



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA PRODUZIDA POR LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS

Paulo Ixtânio L. Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação dos cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Microondas e Eletromagnetismo Aplicados

Orientador:
Glauco Fontgalland

Campina Grande – Paraíba – Brasil
Paulo Ixtânio L. Ferreira, março de 2010.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F383e

Ferreira, Paulo Ixtânio L.

Estudo da interferência eletromagnética produzida por lâmpadas fluorescentes compactas /Paulo Ixtânio L. Ferreira. — Campina Grande, 2010.

138 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Orientador: Prof. Dr. Glauco Fontgalland.

Referências.

1. Interferência Eletromagnética. 2. Espectro de Frequência. 3. Filtro. 4. CEM – Compatibilidade Eletromagnética. 5. LFC – Lâmpada Fluorescente Compacta. I. Título.

CDU 621.3.013(043)

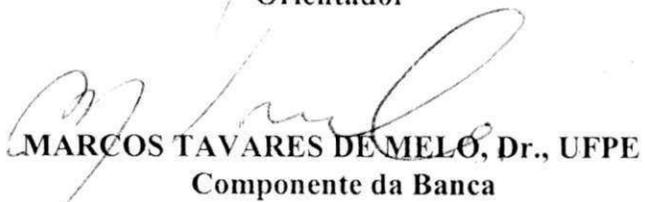


**ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA PRODUZIDA POR
LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS**

PAULO IXTÂNIO LEITE FERREIRA

Dissertação Aprovada em 30.03.2010


GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Orientador


MARCOS TAVARES DE MELO, Dr., UFPE
Componente da Banca


BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG
Componente da Banca


EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA, Dr.Ing., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
MARÇO - 2010

Dedico este trabalho aos meus pais,
Damião Leite e Marilene L. Ferreira
e as minhas Irmãs,
Ivomária Leite,
Ivanise L. Ferreira,
Ivanilda L. Ferreira.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade da realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Glauco Fontgalland pelas orientações e confiança depositada.

Agradeço a Galba Falcão Aragão (Engenheiro do LEMA) pelas valiosas informações e orientação nos experimentos.

Agradeço aos meus amigos: Raimundo, Adaildo Jr., Edvaldo, Max Neri, A. Ricardo, Alex Sierres, F. Osman, Alan e Aldeni Sudário pela ajuda para a elaboração deste trabalho e pelos momentos de descontração.

Agradeço a Universidade Federal de Campina Grande e a COPELE pela confiança depositada e por ter me concedido a oportunidade de cursar a pós-graduação.

Agradeço a CAPES pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Resumo

Este trabalho constitui-se no Estudo da Interferência Eletromagnética Produzida por Lâmpadas Fluorescentes Compactas (LFCs). Foi estudado o comportamento do espectro eletromagnético conduzido emitido pelas LFCs com reator integrado. Estes dispositivos são uma das fontes de luz mais populares e estão presentes nos mais variados ambientes, desde residências a clínicas médicas. No Brasil, seu uso massificado e a falta de regulamentação específica no que se refere à compatibilidade e interferência eletromagnética (IEM) têm motivado esse trabalho. Destaca-se a incompatibilidade das LFCs testadas com a norma internacional e o projeto do filtro para IEM como elemento mitigador do ruído de rádiofrequência produzido por elas.

Dois modelos para o circuito interno da lâmpada foram analisados por meio de simulações computacionais. Algumas restrições são apontadas no modelo sugerido na bibliografia. É proposto um novo modelo de circuito para a LFC para contemplar os efeitos de alta frequência presentes no circuito real da lâmpada. Discute-se a influência das LFCs na geração de harmônicos e na qualidade de energia elétrica.

Os testes foram feitos seguindo as recomendações da norma internacional CISPR 15, que cobre a faixa de 9 kHz a 30 MHz, em algumas marcas de lâmpadas presentes no mercado da região nordeste, em particular no estado da Paraíba, Brasil. As marcas variam desde as menos populares as conhecidas mundialmente.

Os casos analisados levam em conta o número de lâmpadas (uma, duas, três e cinco), a distância de separação entre elas e suas potências. A análise foi realizada sobre cada par de lâmpadas de mesma marca. Foi testado quatorze marcas. Os resultados dos espectros das lâmpadas com e sem o filtro de IEM foram apresentados e concluiu-se que o filtro funciona satisfatoriamente no bloqueio da IEM produzida por LFCs para a maioria das marcas testadas que descumprem a norma CISPR 15.

Palavras-chaves: CEM. Espectro de frequência. Filtro. IEM conduzida. LFCs.

Abstract

This work constitutes with the Study of Electromagnetic Interference Produced by Compact Fluorescent Lamps (CFL's). We studied the behavior of the electromagnetic spectrum emitted by CFL's with integrated ballast. These devices are one of the most popular light sources and are present in various environments, from homes to medical clinics. In Brazil, its massive use and lack of specific regulations with regard to electromagnetic compatibility and interference (EMI) have motivated this work. Highlight the incompatibility of the CFL's tested with the international standard and the design of EMI filter as a mitigating of radio frequency noise produced by them

Two models for the internal circuitry of the lamp were analyzed by computation simulations. Some restrictions are outlined in the model suggested in the literature. It is proposed a new circuit model for the CFL including the effects of high frequency in the circuit of the real lamp. One discusses the influence of CFL's in the harmonics generation and energy quality.

The tests were done following the recommendations of the international standard CISPR 15, which covers the range from 9 kHz to 30 MHz in some brands of lamps on the market in the northeast region, particularly in the state of Paraíba, Brazil. The brands cover the less popular the unknown to international known brands.

The cases analyzed take into account the number of lamps (one, two, three and five), the distance of separation between them and their powers. The analysis was performed on each pair of lamps from the same brand. Was tested fourteen marks. The lamps spectrum results with and without the EMI filter have been presented, one conclude that the filter works satisfactorily in blocking the EMI produced by CFL's over majority brands tested that violate the CISPR 15.

Keywords: CFLs. EMC. EMI conducted. Filter. Frequency spectrum.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	18
1.2. OBJETIVOS	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 COMPATIBILIDADE E INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA (CEM/IEM)	21
2.1.1 Conceito	21
2.1.2 Interferência eletromagnética (IEM)	23
2.1.3 Correntes de modo diferencial e modo comum	29
2.2. LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS (LFCs)	32
2.2.1 Conceito	32
2.2.2 Princípio de obtenção da luz em LFCs	34
2.2.3 Funcionamento das LFCs	35
2.2.4 Circuito equivalente de uma LFC	37
2.2.5 Vantagens e desvantagens das LFCs.....	44
2.2.6 Eficiência energética, qualidade de energia e LFCs.....	47
3. METODOLOGIA DE ENSAIO	50
3.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	50
3.1.1 Rede de estabilização de impedância de linha – LISN.....	51
3.1.2 Filtros.....	53
3.2 NORMAS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA PARA LFCs	58
3.2.1 Norma – CISPR 15 (ou EN 55015).....	59
3.2.2 Situação brasileira	61
3.3 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO	62
4. RESULTADOS E ANÁLISES	71
4.1 MEDIÇÕES DO ESPECTRO CONDUZIDO PELAS LFCs.....	71
4.1.1 Resultados para a marca ARAM.....	73
4.1.2 Resultados para a marca ATRALUX	74

4.1.3 Resultados para a marca AVANT	75
4.1.4 Resultados para a marca EMPALUX.....	81
4.1.5 Resultados para a marca FLC.....	84
4.1.6 Resultados para a marca GREAT VALUE.....	85
4.1.7 Resultado para a marca GOLDEN	86
4.1.8 Resultados para a marca GE.....	87
4.1.9 Resultados para a marca IMPACT	90
4.1.10 Resultados para a marca NEOTRON	91
4.1.11 Resultados para a marca OSRAM	92
4.1.12 Resultados para a marca PHILIPS	95
4.1.13 Resultados para a marca SYLVANIA.....	98
4.1.14 Resultados para a marca SA ECONÔMICA	99
4.2 SOLUÇÃO PARA REDUZIR OS NÍVEIS DE IEM CONDUZIDA PELAS LFCs.....	100
4.2.1 Resultados para a marca ARAM com filtro de IEM.....	105
4.2.2 Resultados para a marca ATRALUX com filtro de IEM.....	106
4.2.3 Resultados para a marca AVANT com filtro de IEM.....	107
4.2.4 Resultados para a marca EMPALUX com filtro de IEM.....	108
4.2.5 Resultados para a marca FLC com filtro de IEM.....	109
4.2.6 Resultados para a marca GREAT VALUE com filtro de IEM.....	110
4.2.7 Resultado para marca GOLDEN com filtro de IEM.....	111
4.2.8 Resultados para a marca GE com filtro de IEM.....	111
4.2.9 Resultados para a marca IMPACT com filtro de IEM.....	112
4.2.10 Resultados para a marca NEOTRON com filtro de IEM	113
4.2.11 Resultados para a marca OSRAM com filtro de IEM.....	114
4.2.12 Resultados para a marca SYLVANIA com filtro de IEM.....	114
4.2.13 Resultados para a marca SA ECONÔMICA com filtro de IEM.....	115
5. CONCLUSÕES.....	117
REFERÊNCIAS.....	120
6. ANEXO A – Informações Técnicas sobre as LFCs.....	123

Lista de Figuras

Figura 1 – Ambiente eletromagnético.....	22
Figura 2 – Modelo e comportamento da impedância do resistor em função da frequência, respectivamente.....	27
Figura 3 – Modelo e comportamento da impedância do capacitor em função da frequência, respectivamente.....	28
Figura 4 – Modelo e comportamento da impedância do indutor em função da frequência, respectivamente.....	28
Figura 5 – Decomposição das correntes, numa linha de transmissão de dois fios, em componentes de modo comum \hat{I}_C e modo diferencial \hat{I}_D	29
Figura 6 – Ilustração do campo elétrico produzido pelas correntes: (a) de modo diferencial \hat{I}_D , e (b) de modo comum \hat{I}_C	30
Figura 7 – Modelando o efeito do <i>choke</i> de modo comum. (a) correntes nos dois fios; (b) componentes do modo diferencial; e (c) componentes do modo comum (PAUL, 1992).	31
Figura 8 – (a) elementos que compõem uma LFC; (b) ilustração do circuito interno de uma LFC (TEIXEIRA et al, 2005).	34
Figura 9 – Representação do circuito interno de uma LFC, adaptado de (MONTERO et al, 1995).	35
Figura 10 – Circuito equivalente de uma LFC.....	38
Figura 11 – Curvas do modelo equivalente de uma LFC: (a) tensão e corrente; (b) espectro harmônico.	39
Figura 12 – Espectro hamônico de corrente contendo a faixa de 40 kHz.	40
Figura 13 – Detalhe em torno de 40 kHz.	40
Figura 14 – Circuito equivalente proposto para LFC: (a) circuito; (b) curvas de tensão e corrente; (c) espectro harmônico de corrente.	42
Figura 15 – Espectro contendo a faixa de 40 kHz, para circuito da Fig.14.a.....	43
Figura 16 – Detalhe na faixa de 40 a 130 kHz.....	43
Figura 17 – Curvas de custo de uma LI e uma LFC ao longo da vida útil.	46
Figura 18 – Espectro de corrente do circuito de uma LFC (WEI et al, 2008).	49
Figura 19 – Ilustração do circuito do LISN.	51
Figura 20 – Contribuições das componentes de corrente de modo diferencial e modo comum na medição de emissão conduzida.	52
Figura 21 – Definição das perdas de inserção de um filtro: (a) tensão na carga sem o filtro; (b) tensão na carga com o filtro.	54
Figura 22 – Quatro filtros simples: (a) passa-baixas; (b) passa-altas; (c) passa-faixa; (d) rejeita-faixa... ..	54
Figura 23 – Topologias de filtros para bloqueio de correntes: (a) de modo diferencial; (b) de modo comum; (c) de modo diferencial e modo comum.	56
Figura 24 – Circuito equivalente do filtro e do LISN: (a) para corrente de modo comum; (b) para corrente de modo diferencial.	57

Figura 25 – Limites para IEM conduzida - norma CISPR 15 (EN 55015).....	60
Figura 26 – Montagem para medição da IEM conduzida - norma CISPR 15 (EN 55015).	63
Figura 27 – Representação da montagem para lâmpadas conectadas com fio de comprimento C.....	64
Figura 28 – Circuito equivalente da montagem vista na Fig. 27.	65
Figura 29 – Circuito equivalente para calcular a contribuição da fonte v_1	65
Figura 30 – Circuito equivalente para calcular a contribuição da fonte v_2	66
Figura 31 – Circuito equivalente para calcular a contribuição da fonte v_3	67
Figura 32 – Circuito equivalente para uma lâmpada conectada ao LINS com fio de 50 cm.	70
Figura 33 – Montagem para medição de três LFCs juntas.	70
Figura 34 – Relação entre vida útil e o preço das LFCs.....	73
Figura 35 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada ARAM 15 W.	74
Figura 36 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas ARAM 15 W.....	74
Figura 37 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada ATRALUW 18 W.....	75
Figura 38 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas ATRALUW 18 W.....	75
Figura 39 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada AVANT 15 W.	76
Figura 40 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas AVANT 15 W.....	76
Figura 41 – Comparação dos espectros de IEM de duas e três lâmpadas AVANT 15 W.....	77
Figura 42 – Comparação dos espectros das lâmpadas AVANT de 9, 20 e 30 W.	78
Figura 43 – (a) Lustre com três lâmpadas AVANT 15 W; (b) Lustre com cinco lâmpadas AVANT 15 W.	79
Figura 44 – (a) Comparação entre três lâmpadas AVANT 15 W separadas de 0 cm e 30 cm; (b) Comparação entre uma e três lâmpadas AVANT 15 W separadas de 30 cm.....	80
Figura 45 – Comparação entre uma e cinco lâmpadas AVANT 15 W separadas de 50 cm.....	81
Figura 46 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada EMPALUW 7,0 W.	82
Figura 47 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas EMPALUX 7,0 W.	82
Figura 48 – Comparação dos espectros das lâmpadas EMPALUX: (a) 11 e 15 W; (b) 20 e 30 W.	83
Figura 49 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada FLC 15 W.	84
Figura 50 – Comparação entre os espectros de IEM de uma e duas lâmpadas FLC 15 W.....	85
Figura 51 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada GREAT VALUE 14 W.	85
Figura 52 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada GOLDEN 6,0 W.....	86
Figura 53 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas GOLDEN 6,0 W.	86
Figura 54 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada GE 14 W.	87
Figura 55 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas GE 14 W e entre duas e três GE 14 W..	88
Figura 56 – Espectros das lâmpadas GE <i>twister</i> : (a) 11 W; (b) 24 W.....	88
Figura 57 – (a) Lustre com três lâmpadas GE 14 W; (b) Lustre com cinco lâmpadas GE 14 W.	89
Figura 58 – Comparação entre três lâmpadas GE 14 W separadas de 0 cm e 30 cm.....	90
Figura 59 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada IMPACT 14 W.....	91
Figura 60 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas IMPACT 14 W.....	91
Figura 61 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada NEOTRON 18 W.	92

Figura 62 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas NEOTRON 18 W.....	92
Figura 63 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada OSRAM 15 W.	93
Figura 64 – Comparação do espectro de IEM de lâmpadas OSRAM 15 W: (a) uma e duas; (b) duas e três.	93
Figura 65 – Comparação dos espectros de IEM das lâmpadas OSRAM 15 W: (a) três lâmpadas juntas e separadas; (b) uma e três lâmpadas separadas.	94
Figura 66 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada PHILIPS 15 W.	95
Figura 67 – Comparação dos espectros de IEM: (a) de uma e duas lâmpadas PHILIPS 15 W; (b) de duas e três lâmpadas PHILIPS 15 W.	95
Figura 68 – Comparação dos espectros das lâmpadas PHILIPS de 5, 14 e 18 W.	96
Figura 69 – Espectro de IEM conduzida para o lustre com cinco lâmpadas PHILIPS 14 W.	97
Figura 70 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada SYLVANIA 9,0 W.	98
Figura 71 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas SYLVANIA 9,0 W.....	98
Figura 72 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada SA ECONÔMICA 18 W.	99
Figura 73 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas SA ECONÔMICA 18 W.....	99
Figura 74 – (a) Estrutura do filtro LC com <i>choke</i> de modo comum; (b) circuito equivalente.	101
Figura 75 – Circuito do filtro LC.	102
Figura 76 – Ilustração das dimensões de um toróide.....	103
Figura 77 – Foto do filtro de IEM projetado.....	103
Figura 78 – Diagrama de Bode do filtro de IEM projetado.....	104
Figura 79 – Curvas de IEM conduzida sem filtro, com filtro apenas capacitivo e com filtro apenas indutivo.	105
Figura 80 – Comparação dos espectros de IEM de uma lâmpada ARAM 15 W com e sem o filtro de IEM.....	106
Figura 81 – Comparação dos espectros de IEM conduzida por uma lâmpada ATRALUW 18 W com e sem o filtro de IEM.	107
Figura 82 – Espectros de IEM das lâmpadas AVANT 9 e 20 W, com e sem o filtro de IEM.	108
Figura 83 – Comparação dos espectros de IEM das lâmpadas EMPALUW 7,0 e 30 W, com e sem filtro.	109
Figura 84 – Espectros de IEM de uma lâmpada FLC 15 W com e sem o filtro de IEM.	109
Figura 85 – Espectros de IEM de uma lâmpada GREAT VALUE 14 W, com e sem filtro de IEM.	110
Figura 86 – Espectros de IEM de uma lâmpada GOLDEN 6,0 W, com filtro e sem filtro de IEM.....	111
Figura 87 – Espectros de IEM de uma lâmpada GE 14 W, com e sem o filtro de IEM.....	112
Figura 88 – Espectros de IEM de uma lâmpada IMPACT 14 W, com e sem filtro de IEM.	113
Figura 89 – Espectros de IEM de uma lâmpada NEOTRON 18 W, com e sem filtro de IEM.	113
Figura 90 – Espectros de IEM de uma lâmpada OSRAM 15 W, com e sem filtro de IEM.....	114
Figura 91 – Espectros de IEM de uma lâmpada SYLVANIA 9,0 W, com e sem filtro de IEM.	115
Figura 92 – Espectros de IEM de uma lâmpada SA ECONÔMICA 18,0 W, com e sem filtro de IEM.	116

Lista de Símbolos

- A – Valor de atenuação de tensão
- C – Capacitância
- C_{DL} – Capacitor do lado esquerdo
- C_{DR} – Capacitor do lado direito
- C_e – Custo da energia (R\$/kWh);
- C_F – Custo fixo da lâmpada em (R\$);
- C_{FLC} – Custo da LFC, (R\$);
- C_{LI} – Custo da LI, (R\$);
- C_T – Custo total da lâmpada e da energia gasta por ela em (R\$);
- C_V – Custo variável, devido ao consumo de energia em (R\$);
- \hat{E} – Campo elétrico
- f – Frequência
- h – Altura
- I_C – Corrente de modo comum
- I_D – Corrente de modo diferencial
- \hat{I}_N – Corrente de neutro
- \hat{I}_P – Corrente de fase
- L – Indutância própria
- L' – Comprimento total do Fio
- L_{GW} – Indutor do fio de terra
- $l_{i,af}$ – Indutância interna de um fio em alta frequência
- $l_{i,DC}$ – Indutância interna de um fio em baixa frequência
- L_T – Indutância total de um fio
- M – Indutância mútua
- N_d – Número de dias requeridos para a lâmpada se pagar
- N_{esp} – Número de espiras
- N_h – Número de horas por dia que a lâmpada permanece ligada
- P – Potência nominal
- P_{LCF} – Potência da Lâmpada Fluorescente Compacta, em (kW)
- P_{LI} – Potência da Lâmpada Incandescente, em (kW)

