

ANÁLISE DAS EMISSÕES ELETROMAGNÉTICAS EM CONVERSORES CHAVEADOS EM REGIME TRANSITÓRIO

Bruno P. Ricobom¹, João Américo V. Junior¹, Marlio José do C. Bonfim¹

¹Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba - PR, Brasil
e-mail: brunoricobom@hotmail.com

Resumo – As atuais normas de emissões eletromagnéticas, como por exemplo as produzidas pelo comitê CISPR, realizam o ensaio de emissões radiadas de conversores chaveados somente em regime permanente de operação. Dessa forma, emissões eletromagnéticas geradas durante transitórios de partida ou desligamento desses conversores acabam não sendo submetidos a nenhum controle. Esses transitórios podem causar problemas de interferência eletromagnética, especialmente se os conversores em questão forem reatores eletrônicos de luminárias, que geralmente estão presentes em um grande número em um ambiente e sujeitos a vários ciclos diários de partida e desligamento. Para realizar essa análise faz-se necessário o desenvolvimento de uma técnica de medidas de emissões eletromagnéticas capaz de ser rápida o suficiente para detectar as emissões durante esses transitórios. Desse modo a captura dos sinais no domínio do tempo e a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) com alguns processamentos adicionais, possibilitaram esse tipo de análise. Nesse trabalho serão demonstradas as ferramentas necessárias para a execução da análise de emissões eletromagnéticas radiadas, particularizando para o caso dos reatores eletrônicos de lâmpadas fluorescentes. Nos testes realizados com esses conversores, foram observadas emissões radiadas acima do limite da norma CISPR15 durante os transitórios.

Palavras-Chave – Conversores chaveados, Emissões Radiadas, FFT, Reatores Eletrônicos, Regime Transitório

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC EMISSION IN SWITCHED CONVERTERS AT THE TRANSIENT REGIME

Abstract – The Current electromagnetic emissions standards, such as those produced by the CISPR committee, perform the radiated emission test of switched-mode converters only under a permanent operating regime. In this way, electromagnetic emissions generated during transients of starting or shutting down of these converters are not submitted to a control. These transients may cause electromagnetic interference issues, especially if the converters are electronic ballasts for lamps, which are usually present in a large number in the same environment and exposed to several daily cycles of

starting and shutting down. To perform this analysis, it is necessary to use an electromagnetic emission measurement technique capable of being fast enough to detect the emissions during these transients. The capture of the transient signals in the time domain and the calculation of the fast Fourier transform (FFT) with some additional processing allow this type of analysis. In this work, the necessary tools to perform the radiated electromagnetic emissions analysis will be demonstrated, particularizing for the case of the electronic ballasts for fluorescent lamps. In the tests executed with these converters, there were observed radiated emissions above the limit of the CISPR15 standard during transients.

Keywords – Eletronic Ballasts, FFT, Switched-mode converters, Transient Regime, Radiated Emissions

I. INTRODUÇÃO

Conversores chaveados são fontes conhecidas de emissões eletromagnéticas, tanto conduzidas quanto radiadas [1]. Estas emissões, muitas vezes, são capazes de produzir interferências em outros dispositivos eletroeletrônicos, devido às elevadas taxas de variação de tensão e corrente geradas por esses conversores. Existem diversas normas produzidas por órgãos de padronização internacional (como por exemplo as normas produzidas pelo comitê CISPR) que visam tentar controlar essas emissões e tornar esses conversores eletromagneticamente compatíveis com o meio em que esses estão inseridos [2]. Essas normas dizem respeito somente a requisitos de emissões eletromagnéticas desses conversores em regime permanente, sendo negligenciadas as emissões que afetam o ambiente durante os transitórios de desligamento e energização do conversor chaveado.

Durante o transitório de energização ou desligamento, podem ocorrer emissões eletromagnéticas que superam em algumas dezenas de vezes os valores obtidos em regime permanente de funcionamento. Nestes instantes podem ocorrer interferências importantes em equipamentos próximos a estes conversores, que podem levar a falhas de funcionamento ou até danos permanentes.

As técnicas de medidas das emissões eletromagnéticas convencionais, baseadas em analisadores de espectro por varredura, não são rápidas o suficiente para detectar esses transitórios [3], uma vez que a medida completa de uma emissão radiada ou conduzida nas faixas de frequências abordadas pela norma podem levar de alguns minutos até algumas horas, dependendo da modalidade do produto submetido ao ensaio.

Artigo submetido em 02/03/2019. Primeira revisão em 24/04/2019. Aceito para publicação em 03/07/2019 por recomendação do Editor Marcello Mezaroba <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2019.3.0016>

Para viabilizar o estudo das emissões eletromagnéticas radiadas durante o transitório foi aplicada a técnica da transformada rápida de Fourier (FFT) [4]. Para se atingir o resultado desejado foram realizados processamentos complementares na FFT para obter uma melhor relação sinal ruído com o objetivo de atingir o requisito mínimo de ruído de fundo da norma CISPR16-4-2 [5]. Desta forma os sinais de ruído puderam ser coletados por um osciloscópio de banda passante de 1 GHz com *trigger* sincronizado com o início das emissões capturadas pelo osciloscópio.

