

ESTUDO DE CASO DE UM FILTRO DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA PARA EQUIPAMENTOS DE ILUMINAÇÃO UTILIZANDO DIODOS EMISSORES DE LUZ

RAFAEL PEDRONI, JOÃO PAULO MAZZOTTI, RENAN R. DUARTE, MARCO A. DALLA COSTA

Universidade Federal de Santa Maria

Av. Roraima, 1000, Santa Maria, RS, Brasil

*E-mails: pedroni.rafael@gmail.com, jpmazzotti@gmail.com,
renan.duarte@gedre.ufsm.br, marcocdc@gedre.ufsm.br*

Abstract — The increasing demand for high efficiency lighting systems made, in recent years, the sales and production of LED based products to increase in Brazil. This increment highlighted the need for regulation and standardization of the market, in order to ensure equipment's quality. One of the requirements of the new legislation is the compliance with the ABNT NBR IEC/CISPR 15 standard which specifies the limits of electromagnetic emission for lighting equipment. Currently, almost of the lighting equipment use switched converters to provide the proper voltage and current for the LEDs. Such converters typically operate in the kHz range and consume a current spectrum loaded with electromagnetic noise. This paper addresses the issue through a case study of a 21 W buck-boost converter used as driver in a tubular LED lamp. The current spectrum was obtained and based on this result, a π filter was designed for noise attenuation. Three different inductors were analysed, being the coupled inductor in series with a differential mode inductor the best compromise between performance and volume.

Keywords — LED, electromagnetic interference, filter, noise, converter.

Resumo — A crescente busca pela eficiência energética de sistemas de iluminação fez com que, nos últimos anos, a produção e comercialização de produtos baseados em LED disparassem no Brasil. Tal crescimento trouxe à tona a necessidade de regulamentação e padronização do mercado a fim de garantir a qualidade dos equipamentos. Uma das exigências da nova legislação é o cumprimento dos requisitos da norma ABNT NBR IEC/CISPR 15, a qual especifica os limites de emissão eletromagnética para equipamentos de iluminação. Atualmente, a grande maioria dos equipamentos de iluminação utilizam conversores estáticos para fornecer os valores adequados de corrente e tensão para os LEDs. Tais conversores operam, tipicamente, na faixa de kHz e consomem um espectro de corrente carregado de ruído eletromagnético. Este trabalho aborda o tema através de um estudo de caso de um conversor buck-boost de 21 W, utilizado na alimentação de uma lâmpada tubular de LEDs. O espectro de corrente do conversor foi obtido e, com base neste resultado, projetou-se um filtro π para atenuação do ruído. Três diferentes indutores foram analisados, sendo determinado que a utilização de um indutor acoplado em série com um indutor de modo diferencial apresenta a melhor relação entre desempenho e volume.

Palavras-chave — LED, interferência eletromagnética, filtro, ruído, conversor.

1 Introdução

Atualmente, grande parte dos fabricantes de equipamentos para iluminação estão voltados para produtos de LED. Todos os novos projetos de eficiência energética têm como objetivo principal a troca da atual iluminação por equipamentos utilizando LED (PennWell Corporation, 2015). Devido a isso, surgiram nos últimos anos diversos tipos e modelos de lâmpadas LED no mercado brasileiro, muitas das quais são importadas e apresentam poucas informações, causando confusão aos consumidores. Com isso surgiu a necessidade de regulamentar o mercado de lâmpadas LED no Brasil. Essa regulamentação iniciou com a publicação da portaria 389 do INMETRO em 25 de agosto de 2014. Dentre as modificações e melhorias, destaca-se a obrigatoriedade do cumprimento dos requisitos da norma ABNT NBR IEC/CISPR 15, que trata especificamente da compatibilidade eletromagnética em equipamentos de iluminação e similares.

Compatibilidade eletromagnética é a capacidade dos dispositivos elétricos e eletrônicos, de funcionarem corretamente em um ambiente eletromagnético, respeitando a margem de segurança definida, sem sofrer ou causar danos (Paul, 2006).