- Q – Carga elétrica
 Q_f – Fator de qualidade do filtro
 R – Resistência de um fio
 r_{af} – Resistência em alta frequência
 r_{bf} – Resistência em baixa frequência
 R_{eq} – Resistência equivalente da rede elétrica
 R_{ext} – Raio externo
 R_{int} – Raio interno
 R_L – Resistência da carga
 R_S – Resistência da fonte
 r_w – Raio do fio
 s – Distância entre um par de fios
 v – Fonte de ruído
 V_{lamp} – Tensão da lâmpada
 $\hat{V}_{L,w}$ – Tensão na carga com o filtro
 $\hat{V}_{L,wo}$ – Tensão na carga sem o filtro
 \hat{V}_N – Tensão no neutro
 \hat{V}_S – Tensão da fonte
 \hat{V}_p – Tensão no fase
 V_{rms} – Tensão eficaz
 X – Reatância
 Z_{fio} – Impedância do par de fios
 Z_{lamp} – Impedância da lâmpada
 \hat{Z}_{MC} – Impedância de modo comum
 \hat{Z}_{MD} – Impedância de modo diferencial
 δ – Efeito pelicular ou efeito *skin*
 μ – Permeabilidade relativa do núcleo
 σ – Condutividade
 Ψ_m – Fluxo magnético
 ω – Frequência angular

Lista de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRITEM – Associação Brasileira de Compatibilidade
Eletromagnética

AM – Amplitude Modulada

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI – American National Standards Institute

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

APEMC – Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility

CA – Corrente/Tensão Alternada

CC – Corrente/Tensão Contínua

CE – Comunidade Europeia

CEM – Compatibilidade Eletromagnética

CGIEE – Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência
Energética

CISPR – Comité International Spécial des Perturbations
Radioélectriques

COBEI – Comitê Brasileiro de Eletricidade Eletrônica e Iluminação

CSA – Canadian Standards Association

DC – Direct Current

EEM – Equipamento EletroMédico

EM – Eletromagnético

EN – European Norm

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EST – Equipamento Sobre Teste

EUA – Estados Unidos da América

FCC – Federal Communication Commission

FM – Frequência Modulada

FP – Fator de Potência

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEM – Interferência Eletromagnética

IL – Insertion Loss

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e
Qualidade Industrial

IR – Infra Vermelho

ISEF – International Symposium on Electromagnetic Fields

ISM – Industrial, Scientific and Medical

ITU – International Telecommunication Union

LFCs – Lâmpadas Fluorescentes Compactas

LI – Lâmpada Incandescente

LISN – Line Impedance Stabilization Network

NBR – Normas Brasileiras

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RIF – Rádio Interferência

RMS – Root Mean Square

SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência

THD – Total Harmonic Distortion

THDI – Current Total Harmonic Distortion

TV – Televisão

UHF – Ultra High Frequency

UV – Ultra Violeta

VHF – Very High Frequency

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se observado uma crescente expansão no uso das lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) nos sistemas de distribuição de energia elétrica, motivada, sobretudo pela queda dos preços dessas lâmpadas e por programas de eficiência energética promovidos pelas concessionárias de energia bem como pela Resolução 492/2002 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Todavia, não obstante aos benefícios relacionados à redução do consumo de energia elétrica, constata-se uma carência de maiores investigações acerca dos impactos da utilização em larga escala das LFCs, como por exemplo, a emissão de correntes harmônicas, suportabilidade e sensibilidade destas às variações de tensão de curta duração, a interferência eletromagnética gerada, dentre outras. Essa indagação se deve ao fato de que a substituição das lâmpadas incandescentes (LI) por lâmpadas compactas é feita de forma direta, ou seja, sem a necessidade de alguma adaptação. Esses dois tipos de lâmpadas apresentam princípios de funcionamento completamente diferentes. Enquanto a primeira é puramente resistiva e com elemento passivo, a segunda (LFC) é eletrônica e possui elementos chaveadores e não lineares.

As LFCs, igualmente chamadas lâmpadas PLs, melhoram algumas características elétricas das lâmpadas incandescentes principalmente em relação a eficiência nos lumens por watt e maior economia de energia elétrica. Elas apresentam fácil instalação, tamanho reduzido e brilho equivalente as LIs.

As LFCs são uma das fontes luminosas mais populares usadas em casas, indústrias, armazéns, hospitais, universidades, laboratórios, *shopping centers*, clínicas médicas, postos de gasolina, etc. Não obstante, os desenvolvimentos tecnológicos na indústria de iluminação igualmente aumentaram a incidência da interferência dos dispositivos da iluminação (MONTERO et al, 1995). Além disso, a larga utilização de LFCs resulta num aumento dos níveis de harmônicos de corrente e tensão da rede elétrica, tendo por resultado a deterioração do equipamento, da qualidade de energia e a interferência nos sistemas de comunicação (MIELCZARSKI et al, 1998).

Interferência eletromagnética (IEM) é a ocorrência de alterações funcionais em um determinado equipamento ou sistema devido a sua exposição aos campos eletromagnéticos, sejam estes conduzidos ou irradiados, emitidos por outro equipamento ou por ele próprio (PAUL, 1992).

Atualmente, diversos comitês normativos trabalham na formulação ou na revisão de normas cujo escopo é interferência e/ou compatibilidade eletromagnética (CEM). Três dos principais são o IEC/CISPR, a ANSI e o IEEE (CABRAL, 2001).

No Brasil, de acordo com a resolução N° 444 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde (ANVISA) de agosto de 1999, os Equipamentos EletroMédico (EEM) comercializados no país devem estar de acordo com as prescrições da norma geral NBR-IEC 60601-1 e das normas particulares NBR-IEC 60601-2 que definem prescrições particulares com relação à segurança elétrica e questões de CEM. Para dispositivos como as LFCs a Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é quem deve definir as normas as quais os fabricantes devem atender, quando mandatárias, e considerar, quando recomendadas, para que seus produtos possam respeitar as exigências do controle da energia adotado no Brasil e, conseqüentemente, ser comercializado em território nacional. O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), por sua vez, executará e fiscalizará o cumprimento dessas diretrizes. Porém, apenas a resolução interministerial N° 132/2000 versa sobre a eficiência das LFCs. No Brasil, não se tem conhecimento da existência de uma regulamentação para as LFCs com menção as exigências de CEM. Esse fato dificulta a manutenção da boa qualidade que as LFCs deveriam ter no Brasil, como se acredita que elas têm no mercado europeu e americano.

Neste trabalho estudou-se o comportamento do espectro eletromagnético conduzido emitido pela LFCs comercializadas em território nacional, em especial, na região nordeste do Brasil. Os níveis de ruído do espectro de interferência eletromagnética conduzida, produzidos pelas LFCs com reator integrado, é o ponto principal desse estudo. Os testes foram feitos seguindo as recomendações da norma internacional CISPR 15, também denominada EN55015, em algumas marcas de lâmpadas presentes no mercado da região nordeste, em particular no estado da Paraíba, Brasil.

Dois modelos para o circuito interno da LFC são analisados por meio de simulações feitas com o *software* Multisim[®]. Algumas restrições são apontadas no modelo sugerido na bibliografia. Foi proposto um novo modelo de circuito para a LFC.

Constatou-se que o modelo de circuito proposto tornou-se mais geral por adicionar os efeitos de alta frequência presentes no circuito real da lâmpada. São discutidos ainda a influência das LFCs na geração de harmônicos e na qualidade de energia elétrica.

Os casos analisados levam em conta: o número de lâmpadas, a distância de separação entre elas e suas potências. Para tornar a análise mais ampla foram considerados os produtos (lâmpadas) de várias marcas adquiridas no mercado consumidor de Campina Grande. A análise se deu sobre um par de lâmpadas de cada marca e, para uma mesma marca, verificada, quando possível, a assinatura espectral para diferentes valores de potências. As condições de teste foram às mesmas para todas as marcas e níveis de potência. As quatorze marcas incluídas nos testes são: ARAM, AVANT, ATRALUX, EMPALUX, FLC, GREAT VALUE, GOLDEN, GE, IMPACT, NEOTROM, OSRAM, PHILIPS, SA ECONÔMICA e SYLVANIA. No final deste trabalho serão apresentados os resultados obtidos com as referidas lâmpadas.

A análise dos resultados dos testes realizados permite observar se o nível de ruído gerado pelas LFCs está acima dos limites máximos estipulados pela norma. Uma vez constatada a desobediência desta, foi proposta uma solução baseada nas técnicas aplicadas a compatibilidade e interferência eletromagnética. Um filtro de IEM para reduzir o nível de ruído conduzido foi projetado e aplicado as LFCs. Os resultados são apresentados e mostram-se satisfatórios.

1.1. JUSTIFICATIVA

No estudo da interferência eletromagnética conduzida por lâmpadas fluorescentes compactas é justificada pela falta de regulamentação dos órgãos fiscalizadores de produtos eletroeletrônicos, no Brasil; pelo crescimento rápido e desregulado deste tipo de produto nas residências, hospitais, supermercados, postos de gasolina, clínicas médicas, entre outros ambientes; pela falta de certificação, nesses produtos, do atendimento aos limites dos níveis de ruído eletromagnético; e do desconhecimento do nível emitido por eles. Esses motivos levaram a questionamentos. Por exemplo, como se comportam os níveis de ruído quando essas lâmpadas são instaladas numa mesma luminária com capacidade de suportar uma ou mais lâmpadas; como se comportam os níveis de ruído quando essas lâmpadas são de potências

diferentes; e como se comportam os níveis de ruído em função da distância entre as lâmpadas quando elas são instaladas de maneira a formarem um lustre.

O estudo foi realizado em uma amostra sobre as marcas de lâmpadas presentes no mercado consumidor do Estado da Paraíba, com validade de cobertura nacional uma vez que esses produtos não são específicos da região Nordeste.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho de dissertação tem como objetivos: medir o espectro de interferência eletromagnética (IEM) conduzida produzido pelas LFCs com reator integrado e propor sugestões de circuitos, para mitigar os níveis de interferência eletromagnética conduzida proveniente desses dispositivos, nos casos de se constatar a incompatibilidade com a norma internacional vigente CISPR 15.

Outro objetivo deste trabalho é estudar o nível de ruído conduzido por uma ou mais LFCs instaladas na mesma luminária a uma distância desprezível e suficientemente distante uma da outra.

Um objetivo específico realizado foi estudar se as LFCs de maior potência produzem maior nível de ruído eletromagnético conduzido.

A estrutura deste trabalho está dividida em cinco capítulos descritos a seguir:

No capítulo 2 é apresentado um embasamento teórico matemático sobre alguns conceitos e parâmetros fundamentais relacionados à compatibilidade e interferência eletromagnética e importantes para o bom entendimento da análise realizada nos capítulos futuros, como: corrente de modo diferencial, corrente de modo comum, elementos não ideais e filtros de redução de ruído. São apresentados também o princípio de funcionamento das LFCs, seu circuito interno, vantagens e desvantagens de seu uso. São discutidos também: o modelo do circuito usado para simulação das LFCs e sua deficiência, os harmônicos gerados, a eficiência e qualidade de energia.

No capítulo 3 são descritos a metodologia dos testes realizados: procedimentos e equipamentos de medição, norma usada nos testes, características das lâmpadas testadas, projeto do filtro para mitigar o nível de ruído produzido por elas e a situação brasileira com relação às normas de CEM/IEM.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais para todas as marcas testadas, os gráficos do espectro eletromagnético conduzido para lâmpadas muito

próximas e separadas, a validação da solução proposta e a comparação dos níveis de ruído eletromagnético conduzido com a norma CISPR 15.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão e as propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico matemático sobre alguns conceitos e parâmetros fundamentais relacionados à compatibilidade e interferência eletromagnética, como elementos não ideais e seus comportamentos em alta frequência, corrente de modo diferencial e corrente de modo comum. São apresentados também o princípio de funcionamento das LFCs, seu circuito interno, vantagens e desvantagens de seu uso. São discutidos, o modelo do circuito usado para simulação das LFCs e sua deficiência, os harmônicos gerados, a eficiência e a qualidade de energia.

2.1 COMPATIBILIDADE E INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA (CEM/IEM)

2.1.1 Conceito

Desde as primeiras comunicações por rádio e por telégrafo pode-se constatar que as ondas eletromagnéticas (EM), ricas em conteúdo espectral (componentes em frequência), podem causar Interferência Eletromagnética em outros equipamentos elétricos e eletrônicos. A título de exemplo de fonte de ruído e equipamento receptor, respectivamente, têm-se os transmissores de rádio e os Equipamentos EletroMédicos.

A Compatibilidade Eletromagnética é um assunto cada vez mais preocupante para pessoas que operem ou necessitem de equipamentos e sistemas elétricos, eletrônicos ou de telecomunicações. Ela está associada a alguns efeitos que fazem parte do cotidiano e, muitas vezes fogem do conhecimento geral, são decorrentes do fato de que qualquer aparelho elétrico produz perturbações radioelétricas. Exemplos desses efeitos são as perturbações visíveis na imagem de um televisor quando um veículo motorizado ruidoso (interferência irradiada) passa nas proximidades ou quando se ouve no receptor de rádio perturbações oriundas do aspirador elétrico ou do liquidificador.

Nas últimas cinco décadas assistiu-se a uma preocupação relativamente crescente a este tema. Isso pode ser constatado pelo reforço obtido pela edição de

publicações e normas técnicas sobre esta matéria. Mais recentemente através das exigências das Diretivas Comunitárias Europeias relacionadas a CEM, pelas exigências nos regulamentos das companhias de aviação comercial, que proíbem a utilização de aparelhos eletrônicos pelos passageiros durante os voos. Essa medida é tomada como forma de reduzir ao máximo a ocorrência de fenômenos que possam interferir com os sistemas de navegação aérea.

A CEM relaciona-se com a medição e a definição de limites para as várias perturbações geradas pelo aparelho 'perturbador', de um lado, e a influência dessas perturbações sobre o aparelho afetado, do outro.

Se um equipamento ou sistema tem a capacidade de funcionar em um determinado ambiente eletromagnético sem produzir ou sofrer perturbações, ele é considerado como sendo eletromagneticamente compatível com o ambiente. Se esta compatibilidade em qualquer um dos dois casos não ocorrer, têm-se o aparecimento de IEM. Na Fig. 1 é ilustrada a complexidade de um ambiente eletromagnético onde estão presentes: fontes perturbadoras e equipamentos suscetíveis.

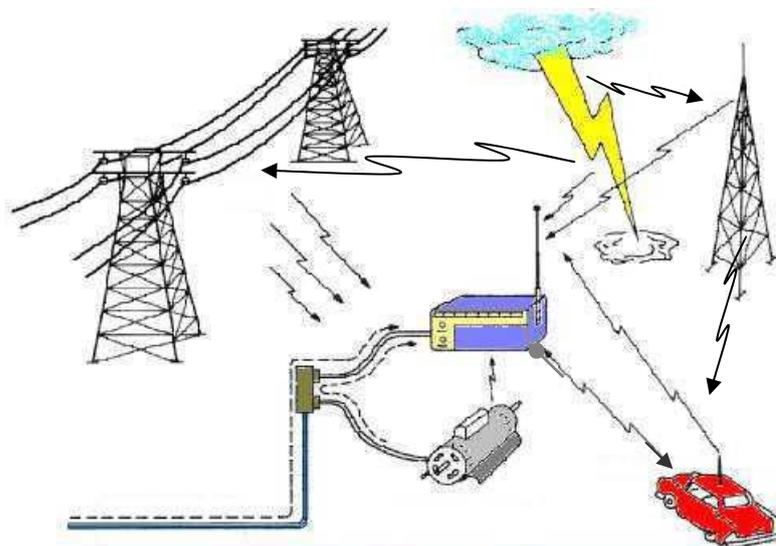


Figura 1 – Ambiente eletromagnético.

A importância da CEM em vários outros países é tal que um produto eletroeletrônico que não atenda as normas estabelecidas não pode ser comercializado. É o caso na Comunidade Europeia, nos Estados Unidos e no Japão.

2.1.2 Interferência eletromagnética (IEM)

A Interferência Eletromagnética é o processo pelo qual a energia eletromagnética perturbadora é transmitida de um dispositivo (equipamento ou sistema) para outro via espaço livre e/ou conduzido. No uso comum, ou em baixas frequências, a IEM se refere aos sinais de rádio-interferência (RIF).

Uma IEM ocorre quando uma energia é transferida de um dispositivo (equipamento ou sistema) para outro causando um comportamento indesejável no receptor dessa energia. Em todos os casos, a IEM ocorre devido à combinação entre uma fonte emissora (perturbadora) e um receptor suscetível.

É importante salientar que a transmissão ou a recepção de energia EM não é necessariamente danosa. A interferência ocorre quando a recepção de energia leva a um comportamento indesejável ou alterado do receptor dessa energia.

As fontes de IEM podem ser classificadas em função da natureza em dois grupos: fontes naturais e fontes artificiais, conforme o Quadro 2.1 (ABRICEM, 2000).

Naturais		Artificiais			
Extraterrestre (baixa energia)	Terrestre (alta energia)	Intencionais		Não intencionais	
Explosões Solares Ruído Cósmico	Descargas Eletrostáticas	Fontes Fixas	Fontes Móveis	Energia Elétrica	Equipamentos Industriais médicos e de consumo
Rádios AM/FM TV UHF/VHF Radares Enlaces Digitais	Telefones Celulares <i>Walkie-Talkies</i> Serviços de Comunicações Móveis	Linhas de Transmissão de Alta tensão Transformadores Geradores	Máquinas Industriais Eletrodomésticos Máquinas de Solda Equipamentos de Informática Lâmpadas Equipamentos Médicos		

Quadro 2.1 – Fontes de radiação eletromagnética (ABRICEM, 2000)

Dentre as fontes artificiais existem aquelas que são intencionais, isto é, elas produzem campos eletromagnéticos como parte de seu funcionamento. É o caso dos transmissores de rádio AM, FM, televisão, telefones sem fio e aparelhos de telefone celular. Já as fontes não intencionais produzem (irradiam) campos eletromagnéticos como consequência de seu funcionamento como, por exemplo, os transformadores.

Ambos os tipos de fontes têm capacidade de provocar IEM em equipamentos vizinhos se os campos elétricos, magnéticos ou eletromagnéticos possuírem magnitude acima do permitido pelas normas.

A interferência eletromagnética pode ser classificada em termos da abrangência de alcance como sendo de dois tipos:

- a) **Interferência intra-sistema:** quando a interferência ocorre dentro de um mesmo sistema, isto é, o equipamento produz a IEM, e ele mesmo sofre a interferência;
- b) **Interferência intersistema:** a interferência ocorre entre sistemas diferentes (CABRAL, 2001).

A IEM proveniente de uma fonte pode alcançar o equipamento suscetível de duas formas possíveis, por um meio condutor ou pelo ar:

- ⇒ IEM Conduzida - Ocorre quando a energia causadora da perturbação é transmitida através de um meio material (cabos de alimentação ou de conexão);
- ⇒ IEM irradiada - Ocorre quando a transmissão da energia causadora da perturbação é através do ar (ondas eletromagnéticas, acoplamento elétrico e acoplamento magnético).

Quando a IEM se dá na forma conduzida é importante estar atento as características físicas do meio, como a resistência e a indutância interna dos fios que se comportam de forma não ideal com o aumento da frequência.

A resistência DC em torno de um fio de raio r_w , condutividade σ , e comprimento total L é dada por (PAUL, 1992):

$$R = \frac{L}{\sigma \pi r_w^2} \Omega. \quad (2.1)$$

Com o aumento da frequência, a corrente sobre o fio tende a se aglomerar na periferia do condutor por causa de um fenômeno conhecido como efeito pelicular (efeito *skin*). Determinado pela equação (2.2).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}. \quad (2.2)$$

Baseado nesse fenômeno a resistência de um fio por unidades de comprimento pode ser calculada para os casos de baixa e alta frequência, sendo (PAUL, 1992),

$$r_{bf} = r_{DC} = \frac{1}{\sigma \pi r_w^2} \quad (\text{em } \Omega/m), \text{ para } r_w \ll \delta. \quad (2.3)$$

$$r_{af} = \frac{1}{\sigma [\pi r_w^2 - \pi (r_w - \delta)^2]}, \text{ para } r_w \gg \delta.$$

$$r_{af} \cong \frac{1}{\sigma 2\pi r_w \delta} \quad (\text{em } \Omega/m). \quad (2.4)$$

$$r_{af} = \frac{1}{2r_w} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi\sigma}} \sqrt{f}$$

em que,

r_{bf} – é a resistência em baixa frequência;

r_{af} – é a resistência em alta frequência.