Um exemplo de conversor chaveado que sofre diversos ciclos de partida e desligamento durante o dia são os reatores eletrônicos de lâmpadas fluorescentes. Além disso, normalmente tem-se vários desses conversores em um único ambiente e geralmente vários deles estão associados a um único interruptor, o que leva a ter situações onde vários desses conversores são ligados ou desligados no mesmo instante. Isto em tese, pode aumentar as emissões eletromagnéticas que poderão causar interferências em outros sistemas durante os transitórios de partida ou desligamento das luminárias. A partir disso aplicou-se a técnica da FFT com as devidas correções na análise de duas luminárias equipadas com lâmpadas fluorescentes. A primeira luminária possui lâmpadas T5 e um reator com correção de fator de potência (PFC) baseado na topologia *charge-pump*. A segunda luminária possui uma lâmpada T8 com reator eletrônico de baixo custo e sem PFC. As duas luminárias apresentaram emissões radiadas maiores do que em regime permanente durante os transitórios, porém a luminária T5 teve suas maiores emissões durante o desligamento e a luminária T8 o maior transitório ocorreu durante a partida.

O presente artigo explorará a técnica da FFT para realização das medidas de emissões radiadas durante o transitório, bem como procurará apontar uma possível causa para o comportamento distinto dos conversores ensaiados.

II. MEDIDA DE EMISSÕES RADIADAS NOS REATORES ELETRÔNICOS

A norma CISPR15 [6] trata sobre as emissões radiadas e conduzidas de dispositivos de iluminação. Essa norma coloca como um dos requisitos para uma luminária ser aprovada que ela tenha suas emissões eletromagnéticas radiadas controladas na faixa de 30 MHz - 300 MHz. Além das emissões radiadas nessa faixa poderem causar interferências em equipamentos elétricos susceptíveis, essa faixa de frequências compreende as transmissões de rádio FM, rádios VHF aeronáuticos e rádios operados por agentes de segurança pública. Dessa forma uma emissão acima dos limites da norma nessa faixa, também pode gerar perturbações nessas transmissões.

A norma CISPR16-2-3 [7] traz detalhes de como deve ser realizado o teste de emissões radiadas e detalha os equipamentos e o ambiente do teste. A medida de emissões radiadas é realizada em um campo aberto ou em uma sala blindada com absorvedores de RF (câmara anecóica). A câmara anecóica permite um maior controle do ensaio do que um teste em campo aberto [2]. Dentre as várias recomendações da norma para o teste, a que mais afeta o estudo que se pretende desenvolver é o requisito da

utilização de um analisador de campos ou de um analisador de espectros por varredura. Um analisador de campos essencialmente é um analisador de espectros com algumas implementações de filtros em hardware, tal como exigidos pela norma [1]. O analisador de espectros utiliza a estrutura de um receptor de rádio super-heteródino para ao final implementar três tipos de detectores distintos: detector de pico, detector de média e detector de quase-pico [2]. Após a passagem por estes detectores, o sinal é amostrado por um conversor analógico digital, processado e mostrado na tela. A varredura das frequências de interesse nesse tipo de equipamento é realizada através da mudança de frequência do oscilador local do aparelho, que em conjunto com o mixer altera a faixa de frequência lida pelo aparelho [2]. Para se obter o sinal de interesse em uma amplitude correta, cada vez que o passo de frequência é incrementado, deve-se aguardar um tempo mínimo para que os detectores possam atuar adequadamente e fornecer o nível do sinal, assim o tempo de varredura muda conforme o detector a ser utilizado [1]. Um dos grandes problemas dessa técnica é a demora em efetuar a varredura de toda a faixa de frequência determinada que pode levar de alguns minutos a algumas horas [3].

A varredura com o detector de pico é a que confere maior velocidade ao analisador de espectros [7], porém maior nível de ruído também. Nesse detector os picos dos sinais de entrada são contabilizados, assim esse detector sempre irá fornecer os maiores valores em detrimento aos outros dois [2]. Uma varredura na faixa de 30 MHz - 1 GHz dura em média 30 minutos, utilizando tempo de medida mínimo em cada frequência de 20 ms e largura de banda do filtro IF de 120 kHz. Já o detector de quase-pico é similar ao detector de pico, porém leva em consideração a taxa de repetição de um mesmo pico durante o tempo de cada medida, apresentando desta forma valores menores para um sinal com uma baixa taxa de repetição e valores maiores para um sinal com alta taxa de repetição [2]. A varredura na faixa de 30 MHz - 1 GHz nas mesmas condições de configuração anterior com este detector dura em média 1,5 hora. Já com o detector de média que adiciona um filtro passa baixa de 1 Hz após o detector de quase-pico [2], o tempo de varredura, para as mesmas condições anteriores é igual ao do detector de quase-pico. Os tempos de varredura também podem variar conforme o modelo e marca de cada equipamento, os valores acima apresentados foram levantados com o receptor de campos Rhode&Schwarz ESVS30.

A norma CISPR15 [6] também prega algumas recomendações para que as lâmpadas fluorescentes sejam ensaiadas. Entre as recomendações principais estão: tempo de uso mínimo da lâmpada de 100 h anteriores ao teste e tempo de estabilização da lâmpada de 15 min após a alimentação da lâmpada e anteriormente ao início do teste. Além disso o posicionamento da luminária na mesa deve estar conforme o anexo B da norma, sendo que no caso das luminárias utilizadas nesse artigo as lâmpadas devem estar iluminando o teto da câmara anecóica.

A Norma CISPR15 foi atualizada em 2018, porém o Brasil ainda não adotou essa nova versão até a data de submissão deste artigo. Entre as modificações pertinentes nessa nova versão estão: O tempo de estabilização da lâmpada fluorescente que passou a ser de 30 min e a faixa de

frequências que as emissões são controladas, que passou a ser de 30 MHz – 1GHz. Ressalta-se que essas modificações não impactam diretamente nos resultados que serão demonstrados nas próximas seções.