A compatibilidade eletromagnética pode ser dividida em duas partes: Interferência e Susceptibilidade. A primeira trata da quantidade de ruído eletromagnético que determinado equipamento insere no ambiente, seja de forma conduzida ou radiada. Já a susceptibilidade se refere à robustez de determinado equipamento a perturbações eletromagnéticas conduzidas ou radiadas.

Interferência eletromagnética (EMI, do inglês *Electromagnetic Interference*) é qualquer emissão ou sinal, irradiado no espaço livre ou conduzido por cabos de alimentação, que coloca em risco o funcionamento de outros equipamentos que estão próximos ou conectados à mesma rede de alimentação (Sartori, 2009; Paul, 2006).

A EMI radiada é dependente de parâmetros construtivos do circuito e é geralmente evitada através de blindagem, sendo difícil estabelecer um modelo que estime de forma adequada seus efeitos durante a fase de projeto do equipamento. Por esta razão, usualmente aborda-se as interferências radiada e conduzida de forma distinta em diferentes etapas do projeto.

Neste contexto, este artigo irá tratar do assunto da interferência eletromagnética conduzida através de um estudo de caso do projeto de filtro de EMI

conduzida, para um conversor buck-boost de 21 W, utilizado na alimentação de uma lâmpada tubular de LED. Primeiramente, serão abordados quesitos referentes às normas que regulamentam o assunto. Após é apresentado um breve resumo sobre a interferência eletromagnética conduzida e suas formas usuais de atenuação. Na Seção 5 são apresentados os resultados obtidos durante a fase de projeto e testes. Finalmente na Seção 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 Normatização

Os limites das perturbações são definidos pelas normas do Comitê Internacional Especial em Rádio Interferência (CISPR). A CISPR foi fundada em 1934 para estabelecer normas para controlar os níveis de interferência dos equipamentos eletrônicos e é uma divisão da IEC. Na Tabela 1 é possível visualizar as principais normas CISPR e suas aplicações.

Tabela 1. Principais normas CISPR

Publicação	Aplicação
CISPR 11	Industrial, equipamentos científicos e médicos
CISPR 12	Veículos, barcos e motores a combustão
CISPR 13	Receptores de radiodifusão
CISPR 14	Eletrodomésticos e ferramentas
CISPR 15	Iluminação
CISPR 16	Métodos de medição
CISPR 18	Alta tensão
CISPR 22	Tecnologia da informação

Normalmente, para ser comercializado em determinado local, um produto deve cumprir as normas de compatibilidade eletromagnética (EMC, do inglês *Electromagnetic Compatibility*) impostas pelo órgão regulador do país (Mainali & Oruganti, 2010).

Atualmente, a norma brasileira que trata de compatibilidade eletromagnética para equipamentos de iluminação, é a norma ABNT NBR IEC/CISPR 15. De acordo com ela, a interferência eletromagnética radiada deve ser medida na faixa de frequência de 9 kHz a 300 MHz, enquanto a conduzida é medida na faixa de frequências de 9 kHz a 30 MHz (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

3 Fontes Geradoras de EMI Conduzida

São inúmeras as fontes geradoras de interferência eletromagnética conduzida. Por si só, um conversor operando em alta frequência já gera correntes com ruído espectral devido às correntes e tensões de comutação. As correntes de ruído geradas se propagam ao longo das trilhas do circuito eletrônico e podem, por sua vez, causar interferência em outros sistemas eletrônicos, incluindo os próprios circuitos auxiliares do conversor.

Existem, porém, inúmeras outras fontes geradoras. Dentre elas é possível citar: layout da placa de circuito impresso, dV/dt , topologias de conversores, capacitâncias intrínsecas de componentes e entre

componentes e seus dissipadores de calor (Mainali & Oruganti, 2010).