Um fio de comprimento L tem uma resistência total $R = rL$.

Normalmente os efeitos da resistência do fio são muito pequenos comparados a indutância, de modo que ela pode ser desprezada.

A indutância interna de um fio, por unidades de comprimento, para baixa (DC) e alta frequência é dada, respectivamente por (PAUL, 1992):

$$l_{i,DC} = \frac{\mu_0}{8\pi}, \text{ para } r_w \ll \delta \quad (2.5)$$

$$l_{i,DC} = 50 \text{ nH/m.}$$

$$l_{i,af} = \frac{2\delta}{r_w} l_{i,DC} \quad , \text{ para } r_w \gg \delta \quad (2.6)$$

$$l_{i,af} = \frac{1}{4\pi r_w} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi\sigma}} \frac{1}{\sqrt{f}} \text{ (H/m).}$$

Portanto, a indutância interna de um fio diminui com o aumento da frequência. Um fio de comprimento L' tem uma indutância interna total $L_T = l_i L'$.

Quando um equipamento é alimentado por uma fonte normalmente existe uma conexão através de um par de fios separados por uma distância s . O fluxo magnético

externo em cada fio contribui para o fluxo total que penetra na área entre os dois fios. Assumindo que os fios estejam suficientemente separados ($(s/r_w) > 5$) e que a corrente seja distribuída uniformemente entorno dos fios. Os efeitos de indutâncias e capacitâncias são quantificados pelas equações (2.6 e 2.7).

$$l_e = \frac{\psi_m/L'}{I} = 0,4 \ln\left(\frac{s}{r_w}\right) (\mu\text{H/m}). \quad (2.7)$$

$$c = \frac{Q/L'}{V} = \frac{27,78}{\ln\left(\frac{s}{r_w}\right)} (\text{pF/m}). \quad (2.8)$$

A indutância total do *loop* é a soma do produto do comprimento da linha e as indutâncias internas e externas dos dois fios, ou seja, $L = L'l_i + L'l_e$.

A capacitância total entre um par de fios paralelos de comprimento total L' é o produto da capacitância por unidade de comprimento pelo comprimento: $C = cL'$.

Assim como os fios, os componentes mais usados nos circuitos eletroeletrônicos: resistores, capacitores e indutores, têm um comportamento não ideal com o aumento da frequência. Isso é muito importante, pois o projetista pode ter um resultado não desejado para o funcionamento do componente. Os modelos para esses três componentes são apresentados a seguir.

Modelo do Resistor

Os resistores são fabricados em três tipos de materiais: de carbono, de fio enrolado e de filme fino. Com o aumento da frequência o resistor pode apresentar comportamento indutivo e capacitâncias parasitas, devido ao deslocamento de cargas em torno do resistor. Normalmente essa capacitância é desprezível. O modelo do resistor e o gráfico do comportamento da resistência em função da frequência podem ser vistos na Fig. 2, respectivamente (PAUL, 1992).

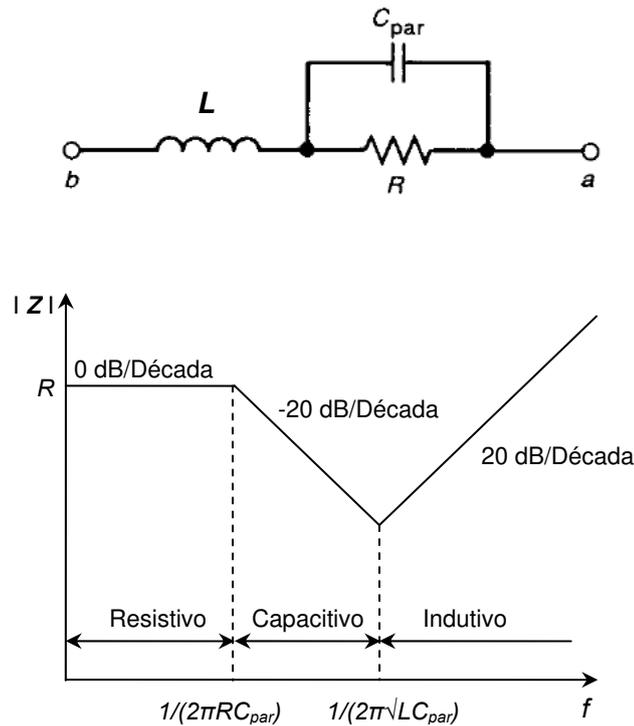
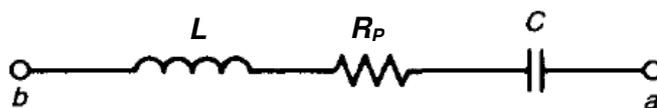


Figura 2 – Modelo e comportamento da impedância do resistor em função da frequência, respectivamente.

Modelo do Capacitor

O modelo para o capacitor leva em consideração a resistência das placas e a indutância de conexão. Em capacitores cerâmicos a resistência das placas R_p é desprezada. Com o aumento da frequência a reatância capacitiva torna-se indutiva, conforme visto na Fig. 3, onde também é mostrado o modelo do capacitor. A frequência f_o é denominada frequência própria de ressonância do capacitor. Então, para usar um capacitor com a finalidade de desviar a corrente de ruído para o terra, a frequência do ruído, a ser bloqueado, tem que ter valor menor que f_o . Assim, o capacitor funcionará como ideal, ou seja, a impedância deve diminuir com o aumento da frequência, caso contrário a reatância capacitiva aumentará ao invés de diminuir (como se espera) e o efeito será indutivo.



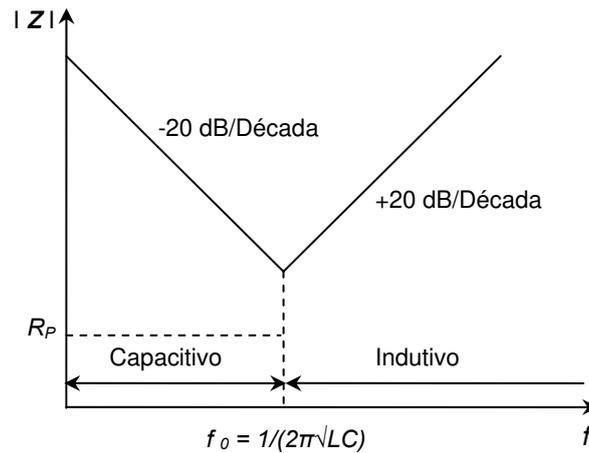


Figura 3 – Modelo e comportamento da impedância do capacitor em função da frequência, respectivamente.

Modelo do Indutor

A técnica específica de construção determinará os valores dos elementos parasitas no modelo não ideal do indutor que é mostrado na Fig. 4. É importante lembrar que aumentar o valor de um indutor, trabalhando em alta frequência, não aumentará necessariamente o valor da impedância, pois o efeito capacitivo pode ser predominante, conforme observado no gráfico da Fig. 4. Os indutores são mais efetivos no bloqueio do ruído quando colocados em série, pois a reatância indutiva aumenta com a frequência impedindo a circulação do ruído.

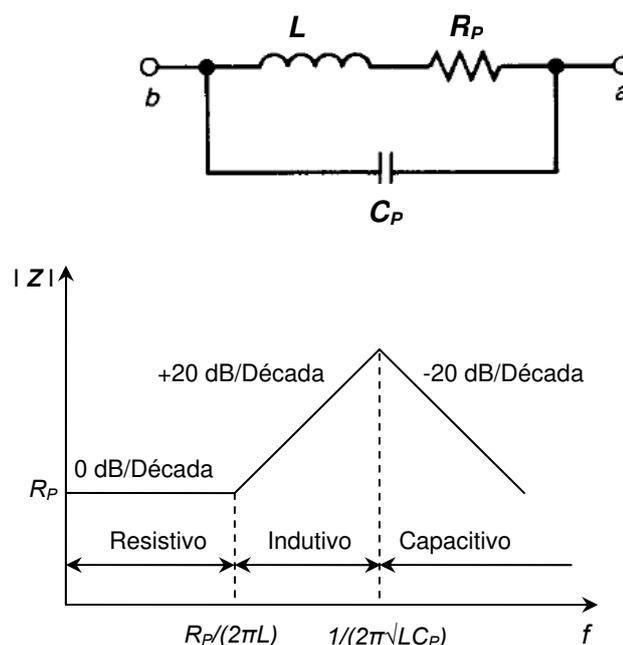


Figura 4 – Modelo e comportamento da impedância do indutor em função da frequência, respectivamente.

2.1.3 Correntes de modo diferencial e modo comum

Em termos de CEM/IEM as correntes presentes nos circuitos eletroeletrônicos são responsáveis pelos problemas de interferência eletromagnética conduzida. Sejam estas correntes efetivamente geradas por fontes de tensão/corrente ou originárias do acoplamento de campos eletromagnéticos.

Considere um par de condutores paralelos conduzindo correntes \hat{I}_1 e \hat{I}_2 , como mostrado na Fig. 5 (PAUL, 1992).

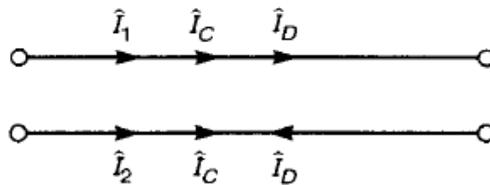


Figura 5 – Decomposição das correntes, numa linha de transmissão de dois fios, em componentes de modo comum \hat{I}_C e modo diferencial \hat{I}_D .

Essas duas correntes podem ser decompostas em duas correntes auxiliares, as quais são denominadas como modo diferencial \hat{I}_D e modo comum \hat{I}_C .

$$\begin{aligned}\hat{I}_1 &= \hat{I}_C + \hat{I}_D \\ \hat{I}_2 &= \hat{I}_C - \hat{I}_D\end{aligned}\tag{2.9}$$

Resolvendo essas duas equações obtêm-se:

$$\begin{aligned}\hat{I}_D &= \frac{1}{2}(\hat{I}_1 - \hat{I}_2) \\ \hat{I}_C &= \frac{1}{2}(\hat{I}_1 + \hat{I}_2)\end{aligned}\tag{2.10}$$

As correntes de modo diferencial \hat{I}_D são iguais em amplitude, mas circulam em sentidos opostos nos dois fios. Essas são as correntes desejadas ou funcionais. As correntes de modo comum \hat{I}_C são iguais em amplitude e circula no mesmo sentido nos dois fios simultaneamente. Essas não são desejadas e nem projetadas nos circuitos, mas elas aparecem nos sistemas práticos.

O caminho para a corrente de modo comum pode ser um cabo adjacente ao sinal da fonte, um plano de terra ou outro caminho de retorno, mesmo um inesperado, caminho indefinido. Os efeitos parasitas que originam a corrente de modo comum são impedâncias de terra comuns, capacitâncias inesperadas, acoplamentos indutivos e desbalanceamento de duas linhas de sinal (MONTROSE e NAKAUCHI, 2004).

Os campos elétricos irradiados \hat{E} , devido a cada corrente, podem ser sobrepostos para formar o campo elétrico irradiado total. Primeiramente considere-se os campos irradiados devido à corrente de modo diferencial, como ilustrado em Fig. 6.a. As correntes de modo diferencial possuem sentidos opostos. Assim, o campo elétrico resultante também terá sentidos opostos. Porém, se os sinais de modo comum não são exatamente opostos em fase, a amplitude dos campos não vão se cancelar exatamente, mas se subtrairão para dar um campo elétrico irradiado total pequeno. Por outro lado, as correntes de modo comum têm a mesma direção e o campo irradiado por elas se somará, contribuindo para um campo irradiado total muito maior que o gerado pelas correntes de modo diferencial, como é ilustrado na Fig. 6.b.

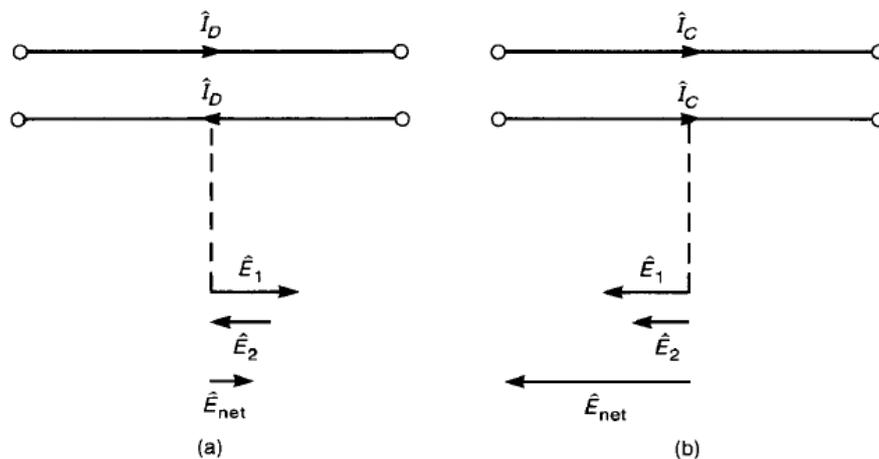


Figura 6 – Ilustração do campo elétrico produzido pelas correntes: (a) de modo diferencial \hat{I}_D , e (b) de modo comum \hat{I}_C .

Portanto, uma pequena corrente de modo comum pode produzir o mesmo nível de campo elétrico irradiado que a corrente de modo diferencial ou com valor maior. Em resumo, correntes de modo comum, têm um potencial muito maior para a produção de emissões irradiadas do que as correntes de modo diferencial.

Um dos métodos mais eficazes para reduzir as correntes de modo comum é com indutores de modo comum (*common mode choke*). Ele é um dispositivo constituído de

um par de fios enrolados em torno de um núcleo ferromagnético que transportam as correntes \hat{I}_1 e \hat{I}_2 , como mostrado na Fig. 7.a. É preciso estar atento para o sentido dos enrolamentos. O circuito equivalente também é mostrado. Aqui é foi assumido que os enrolamentos são idênticos, de tal forma que $L_1 = L_2 = L$.

A fim de investigar o efeito do núcleo sobre o bloqueio da corrente de modo comum, pode-se calcular a impedância de um enrolamento:

$$\hat{Z}_1 = \frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \frac{j\omega L\hat{I}_1 + j\omega M\hat{I}_2}{\hat{I}_1}. \quad (2.11)$$

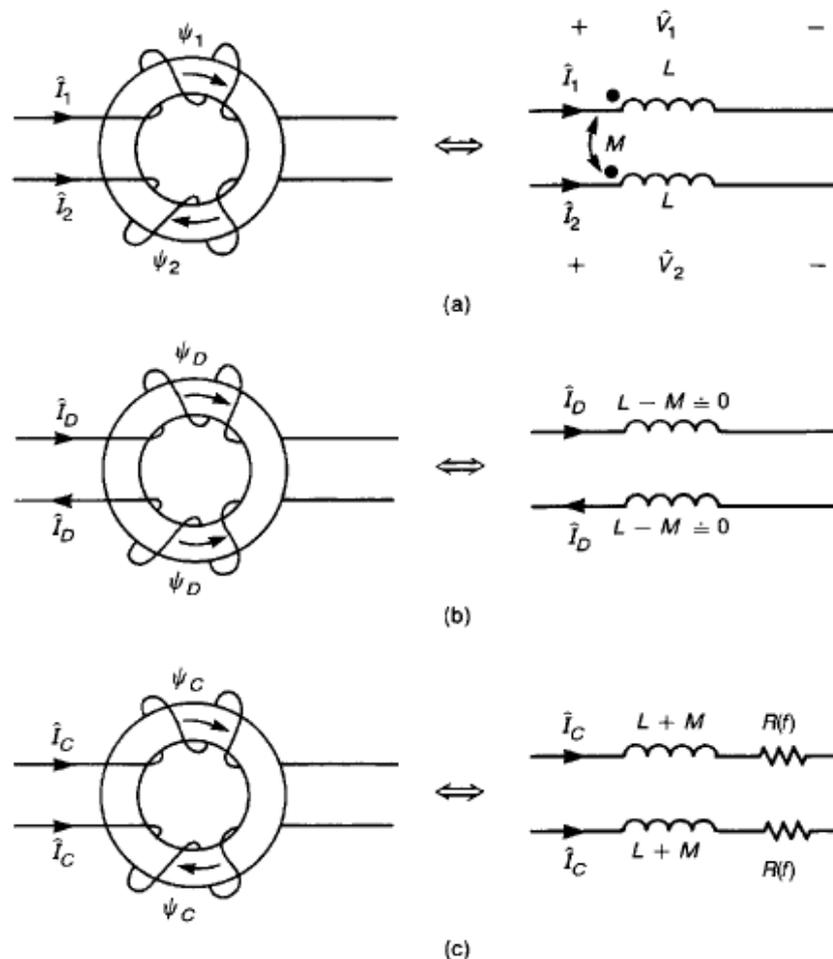


Figura 7 – Modelando o efeito do *choke* de modo comum. (a) correntes nos dois fios; (b) componentes do modo diferencial; e (c) componentes do modo comum (PAUL, 1992).

A contribuição para a impedância série devido a cada componente da corrente pode ser feita separadamente. Primeiro considerando-se a corrente de modo comum, ou seja, $\hat{I}_1 = \hat{I}_C$ e $\hat{I}_2 = \hat{I}_C$. Substituindo em (2.11) têm-se:

$$\hat{Z}_{MC} = j\omega(L + M). \quad (2.12)$$

Depois considerando as correntes de modo diferencial, ou seja, $\hat{I}_1 = \hat{I}_D$ e $\hat{I}_2 = -\hat{I}_D$. Assim,

$$\hat{Z}_{MD} = j\omega(L - M). \quad (2.13)$$

Se os enrolamentos são simétricos e todo o fluxo permanece no núcleo, então, $L = M$ e $\hat{Z}_{MD} = 0$. Assim, no caso ideal onde $L = M$ um *choke* de modo comum não tem efeito nas correntes de modo diferencial, mas coloca uma indutância (impedância) $2L$ em série com os dois condutores de correntes de modo comum, Fig. 7. Com a finalidade de fornecer essa impedância para as correntes de modo comum, os fios devem ser enrolados em torno do núcleo de tal forma que os fluxos devido às duas correntes de modo comum se adicionem no núcleo enquanto que o fluxo devido duas correntes de modo diferencial se subtraíam no núcleo.

2.2. LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS (LFCs)

2.2.1 Conceito

A história das lâmpadas começa com a lâmpada incandescente desenvolvida por Thomas Alva Edison (1847-1931), em 1880, como um dispositivo capaz de converter energia elétrica em energia luminosa e energia térmica. Na evolução deste dispositivo, surgiram vários outros modelos, com maior eficiência em termos de energia e luminosidade. É o caso das lâmpadas de descarga em gases, tanto em alta como em baixa pressão. Por meio da nanotecnologia as tradicionais lâmpadas incandescentes, que estavam condenadas à obsolescência, podem se tornar lâmpadas bastante eficientes. graças a estudos de físicos no desenvolvimento de um filtro fotônico metálico bidimensional, totalmente transparente à luz visível e que funciona como um refletor perfeito para a luz infravermelha. A eficiência energética é aprimorada de duas maneiras: pela redução da quantidade de eletricidade necessária para manter o filamento quente, o que representa um aumento na conversão de eletricidade para luz; e pela redução da

radiação térmica da lâmpada, na medida em que os fótons infravermelhos não conseguem escapar (LUCIANO, 2008).

Paralelamente ao avanço das lâmpadas em descargas em gases estão as lâmpadas em tecnologia de LED (*Light Emission Diode*) que são muito econômicas e possuem vida útil muito longa (em torno de 25.000 horas).

Dentre as lâmpadas de baixa pressão, têm-se as lâmpadas fluorescentes tubulares e lâmpadas fluorescentes compactas, sendo essa última a grande concorrente das incandescentes e alvo deste trabalho.