Conforme as recomendações expostas acima pelas normas CISPR 15 e 16 e utilizando um analisador de espectros, a medida das emissões radiadas durante os transitórios de partida e desligamento de uma luminária não podem ser medidos com as técnicas convencionais descritas nesses procedimentos, pois o tempo necessário para efetuar uma única varredura do sinal supera e muito o tempo de partida ou desligamento de um conversor chaveado. A norma CISPR 16 [7] já faz menção ao uso de técnicas de FFT para acelerar as medidas.

Apesar da norma referente à iluminação (CISPR15) não determinar medidas de emissões eletromagnéticas durante transitórios de partida ou desligamento, sabe-se que nesses momentos podem ocorrer emissões importantes que podem causar interferências em dispositivos eletrônicos e comunicações de rádio. Conforme [2], o fato de um produto ser aprovado por uma norma de emissão eletromagnética não garante que esse produto não irá causar interferências no ambiente, uma vez que a norma apesar de tentar contemplar as mais diversas situações, não consegue abranger todas as possibilidades que podem existir. Além disso, a faixa de frequências normatizada é finita, não impedindo que um determinado dispositivo seja aprovado pela norma, mas tenha emissões importantes em uma faixa superior a normatizada [2].

III. TÉCNICA DA FFT APLICADA À EMC

A transformada rápida de Fourier (FFT) é uma ferramenta matemática amplamente aplicada ao processamento de sinais discretizados no tempo, publicada originalmente por James Cooley e John Tukey, em 1965 [4]. Trata-se de uma variante da transformada discreta de Fourier (DFT), que possibilita simplificações significativas nos algoritmos matemáticos utilizados, quando o número de amostras discretizadas no tempo é uma potência de dois. A FFT é amplamente utilizada atualmente no processamento digital de sinais, estando presente em diversos instrumentos de medida, particularmente nos osciloscópios digitais, analisadores de espectro e analisadores de rede vetoriais, bem como constituindo uma importante ferramenta para análise de harmônicos na rede elétrica.

A sua utilização na análise de sinais na área de Interferência eletromagnética (EMI) ainda é restrita, no entanto vários estudos têm apontado para diversas vantagens do uso da FFT sobre equipamentos tradicionais de varredura (analisadores de espectro), particularmente no que diz respeito ao tempo necessário à análise de uma ampla faixa espectral [8]. No passado, a capacidade limitada dos processadores e memória embarcada nos equipamentos de medida, levava a restrições do uso da FFT para análise de sinais no domínio da frequência a partir de amostras temporais. Estas limitações já não existem nos equipamentos de medida atuais, possibilitando a implementação em tempo real de algoritmos complexos como a FFT. Associado a este fato, a grande evolução dos conversores analógico-digital,

tanto em termos de resolução como em taxa de amostragem, tem possibilitado a discretização direta de sinais de alta frequência (GHz), sem a necessidade de misturadores ou conversores de frequência [9].

A utilização da FFT na caracterização de sinais de EMI exige uma análise criteriosa da amplitude dos sinais envolvidos, pois os valores ditados pelas normas relacionam claramente os limites máximos permitidos para cada faixa de frequência. Aspectos como vazamento espectral, janelamento, ganho de processo, dentre outros, devem ser criteriosamente levados em conta para que se possa obter medições precisas da amplitude dos sinais após a aplicação da FFT [1][2].

O janelamento do sinal no domínio do tempo, antes da aplicação do algoritmo da FFT, traz benefícios nos aspectos denominados vazamento espectral (*spectral leakage*) e perda de recorte (*scalloping loss*)[10][11]. No entanto o janelamento causa perdas na amplitude do sinal resultante, sendo necessárias correções após o processamento. A Tabela I mostra algumas das funções de janelamento mais utilizadas e suas respectivas alterações na amplitude do sinal resultante.

TABELA I
Janelas Utilizadas na FFT e Perdas de Amplitude no Sinal Resultante

Tipo de Janela	Perdas (dB)
Retangular	0 dB
Hanning	-6 dB
Blackmann	-7,5 dB
Flat-top	-13,3 dB

Em aplicações de análise de sinais de EMI, a janela “Flat-top” mostra-se bem adaptada, pois proporciona raias espectrais mais largas, garantindo a captura de sinais de banda estreita, assim como sinais de banda larga. Neste caso, a correção de amplitude é feita somando-se +13,3 dB em todo o espectro de frequências, após o processamento. Numa escala linear em termos de tensão, isto equivale a uma multiplicação por um fator 4,62.

As amplitudes resultantes do processamento da FFT correspondem ao valor de pico do sinal no domínio do tempo. As normas de compatibilidade eletromagnética (EMC) do comitê CISPR se baseiam no valor RMS de tensão ou corrente, ou na potência do sinal (tipicamente dBuV, dBuA ou dBm). Assim faz-se necessário uma correção adicional na amplitude, que neste caso é obtida pela simples divisão por $\sqrt{2}$, tendo em vista que se trata de sinais senoidais.

O parâmetro denominado ganho de processo da FFT (*process gain*) [11] está relacionado ao número de pontos utilizados no processamento e tem implicação direta no nível de ruído residual e consequentemente na relação sinal-ruído da medida (SNR). Quanto maior o número de pontos utilizados na aquisição do sinal no domínio do tempo, menor o nível de ruído residual após a FFT, pois a banda passante equivalente de cada raia espectral (*bin*) é reduzida proporcionalmente. A largura espectral (Δf) de cada raia é dada por (1).

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (1)$$

Onde f_s é a frequência de amostragem e N é o número de pontos total da aquisição. Assim, quanto menor o Δf , menor a densidade espectral de ruído presente em cada raia, aumentando a SNR da medida. O ganho de processo (PG) é dado por (2).

$$PG = \sqrt{\frac{N}{2}} \text{ ou } PG[\text{dB}] = 10 \log\left(\frac{N}{2}\right) \quad (2)$$

O ganho de processo torna-se uma característica particularmente interessante para contornar a limitação da resolução em amplitude de conversores AD de alta taxa de amostragem (GS/s), que em geral possuem apenas 8 bits de resolução nativa. Esta baixa resolução resulta em altos níveis de ruído de quantização (Eq), distribuído uniformemente ao longo de todo o espectro de frequências, até a condição de Nyquist ou $\frac{f_s}{2}$.

