Spice Page.** [Acessado em 11 de junho de 2013] [http://bwrcs.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/UserGuide/elements\\_fr.html](http://bwrcs.eecs.berkeley.edu/Classes/IcBook/SPICE/UserGuide/elements_fr.html)