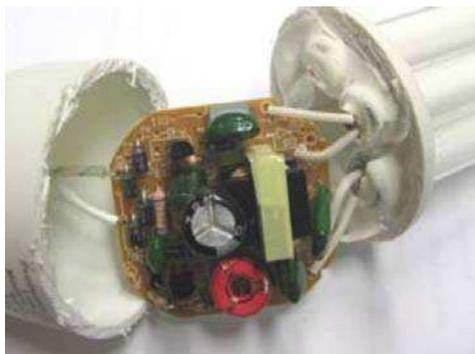
A LFC com reator integrado – também conhecida como lâmpada PL (CREDER, 2000), é concebida como uma unidade e não pode ser desmontada sem ser danificada de forma permanente. O reator é interligado a duas outras partes: um soquete e uma fonte de luz.

As lâmpadas do tipo fluorescentes têm sua origem nos estudos sobre descargas elétricas em atmosferas gasosas, por volta da metade do século XIX. Porém, somente no início do século XX é que se pode utilizar a descarga elétrica em gases como princípio de construção de lâmpadas.

A partir da década de 1980 foram desenvolvidas lâmpadas fluorescentes compactas que possuem reator eletrônico incorporado e um soquete compatível com o das lâmpadas incandescentes, como mostrado na Fig. 8.a. Isso permitiu a substituição direta destas pelas fluorescentes compactas (MORAES, 2006).



(a)



(b)

Figura 8 – (a) elementos que compõem uma LFC; (b) ilustração do circuito interno de uma LFC (TEIXEIRA et al, 2005).

2.2.2 Princípio de obtenção da luz em LFCs

As LFCs apresentam o mesmo princípio de funcionamento das lâmpadas fluorescente tubulares com reator magnético ou reator eletrônico. Elas se diferenciam no tamanho e pelo circuito de disparo da lâmpada. Nas lâmpadas fluorescentes com reator magnético (fluorescentes tubulares) se faz necessário o uso de um dispositivo auxiliar de partida, o *starter*. Já nas PLs esse dispositivo é substituído pelo inversor de frequência incorporado ao reator eletrônico.

As lâmpadas fluorescentes, cujo princípio de funcionamento baseia-se em descargas a gás de baixa pressão, têm sido a principal fonte de iluminação desde o seu desenvolvimento na década de 1930. Com alta eficiência e longa durabilidade, elas emitem luz pela passagem da corrente elétrica através de um gás, provocando uma descarga que é quase que totalmente formada por radiação ultravioleta (invisível ao olho humano).

O gás que se encontra aprisionado no interior do bulbo é ionizado através de uma descarga elétrica gerada pelo reator. Através de colisões sucessivas entre os átomos do gás, os elétrons são excitados e alteram seus níveis de energia para níveis mais altos. Quando os elétrons voltam para os níveis normais emitem radiação luminosa na faixa de ultravioleta. O bulbo é revestido internamente com uma camada de pó fluorescente que permite transformar essa radiação para a faixa de luz visível. Assim, têm-se a luz produzida pelas lâmpadas fluorescentes. É da composição do pó fluorescente que resultam as mais diferentes alternativas de cores de luz adequadas a cada tipo de

aplicação e ambiente, além de determinar a qualidade e quantidade de luz e a eficiência na reprodução das cores.

2.2.3 Funcionamento das LFCs

Uma LFC é composta por um reator eletrônico e um tubo fluorescente. A tensão alternada (CA) de entrada de 50 ou 60 Hz é retificada. Em seguida essa tensão contínua (CC) é invertida para alimentar a lâmpada com tensão CA de alta frequência, para evitar o ruído audível e reduzir o tamanho dos componentes. O circuito do reator converte as frequências de 50 ou 60 Hz em valores de frequência que podem variar entre 20 kHz e 100 kHz (SANCHES, 2003). Para as LFCs disponíveis no comércio essa frequência, em geral, fica dentro da faixa de 20 kHz até 40 kHz, frequência operacional do tubo fluorescente (RAJAMAKI, 2005).

Na Fig. 9 é mostrado um exemplo genérico do circuito elétrico dessas lâmpadas, a nível de componentes.

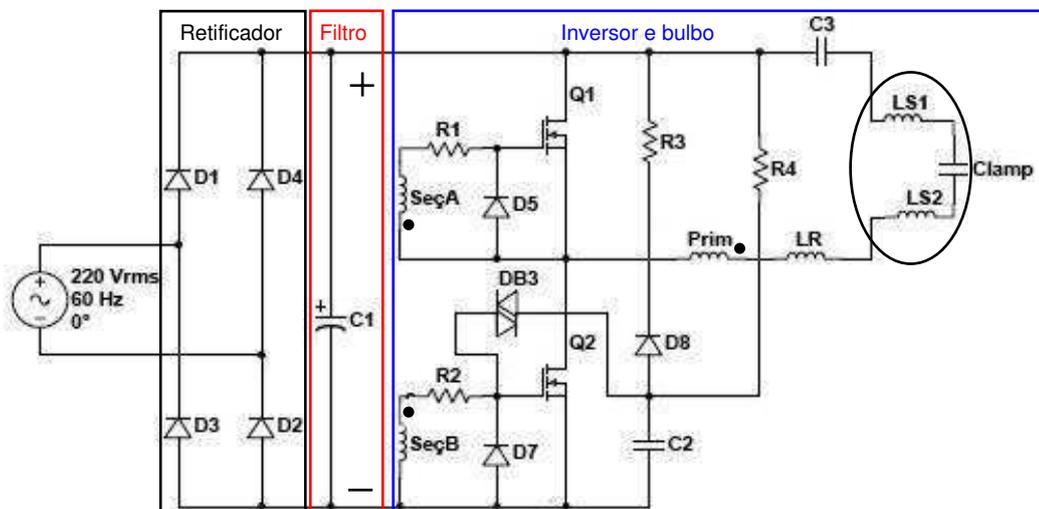


Figura 9 – Representação do circuito interno de uma LFC, adaptado de (MONTERO et al, 1995).

Dois potenciais fontes de interferência existem neste tipo de lâmpada:

- (1) Variações em corrente devido aos picos (*sparking*) nos eletrodos durante a operação normal de funcionamento; e
- (2) O ruído de chaveamento dos harmônicos e o condicionamento do sinal dentro do reator eletrônico.

Assim como os cabos de potência ou de controle, as lâmpadas ou luminárias também podem conduzir e/ou irradiar IEM (RAJAMAKI, 2005) e (UYAISOM e KHAN-NGERN, 2007).

Várias situações envolvendo interações eletromagnéticas devido à proximidade das LFCs e outros equipamentos eletroeletrônicos foram reconhecidos pelos comitês de regulação de IEM. Dentre os fenômenos relatados pode-se citar o caso das LFCs em quartos de hotéis que interagiram com os receptores de televisão a cabo. O relato constatou um acesso aleatório dos canais e mudanças no nível de volume. Outro relato apresentado referiu-se aos teclados eletrônicos em portas de acesso restrito, onde as mesmas travavam e; redução nas faixas de funcionamento dos controles remotos. Somente depois de algumas investigações foi possível estabelecer uma associação entre as LFCs e os receptores de infravermelho (ANDERSON, 1995). Também há relatos de acionamentos involuntários de relés, em subestações.

As LFCs são classificadas como lâmpadas com alto fator de potência quando o fator de potência é $0,92 \pm 0,05$, e de baixo fator de potência quando o fator de potência mínimo é de $0,5 \pm 0,05$ (THIAGO, 2007). No caso de lâmpadas com reator eletrônico, o fator de potência deverá levar em consideração a distorção da forma de onda da corrente.

Um baixo FP e elevada distorção, pode acarretar nos seguintes fatos:

- A máxima potência ativa absorvível da rede é fortemente limitada pelo FP;
- As harmônicas de corrente exigem um sobre dimensionamento da instalação elétrica e dos transformadores, além de aumentar as perdas (efeito pelicular);
- A componente de 3ª harmônica da corrente, em sistema trifásico com neutro, pode ser muito maior do que o normal;
- O achatamento da onda de tensão, devido ao pico da corrente, além da distorção da forma de onda, pode causar mau funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma rede;
- As componentes harmônicas podem excitar ressonâncias no sistema de potência, levando a picos de tensão e de corrente, podendo danificar dispositivos conectados à linha.

Harmônicos são componentes senoidais de frequências múltiplas da frequência fundamental. Além dos harmônicos existem os inter-harmônicos que são componentes senoidais, cujas frequências não são múltiplas da fundamental. Tanto os harmônicos como os inter-harmônicos são causados por elementos não lineares do sistema elétrico (TORRES et al, 2009).

Como consequência de um baixo fator de potência pode-se verificar:

- Acréscimo na conta de energia elétrica pelo baixo fator de potência;
- Limitação da capacidade dos transformadores de alimentação;
- Quedas e flutuações de tensão nos circuitos de distribuição;
- Sobrecarga nos equipamentos de manobra, limitando sua vida útil;
- Aumento das perdas elétricas na linha de distribuição pelo efeito Joule;
- Necessidade de aumento do diâmetro dos condutores;
- Aumento da capacidade dos equipamentos de manobra e de proteção.

2.2.4 Circuito equivalente de uma LFC

O circuito equivalente de uma LFC é uma representação simplificada do circuito visto na Fig. 9. Ele é usado em simulações e deve contemplar os efeitos que estão no circuito real. No estudo para investigar as correntes harmônicas na entrada CA, apenas os três primeiros blocos do circuito da lâmpada precisam ser representados em detalhe, ou seja, a ponte de diodos (retificador de onda completa), o filtro capacitivo e uma resistência, como mostrado na Fig. 10. O bloco do inversor ressonante e o tubo podem ser representados por um resistor, segundo (WEI et al, 2008). Outras referências como: (LI et al, 1997) e (TEIXEIRA et al, 2005) também usam esse modelo para uma LFC funcionando em estado permanente.

Esse modelo de circuito equivalente é muito usado pelos engenheiros eletricitas para avaliar o nível dos harmônicos da forma de onda da corrente de entrada em baixa frequência (harmônicos de 60 Hz), ou seja, a corrente antes da ponte de diodos.

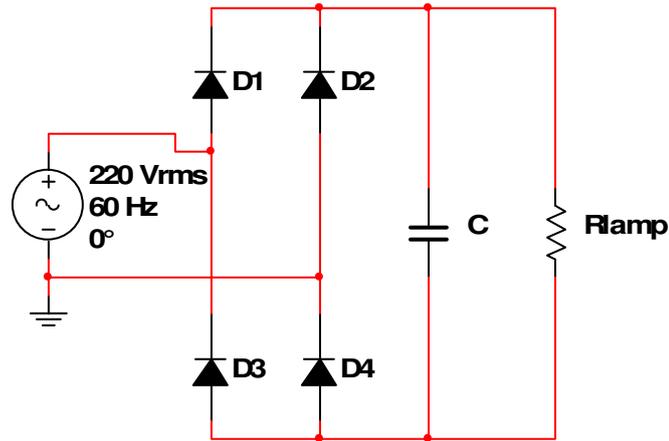
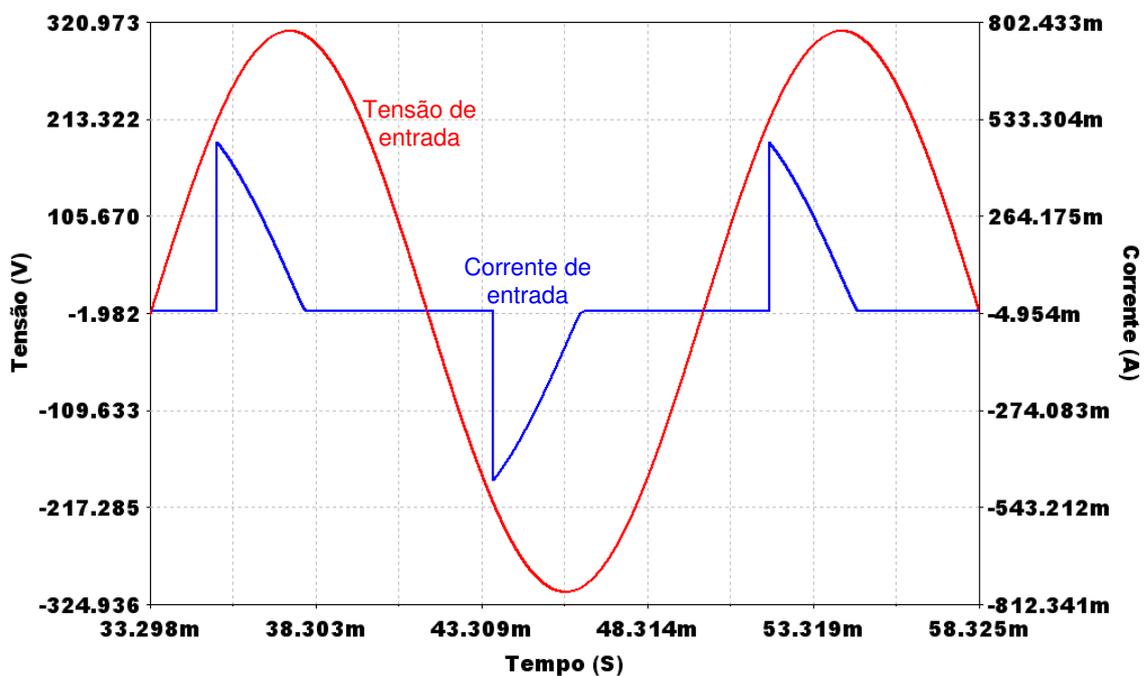
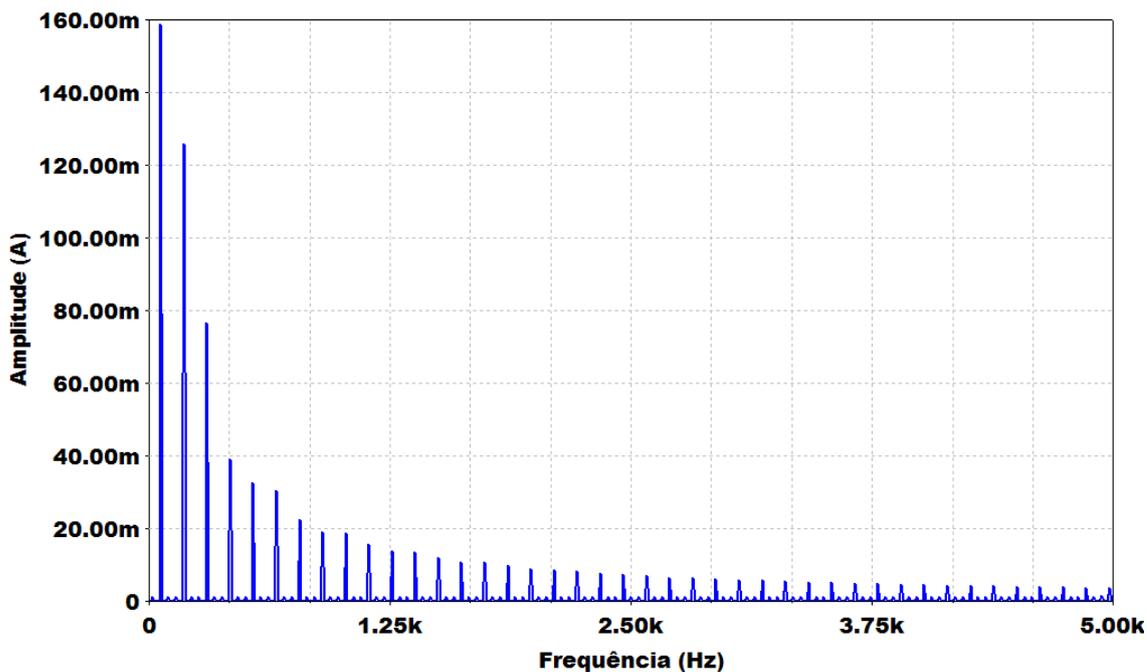


Figura 10 – Circuito equivalente de uma LFC.

Devido ao chaveamento dos diodos no período em que ocorre inversão da tensão de entrada e consequente descarregamento do capacitor do filtro, ocorrem picos de correntes nos diodos que se transformam em vasto espectro no domínio da frequência, ou seja, têm-se a origem de muitos harmônicos. As formas de onda de tensão e corrente de entrada, para o circuito apresentado na Fig.10, são mostradas na Fig. 11.a, bem como o espectro de frequência até a 83^a harmônica da corrente de entrada, Fig. 11.b.



(a)



(b)

Figura 11 – Curvas do modelo equivalente de uma LFC: (a) tensão e corrente; (b) espectro harmônico.

Observando a resposta nos domínios do tempo e da frequência para modelo da LFC verifica-se que esse dispositivo proporciona grande distorção na forma de onda da corrente que por sua vez produz um espectro com vários harmônicos que serão injetados no sistema de distribuição de energia elétrica e poderá provocar muitos problemas advindos dessa característica.

Os harmônicos de ordem mais elevada são fontes de interferência eletromagnética que podem causar mau funcionamento de outros equipamentos, como por exemplo, relés dependentes de pico de corrente ou passagem por zero, podem não operar adequadamente com uma onda distorcida (PIRES, 2006).

Embora o circuito equivalente mostrado na Fig.10, seja bastante usado para modelar o comportamento harmônico das LFCs ele apresenta limitações por não considerar o efeito da contribuição das altas frequências na produção dos harmônicos gerados pela lâmpada. O circuito de chaveamento (inversor), presente no circuito real da lâmpada, produz harmônicos em frequências mais elevadas, normalmente em 30 ou 40 kHz, que aparecem na análise do espectro do modelo citado com amplitude praticamente zero, Fig. 12.

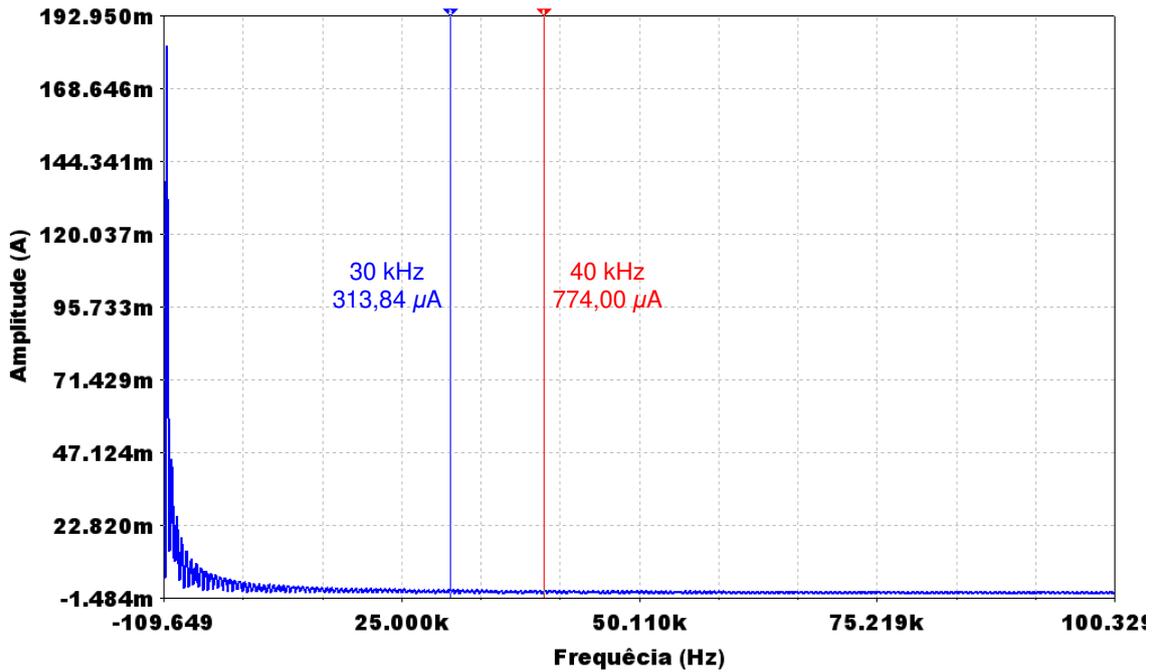


Figura 12 – Espectro hamônico de corrente contendo a faixa de 40 kHz.

Para melhor visualização do espectro na região em torno de 40 kHz foi ampliada a faixa de frequência de 25 a 50 kHz, Fig. 13.