A Figura 1 mostra o resultado de uma simulação do efeito do PG no ruído residual de um sinal quantizado com 8 bits de resolução (256 níveis), com $N=1000$ pontos e $N=40000$ pontos. Nesta simulação também foi incluído um sinal senoidal (frequência 100 MHz, amplitude 120 dB μ V) e efetuado o janelamento Flat Top no domínio do tempo. Percebe-se que o nível de ruído residual na condição $N=400000$ é 100 vezes menor que na condição $N=1000$, comprovando o ganho de processo quando é utilizado um maior número de pontos. Assim, torna-se possível a utilização de um sistema de aquisição com resolução de 8 bits (osciloscópio digital típico) para análise de sinais de EMI, desde que se disponha de uma profundidade de memória suficiente para se chegar a níveis de ruídos intrínsecos abaixo dos valores especificados pela norma CISPR16-4-2 [5] que é de no mínimo 23 dB μ V. As desvantagens de se utilizar um número de amostras elevados residem na necessidade de alta capacidade de memória do sistema de aquisição, além do tempo superior de processamento da FFT.

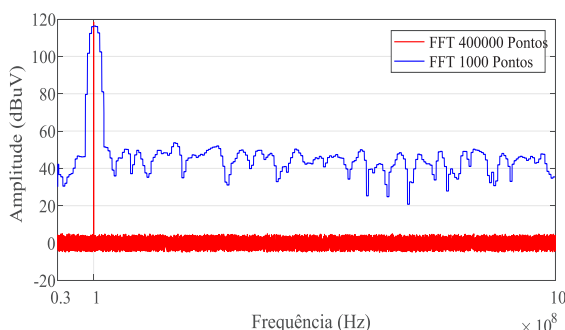


Fig. 1. Simulação do Ganho de processo aplicado a FFT

Considerando a faixa de frequências de 30 MHz a 1 GHz e 400000 pontos de aquisição, obtém-se uma resolução espectral de 5 kHz, valor bem inferior ao ditado pela norma, tipicamente 120 kHz. Assim, foi efetuado um processamento adicional aplicando-se uma média móvel de 25 pontos adjacentes e em seguida uma interpolação, de modo a obter-se uma resolução final de 120 kHz. Para melhorar ainda mais a SNR do espectro resultante, podem ser efetuadas aquisições subsequentes nas mesmas condições de operação

do equipamento, sendo em seguida aplicadas médias das FFTs resultantes destas aquisições.

Para efeito de validação das correções efetuadas na FFT, efetuou-se uma análise espectral de uma onda retangular em regime permanente, com frequência fundamental de 20 MHz, aplicada a uma antena monopolo no interior de uma câmara anecóica. A escolha de uma onda retangular para esta calibração, reside no fato da mesma possuir harmônicas pares e ímpares numa grande banda espectral, cobrindo toda a faixa de frequências estipulada pelas normas [2]. Como equipamento de referência para esta validação, foi utilizado um analisador de campos Rhode&Schwarz ESVS30 com filtro de IF de 120 kHz, conversor AD de 14 bits, detector de quase-pico e tempo de medida de 20 ms. Os dados no domínio do tempo foram adquiridos por um osciloscópio digital Lecroy LT584 com uma banda passante de 1 GHz, taxa de amostragem de 2 GS/s, conversor AD de 8 bits, tempo total de aquisição de 200 μ s (total de 400000 amostras). O processamento da FFT e demais correções e foram efetuados com o auxílio do software MatLab, na ordem em que foram descritas anteriormente. O MatLab implementa uma compensação para possibilitar o uso da FFT com um número de pontos (N) não múltiplo 2^N . Essa compensação consiste em adicionar pontos no domínio do tempo com valores 0 até que seja atingido um múltiplo de 2^N . Posteriormente o algoritmo do MatLab exclui esses pontos já no domínio da frequência.

A Figura 2 mostra um gráfico comparativo das medidas efetuadas com o analisador de campos e com o osciloscópio seguido do processamento da FFT. Pode-se constatar que as frequências e amplitudes medidas pelas duas técnicas são equivalentes. Para analisar com mais exatidão as diferenças na medida de amplitude pelas duas técnicas, são apresentados na Tabela II o valor das amplitudes para diversas harmônicas do sinal. Os dados foram convertidos para unidades de campo elétrico (dB μ V/m), a partir das características da antena utilizada. Observa-se que o erro máximo é de 3,44 dB μ V/m (frequência de 105 MHz) e o erro médio é de 0,67 dB μ V/m. Estes valores de erro estão dentro dos limites aceitáveis para a maioria dos equipamentos de medidas (tipicamente 3 dB). Observa-se também que o nível de ruído de ambas as técnicas ficou em torno de 10 dB μ V, valor também dentro dos limites da norma.