Este ruído pode ser minimizado por um layout bem projetado, ou seja, é possível fazer com que ruídos gerados pela comutação dos semicondutores sejam absorvidos pelas capacitâncias parasitas do próprio circuito (Mainali & Oruganti 2010). Outra forma de reduzir a interferência eletromagnética é escolher topologias que apresentam melhor desempenho.

3.1 Correntes de Modo Comum versus Correntes de Modo Diferencial

O ruído conduzido gerado por um conversor pode ser classificado em dois grupos: ruído de modo comum (CM, do inglês *common mode*) e ruído de modo diferencial (DM, do inglês *differential mode*).

Em um conversor com entrada em corrente alternada, as correntes de modo diferencial (ou simétricas) têm origem na forma de onda triangular de alta frequência da corrente comutada e circulam sobrepostas à corrente de alimentação do conversor nos terminais de entrada. Este tipo de ruído interfere de forma mais significativa nas faixas de baixa frequência do espectro de emissões (Paul, 2006; Almeida, 2013; Sartori, 2009).

Já as correntes de modo comum circulam através dos condutores fase e neutro e retornam pelo condutor terra. Estas correntes estão em fase e influenciam mais significativamente as frequências mais altas do espectro de emissões (Almeida, 2013; Sartori, 2009). Estas correntes são tipicamente causadas pelos acoplamentos capacitivos e indutivos e se beneficiam das capacitâncias intrínsecas dos componentes para circular pelo condutor terra do equipamento. Como a dependência deste ruído é de ordem aleatória, ou seja, depende de inúmeros fatores que não podem ser previamente estimados, a única forma de medir este tipo de ruído é através de ensaios práticos (Paul, 2006; Sartori, 2009; Mainali & Oruganti, 2010).

A Figura 1 ilustra os caminhos percorridos pelas correntes de modo comum e diferencial em um conversor estático.

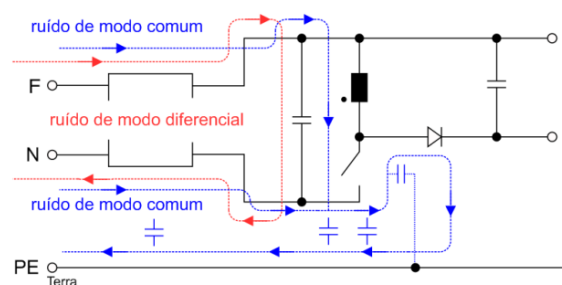


Figura 1. Correntes de modo comum e correntes de modo diferencial

O principal método utilizado para controlar os níveis de ruído de um conversor estático é a adição de filtros passivos na entrada.

4 Procedimento de Projeto de Filtros

Primeiramente, é necessário identificar se um equipamento necessita ou não do acréscimo de um filtro para o ruído conduzido. Existem basicamente duas formas para isso: simulação e/ou ensaio propriamente dito do equipamento em questão. Vide na Figura 2 um fluxograma do procedimento de projeto de filtro de EMI.

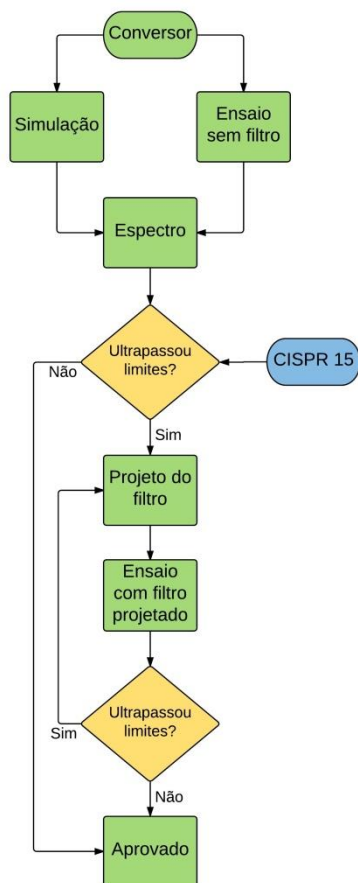


Figura 2. Fluxograma de projeto

Após a identificação ou não da necessidade de utilização do filtro, caso seja necessário projetar o filtro, existem inúmeros tipos de filtros para serem empregados nos mais diversos tipos de aplicações. Dentre eles, alguns dos mais comuns são: filtro LC, filtro π e o filtro T (Almeida, 2013; Sartori, 2009).