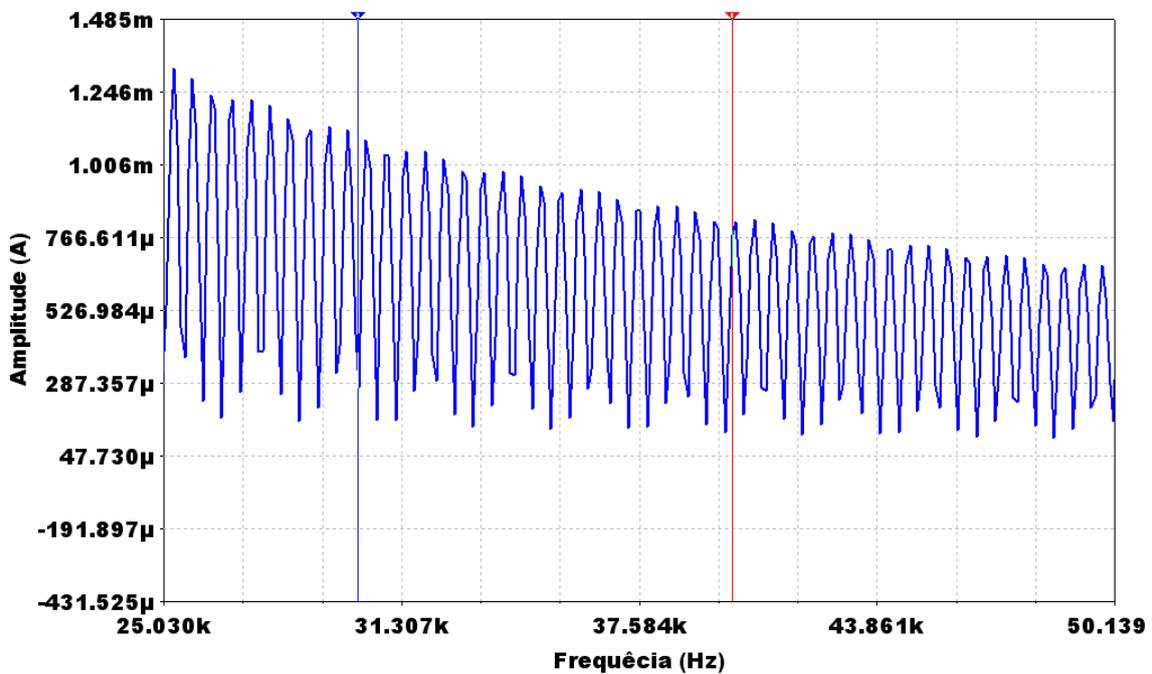


Figura 13 – Detalhe em torno de 40 kHz.

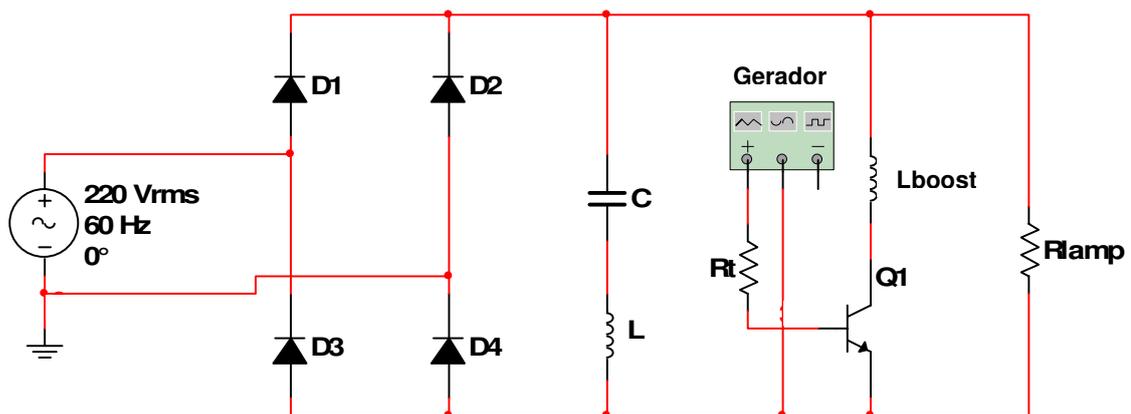
Para considerar o efeito de alta frequência presente no circuito de uma LFC, propõe-se inserir, ao modelo anterior, um circuito de chaveamento para representar o

inversor e elementos que modelam o comportamento do capacitor em alta frequência, ou seja, considerar seu efeito indutivo, como visto na seção 2.1.2.

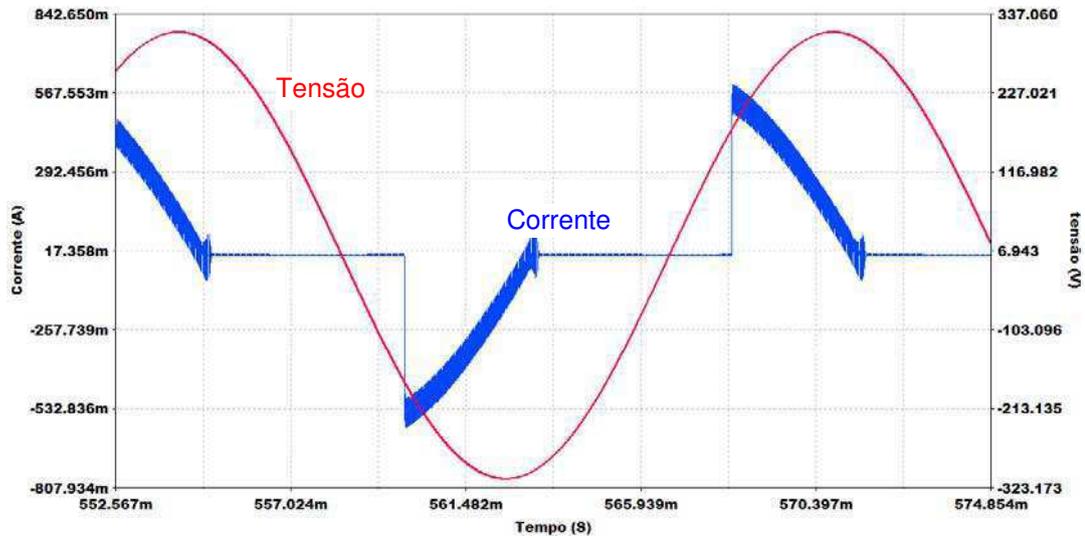
O circuito de chaveamento consiste em um gerador de sinais, que gera uma onda quadrada de frequência elevada, 40 kHz, por exemplo, que aciona um transistor de potência associado a uma indutância que representa a indutância *boost* do circuito de chaveamento. Na Fig. 14 é apresentado o circuito equivalente proposto e as formas de onda da tensão e corrente além do espectro harmônico da corrente de entrada.

Os valores dos componentes do circuito da Fig. 14.a, são:

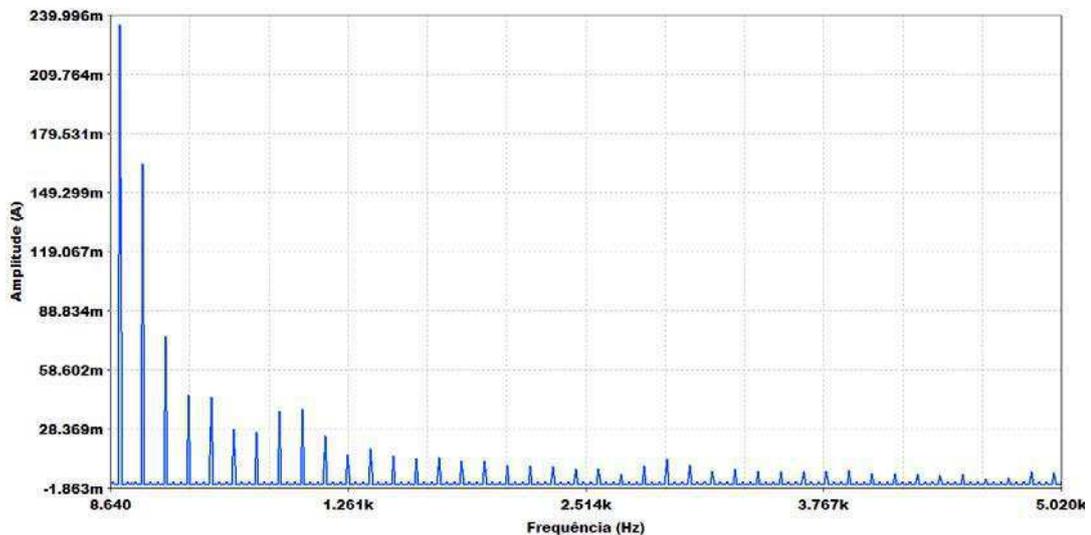
- Ponte de diodos = 1N4007, diodos retificadores;
- $C = 4,7 \mu\text{F}$, valor normalmente usado em LFC;
- $L = 14 \text{ nH}$, indutância do modelo do capacitor;
- $L_{\text{boost}} = 3,4 \text{ mH}$, indutância de chaveamento do inversor de alta frequência;
- $R_t = 10 \text{ k}\Omega$, resistência pra limitar a corrente na base do transistor;
- $Q1 = \text{BJT_NPN}$, transistor de potência;
- $R_{\text{lamp}} = 3,23 \text{ k}\Omega$, resistência equivalente de uma lâmpada de 15 W ($R_{\text{lamp}} = V_{\text{rms}}^2/P$).



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – Circuito equivalente proposto para LFC: (a) circuito; (b) curvas de tensão e corrente; (c) espectro harmônico de corrente.

A diferença entre as curvas apresentadas na Fig. 11.a e Fig. 14.b são os sinais de chaveamento de alta frequência que aparecem sobrepostos ao sinal de baixa frequência (60 Hz) e contribuem fortemente para distorcer ainda mais a onda de corrente. Além disso, faz com que aumente a amplitude na frequência de 30 kHz/40 kHz e seus harmônicos. Esse fato se reflete numa diferença entre a composição dos harmônicos de corrente mostrados nas Figs. 11 e 14. A inclusão do modelo do circuito de chaveamento modificou as amplitudes dos harmônicos de baixa frequência (mostrado nas figuras até 83^a harmônica).

Extraindo o espectro para a faixa de 40 kHz e seu terceiro harmônico (Fig. 15) é possível observar que a amplitude da fundamental e o terceiro harmônico de corrente têm valores bem maiores do que os mostrados na Fig. 12. Esse fato demonstra uma limitação no modelo da LFC usado por vários autores (Fig. 10). A amplitude em 40 kHz, para este modelo, é 58 vezes maior que no caso do modelo mais simplificado.

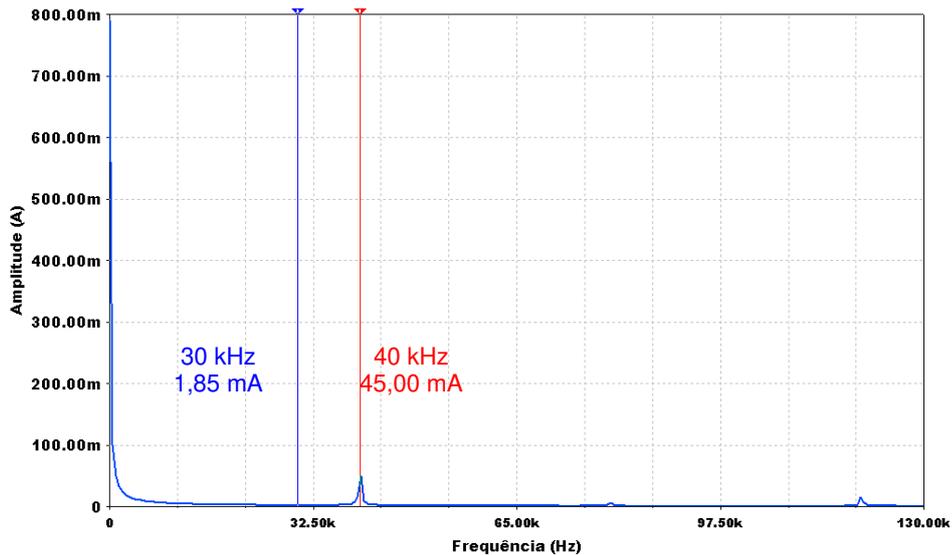


Figura 15 – Espectro contendo a faixa de 40 kHz, para circuito da Fig.14.a.

Para melhor visualização do espectro na região entorno de 40 kHz e visualizar o terceiro harmônico (120 kHz) foi ampliada a faixa de frequência de 25 a 130 kHz, Fig. 16.

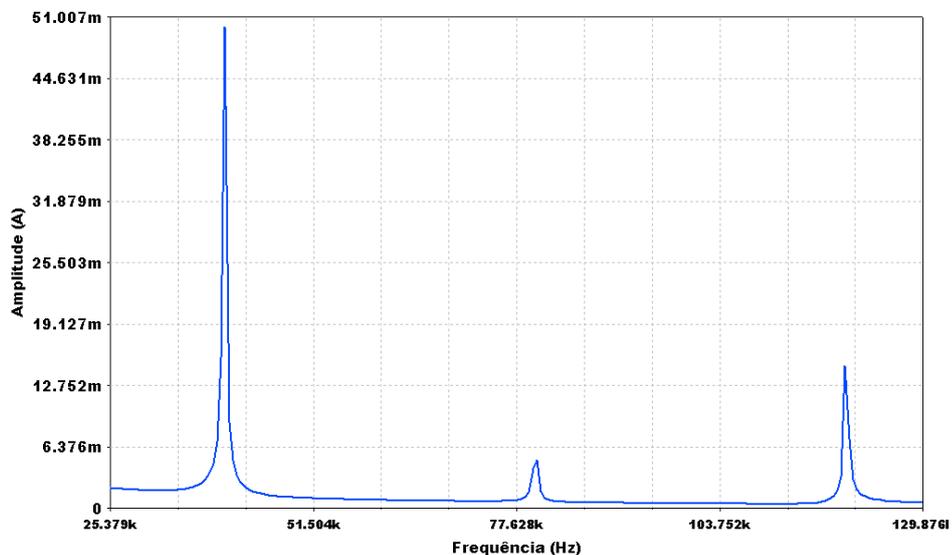


Figura 16 – Detalhe na faixa de 40 a 130 kHz.

Se comparado com as curvas apresentadas em (MONTERO et al, 2005), (TEIXEIRA et al, 2005) e (WEI et al, 2008) o circuito equivalente proposto se aproxima melhor das curvas experimentais. Assim, considerar a LFC apenas como uma resistência pode não ser suficiente para caracterizar bem o valor dos harmônicos gerados por ela.

Todos os gráficos vistos aqui sobre o circuito equivalente da LFC são resultantes de simulações realizadas no *software multisim10*[®], versão estudante disponível no site da *National Instruments*. Não foram feitas medições na faixa de 0 a 5 kHz.

Algumas simulações foram feitas usando o modelo da Fig. 10, com o intuito de verificar qual a influência do valor do capacitor do filtro DC no valor da Distorção Harmônica Total de Corrente (THDI) para os valores sugeridos em (WEI et al, 2008) 4,7 μF – 10 μF . Dentro desse intervalo foram considerados valores comerciais. Além dos sugeridos foram usados valores inferiores a 4,7 μF . Os resultados são apresentados no Quadro 2.2.

Capacitor (μF)	1,0	3,0	3,3	4,0	4,7	5,6	6,8	7,5	8,2	9,0	10
THDI (%)	42,00	81,65	86,33	93,26	99,46	106,13	113,35	114,15	120,85	121,51	128,82

Quadro 2. 2 – Relação entre o valor do capacitor do filtro DC e a THDI.

Com o aumento do valor do capacitor observa-se um aumento na THDI devido ao aumento da amplitude no pico de corrente produzido pelo chaveamento dos diodos no intervalo em que o capacitor se carrega e se descarrega. Portanto, para uma menor THDI deve-se usar um valor pequeno para o capacitor. Porém, para evitar que a tensão no capacitor atinja um valor próximo de zero, o que pode acarretar no não funcionamento ou oscilações (*flickers*) da lâmpada, o valor deste não pode ser muito pequeno.

2.2.5 Vantagens e desvantagens das LFCs

As principais vantagens em se utilizar as LFCs com reator eletrônico integrado são:

- Economia de energia, cerca de 80% em relação às lâmpadas incandescentes;

- Incremento da vida útil das lâmpadas;
- Ausência do efeito estroboscópico e da cintilação;
- Ausência de ruído audível;
- Alimentação múltipla (50 Hz, 60 Hz e tensão contínua);
- Massa e volume menor quando comparadas às fluorescentes tubulares; e
- Custos de instalação e manutenção reduzidos.

Entre as vantagens de se adquirir uma LFC destaca-se a longa vida útil. Esse fato é preponderante para se saber a viabilidade do investimento de se substituir uma lâmpada incandescente (LI) por uma LFC. O número de dias requeridos para o consumidor recuperar o investimento na compra de uma LFC depende dos custos fixo e variável da LFC e da LI. O custo variável depende da vida útil das LIs e LFCs, do número diário de horas de utilização das lâmpadas, do custo do kWh e da potência das lâmpadas. Matematicamente essas variáveis podem ser equacionadas conforme a equação (2.14).

$$\begin{aligned} C_T &= C_F + C_V \\ &= C_F + P \cdot N_h \cdot C_e \cdot N_d. \end{aligned} \quad (2.14)$$

em que:

C_T – custo total da lâmpada e da energia gasta por ela, ao longo de um período de avaliação em (R\$);

C_F – custo fixo da lâmpada em (R\$);

C_V – custo variável, devido ao consumo de energia em (R\$);

P – potência nominal da lâmpada em (kW);

N_h – número de horas por dia que a lâmpada permanece ligada (h/dia);

C_e – custo da energia (R\$/kWh);

N_d – número de dias requeridos para a lâmpada se pagar.

O Cálculo para saber em quanto tempo uma LFC tem seu custo inicial pago é feito pela equação (2.15) (SAMESIMA et al, 2005).

$$N_d = \frac{C_{LFC} - C_{LI}}{N_h C_e (P_{LI} - P_{LFC})}. \quad (2.15)$$

em que:

C_{FLC} – custo da LFC, (R\$);

C_{LI} – custo da LI, (R\$);

P_{LI} – potência da LI, em (kW);

P_{LCF} – potência da LFC, em (kW).

No gráfico da Fig. 17 são mostrados, genericamente, os comportamentos dos custos (fixo + variável) que um consumidor terá, devido ao uso de uma LI ou uma LFC ao longo do tempo. Apesar de uma LFC ter valor inicial elevado após um determinado tempo a LFC tem o valor investido pago e, a partir daí, poderá causar uma economia na conta de energia elétrica do consumidor.

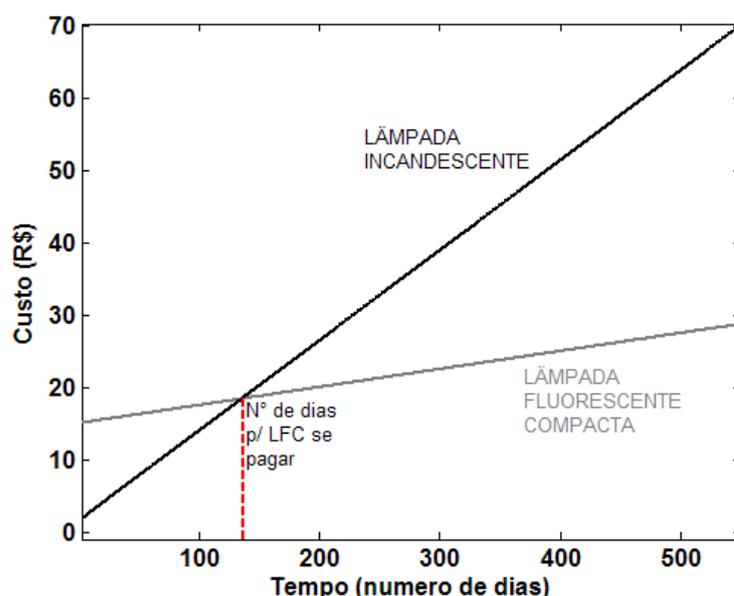


Figura 17 – Curvas de custo de uma LI e uma LFC ao longo da vida útil.