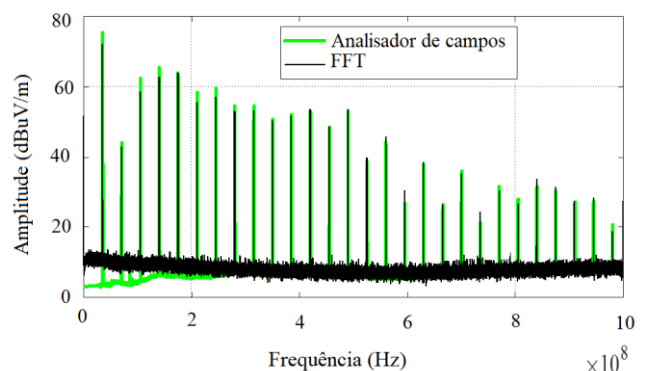


Fig. 2. Comparação entre o desempenho de medida da técnica desenvolvida com a FFT e do analisador de campos

TABELA II
Erros Entre o Analisador de Campos e a FFT

Frequência (MHz)	Valor Analisador de Campos (dBuV/m)	Valor FFT (dBuV/m)	Erro (dBuV/m)
35	75,48	72,27	3,21
105	62,39	58,63	3,44
175	63,92	63,95	-0,03
245	59,54	57,11	2,43
315	54,53	53,37	1,16
385	52,21	51,66	0,55
455	48,54	48,79	-0,25
490	53,18	53,76	-0,58
560	44,37	45,79	-1,42
630	38,12	38,5	-0,38
700	36,05	35,42	0,63
770	31,79	30,25	1,54
840	31,97	33,74	-1,77
910	26,97	27,4	-0,43
980	20,62	18,7	1,92
Erro médio			0,67

IV. PROCEDIMENTO DE TESTES DOS CONVERSORES CHAVEADOS EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO

As medidas em regime permanente foram realizadas seguindo as recomendações das normas CISPR15 e 16, já especificadas na seção II. Foi utilizado um analisador de campos Rhode&Schwarz ESVS30 com tempo de medida de 20 ms e largura de banda do IF de 120 kHz. A faixa de frequência medida foi de 30 MHz – 1 GHz. A escolha estendida da faixa de frequências foi proposital, para permitir comparações futuras com os dados adquiridos durante os transitórios. Foi utilizada uma câmara anecóica blindada e com absorvedores para até 18 GHz fabricada pela Albatross. A distância de medida entre o equipamento emissor e a antena receptora desta câmara é de 3 m. Como a norma especifica valores para medidas em câmaras maiores (10 m) é somado um valor de 10 dB no limite da norma para compensar a distância menor de medida, o que irá causar maiores valores de campos recebidos [2]. A antena receptora é de banda larga com faixa de frequência de 20 MHz - 2,5 GHz. Foram realizadas medidas nas polarizações vertical e horizontal, porém para simplificar as análises da próxima seção somente os dados com maiores valores de emissão serão mostrados, neste caso com polarização horizontal. As Figuras 3 e 4 mostram uma fotografia da luminária dentro da câmara anecóica para realização do teste.



Fig. 3. Luminária posicionada para o ensaio



Fig. 4. Visão da luminária e da antena utilizada nos ensaios

As medidas realizadas durante os transitórios foram obtidas com um osciloscópio Lecroy LT584 com uma banda passante de 1 GHz e taxa de amostragem máxima de 4 GS/s. A taxa de amostragem utilizada nos ensaios foi de 2GS/s para permitir que fossem capturados 400000 pontos. A FFT foi realizada pelo computador no software MatLab para que fosse possível implementar as correções discutidas na seção III. Com esta taxa de amostragem e quantidade de pontos, foi utilizada a escala horizontal de 20 μ s/div, contemplando uma janela temporal total de 200 μ s por cada captura. Estas condições possibilitam uma resolução espectral de 5 kHz e uma frequência máxima de análise de 1 GHz (critério de Nyquist). O *trigger* do osciloscópio foi obtido através do próprio sinal de entrada, quando um nível de ruído significativo era notado. Para realizar as medidas durante os transitórios, observou-se o sinal no domínio do tempo, escolhendo a faixa mais conveniente para a aquisição dos dados pelo computador, de forma a permitir que o momento exato do início das emissões após a energização fosse capturado. O mesmo foi feito para o desligamento. Isso foi necessário pois há um certo atraso, principalmente durante a energização da luminária, entre a disponibilização da tensão em seus terminais e o início do chaveamento do reator eletrônico. O dispositivo de comutação utilizado foi um interruptor para luminárias comumente usado em residências, porém esse estava localizado fora da câmara anecóica, de maneira que a fiação gerada durante a comutação não fosse captada pela antena.

V. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EMISSÕES RADIADAS EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO DOS CONVERSORES CHAVEADOS

O primeiro conversor chaveado ensaiado foi o reator eletrônico que acompanha a luminária para lâmpadas T8. Esse reator aciona duas lâmpadas fluorescente T8 de 20 W, porém ele não conta com nenhum dispositivo de correção de fator de potência. A Figura 5 traz as emissões radiadas durante a partida da luminária T8 (conjunto lâmpadas + reator), a Figura 6 as emissões em regime permanente e a Figura 7 as emissões durante o desligamento da luminária.

Com base na Figura 6, verifica-se que o teste preconizado pela norma CISPR15, executado em regime permanente, a luminária tem suas emissões dentro dos limites da norma. Durante o transitório de partida da lâmpada, Figura 5,

existem emissões nas faixas de 30 MHz e 130 MHz que estão acima do limite da norma. Já na condição do transitório de desligamento, Figura 7, da luminária não há emissões significativas, que ultrapassem o limite da norma. Ressalta-se que os limites impostos pela norma CISPR15 são especificados para medidas em regime permanente e que na análise de transitórios, esses limites são utilizados apenas como referência para comparação.

