

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTIMAÇÃO DE EMI PRODUZIDA EM CONVERSORES DE POTÊNCIA UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

AUTORES:

Márlius Hudson de Aguiar

Maurício Beltrão Rossiter Correa

Gutemberg Gonçalves dos Santos Júnior

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

ESTIMAÇÃO DE EMI PRODUZIDA EM CONVERSORES DE POTÊNCIA UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS

Abstract

The Power Converters are equipments based on semiconductor switching processes which can cause the appearing of Electromagnetical Interference (EMI). In turn, these interferences can propagate through the power line and change the machine and equipment operating status, causing for example unintended ligaments/shutdowns. Such converters are widely used in the petroleum industry, mainly to control the power of large motors such as those used in the drilling equipments (top drive, mud pumps, cement pumps, winches), propulsion systems semi submersible platforms and barges. Furthermore, they are used in energy supply systems of offshore platforms such as Uninterruptible Power Supplies (UPS) and HVDC, which transmits energy into high voltage and direct current through submarine cables . Thus, it is necessary ensure an Electromagnetic Compatibility (CEM) between equipments to prevent any problem during the operating processes and production of oil and gas.

With the growth of power electronics, it is very important to develop techniques for the characterization of EMI in converters, and then treat these disorders effectively still in the design stage. An efficient means of accomplishing this task is predict the real circuit behavior through simulations, and then develop solutions that can be added to the original circuit, or modifying its own structure, allowing an iterative process that converges to an efficient solution and puts the converter within of the limits imposed by the rules governing the issue of EMI.

This paper deals of the Power Converters modeling, based on the DC-DC Push-Pull converter. The implementation of this model is made in Simulink / Matlab simulation software, with the aim of characterizing the generation and propagation of EMI produced by this topology. For this, various non-ideal behaviors of components of the circuit were taken into account in the model, based on data collected on components specifications (Datasheet), high frequency behavioral models and measurements, seeking the correct characterization of a converter implemented in laboratory.

Introdução

O uso de conversores de potência na indústria petroquímica é muito comum, principalmente no controle de potência para o acionamento de grandes motores elétricos e outras máquinas envolvidas nas etapas de exploração e produção.

Os conversores têm seu funcionamento baseado na comutação de interruptores em alta frequência, que provocam altas taxas de variação de corrente e tensão, resultando na geração de ruídos eletromagnéticos. Se estes ruídos não forem tratados de maneira adequada, poderão se propagar pela rede elétrica de alimentação e causar Interferência Eletromagnética (EMI) em outros sistemas, como por exemplo, um sistema de controle de uma máquina, podendo provocar o ligamento/desligamento não intencional dessa máquina, fato este, que acarretaria prejuízos financeiros e colocaria a vida dos funcionários que trabalham neste ambiente em perigo. Mediante a esses fatos, é necessária adotar medidas que impeçam ou ao menos atenuem a magnitude desses ruídos, de forma que eles não se configurem como uma interferência ao sistema e possa ser atingida a Compatibilidade Eletromagnética (CEM).

Um primeiro passo para alcançar este objetivo de forma rápida e em etapa de projeto, é estimar os níveis de EMI produzida pelo conversor e identificar os principais elementos do circuito que provocam ou influenciam na propagação destes ruídos, utilizando modelos mais complexos para os componentes do sistema, permitindo aproximar o comportamento em alta frequência da conversor simulado de um conversor real, para então serem feitas análises no domínio do tempo e da frequência, apontando os principais pontos a serem tratados para enquadrar o conversor nas normativas referentes ao níveis de EMI permitidos.

Metodologia

A predição dos níveis de EMI em um conversor é possível pela simulação de modelos realísticos o bastante para incluir efeitos que provocam os ruídos eletromagnéticos de alta frequência, comumente providos pelas comutações dos dispositivos semicondutores (MOSFETs e diodos) que provocam altas taxas de variação de tensão e corrente, e resultam em elevações impulsivas de tensão e corrente devido aos elementos parasitas, tais como as capacitâncias e indutâncias intrínsecas do componentes elétricos do circuito. Uma forma de realizar esta tarefa é por meio de ferramentas computacionais de simulação no domínio do tempo, como o software SIMULINK/MATLAB, que possibilita a construção de sistemas complexos pela interligação de blocos, os quais, em alguns casos, já apresentam parâmetros em seus modelos que são de alta influência no espectro de frequência do ruído gerado no conversor. Além disso, o software apresenta ferramentas poderosas para análise temporal e também no domínio da frequência.