A utilização de cada filtro depende de onde existe a necessidade e o tipo de ruído a ser filtrado. Dos filtros citados acima, o filtro π é extremamente difundido, devido a sua boa atenuação para as mais diferentes aplicações além de ser compacto e eficiente, pois é capaz de filtrar tanto as correntes de modo diferencial como as de modo comum. A Figura 3 mostra o circuito equivalente para a topologia π (Sartori 2009). Nele, o indutor acoplado L_{CM} fornece um caminho de alta impedância para o ruído de modo comum enquanto os enrolamentos L_{DM} criam um caminho de baixa impedância para o ruído de modo diferencial.

Em muitos casos, a topologia completa pode ser implementada utilizando apenas um elemento mag-

nético. Nesses casos, os indutores de modo diferencial e comum são acoplados em um único núcleo onde a indutância própria dos enrolamentos atua no ruído de modo comum enquanto a de dispersão no ruído de modo diferencial. Os enrolamentos devem estar dispostos de forma a anular o fluxo magnético no interior do núcleo, evitando assim saturação e reduzindo as perdas no material magnético, resultando em um indutor com menor tamanho. A Figura 4 apresenta os circuitos equivalentes de um filtro π completo para os dois tipos de ruído. Nestes circuitos, além das indutâncias L_{CM} e L_{DM} mostradas na Figura 3, a indutância de dispersão L_{LEAK} do indutor de modo comum é considerada (Shih et al., 1996; Sartori, 2009; Nidhal Y. Nasser, 2012).

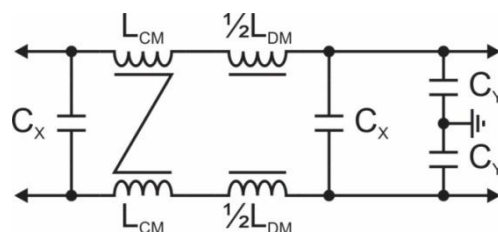


Figura 3. Filtro π completo

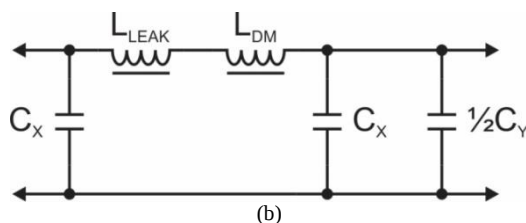
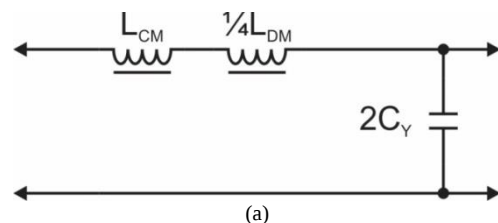


Figura 4. (a) Circuito equivalente para modo comum. (b) Circuito equivalente para modo diferencial

Para atenuação do ruído de modo comum, são utilizados o indutor L_{CM} e os capacitores C_Y . Para atenuação do ruído de modo diferencial, são utilizados os capacitores C_X , as indutâncias L_{DM} e também a indutância de dispersão L_{LEAK} do indutor L_{CM} .

5 Estudo de Caso

Com o objetivo de comprovar a teoria apresentada, utilizou-se um conversor buck-boost de 21 W em modo crítico de condução, utilizando a metodologia *Primary Side Regulation* (PSR) como estudo de caso. Diagramas e formas de ondas típicas do conversor buck-boost podem ser encontradas em (Kazimierczuk, 2008). O conversor em questão possui alto fator de potência ($>0,92$), baixa distorção harmônica e tem como aplicação a alimentação de

uma lâmpada tubular de LED. Por questões de sigilo industrial, os parâmetros do circuito de controle foram omitidos.