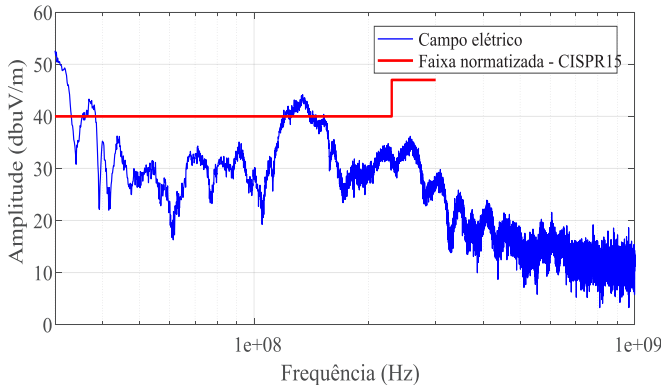


Fig. 5. Emissões radiadas Luminária T8 – Transitório de Partida

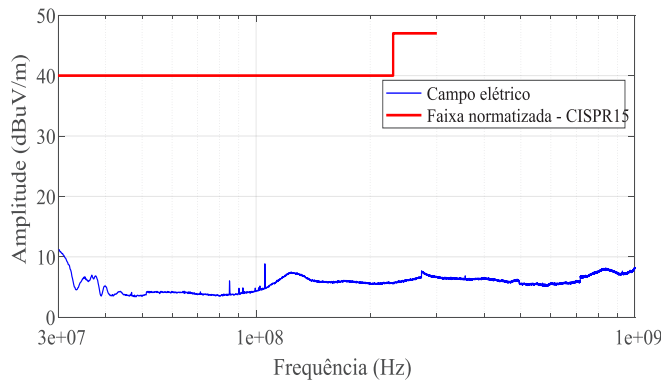


Fig. 6. Emissões radiadas Luminária T8 - Regime permanente

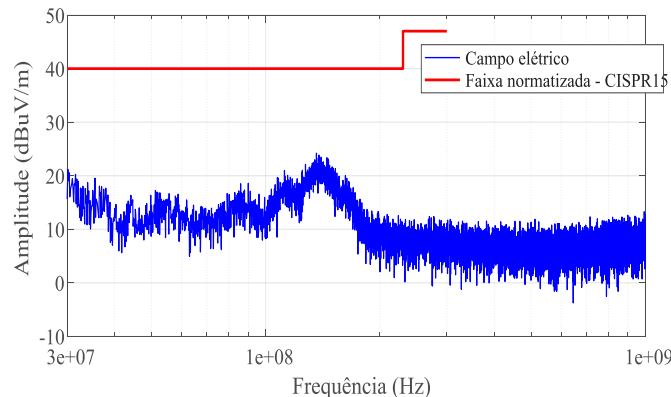


Fig. 7. Emissões radiadas Luminária T8 – Transitório de desligamento

A topologia desse reator é apresentada na Figura 8. Ele é constituído por um filtro ressonante LCC em sua saída, para promover a partida e estabilizar a lâmpada em operação. Esse circuito, antes da partida da lâmpada, possui um baixo fator de qualidade devido à resistência da lâmpada ser praticamente infinita. Projetando-se o filtro para, na partida, operar em uma frequência próxima à ressonante, conseguem-

se elevadas tensões sobre a lâmpada, o que promove o rompimento do dielétrico. Dessa forma as emissões elevadas durante a partida dessa luminária podem ser associadas com a sobretensão momentânea necessária a partida dessa lâmpada. Após a ignição da lâmpada, sua resistência reduz radicalmente, ficando com valores significativamente inferiores à reatância capacitiva (Cr_2) em paralelo com a mesma, passando o circuito a ter um comportamento próximo ao filtro LC operando fora da sua frequência ressonante.

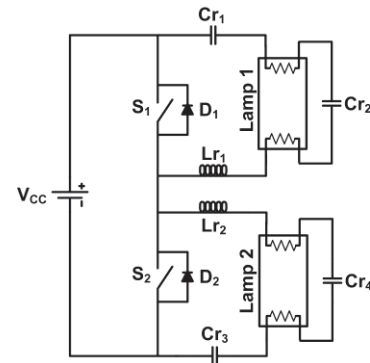


Fig. 8. Reator eletrônico ressonante - Lâmpadas T8

O segundo conversor ensaiado foi o reator eletrônico que acompanha uma luminária T5 para duas lâmpadas T5 de 28 W cada uma. Esse reator possui correção de fator de potência através de uma topologia denominada *charge-pump*. A Figura 9 traz as emissões radiadas durante o transitório de partida da luminária T5 (conjunto lâmpadas + reator), a Figura 10 as emissões em regime permanente e a Figura 11 as emissões durante o desligamento da luminária.