Mais detalhes de quanto se economiza na troca de uma LI por uma LFC pode ser visto em (SAMESIMA et al, 2005).

As lâmpadas fluorescentes compactas consomem menos, mas “poluem” muito mais a rede elétrica. Esta “poluição” certamente se reflete numa maior distorção da tensão presente na rede elétrica, podendo ainda levar ao surgimento de fenômenos ainda mais graves, afetando o funcionamento de outros aparelhos ligados à rede.

As principais desvantagens ao se utilizar as LFCs com reator eletrônico integrado são:

- Geração de harmônicos de alta frequência;

- Interferência eletromagnética conduzida e irradiada;
- São mais caras que as lâmpadas incandescentes;
- Baixo fator de potência e, conseqüente, degradação do espectro das linhas de distribuição de energia elétrica. Existem LFCs com elevado fator de potência (0,92), mas são muito caras e não foram encontradas no comércio local.

As LFCs são cargas não lineares e apresentam características de impedância negativa, o que requer dispositivos que atuem limitando a sua corrente, para evitar a sua destruição por corrente excessiva (BRIOSCHI et al, 1998).

2.2.6 Eficiência energética, qualidade de energia e LFCs

Apesar de não ser o foco principal deste trabalho é importante ressaltar alguns aspectos que relacionam eficiência energética e qualidade de energia com as LFCs. Um questionamento pertinente de se fazer a respeito das LFCs é: elas são realmente eficientes e de boa qualidade do ponto de vista da geração de harmônicos para o sistema elétrico (qualidade de energia)?

Como o conceito de eficiência energética envolve redução de perdas e eliminação de desperdícios, sem nenhuma dúvida as LFCs são dispositivos eficientes. As lâmpadas fluorescentes são superiores quando comparadas com as lâmpadas incandescentes. A eficiência deste tipo de dispositivo diz respeito ao nível de iluminação e é denominada eficiência luminosa, matematicamente definida como a razão entre a iluminância (lumens) pela potência (watts). O mesmo não se pode dizer quanto à qualidade de energia.

Em (PIRES, 2006) são apresentados alguns conceitos para qualidade de energia, entre eles está englobado conceitos de qualidade de tensão e corrente, de potência, de fornecimento e de consumo. O conceito de qualidade de energia deve englobar também a ausência relativa de variações de tensão provocadas pelo sistema da concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, surtos e harmônicos (este último pelo lado do cliente), medidos no ponto de entrega de energia.

Quando se observam os efeitos das lâmpadas fluorescentes sobre a qualidade da energia elétrica do sistema onde elas são empregadas, verifica-se certo comprometimento, devido ao surgimento de distorções indesejadas na rede. Preocupação

semelhante é observada em (TEIXEIRA et al, 2005). Essas distorções são compostas de frequências múltiplas (harmônicos) ou submúltiplos (inter-harmônicos) da fundamental.

A baixa qualidade de energia da LFC está diretamente ligada aos baixos valores do fator de potência e a alta distorção harmônica total nas formas de onda de tensão e, sobretudo de corrente. Quando a carga tem fator de potência menor do que 1, mais corrente é requerida para suprir a mesma quantidade de potência útil. As concessionárias de energia estabelecem que os consumidores, especialmente os que possuem cargas maiores, mantenham os fatores de potência de suas instalações elétricas dentro de um limite mínimo, hoje 0,92, estuda-se aumentar para 0,96. Caso contrário o consumidor será penalizado com cobranças adicionais.

A distorção na forma de onda da corrente é devida, em parte, ao chaveamento da ponte retificadora de onda completa no circuito do reator eletrônico. O retificador conduz apenas quando a tensão instantânea excede a tensão no capacitor de entrada. Isso produz altos picos de corrente de entrada, que por sua vez, produzem distorções no fator de potência e problemas de carregamento, tanto dos condutores fase como neutro das instalações e dos sistemas elétricos.

Os níveis de distorção podem ser quantificados pelo cálculo da distorção harmônica total (THD) e pelo fator de potência.

O valor RMS da corrente de entrada pode ser expresso em função das componentes harmônicas (POMILIO, 2009):

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}. \quad (2.16)$$

Define-se a THDI como sendo a relação entre o valor RMS das componentes harmônicas da corrente e a fundamental:

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}. \quad (2.17)$$

Nos circuitos de cargas não lineares, como é o caso das LFCs, o fator de potência não é calculado apenas levando em consideração o ângulo de defasagem entre

os fasores de tensão e corrente. Deve-se levar em conta o efeito da distorção. Assim, o FP pode ser escrito como:

$$FP = \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{1 + THD^2}}. \quad (2.18)$$

É evidente a relação entre o *FP* e a distorção da corrente absorvida da linha. Neste sentido, existem normas internacionais que regulamentam os valores máximos das harmônicas de corrente que um dispositivo ou equipamento pode injetar na linha de alimentação (POMILIO, 1997).

A forma de onda de corrente normalmente possui uma elevada THD e um espectro harmônico vasto, como pode ser observado na Fig.18.

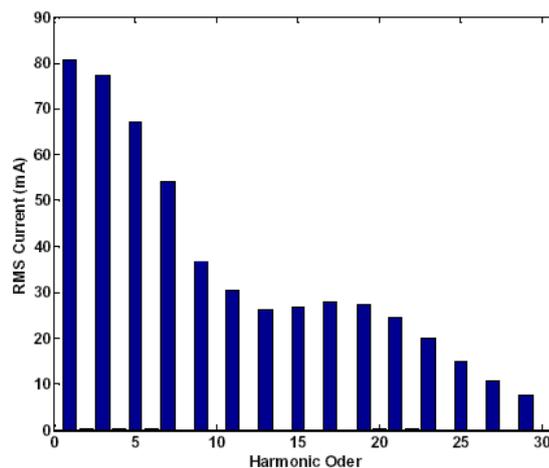


Figura 18 – Espectro de corrente do circuito de uma LFC (WEI et al, 2008).

O espectro mostrado na Fig. 18, leva em consideração apenas os harmônicos da frequência de alimentação da lâmpada, ou seja, os de 60 Hz. Não é informada a contribuição dos harmônicos devido à frequência de funcionamento da lâmpada, normalmente entre 20 e 100 kHz.

As distorções harmônicas de corrente inseridas no sistema devido aos chaveamentos dos circuitos eletrônicos não são abordadas nas embalagens das LFCs.

O uso acentuado de lâmpadas fluorescentes compromete a qualidade da energia elétrica (ASTORGA et al, 2001).

Capítulo 3

3. METODOLOGIA DE ENSAIO

Neste capítulo é descrita a metodologia dos testes realizados: procedimentos e equipamentos de medição, norma usada nos testes, características das lâmpadas testadas, projeto do filtro para mitigar o nível de ruído gerado por elas e a situação brasileira com relação às normas de CEM/IEM.

3.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Os equipamentos de medição exigidos pela norma CISPR 15 para ensaios de IEM conduzida são descritos a seguir:

- ⇒ Fonte de tensão – é a rede elétrica da concessionária, normalmente 127/220 V em 50/60 Hz;
- ⇒ LISN (*Line Impedance Stabilization Network*) – tem a função de isolar eletricamente a rede de alimentação do equipamento sobre teste e manter uma impedância constante. Ele evita que o ruído provocado pela rede chegue ao equipamento sobre teste e que este envie ruído à rede. Assim, se pode medir somente o ruído proveniente do equipamento. O modelo usado é o ETS – EMCO/3810/2, 9 kHz – 30 MHz, 50 Ω 50/250 μ H;
- ⇒ Equipamento sobre teste (EST) – é o objeto de estudo, o qual se deseja verificar os níveis de ruído gerado. Ele é conectado ao LISN por meio de um par de fios flexíveis de 80 cm e do LISN se retira a amostra do ruído produzido pelo equipamento. Neste trabalho o equipamento sobre teste são as lâmpadas fluorescentes compactas.
- ⇒ Analisador de espectro – é o equipamento responsável por medir os níveis de sinal provenientes do EST, em termos de amplitude e frequência. Ele se conecta ao LISN através de um cabo coaxial RG 213 de 50 Ω . A partir deste é possível transferir os dados medidos para

um computador e assim fazer uma análise mais detalhada dos valores medidos. O modelo usado é R&S/FSH3, 100 kHz – 3 GHz.

Dos equipamentos acima talvez o que mereça um pouco mais de atenção seja O LISN por ser o equipamento menos conhecido dos citados.

3.1.1 Rede de estabilização de impedância de linha – LISN

O LISN é efetivamente o equipamento que possibilita a realização de ensaios de CEM/IEM na forma conduzida. Ele tem como primeiro objetivo apresentar uma impedância constante no cabo de saída de energia do produto em toda a faixa de frequência do teste de emissão conduzida. O segundo objetivo do LISN é bloquear as emissões conduzidas que não são advindas do produto que está sendo testado para que apenas as emissões produzidas pelo produto sejam medidas (PAUL, 1992). Na Fig. 19 é apresentado o circuito interno genérico de um LISN conectado a um produto.

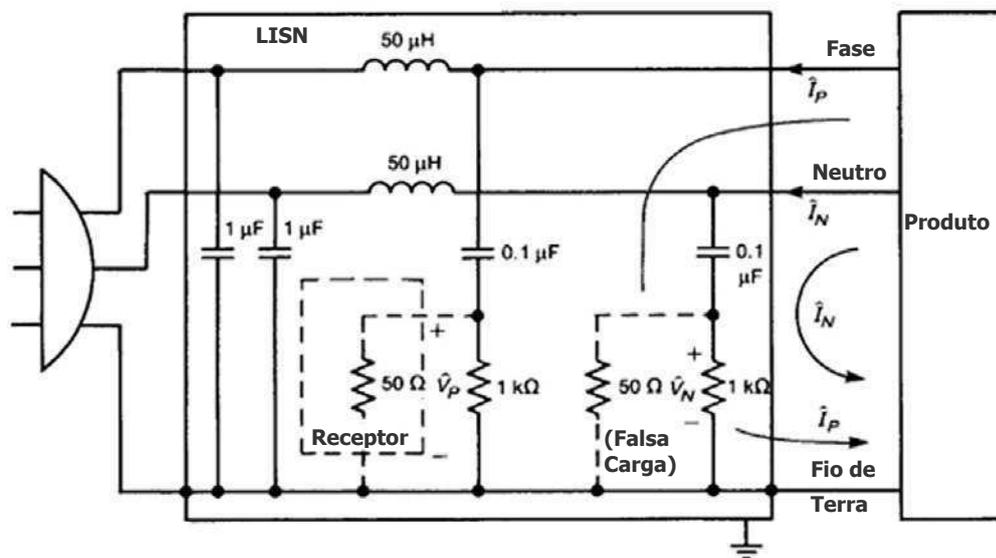


Figura 19 – Ilustração do circuito do LISN.

As correntes de fase \hat{I}_P e de neutro \hat{I}_N estão relacionadas à tensão medida por (PAUL, 1992):

$$\begin{aligned}\hat{V}_P &= 50\hat{I}_P. \\ \hat{V}_N &= 50\hat{I}_N.\end{aligned}\tag{3.1}$$

Na faixa de frequência de medição é assumido que os capacitores do LISN são curtos-circuitos e os indutores são circuitos abertos. Portanto, as tensões medidas estão diretamente relacionadas com as correntes de ruído que saem do produto através dos fios fase e neutro.

É possível decompor essas correntes em uma componente de modo diferencial que flui através do condutor de fase e retorna pelo condutor neutro e uma componente de modo comum que flui através dos condutores fase e neutro e retorna pelo fio de terra, como mostrado na Fig. 20.

$$\begin{aligned}\hat{I}_P &= \hat{I}_C + \hat{I}_D \\ \hat{I}_N &= \hat{I}_C - \hat{I}_D\end{aligned}\quad (3.2)$$

Resolvendo (3.2) para as correntes de modo diferencial e modo comum encontra-se:

$$\begin{aligned}\hat{I}_D &= \frac{1}{2}(\hat{I}_P - \hat{I}_N) \\ \hat{I}_C &= \frac{1}{2}(\hat{I}_P + \hat{I}_N)\end{aligned}\quad (3.3)$$

As tensões medidas em função das correntes \hat{I}_D e \hat{I}_C são:

$$\begin{aligned}\hat{V}_P &= 50(\hat{I}_C + \hat{I}_D) \\ \hat{V}_N &= 50(\hat{I}_C - \hat{I}_D)\end{aligned}\quad (3.4)$$

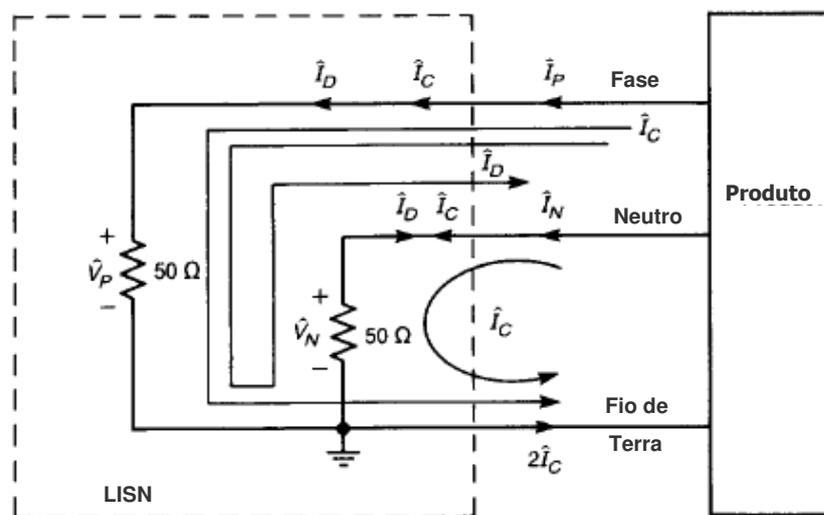


Figura 20 – Contribuições das componentes de corrente de modo diferencial e modo comum na medição de emissão conduzida.

É importante saber que, ao contrário de emissões irradiadas, as correntes de modo comum podem ser da mesma ordem ou maior do que as correntes de modo diferencial em emissões conduzidas. Dessa forma, as contribuições devido a cada corrente se adicionam em \hat{V}_p e se subtraem em \hat{V}_N . Portanto, se as correntes de modo comum e diferencial têm a mesma amplitude, as tensões de fase e neutro não serão as mesmas (PAUL, 1992).

A decomposição das correntes totais em componentes de modo comum e modo diferencial aliada com a percepção que cada elemento de um filtro afeta uma e apenas uma dessas componentes, é a chave para o projeto de filtros eficazes na redução das emissões de forma que o produto cumpra os limites regulamentares.

3.1.2 Filtros

O filtro é um componente passivo, composto de elementos séries de alta impedância (indutores) e paralelos de baixa impedância (capacitores), que formam o circuito, em função da faixa de operação, destinado a atenuar a interferência eletromagnética conduzida de origem interna e externa ao equipamento (SANCHES, 2003).

Ele proporciona a compatibilidade eletromagnética dos equipamentos, do ponto de vista da interferência conduzida, isto é, o equipamento não interferirá nos equipamentos vizinhos e também não sofrerá interferência destes.

Os filtros são tipicamente caracterizados por sua perda de inserção (IL), normalmente indicada em dB. Considerando a Fig. 21, a tensão na carga sem o filtro, é indicada por $\hat{V}_{L,w0}$ e a tensão na carga com o filtro, é indicada por $\hat{V}_{L,w}$, a perda de inserção do filtro é definida como:

$$\begin{aligned}
 IL_{dB} &= 10 \log \left(\frac{P_{L,w0}}{P_{L,w}} \right) \\
 &= 10 \log \left(\frac{V_{L,w0}^2 / R_L}{V_{L,w}^2 / R_L} \right) \\
 &= 20 \log \left(\frac{V_{L,w0}}{V_{L,w}} \right).
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

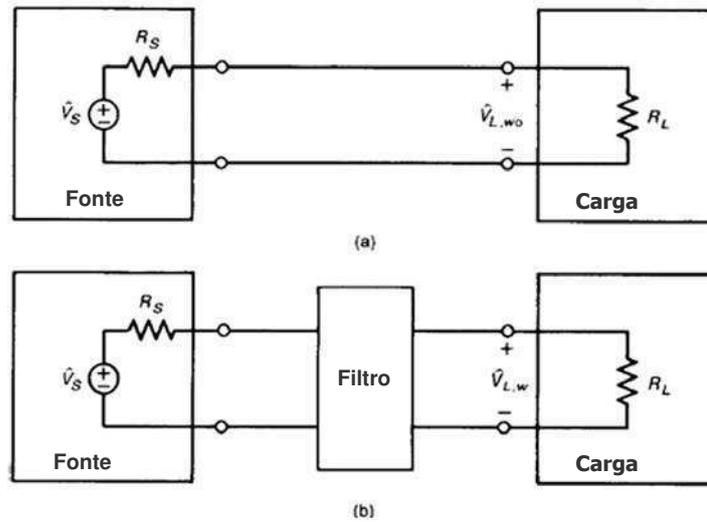


Figura 21 – Definição das perdas de inserção de um filtro: (a) tensão na carga sem o filtro; (b) tensão na carga com o filtro.

A perda de inserção permite a redução da tensão da carga, na frequência de interesse, devido à inserção do filtro. Algumas configurações de filtros simples são mostradas na Fig. 22.

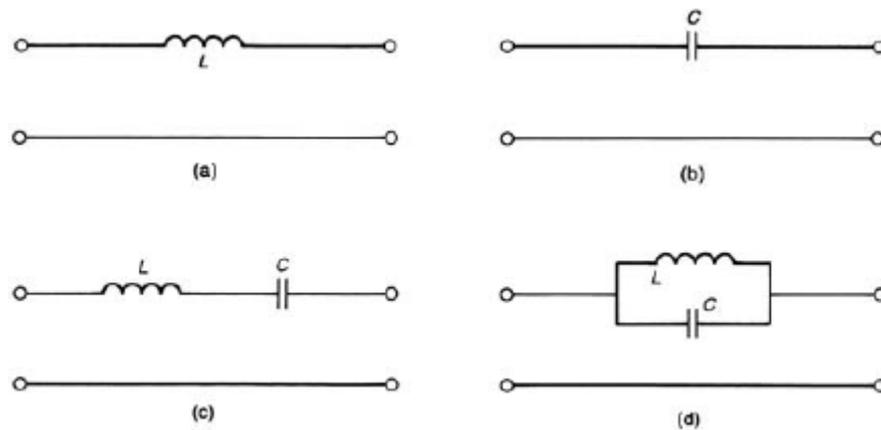


Figura 22 – Quatro filtros simples: (a) passa-baixas; (b) passa-altas; (c) passa-faixa; (d) rejeita-faixa.

A título de ilustração, vamos determinar a perda de inserção do filtro passa-baixas simples da Fig. 22.a. sendo,

$$\hat{V}_{L,wo} = \frac{R_L}{R_S + R_L} \hat{V}_S. \quad (3.6)$$

A tensão na carga com a inserção do filtro é

$$\begin{aligned}\hat{V}_{L,w} &= \frac{R_L}{R_S + j\omega L + R_L} \hat{V}_S \\ &= \frac{R_L}{R_L + R_S} \frac{1}{1 + j\omega L / (R_S + R_L)} \hat{V}_S.\end{aligned}\quad (3.7)$$

As perdas de inserção é a razão de (3.6) e (3.7), assim,

$$IL_{dB} = 20 \log \left| 1 + \frac{j\omega L}{R_S + R_L} \right|. \quad (3.8)$$

Sendo a perda de inserção de um filtro dependente das impedâncias da fonte e da carga, se faz $R_S = R_L = 50 \Omega$. A “impedância de carga” corresponde à impedância de 50Ω do LISN entre a fase e o terra e entre o neutro e o terra (Fig. 23.c). No entanto, em uma instalação típica R_L é a impedância vista olhando para trás da rede de distribuição de energia. É altamente duvidoso que ela seja 50Ω .