O ensaio de EMI consiste em medir os espectros emitidos com a utilização de um *receiver* e uma LISN (*Line Impedance Stabilization Network*). A metodologia de ensaio consiste em medir primeiramente os valores de pico e média. Caso nenhum dos dois valores medidos ultrapasse os limites da norma, o ensaio está aprovado. Se somente o valor de pico ultrapassar o limite da norma e o valor de média não ultrapassar, é realizado um segundo ensaio, para avaliar o valor de quase pico, o qual não poderá ultrapassar para ser aprovado. Ou seja, um ensaio para ser aprovado precisa que o valor de média e quase pico não ultrapassem os limites da norma (International Special Committee on Radio Interference, 2015).

Com relação ao estudo de caso, primeiramente mediu-se o ruído conduzido produzido pelo conversor sem filtro de entrada. Na Figura 5, a linha vermelha é o limite de quase pico e a linha azul é o limite de média, ambos são especificados pela norma e medidos em dB μ V. Já a linha verde é o valor de pico medido e a linha azul é o valor de média medido.

Como pode ser observado, tanto o valor de média como o de pico não respeitam os limites especificados pela norma ABNT NBR IEC/CISPR 15, sendo necessário, portanto, o projeto de um filtro para atenuar os ruídos. Neste primeiro ensaio, como os valores de pico e média ultrapassaram muito os limites da norma, o valores de quase pico não foram avaliados.

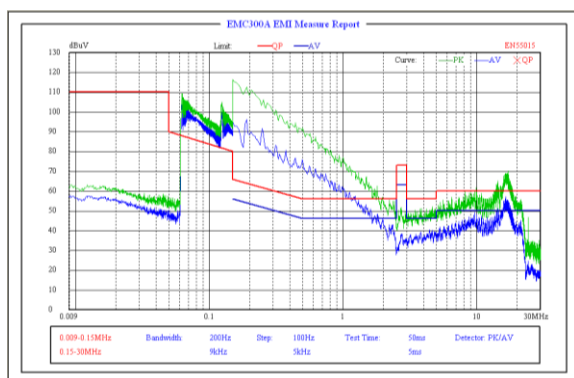


Figura 5. Ensaio de interferência eletromagnética sem filtro na condição neutro, 220V

O projeto do filtro baseou-se nas metodologias descritas em (Sartori, 2009; Shih et al., 1996). A partir do ensaio sem filtro, foram retirados os dados necessários para o projeto. A primeira frequência onde o limite da norma é ultrapassado é denominada de frequência crítica, neste caso, 60 kHz. O próximo dado adquirido foi o valor máximo de pico medido na frequência crítica, que no ensaio acima foi de 110 dB μ V. Projetou-se então um filtro π com frequência de corte de 14,2 kHz, o qual resulta em um indutor de modo diferencial de 835 μ H.

O conversor opera com tensão de entrada universal a partir de uma rede monofásica com conexões de fase e neutro. Como não há conexão direta com o

terra da rede, apenas um filtro de modo diferencial já seria suficiente. Entretanto, a presença de ruídos na extremidade superior do espectro indica que acoplamentos capacitivos, ainda que pequenos, influenciam no ruído de modo comum.

Optou-se então pela utilização de um indutor comercial do fabricante Epcos, referência comercial B82732F2701B001 (Figura 6) que apresenta 47 mH no modo comum (indutância própria) e 920 μ H de modo diferencial (indutância de dispersão). Os capacitores C_{X1} e C_{X2} tem 220 nF e 150 nF respectivamente. Devido à ausência de aterramento no circuito, os capacitores C_Y não foram utilizados.