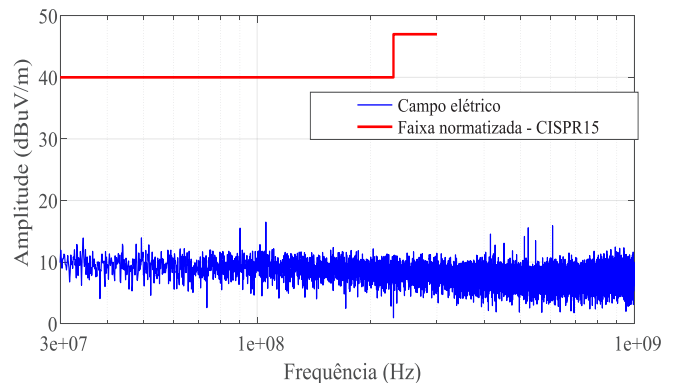


Fig. 9. Emissões radiadas Luminária T5 – Transitório de Partida

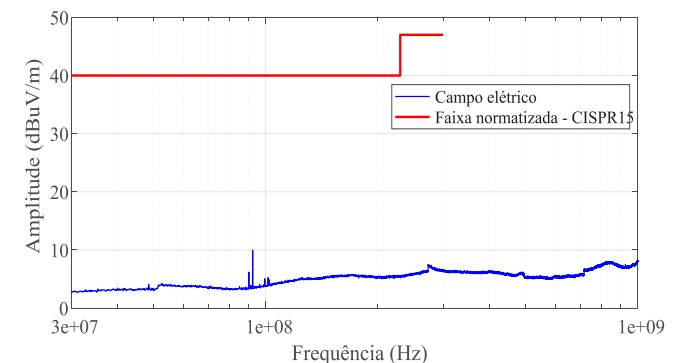


Fig. 10. Emissões radiadas Luminária T5 - Regime permanente

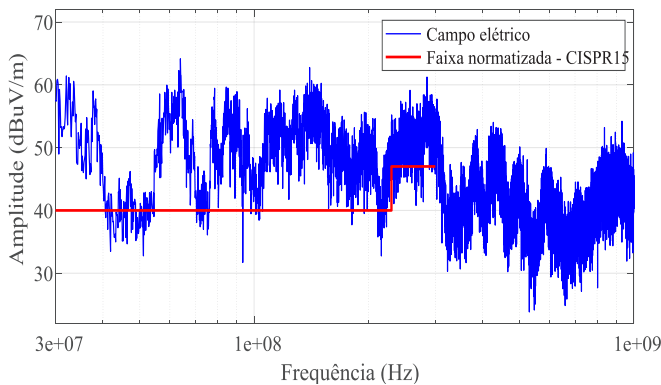
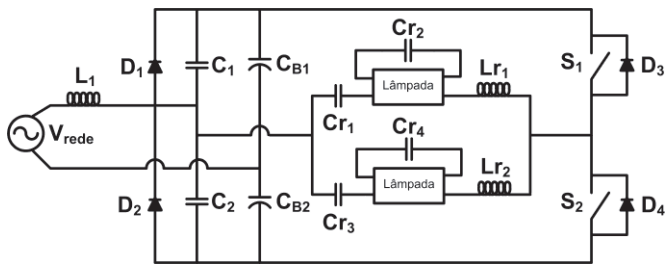


Fig. 11. Emissões radiadas Luminária T5 Desligamento

O teste da luminária T5 em regime permanente, Figura 10, aponta que as emissões radiadas estão dentro da norma CISPR15, inclusive os dados de transitório de partida, Figura 9, também estão completamente dentro dos limites dessa norma. Já as emissões radiadas durante o transitório de desligamento da luminária, Figura 11, apresentaram valores bastante elevados, superando o limite da norma, em toda a faixa de frequência normalizada e inclusive indo além dessa. Observa-se que existem emissões significativas em toda a faixa de frequências.

Os reatores eletrônicos que utilizam topologias *charge-pump* têm como princípio de funcionamento a integração do circuito ressonante de saída com circuito de entrada. O objetivo desses conversores é absorver energia da rede elétrica durante um período maior que os retificadores com filtro capacitivo convencionais aumentando o fator de potência, reduzindo a distorção harmônica de corrente e reduzindo a ondulação na tensão de barramento de corrente contínua (CC) [12][13]. Entretanto, para isso muitas topologias requerem um indutor na entrada do equipamento.

Na Figura 12 pode-se observar que o desligamento do reator é realizado pela interrupção da alimentação, provocando o seccionamento do indutor de entrada (L_1) que em muitos casos está com carga. Dessa forma, uma elevada tensão é produzida em todo o ramal de alimentação do reator até o interruptor, formando uma grande antena que radia ondas eletromagnéticas. Devido as dimensões desse ramal de alimentação, essas emissões poderiam causar interferências em outros sistemas eletrônicos, elétricos ou de comunicação que estiverem no mesmo ambiente dessa luminária.

Fig. 12. Reator eletrônico com topologia *charge-pump* – Lâmpadas T5

Através do uso da FFT foi possível realizar os ensaios de emissões radiadas em regime transitório das luminárias em questão. As atuais normas de emissão eletromagnética, como a CISPR15, não exigem testes de emissões neste regime, não contemplando procedimentos e limites para este tipo de teste. No entanto, ficou demonstrado que durante o transitório de partida ou de desligamento de um reator de uma luminária para lâmpadas fluorescentes, podem ocorrer emissões eletromagnéticas que superam o limite de regime permanente das atuais normas. Assim, foi demonstrado que as maiores emissões ocorrem nos momentos de comutação das luminárias, o que poderia justificar possíveis problemas de interferência em dispositivos eletroeletrônicos ou afetar comunicações sem fio nestes instantes. Isso aponta para a necessidade de futuros estudos que possam discutir limites aceitáveis para emissões radiadas durante esses transitórios, uma vez que as duas luminárias ensaiadas passam nos testes em regime permanente exigidos pela norma CISPR15. Trabalhos como apresentado por [14], que buscam reduzir as emissões eletromagnéticas em reatores eletrônicos, geralmente não analisam esses conversores durante o transitório, porém como demonstrado nesse trabalho essas emissões são de importante monta.

A questão do reator da lâmpada T5 com topologia *charge-pump* apresentar elevadas emissões eletromagnéticas radiadas durante o desligamento é um dado importante. Isso pode apontar que topologias onde um indutor está colocado em série com a entrada de energia de um conversor chaveado pode apresentar o mesmo comportamento. Existem diversos conversores na eletrônica de potência que funcionam baseados nessas topologias, entre eles: O retificador e o filtro ativo, ambos com o indutor em série com a rede atuando como filtro [15][16]; O inversor de tensão com filtro LCL [17] e o driver para LEDs com filtro LC [18].