Além disso, há a preocupação com as duas correntes que devem ser reduzidas, de modo comum e modo diferencial. As correntes de modo diferencial e comum na saída do produto (normalmente a entrada para fornecer a alimentação do produto) são denotadas como \hat{I}_D e \hat{I}_C . As correntes na entrada do LISN (na saída do filtro) são denotadas como correntes primárias \hat{I}'_D e \hat{I}'_C . As correntes \hat{I}'_D e \hat{I}'_C dão as tensões medidas, Fig. 22.c.

$$\begin{aligned}\hat{V}_P &= 50(\hat{I}'_C + \hat{I}'_D) \\ \hat{V}_N &= 50(\hat{I}'_C - \hat{I}'_D)\end{aligned}\quad (3.9)$$

Os filtros para bloquear IEM são um pouco mais complexos do que aqueles mostrados na Fig.22. Existem configurações destinadas ao bloqueio da IEM conduzida devido às correntes de modo diferencial ou modo comum ou ainda de ambas, usados nos casos em que se detecta qual componente de corrente é mais preponderante na geração do ruído. Normalmente estes filtros possuem a mesma característica: são filtros passa-baixas LC de ordem maior ou igual a 2. As topologias são mostradas na Fig. 23.

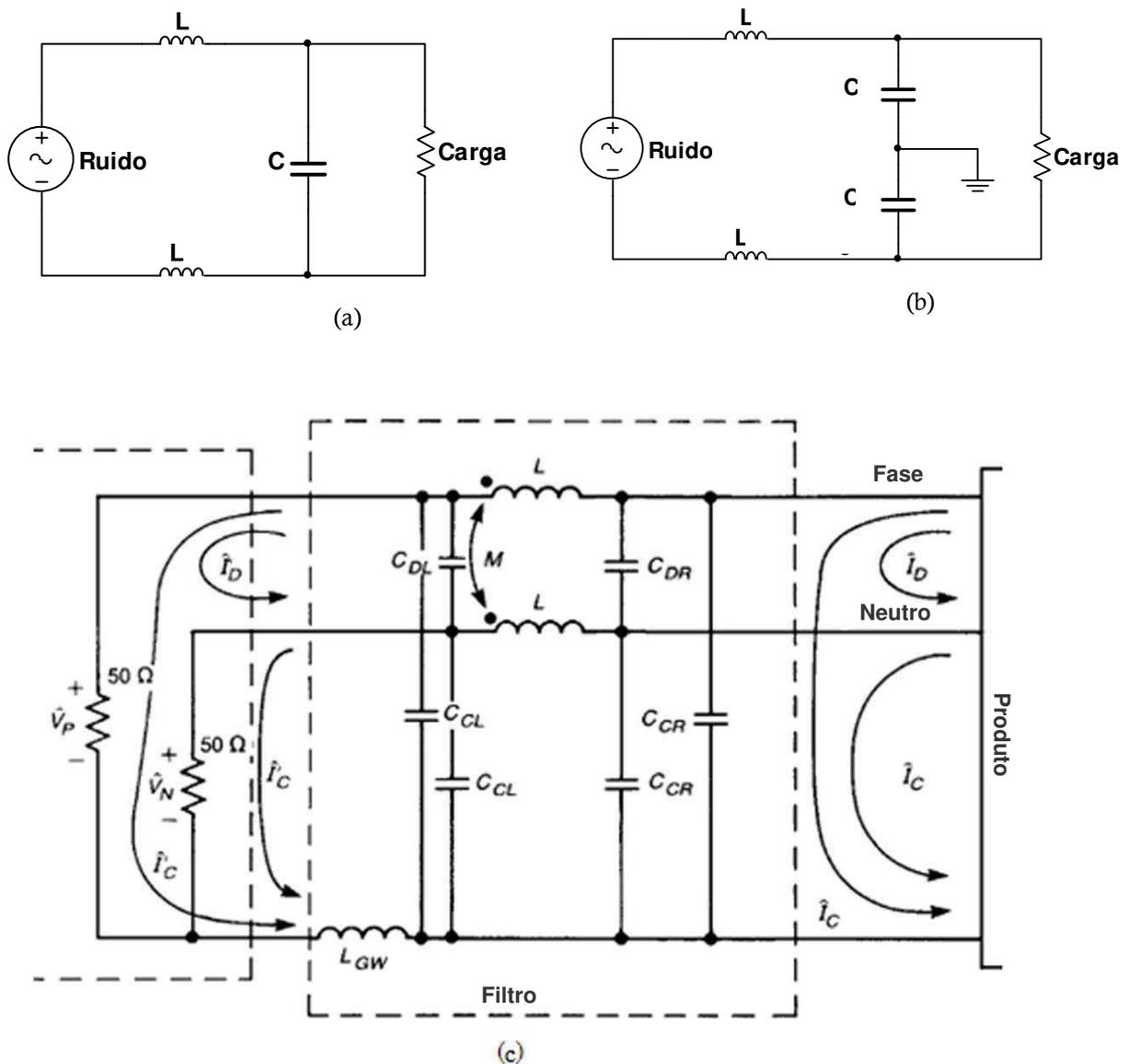


Figura 23 – Topologias de filtros para bloqueio de correntes: (a) de modo diferencial; (b) de modo comum; (c) de modo diferencial e modo comum.

A propósito da Fig. 23.c, os capacitores denotados por C_{DL} e C_{DR} são usados para desviar correntes de modo diferencial e o *choke* para bloqueio das correntes de modo comum.

O modelo equivalente do circuito do filtro e do LISN para as correntes de modo comum e modo diferencial são apresentados na Fig. 24, (PAUL, 1992).

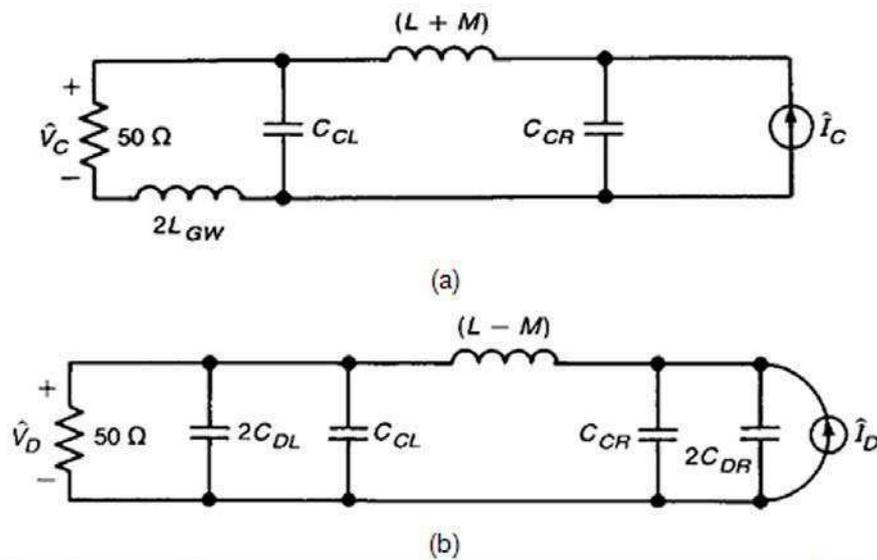


Figura 24 – Circuito equivalente do filtro e do LISN: (a) para corrente de modo comum; (b) para corrente de modo diferencial.

É possível mostrar que o indutor do fio de terra (L_{GW}), Fig. 24.a, tem grande importância no bloqueio da corrente, mas pode ser retirado do circuito e ainda assim se obter um bom nível de bloqueio apenas usando o capacitor C_{CL} . Considerando o indutor de terra e o capacitor C_{CL} , obtêm-se a relação entre a corrente pelo *choke* e o LISN: (PAUL, 1992).

$$\frac{I_{LISN}}{I_{Choke}} = \frac{1/j\omega C_{CL}}{50 + j\omega 2L_{GW} + 1/j\omega C_{CL}} \quad (3.10)$$

$$= \frac{1}{1 - \omega^2 2L_{GW} C_{CL} + j\omega 50 C_{CL}}$$

A frequência de bloqueio começa em

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L_{GW} C_{CL}}} \quad (3.11)$$

A partir de f_0 a atenuação cai a -40 dB/década. Retirando o indutor à relação entre a corrente pelo *choke* e o LISN, fica:

$$\frac{I_{LISN}}{I_{Choke}} = \frac{1/j\omega C_{CL}}{50 + 1/j\omega C_{CL}} \quad (3.12)$$

$$= \frac{1}{1 + j\omega 50 C_{CL}}.$$

A frequência de bloqueio nessa situação é

$$f_1 = \frac{1}{2\pi 50 C_{CL}}. \quad (3.13)$$

A partir daí a atenuação cai a -20 dB/década, ou seja, o capacitor C_{CL} somente tem efeito no bloqueio do ruído para frequências acima de f_1 .

Quando se faz a mesma análise para o modelo da Fig. 24.b observa-se que o capacitor C_{DL} é mais importante que o capacitor C_{CL} para desviar a corrente de modo diferencial e o *choke* de modo comum é indiferente a corrente de modo diferencial quando $L = M$.

3.2 NORMAS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA PARA LFCs

Atualmente, diversos comitês normativos estão trabalhando na formulação de normas relativas à IEM e a CEM, a exemplo do CISPR, IEC, ITU e FCC.

Os principais objetivos dessas normas são: impor limites para as emissões (conduzida e irradiada) e estabelecer um nível mínimo de imunidade.

As normas para IEM e CEM utilizadas em um determinado país são geralmente formuladas por agências não governamentais, ou seja, comitês formados pelas indústrias e por representantes do governo.

Embora os Estados Unidos (EUA) e a Comunidade Europeia (CE) estejam mais ativamente empenhados na produção de normas para IEM e CEM, outros países também estão caminhando para isso. É o caso do Canadá, por intermédio do *Canadian Standards Association* (CSA), e o México, que segue as mesmas normas dos Estados Unidos da América (EUA) com pequenas modificações. Os demais países do mundo geralmente seguem as prescrições da CE. A CE adota as normas que são recomendadas pelo CISPR/IEC.

3.2.1 Norma – CISPR 15 (ou EN 55015)

A norma internacional CISPR 15 (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*) trata dos limites e métodos de medição das perturbações rádio-elétricas produzidas pelos aparelhos elétricos de iluminação e similares.

A CISPR 15 (ou EN 55015) aplica-se à emissão (irradiada e conduzida) de perturbações de radiofrequência provenientes de:

- Todo o equipamento de iluminação com a função primária de gerar e/ou distribuir luz, dirigida a propósitos de iluminação, e projetado para conexão em fontes elétricas de baixa tensão ou que funcionem a bateria;
- Partes de um equipamento multifuncional, onde uma das funções primárias é a iluminação;
- Equipamentos auxiliares e independentes, usados exclusivamente para iluminação;
- Equipamentos de radiação UV (Ultravioleta) e IR (Infravermelho);
- Sinais de advertência néon;
- Iluminação destinada ao uso ao ar livre;
- Iluminação de transporte (instalado em ônibus e trens).

Este padrão não se aplica as seguintes fontes:

- Equipamento de iluminação que opera nas faixas de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), como definido na Resolução 63 (1979), Regulação de Rádio do ITU;
- Equipamentos de iluminação para aeronaves e aeroportos;
- Equipamentos para o qual as exigências de CEM na faixa de radiofrequência são explicitamente formuladas em outros padrões do IEC ou CISPR;

A recomendação a que se refere à norma CISPR 15 cobre a faixa de frequência de 9 kHz a 400 GHz.

Equipamentos multifuncionais sujeitos simultaneamente a diferentes cláusulas desta norma e/ou outras serão submetidos às providências de cada cláusula/norma com as funções pertinentes em operação.

Os limites desta norma foram determinados em uma base probabilística para manter a supressão de perturbações dentro de limites economicamente razoáveis enquanto ainda é alcançando um nível adequado de proteção a interferência e compatibilidade eletromagnética. Em casos excepcionais, podem ser exigidas providências adicionais (CISPR 15, 2007).

Os níveis máximos de IEM conduzida para as LFCs são mostrados no Quadro 3.1. A representação gráfica desses níveis pode ser vista na Fig. 25, com o eixo das ordenadas (eixo-y) na escala $\text{dB}\mu\text{V}$ e o eixo das abscissas (eixo-x) na escala semi-logarítmica em MHz.

Faixa de frequência	Limites [$\text{dB}\mu\text{V}$]	
	Quase-pico	Média
9 kHz a 50 kHz	110	-
50 kHz a 150 kHz	90 a 80*	-
150 kHz a 0,5 MHz	66 a 56*	56 a 46*
0,5 MHz a 5,0 MHz	56	46
5,0 MHz a 30 MHz	60	50

* o limite diminuí linearmente com o logaritmo da frequência na faixa de 50 kHz a 150 kHz e de 150 kHz a 0,5 MHz.

Quadro 3. 1 – Níveis máximos permitidos para as LFCs (segundo a CISPR 15)

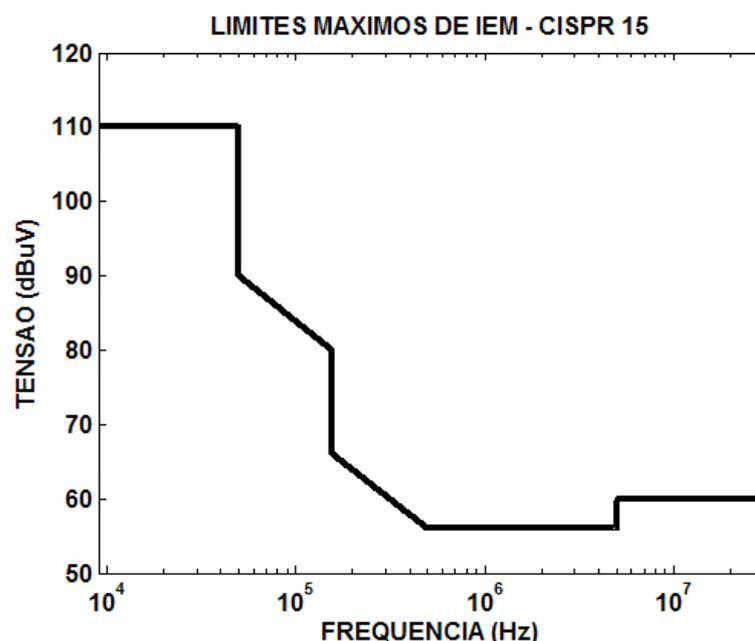


Figura 25 – Limites para IEM conduzida - norma CISPR 15 (EN 55015).

3.2.2 Situação brasileira

De acordo com a resolução N° 444 da ANVISA, de 31/08/1999, os EEM comercializados no Brasil devem estar de acordo com as prescrições da NBR/IEC 60601-1, que traz as prescrições gerais para segurança de equipamentos eletromédicos, e as normas técnicas particulares brasileiras NBR/IEC 60601-2.

A Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética (ABRICEM) é uma das associações cujos trabalhos estão ligados as questões de IEM/CEM. A ABRICEM foi fundada em 18/05/1989 por iniciativa do COBEI/ABNT apoiada por 12 empresas que se tornaram também fundadoras. Essas empresas vislumbraram na época a necessidade de que o Brasil passasse a tratar das questões de CEM de uma forma mais sistematizada em nível nacional, a fim de que não se chegasse definitivamente a uma situação de poluição eletromagnética crônica e de difícil solução.

O órgão responsável por atestar a conformidade dos equipamentos eletroeletrônicos no Brasil é o INMETRO, porém ainda não se segue uma norma mandatária (nacional ou internacional) no que se refere à interferência eletromagnética, seja ela conduzida ou irradiada, para os equipamentos de iluminação.

O INMETRO, que atesta a marca de conformidade brasileira, possui apenas normas que se aplicam a reatores para lâmpadas fluorescentes que atendem aos requisitos de segurança NBR 14538/JUNHO 2000 (EN 60928), desempenho NBR 14539/JUNHO 2000 (EN 60929) e a terminologia usada em CEM/IEM NBR 5464/MARÇO 1981.

A NBR 8184/SETEMBRO 1983 trata da medição de rádio interferência em lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico ou magnético, mas não trata da IEM produzida por LFCs. Assim, os fabricantes não precisam atender normas referentes a CEM nos seus produtos vendidos no Brasil e o consumidor brasileiro, assim como, os sistemas de distribuição de energia elétrica, ficam dependentes de produtos que podem provocar interferência eletromagnética em outros dispositivos e poluir ainda mais o espectro de frequência da rede de distribuição elétrica.

O REGULAMENTO DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DE LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS COM REATOR INTEGRADO de 09/09/2006 recomenda, mas não exige, que os fabricantes e importadores de lâmpadas PLs (ou LFCs) submetam seus produtos aos testes de compatibilidade eletromagnética

para obterem a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, aposta pelo PROCEL e INMETRO.

Simplemente as lâmpadas não aprovadas, ou que não forem submetidas ao ensaio de emissão eletromagnética conduzida, deverão exibir na embalagem ou em local visível a frase: **“Esta lâmpada pode causar interferência em equipamentos eletroeletrônicos”**, sem nenhuma outra segurança para o consumidor (PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM, 2006).

A portaria interministerial N° 132, de 12 de junho de 2006 instituiu o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE, com a finalidade de elaborar regulamentação específica para cada tipo de aparelho e máquina consumidora de energia e estabelecer o Programa de Metas com indicação da evolução dos níveis a serem alcançados para cada equipamento regulamentado (PORTARIA INTERMINISTERIAL, 2006). Esse comitê aprovou a regulamentação específica para lâmpadas fluorescentes compactas fabricadas no Brasil ou importadas no que diz respeito aos índices mínimos de eficiência energética, mas não especifica quais os níveis de interferência eletromagnética que esse tipo de equipamento deve obedecer nem quais normas, relativo à compatibilidade eletromagnética, elas devam seguir para serem comercializadas no Brasil. Portanto, ainda não se tem, no Brasil, norma específica que trate dos níveis máximos de interferência eletromagnética exigidos por lei que as lâmpadas fluorescentes compactas devam obedecer.

3.3 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

O procedimento de medição segue as especificações da norma CISPR 15. Nela é especificado que as medições devam ser feitas em laboratório a temperatura ambiente na faixa de 15 a 25 °C; a tensão de alimentação pode variar $\pm 2\%$ do seu valor nominal. Não é feita nenhuma observação ou exigência a respeito da qualidade da forma de onda da tensão, ou seja, não é exigida uma THD máxima da onda de tensão; as lâmpadas devem ter um consumo de 100 horas; antes de começar a realizar as medições as lâmpadas devem passar 30 minutos ligadas, ininterruptamente, para estabilizarem; a conexão entre o LISN e o EST deve ser feita com cabo flexível de três condutores com comprimento de 0,8 m; a conexão entre o LISN e analisador de espectro deve ser feita por meio de um cabo coaxial de 50 Ω ; a lâmpada/luminária deve ficar a 0,4 m de altura

de um plano de terra metálico de 2 m x 2 m. A norma não exige que o ambiente de medição seja isolado eletromagneticamente, ou seja, para o teste de emissão conduzida não é necessário uma câmara anecóica ou similar.

Para garantir que o ruído medido seja proveniente somente das lâmpadas, as medições foram realizadas com o mínimo de equipamentos elétricos conectados à rede, ou seja, a iluminação do laboratório, o ar condicionado, os estabilizadores permaneceram desligados. Esse procedimento não é exigido na norma.

A montagem para realizar a medição de IEM proveniente de LFCs é composta por quatro equipamentos: Fonte de alimentação, LISN, analisador de espectro e o equipamento sobre teste. É possível, alternativamente, usar um computador para coleta e tratamento dos dados provenientes do analisador de espectro e, posteriormente, traçá-los em gráficos de curvas. Na Fig. 26 é apresentado o diagrama esquemático para medição da IEM proveniente de LFCs utilizando o sistema de aquisição e tratamento dos dados por computador (FERREIRA et al, 2009). Outro item presente na montagem é o plano terra.



Figura 26 – Montagem para medição da IEM conduzida - norma CISPR 15 (EN 55015).