O conversor Push-Pull é uma topologia típica de alimentação de barramentos para estágio DC de inversores, tais como aqueles utilizados no acionamento de grandes motores dos sistemas de perfuração e bombeamento na exploração de hidrocarbonetos. Seu esquema elétrico básico é composto por elementos semicondutores para realizar o chaveamento, no caso em estudo, são utilizados transistores MOSFET e diodos rápidos, um transformador, além de elementos passivos indutores, capacitores e resistores próprios do funcionamento ideal do conversor. O esquema ideal do Push-Pull é apresentado na figura 1. Com apenas estes elementos não é possível simular os efeitos provocados pelas variações rápidas de corrente e tensão, nem os acoplamentos parasitas entre as várias partes do circuito. Para tal, é necessário incluir não idealidades que estão presentes nos componentes reais, inserir algumas partes do circuito que normalmente não são representadas e características do substrato onde o circuito será montado.

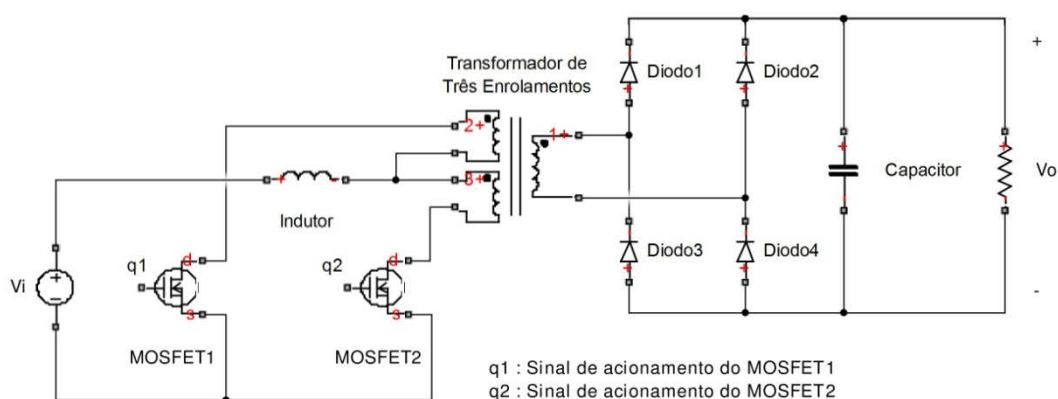
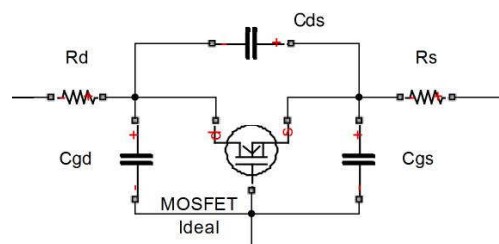


Figura 1 - Esquema ideal do Push-Pull.

A seguir serão analisados cada componente em separado para avaliar sua influência na geração ou propagação do ruído eletromagnético, e quais os parâmetros responsáveis por estes efeitos.

MOSFET

Por ser o elemento de chaveamento de alta frequência e responsável pelas variações abruptas de tensão e corrente, o MOSFET é considerado uma fonte geradora de ruído. Não obstante, existem elementos parasitas capacitivos e indutivos, providos pelo material e estrutura do componente, que se opõem a estas variações abruptas e provocam o aparecimento de correntes e tensões impulsivas (por vezes chamadas de 'spikes') que alteram o conteúdo harmônico, principalmente em alta frequência. Alguns valores destes parâmetros podem ser encontrados no datasheet do fabricante, como as resistências de dreno R_d e fonte R_s , e capacitâncias parasitas de junção, calculadas a partir das capacitâncias de saída C_{oss} , de entrada C_{iss} e de transferência reversa C_{rss} , por meio das equações (1), (2) e (3). A figura 2 apresenta o modelo não ideal do MOSFET.



$$C_{ds} = C_{oss} - C_{rss} \quad (1)$$

$$C_{gs} = C_{iss} - C_{rss} \quad (2)$$

$$C_{gd} = C_{rss} \quad (3)$$

Figura 2 - Modelo Não Ideal do MOSFET.