A Figura 7 apresenta o circuito equivalente do filtro projetado, onde a indutância L_{CM} é a indutância (47 mH) própria do componente utilizado e a indutância L_{LEAK} representa a indutância (920 μ H) de dispersão do indutor utilizado.



Figura 6. Indutor comercial Epcos B82732F2701B001

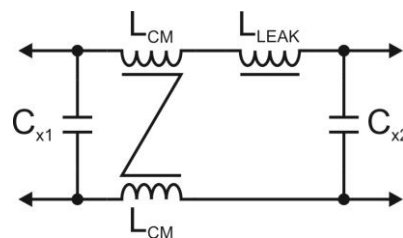


Figura 7. Esquemático filtro π com indutor modo comum

É possível verificar na Figura 8 o resultado do ensaio de EMI utilizando o filtro proposto.

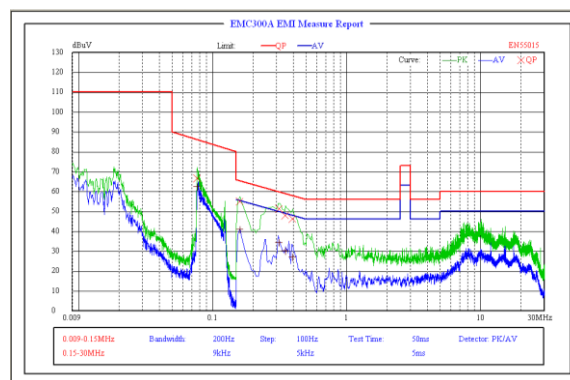


Figura 8. Ensaio de interferência eletromagnética com indutor modo comum

De acordo com a Figura 8, o conversor buck-boost foi aprovado utilizando o filtro π projetado. Em toda faixa de frequências, os valores medidos ficaram abaixo do limite da norma. Porém, devido a questões dimensionais, se fez necessária a substituição

ção do indutor comercial por um de características semelhantes, porém utilizando um núcleo E13.

A utilização de um indutor com núcleo E13, além de ser menor, possui algumas vantagens. Dentre elas destacam-se o custo e a praticidade de produção, pois núcleos do tipo E são mais facilmente construídos em larga escala do que os do tipo toroidal. Entretanto, a dificuldade de obtenção de altos valores de indutância aumenta à medida que o tamanho físico do indutor diminui. Para o caso em questão, a indutância máxima obtida foi 25 mH. Vide na Figura 9 o indutor construído e na Figura 10 o resultado do ensaio de EMI utilizando um filtro de modo comum com núcleo de ferrite E13.



Figura 9. Indutor modo comum com núcleo de ferrite E13 construído

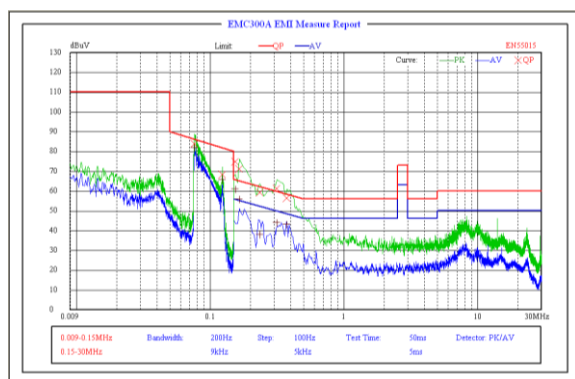


Figura 10. Ensaio de interferência eletromagnética com indutor modo comum utilizando núcleo de ferrite E13

Como pode ser visualizado na Figura 10, o ensaio de EMI utilizando um indutor com núcleo de ferrite E13 ultrapassou os limites da norma.

Analisando os dois indutores, notou-se que além da indutância de modo comum propriamente dita ser maior, a indutância de dispersão do indutor comercial é superior a do indutor construído. Enquanto o primeiro apresenta 920 μ H na indutância de dispersão, o indutor construído tem apenas 240 μ H. Como a indutância de dispersão deste indutor atua diretamente no ruído de modo diferencial, adicionou-se ao circuito um indutor extra de modo diferencial, com a intenção de melhorar a atenuação do filtro. Vide na Figura 11 o esquema de filtro utilizado.