As técnicas de medidas tradicionais, utilizando um receptor de campos ou um analisador de espectro, não são rápidas o suficiente para detectar essas emissões durante os referidos transitórios. Dessa forma mostrou-se que a aplicação da técnica da FFT com algumas correções, possibilitou a realização das medidas. Além disso, o ganho de processo na FFT permitiu que um osciloscópio de 8 bits possa oferecer um nível de ruído baixo o suficiente para estar em conformidade com as exigências das normas de realização dos ensaios e possibilitar a medida. Esse resultado é corroborado pelo erro médio de 0,67 dBµV/m entre a medida com o analisador de campos e o osciloscópio durante a etapa de validação da técnica desenvolvida. Essa nova metodologia de medida de transitórios pode ser aplicada a outros tipos de conversores chaveados, aumentando o leque de análises possíveis de serem realizadas.

O uso da FFT nos equipamentos de medida de emissões eletromagnéticas já é uma realidade [3]. No entanto ainda se faz necessários maiores estudos do uso da FFT para medidas de emissões, a fim de aprimorar a técnica e verificar suas limitações e vantagens. Deve-se procurar contemplar cenários utilizados nos equipamentos tradicionais, como por exemplo a implementação de outros tipos de detectores de sinal (pico, quase-pico e média), bem como o tratamento de

problemas causados pela sub-amostragem (*aliasing*) dos sinais de ruído.

REFERÊNCIAS

- [1] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*, John Wiley & Sons, New Jersey, 3ed, 2009.
- [2] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Wiley-Interscience, New Jersey, 2ed, 2006.
- [3] J. Medler, M. Keller. "Use of FFT-based measuring instruments for EMI compliance measurements." *ESA Workshop on Aerospace EMC IEEE*, 2016
- [4] J. W. Cooley, J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series". *Math. Comput.* 19: 297–301, 1965.
- [5] I.E.C., *CISPR 16-4-2: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling — Measurement instrumentation uncertainty*. Geneva, 2011.
- [6] I.E.C., *CISPR 15: Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment*. Geneva, 2014.
- [7] I.E.C., *CISPR 16-2-3: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity — Radiated disturbance measurements*. Geneva, 2014.
- [8] G. W. Chang, C. Y. Chen, M. C. Wu, "Measuring harmonics by an improved FFT-based algorithm with considering frequency variations", in *IEEE International Symposium Circuits and Systems*, p. 4, 2016.
- [9] S. D. Kent III, L. F. Linder, K. V. Cai, "Mixed technology MEMS/SiGe BiCMOS digitalized analog front end with direct RF sampling". *U.S. Patent n. 7,187,735*, 6mar 2007.
- [10] F. J. Harris, "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform", in *Proceedings of the IEEE*, v. 66, n. 1, p. 51-83, 1978.
- [11] S. Scholl, "Exact Signal Measurements using FFT Analysis", in *Microelectronic Systems Design Research Group*, TU Kaiserslautern, Germany, 2016.
- [12] C.-H. Chang, C.-A. Cheng, E.-C. Chang, H.-L. Cheng, B.-E. Yang, "An Integrated high-power-factor converter with ZVS transition", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 3, pp.2362-2371, March 2016.
- [13] Z. P. da Fonseca, A. J. Perin, E. Agostini Jr, C. B. Nascimento, "Single-stage high power factor converters requiring low DC-link capacitance to drive power LEDs", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 5, pp. 3557-3567, May 2017.
- [14] S. Johnson, R. Zane, "Custom spectral shaping for EMI reduction in high-frequency inverters and ballasts", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, n. 6, Nov. 2005.
- [15] F. L. Lirio, M. do C. B. P. Rodrigues, H. A. C. Braga, "Análise e modelagem do filtro ativo de potência PWM monofásico", in *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 6, no. 1, Dec 2001.
- [16] A. V. Costa, D. B. Rodrigues, G. B. de Lima, L. C. de Freitas, E. A. A. Coelho, V. J. Farias, L. C. G. de Freitas, "Retificador híbrido trifásico de alta potência com reduzida DHTi utilizando conversor boost para promover suportabilidade a fundamentos de tensão", in *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 17, no. 3, Ago 2012.
- [17] L. P. Sampaio, M. A. G. de Brito, G. de A. Melo, C. A. Canesin, "Inversor monofásico para geração distribuída conectada à rede elétrica, com injeção de potência ativa e capacidade de compensação reativa", in *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 19, no. 1, Feb 2014.
- [18] C. H. Barriquello, G. W. Denardin, R. A. Pinto, P. E. Bolzan, A. Campos, R. N. do Prado, "A LED street lighting system supplied by mains or battery with an integrated control and monitoring network", in *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 18, no. 2, May 2013.

DADOS BIOGRÁFICOS

Bruno Pohlot Ricobom, Professor Assistente 1 da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Doutorando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná – UFPR. Mestre em Engenharia Elétrica na área de compatibilidade eletromagnética pela UFPR (2015), e graduado em Engenharia Elétrica pela UFPR (2012). Sua principal área de pesquisa é em compatibilidade eletromagnética

João Américo Vilela Jr, Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2007), mestre e graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2003/2000). É professor da Universidade Federal do Paraná desde 2011 e coordenador do Grupo de Pesquisa de Eletrônica de Potência e Eletromagnetismo (GEPEL) na UFPR. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência e Máquinas Elétricas.

Marlio José do Couto Bonfim, Professor Associado 4 da Universidade Federal do Paraná - UFPR. Possui doutorado em Physique de la Matière et du Rayonnement - Université Joseph Fourier - Grenoble I (2000), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1992) e graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (1989). Tem experiência na área de Instrumentação eletrônica, Medidas elétricas e magnéticas, microeletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: Instrumentação Científica, Medidas em altas frequências, geração de campos magnéticos pulsados, Compatibilidade Eletromagnética.