DIODO

O diodo também é considerado uma fonte de ruído e por isso deve ser modelado de forma eficaz para obter uma boa caracterização dos níveis de EMI. Vários de seus parâmetros também podem ser encontrados em datasheet, sendo que o mais importante deles para o aspecto estudado é a capacitância de junção (C_j), que, de forma semelhante ao MOSFET, provoca elevações impulsivas de corrente. A figura 3 mostra o modelo do diodo utilizado para análise em alta frequência.

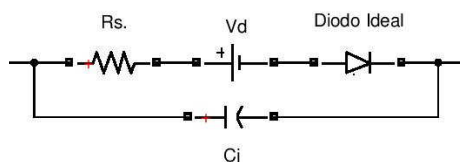


Figura 3 - Modelo Não Ideal do Diodo.

TRANSFORMADOR

Os elementos parasitas de destaque no transformador são as capacitâncias entre os enrolamentos e as indutâncias de dispersão. Em alguns casos, a indutância de dispersão equivalente referida ao primário é informada no catálogo do fabricante, e sabe-se que em um bom projeto de transformador, este não passa de 1% do valor da indutância do enrolamento. Já a capacitância entre os enrolamentos não é fornecida, sendo necessário efetuar medições sobre o transformador a ser usado. Como o objetivo do trabalho é minimizar o esforço necessário para estimar os níveis de EMI, foram utilizados valores encontrados na bibliografia, em aplicações semelhantes.

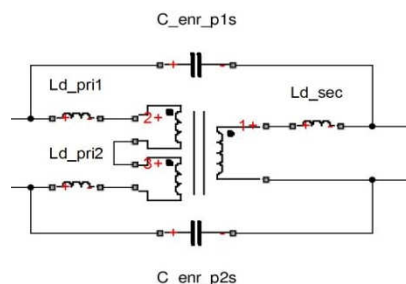


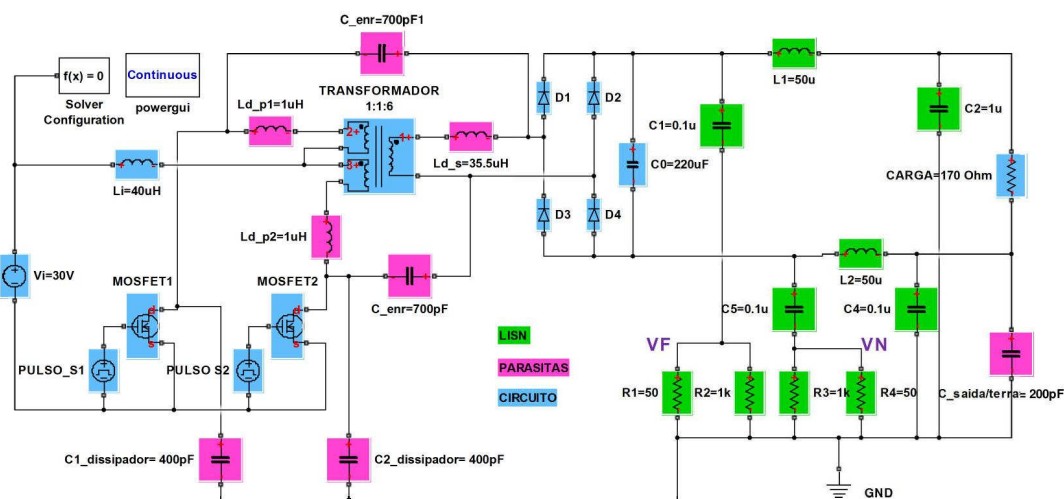
Figura 4 - Modelo do Transformador de alta frequência.