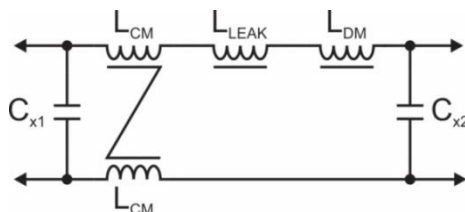


Figura 11. Esquemático filtro π projeto com a adição da indutância de modo diferencial extra

Nesta nova configuração de filtro π , L_{CM} representa a indutância de modo comum, L_{LEAK} representa a indutância de dispersão do indutor de modo comum e L_{DM} representa a indutância externa de modo diferencial adicionada.

Na Figura 12 é possível verificar o resultado do ensaio com o novo filtro proposto.

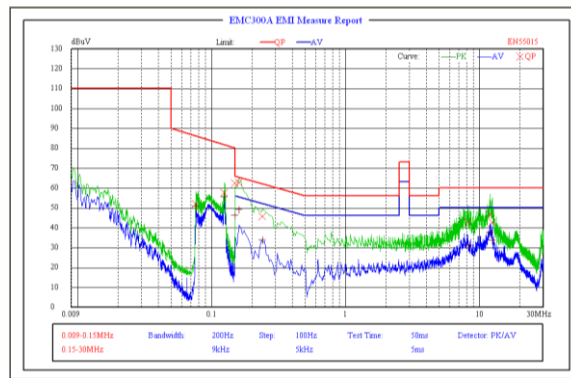


Figura 12. Ensaio de interferência eletromagnética com indutor modo comum E13 e indutor modo diferencial

Como pode ser visto, com a inserção de um indutor de modo diferencial, foi possível atender aos limites exigidos pela ABNT NBR IEC/CISPR 15.

Com a intenção de comprovar os resultados, foi proposto um novo ensaio, somente com a utilização do indutor de modo diferencial. Por questões construtivas, utilizou-se um indutor tipo I de 4,7 mH. A Figura 13 apresenta o circuito do novo filtro enquanto na Figura 14 é exibido o indutor utilizado.

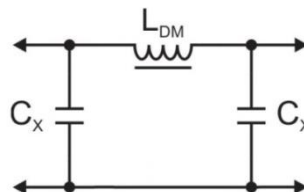


Figura 13. Esquemático filtro π proposto somente com a indutância de modo diferencial



Figura 14. Indutor modo diferencial utilizado

Conforme é possível visualizar na Figura 15, a proposta de filtro utilizando somente um indutor de modo diferencial foi reprovada. Isso se deve principalmente pelo tipo de indutor utilizado. Por ser um indutor tipo I, são necessárias muitas espiras para alcançar a indutância requerida, desta forma, entre as espiras utilizadas no enrolamento do indutor acabam se formando capacitâncias intrínsecas, o que acaba afetando o desempenho do filtro utilizado.

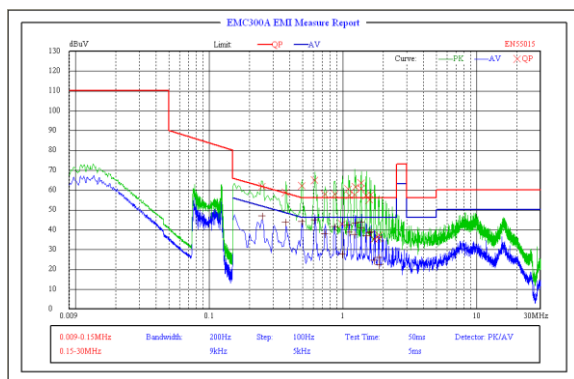


Figura 15. Resultado ensaio EMI com somente filtro de modo diferencial

Conforme é possível visualizar na Figura 16, no ensaio de impedância versus frequência do indutor utilizado, o ponto em que no indutor deixa de prevalecer a indutância e começa a prevalecer a capacitância, ocorre em 534 kHz. Ou seja, as capacitâncias intrínsecas que aparecem com o aumento da frequência fazem com que o filtro deixe de atenuar os ruídos. Esta frequência coincide com a frequência na qual o conversor passa a exceder os limites de ruído impostos pela norma.