ACOPLAMENTOS COM O TERRA

Algumas partes do conversor apresentam facilidades para a passagem de componentes de alta frequência da corrente, tais como os dissipadores de calor dos transistores que são separados do corpo do MOSFETs por uma fina camada de pasta térmica. Esta pasta serve de dielétrico para o surgimento de uma capacitância de acoplamento entre o dreno e o terra. Além disso, também existe uma capacitância entre o referencial da tensão de saída e o terra.

Resultados e Discussão

Para simular o conversor Push-Pull e analisá-lo quanto aos aspectos da EMI, foram utilizados os modelos não ideais dos componentes, inserindo os elementos parasitas. Aqueles que não estavam presentes nos modelos fornecidos pelo Simulink, foram caracterizados como indutores e capacitores conectados nos locais adequados. Para simular as condições de um ambiente de medição real, foi inserido também o modelo da LISN, instrumento utilizado para medir a EMI. O circuito utilizado na simulação é mostrado na figura 5.



Para avaliar a influência de cada elemento parasita anteriormente apresentado na geração de ruídos de alta frequência, foi analisada a tensão dreno-fonte do MOSFET para cada inserção de elementos parasitas no circuito, acumulando-os até chegar ao circuito da figura 5, como mostra a figura 6.

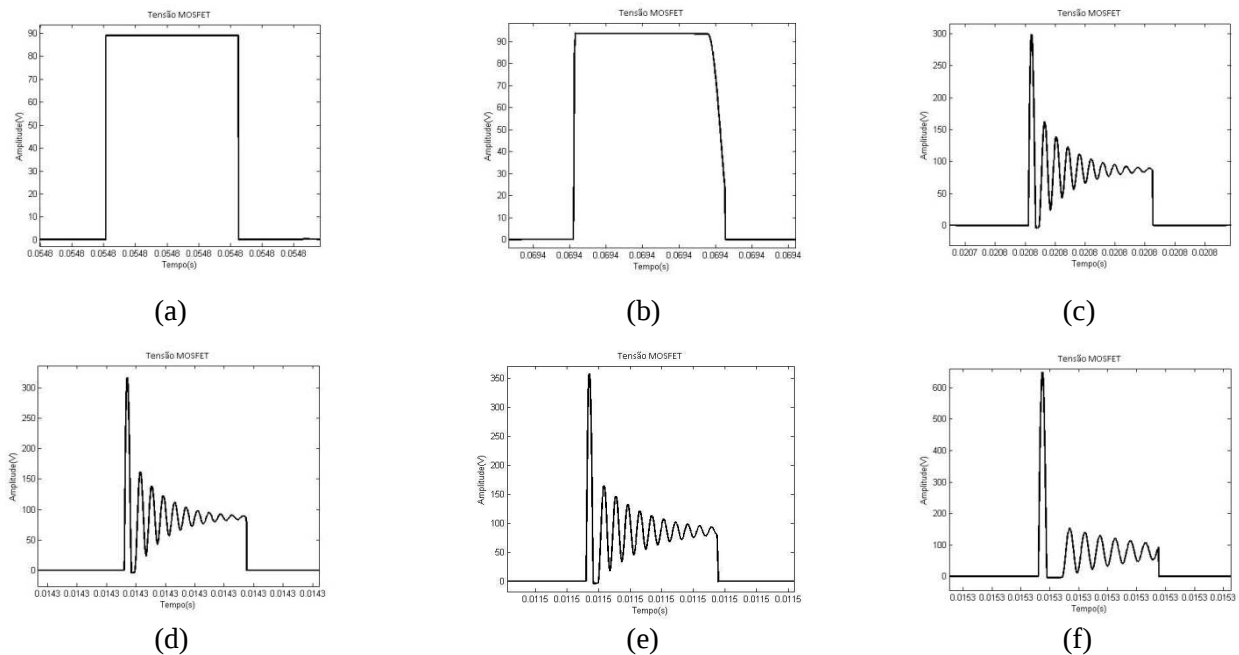


Figura 6 - Tensão dreno-fonte do MOSFET (a) Ideal (b) mais capacitâncias de junção (c) mais indutâncias de dispersão (d) mais capacitância entre enrolamentos (e) mais capacitâncias entre o dissipador (f) mais capacitância saída/terra.

Observa-se que depois da inserção das capacitâncias de junção e indutâncias de dispersão, a tensão dreno-fonte começou a oscilar. Isto deve-se ao efeito de ressonância entre estes dois elementos, resultando em distorções de alta frequência. Além disso, aparecem spikes de tensão na maioria das situações, atingindo 650V no circuito completo, enquanto que em funcionamento ideal esta tensão não ultrapassa 90V. Este fenômeno é atribuído à altíssimas taxas de variação da corrente frente a elementos indutivos do circuito. Na figura 7 é apresentado o espectro harmônico da tensão dreno-fonte.

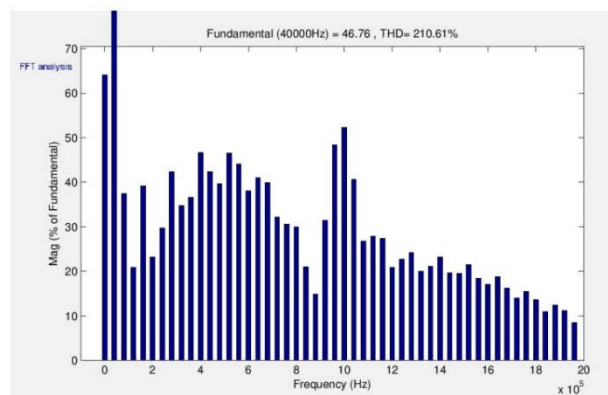
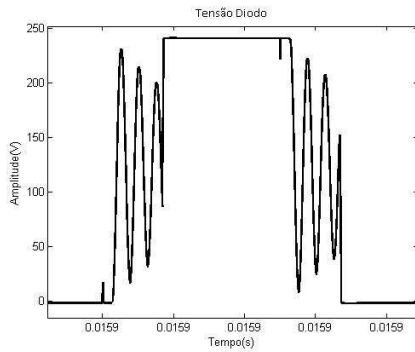


Figura 7 - Espectro de frequência da tensão dreno-fonte do MOSFET.

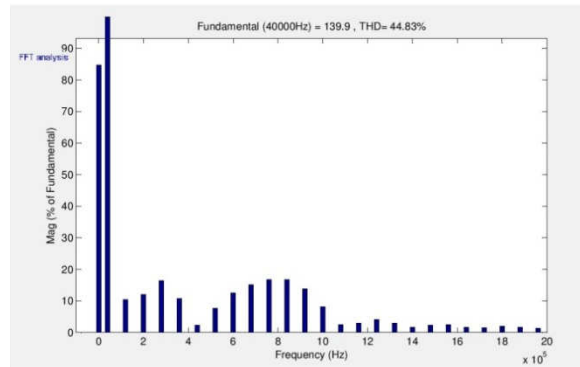
Nota-se que a EMI se espalha através de uma alta faixa de frequências, o que requer um procedimento corretivo para eliminá-las de forma a cumprir com as normas regulamentadoras

correspondentes. No mais, há um pico na 25ª harmônica (1MHz), que ocorre devido ao efeito de ressonância anteriormente mencionado.

Prosseguindo a análise, a figura 8 mostra a forma de onda da tensão do diodo D1, bem como o espectro de frequência correspondente. Observa-se a presença de oscilações de alta frequência durante o chaveamento, devido à capacitância de junção do diodo e a indutância de dispersão do secundário do transformador.



(a)



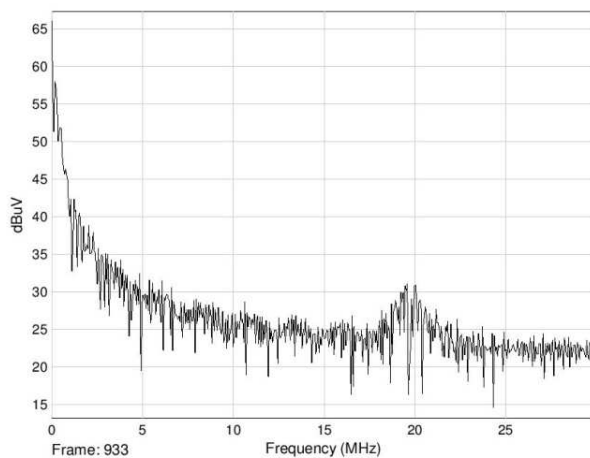
(b)

Figura 8 - (a) Forma de onda da tensão no diodo D1. (b) Espectro de frequência desta tensão.