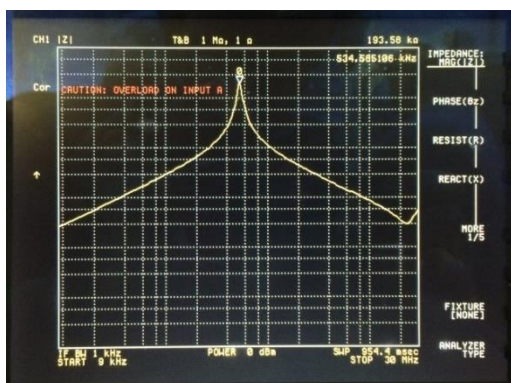


Figura 16. Curva impedância versus frequência do indutor modo diferencial utilizado

6 Conclusões

Conforme mostrado no estudo de caso realizado, foram abordadas três configurações distintas de um filtro π para atenuar o ruído eletromagnético conduzido emitido. A primeira obteve um bom resultado, porém a utilização de um indutor acoplado comercial apresenta restrições físicas no protótipo em questão. Na segunda avaliação, o resultado não foi satisfatório para atender aos limites da norma. A utilização de um indutor acoplado com núcleo E13 juntamente com um indutor de modo diferencial se mostrou a melhor opção.

A junção do filtro de modo comum com núcleo E13 mais o indutor de modo diferencial acabaram atenuando a quantidade de ruído necessário para que o conversor buck-boost atendesse os limites impostos pela norma.

A implementação do filtro utilizando o núcleo E13, além de ter sido aprovado no ensaio de EMI, também é menor fisicamente do que o filtro utilizando indutor Epcos. Enquanto o indutor Epcos possui um volume de 4,79 cm³ o indutor com núcleo E13 possui um volume de 2,49 cm³.

É possível concluir que o projeto do filtro de EMI é extremamente importante para o atendimento das normas onde são utilizados conversores estáticos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Intral S/A Indústria de Materiais Elétricos e a EPCOS Brasil pelas contribuições na realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Almeida, C.C. de, 2013. *Análise das Emissões Conduzidas Utilizando Técnicas de Separação de Ruído de Modo Comum e Modo Diferencial*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. ABNT NBR IEC/CISPR 15 - Limites e métodos de medição das radioperturbações características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares. , pp.1–68.
- International Special Committee on Radio Interference, 2015. CISPR 16-1-1 - Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus. , p.205.
- Kazimierczuk, M.K., 2008. *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*, Dayton: Wiley.
- Mainali, K. & Oruganti, R., 2010. Conducted EMI Mitigation Techniques for Switch-mode Power Converters: A survey. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(9), pp.2344–2356.
- Nidhal Y. Nasser, 2012. Practical Approach in Designing Conducted EMI Filter to Mitigate Common Mode and Differential Mode Noises in SMPS. *Journal of Engineering and Development*, 16(1), pp.164–183. Available at: <http://www.iasj.net/>.
- Paul, C.R., 2006. *Introduction to Electromagnetic Compatibility* 2nd ed., Hoboken: Wiley.
- PennWell Corporation, April 23, 2015. LEDs Magazine Special Report. *LEDs Magazine*, p.37.
- Sartori, H.C., 2009. *Uma Nova Metodologia de Projeto para a Otimização do Volume do Conversor Boost PFC*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.
- Shih, F.Y. et al., 1996. A Procedure for Designing EMI Filters for AC Line Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 11(1), pp.170–181.