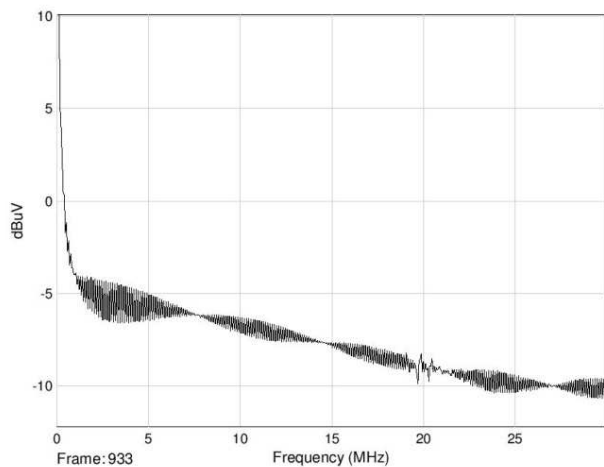
Por fim, a figura 9 apresenta o espectro dos ruídos de modo-comum e modo-diferencial captados pela LISN e calculados pelas equações (1) e (2), a partir das tensões VF e VN medidas nos resistores de 50Ω, que transduzem a corrente interferente em tensão interferente, facilitando a medição.

$$V_{mod-com} = \frac{VF + VN}{2} \quad (1)$$

$$V_{mod-dif} = \frac{VF - VN}{2} \quad (2)$$



(a)



(b)

Figure 9 - (a) Ruído de modo-diferencial. (b) Ruído de modo-comum.

Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia simples para obter um modelo de alta frequência de um conversor Push-Pull utilizado nas indústrias do setor P&G, pela consideração de características parasitas dos seus componentes, que têm alta influência no conteúdo espectral de alta frequência.

Com o uso de uma rotina SIMULINK/MATLAB, foi possível representar a interferência eletromagnética gerada pelos processos de comutação do conversor, permitindo um planejamento e projeto cuidadoso de soluções a serem aplicadas. Essencialmente, o processo de simulação apresentado neste trabalho é uma alternativa rápida e de baixo custo para guiar o desenvolvimento de soluções visando a redução dos ruídos eletromagnéticos dos conversores de potência enquanto estão ainda na fase de projeto.

Agradecimentos

Agradeço à ANP, FINEP e PETROBRÁS pela concessão da bolsa vinculada ao Programa de Recursos Humanos, seção 42 - PRH 42; e ao Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas - LEIAM, pela permissão do uso de seus equipamentos;

Referências Bibliográficas

PAUL, C. R. **Introduction to electromagnetic compatibility**. 2. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2006. 983 p.

SHELDRAKE, A. L. **Handbook of Electrical Engineering**: for practitioners in the oil, gas and petrochemical industry. 1. ed. Inglaterra: John Wiley & Sons. 2003. 624 p.

MAGNUS, E. F. **Desenvolvimento de uma ferramenta para ensaios de emi conduzida de baixo custo**. 2001. 101 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontífica Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HARTMANN, L. V. **Otimização de sistemas fotovoltaicos**. 2007. 90 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

KARVONEN, A. **Emi from switched converters**: simulation methods and reduction techniques. 2011. 171f.. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Chalmers University of Technology, Suécia, 2011.

DIANBO Fu; SHUO Wang; PENGJU Kong; LEE, F.C.; DAOCHENG Huang, "Novel Techniques to Suppress the Common-Mode EMI Noise Caused by Transformer Parasitic Capacitances in DC–DC Converters", **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, vol.60, no.11, pp.4968,4977, Nov. 2013.

Mesh Overlay. Datasheet: STE110NS20FD Power Mosfet. Publicação eletrônica, 2006.

International Rectifier. Datasheet: 15ETH6 Hyperfast Rectifier. Publicação eletrônica, 2006.

SCHLICHTING, L. C. M. **Contribuição ao estudo da compatibilidade eletromagnética aplicada aos conversores estáticos**. 2003. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.