Como a faixa de frequência a ser medida é muito grande (9 kHz a 30 MHz) e o analisador de espectro possui limitações quanto à quantidade de pontos que são amostrados e apresentados na tela, dividiu-se essa faixa em 13 trechos: 100 – 400 kHz, 400 – 700 kHz, 700 kHz – 1 MHz, 1 – 1,5 MHz, 1,5 – 2 MHz, 2 – 2,5 MHz, 2,5 – 3 MHz, 3 – 5 MHz, 5 – 10 MHz, 10 – 15 MHz, 15 – 20 MHz, 20 – 25 MHz e 25 – 30 MHz. Com isso se consegue maior resolução do sinal medido.

Uma vez montado o circuito mostrado na Fig. 26 e seguindo os procedimentos acima, o ensaio pode ser realizado.

No caso em que se deseja realizar medições com mais de uma lâmpada basta substituir a luminária, que suporta uma única lâmpada, pela correspondente que suporta várias lâmpadas. As lâmpadas devem funcionar simultaneamente.

Foram realizados ensaios com as luminárias/lustres que possuem três lâmpadas conectadas com fios de comprimento (C) de 0 e 30 cm e com cinco lâmpadas conectadas com fios de comprimento de 50 cm. Em cada ensaio a respectiva luminária (lustre) foi conectada ao LISN a partir da distância recomendada pela norma (0,8 m), ou seja, do LISN ao ponto de alimentação há uma distância de 0,8 m, conforme o esquema mostrado na Fig. 27 para o caso do lustre com cinco lâmpadas. Essas duas configurações foram escolhidas por serem mais comuns em ambientes residenciais e comerciais, conforme nossas observações.

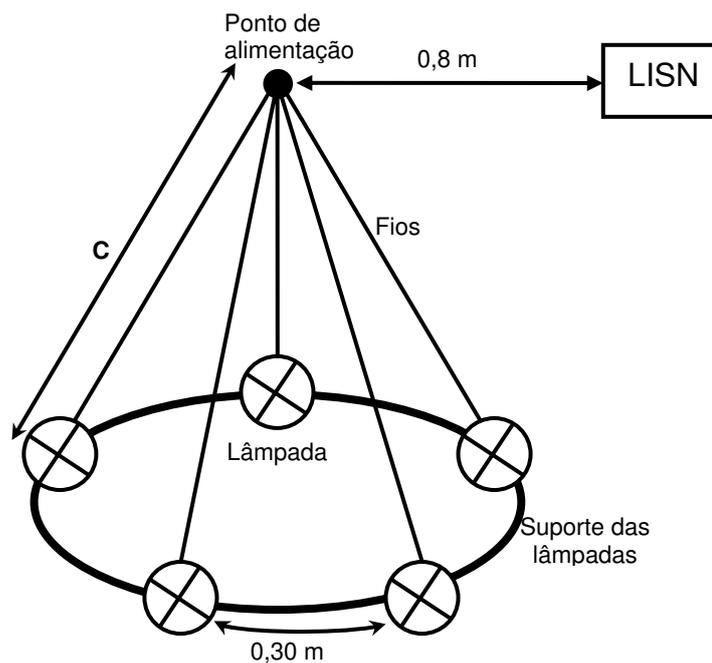


Figura 27 – Representação da montagem para lâmpadas conectadas com fio de comprimento C.

O circuito elétrico equivalente da montagem vista na Fig. 27, que têm todas as lâmpadas ligadas em paralelo, é mostrado na Fig. 28. Nele as lâmpadas são representadas como fontes de ruído alternado (v_1, v_2, v_3, v_4 e v_5) na frequência de 40 kHz, frequência de funcionamento das lâmpadas. Também são representadas as impedâncias

do par de fios (Z_{fio}) e das lâmpadas (Z_{lamp}) além da resistência do LISN (R_{LISN}). Nesse modelo desprezou-se a resistência dos fios que conectam as lâmpadas ao LISN. À distância (C) de cada lâmpada para o LISN é a mesma. Essa figura não está em escala.

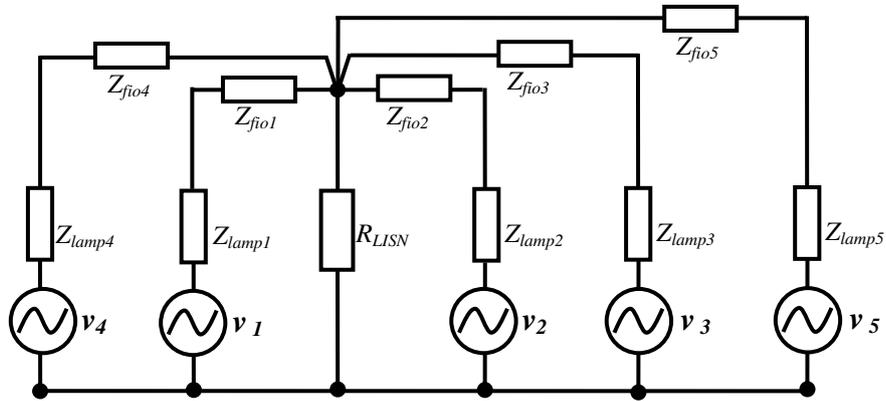


Figura 28 – Circuito equivalente da montagem vista na Fig. 27.

Com o intuito de verificar a contribuição total das lâmpadas (fontes de ruído) na tensão medida, no LISN foi calculada as contribuições individuais de cada fonte de ruído usando o teorema da superposição. Para efeito de simplificação, apenas três lâmpadas serão usadas na análise do circuito equivalente da Fig. 28. No final será mostrado que o procedimento de cálculo poderá ser usado para cinco ou n lâmpadas.

Pelo teorema da superposição de tensão, a contribuição total de n fontes de tensão será a soma das contribuições individuais de cada fonte, sendo que para calcular a contribuição individual todas as outras fontes devem ser curto-circuitadas. Assim, a contribuição da fonte v_1 pode ser calculada analisando o circuito da Fig. 29.

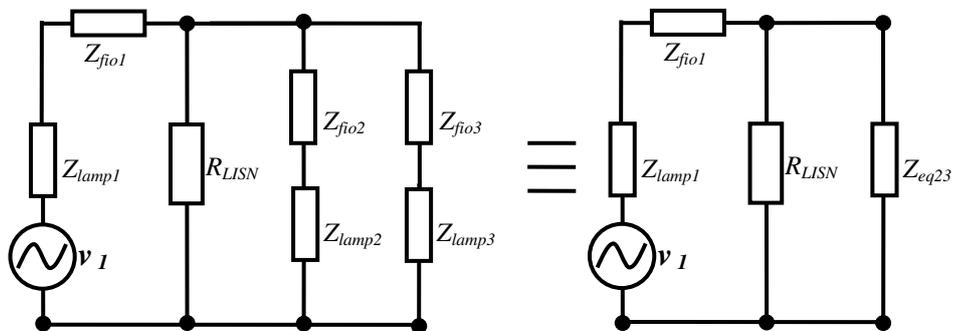


Figura 29 – Circuito equivalente para calcular a contribuição da fonte v_1 .

em que,

$$Z_{eq23} = \frac{(Z_{fio2} + Z_{lamp2})(Z_{fio3} + Z_{lamp3})}{(Z_{fio2} + Z_{lamp2}) + (Z_{fio3} + Z_{lamp3})}. \quad (3.14)$$

A tensão no LISN devido à fonte v_1 é

$$v'_{LISN} = \frac{R_{LISN} // Z_{eq23}}{R_{LISN} // Z_{eq23} + (Z_{fio1} + Z_{lamp1})} v_1.$$

$$v'_{LISN} = \frac{Z'_{eq}}{Z'_{eq} + (Z_{fio1} + Z_{lamp1})} v_1. \quad (3.15)$$

em que,

$$R_{LISN} // Z_{eq23} = Z'_{eq} = \frac{R_{LISN} Z_{eq23}}{R_{LISN} + Z_{eq23}}. \quad (3.16)$$

Para contabilizar a contribuição da fonte v_2 tem-se o circuito da Fig. 30.

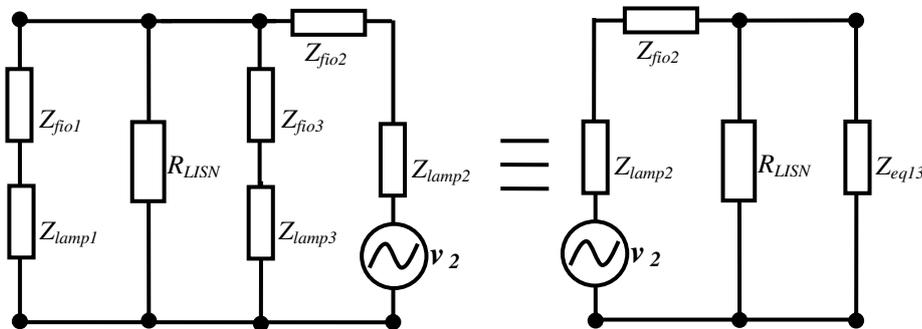


Figura 30 – Circuito equivalente para calcular a contribuição da fonte v_2 .

em que,

$$Z_{eq13} = \frac{(Z_{fio1} + Z_{lamp1})(Z_{fio3} + Z_{lamp3})}{(Z_{fio1} + Z_{lamp1}) + (Z_{fio3} + Z_{lamp3})}. \quad (3.17)$$

A tensão no LISN devido à fonte v_2 é

$$v''_{LISN} = \frac{R_{LISN} // Z_{eq13}}{R_{LISN} // Z_{eq13} + (Z_{fio2} + Z_{lamp2})} v_2.$$

$$v_{LISN}'' = \frac{Z_{eq}''}{Z_{eq}'' + (Z_{fio2} + Z_{lamp2})} v_2. \quad (3.18)$$

em que,

$$R_{LISN} // Z_{eq13} = Z_{eq}'' = \frac{R_{LISN} Z_{eq13}}{R_{LISN} + Z_{eq13}}. \quad (3.19)$$

A contribuição da fonte v_3 vem da análise do circuito da Fig. 31.

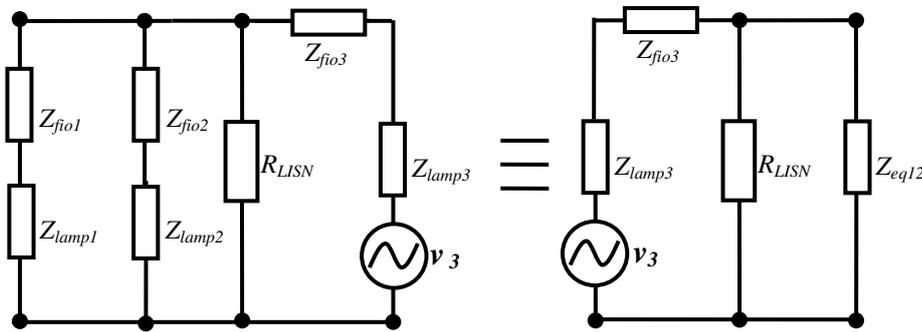


Figura 31 – Circuito equivalente para calcular a contribuição da fonte v_3 .

em que,

$$Z_{eq12} = \frac{(Z_{fio1} + Z_{lamp1})(Z_{fio2} + Z_{lamp2})}{(Z_{fio1} + Z_{lamp1}) + (Z_{fio2} + Z_{lamp2})}. \quad (3.20)$$

A tensão no LISN devido à fonte v_3 é

$$v_{LISN}''' = \frac{R_{LISN} // Z_{eq12}}{R_{LISN} // Z_{eq12} + (Z_{fio3} + Z_{lamp3})} v_3. \quad (3.21)$$

$$v_{LISN}''' = \frac{Z_{eq}'''}{Z_{eq}''' + (Z_{fio3} + Z_{lamp3})} v_3.$$

em que,

$$R_{LISN} // Z_{eq12} = Z_{eq}''' = \frac{R_{LISN} Z_{eq12}}{R_{LISN} + Z_{eq12}}. \quad (3.22)$$

Logo, a tensão total de ruído medida no LISN é:

$$\begin{aligned}
 v_{TLISN} &= v'_{LISN} + v''_{LISN} + v'''_{LISN} \\
 &= \frac{Z'_{eq}}{Z'_{eq} + (Z_{fio1} + Z_{lamp1})} v_1 + \frac{Z''_{eq}}{Z''_{eq} + (Z_{fio2} + Z_{lamp2})} v_2 + \frac{Z'''_{eq}}{Z'''_{eq} + (Z_{fio3} + Z_{lamp3})} v_3.
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Como o fio que conecta as lâmpadas é o mesmo, ou seja, têm as mesmas dimensões, $Z_{fio1} = Z_{fio2} = Z_{fio3} = Z_{fio}$ e sendo as lâmpadas iguais, ou seja, de mesma potência e mesma marca, $Z_{lamp1} = Z_{lamp2} = Z_{lamp3} = Z_{lamp}$,

$$\begin{aligned}
 Z_{eq23} = Z_{eq13} = Z_{eq12} = Z_{eq} &= \frac{Z_{fio} + Z_{lamp}}{2} \\
 e \\
 Z'_{eq} = Z''_{eq} = Z'''_{eq} &= \frac{R_{LISN} (Z_{fio} + Z_{lamp})/2}{R_{LISN} + (Z_{fio} + Z_{lamp})/2} = \frac{R_{LISN} (Z_{fio} + Z_{lamp})}{2R_{LISN} + (Z_{fio} + Z_{lamp})}.
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Substituindo (3.24) em (3.23) e fazendo algumas manipulações matemáticas chega-se a:

$$\begin{aligned}
 v_{TLISN} &= \frac{\frac{R_{LISN}}{[2R_{LISN} + (Z_{fio} + Z_{lamp})]}}{1 + \frac{R_{LISN}}{[2R_{LISN} + (Z_{fio} + Z_{lamp})]}} (v_1 + v_2 + v_3) \\
 &= \frac{R_{LISN}}{3R_{LISN} + Z_{fio} + Z_{lamp}} (v_1 + v_2 + v_3).
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Reescrevendo a equação (3.25), fica:

$$v_{TLISN} = \frac{1}{3 + \left(\frac{Z_{fio} + Z_{lamp}}{R_{LISN}} \right)} (v_1 + v_2 + v_3). \tag{3.26}$$

De forma análoga pode-se generalizar a equação (3.26) para n fontes de ruído. Logo, a tensão total medida no LISN para n lâmpadas iguais conectadas em paralelo ao LISN por fios de mesmo comprimento e mesma bitola é:

$$v_{TLISN} = \frac{1}{n + \left(\frac{Z_{fio} + Z_{lamp}}{R_{LISN}} \right)} (v_1 + v_2 + \dots + v_n). \quad (3.27)$$

Observa-se da equação (3.27) que o ruído medido depende do número de fontes de ruído, das impedâncias das fontes e dos fios de conexão, e da amplitude do ruído produzido por cada fonte. Como o número de lâmpadas, a resistência do LISN e a impedância do fio são constantes, a tensão de ruído medida é dependente do comportamento da impedância da lâmpada e da composição das amplitudes do ruído produzido por cada lâmpada do arrajo.

Apesar de considerar que as fontes (lâmpadas) sejam iguais não se pode garantir que produzam o mesmo nível de ruído com amplitude e fase iguais. Isso por que elas podem não iniciar seu funcionamento no mesmo instante de tempo em que são ligadas. Esse fato pode implicar em níveis de ruído com amplitude e fase diferentes de forma que o resultado final seja um aumento ou redução no nível de ruído total medido pelo LISN. Porém, como o ruído é aleatório essas contribuições podem ser muito pequenas para que o nível médio total do ruído suba ou diminua quando se têm mais de uma lâmpada em paralelo. Logo o parâmetro na equação (3.27) que pode contribuir efetivamente para a mudança no nível total do ruído é um aumento ou diminuição na impedância do conjunto de lâmpadas na faixa de frequência de interesse (9 kHz – 30 MHz), já que a resistência do LISN é constante (50 Ω) e a impedância do fio é muito baixa.

A indutância de um fio por unidades de comprimento pode ser calculada pela equação (3.28). Essa equação leva em consideração o espaçamento entre os fios (s) e o raio (r) da seção transversal do fio (PAUL, 1992).

$$L = 0,4 \ln \left(\frac{s}{r} \right) \left(\text{em } \frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \right). \quad (3.28)$$

Por exemplo, para um par de fios separados por 5,0 mm com uma bitola de $1,5 \text{ mm}^2$ ($r \approx 0,5 \text{ mm}$) e comprimento de 0,5 m num circuito como aquele mostrado na Fig. 32, tem uma indutância de $0,46 \mu\text{H}$. Na frequência de 40 kHz e desprezando a resistência dos fios, a impedância do fio ($Z_{\text{fio}} = 2\pi fL$) é de $0,12 \Omega$. Essas são as características do fio que foi usado nos ensaios.

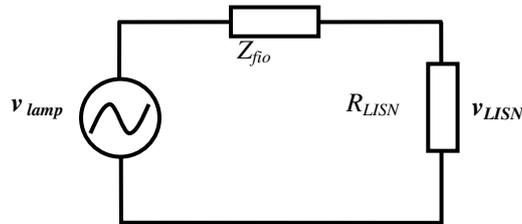


Figura 32 – Circuito equivalente para uma lâmpada conectada ao LISN com fio de 50 cm.

A relação entre a tensão medida no LISN (v_{LISN}) e a tensão de ruído proveniente de uma única lâmpada (v_{lamp}) conectada com um par de fios com as características anteriores é dada pela equação (3.29).

$$A = \frac{v_{LISN}}{v_{lamp}} = \frac{R_{LISN}}{R_{LISN} + Z_{fio}}. \quad (3.29)$$

Sendo $R_{LISN} = 50 \Omega$ e $Z_{fio} = 0,12 \Omega$ a relação $A = 0,998$, ou seja, o fio proporciona uma atenuação de apenas $A_{dB} = -2,08 \text{ dB}$ ao sinal de ruído produzido pela lâmpada. Portanto, o fio deve produzir pouco efeito no bloqueio do sinal de ruído.

Para o caso particular em que se tem na mesma luminária três lâmpadas iguais juntas (ver Fig. 33) a tensão de ruído medida no LISN pode ser analisada pela equação (3.29) (FERREIRA, 2010).

$$v_{TLISN} = \frac{1}{3 + \left(\frac{Z_{lamp}}{R_{LISN}} \right)} (v_1 + v_2 + v_3) \quad (3.30)$$

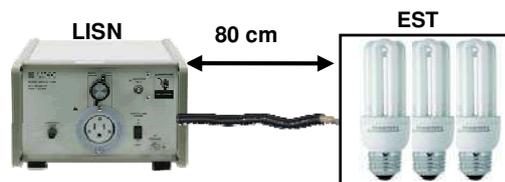


Figura 33 – Montagem para medição de três LFCs juntas.

Capítulo 4

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas medições feitas do espectro do ruído eletromagnético conduzido de IEM produzido pelas LFCs individualmente e em conjunto. Esses foram comparados com os limites máximos de emissão eletromagnética conduzida, exigidos pela norma correspondente (CISPR 15). Também são mostrados os resultados para os casos em que se investigou o comportamento do espectro eletromagnético conduzido quando se têm na mesma luminária mais de uma lâmpada junta, afastada praticamente de zero e, ainda, quando elas estão afastadas à distância de 30 a 50 cm do ponto de alimentação. São expostos também os resultados do espectro das lâmpadas de potências diferentes. Além disso, é abordada a resposta do espectro quando o filtro para IEM é adicionado à lâmpada.

4.1 MEDIÇÕES DO ESPECTRO CONDUZIDO PELAS LFCs

As medições do espectro eletromagnético conduzido pelas LFCs são apresentadas na faixa de frequência de 100 kHz a 30 MHz. As LFCs foram medidas em cinco configurações: uma luminária com uma, com duas e com três lâmpadas juntas com separação desprezível; uma luminária (lustre) com três e cinco lâmpadas distantes de 30 cm e 50 cm do ponto de alimentação, respectivamente. Para isso aplicou-se o procedimento descrito na seção 3.3 para as diversas marcas de LFCs mostradas no Quadro 4.1.

Todas as marcas de lâmpadas testadas possuem as seguintes características em comum:

- O selo do INMETRO e do PROCEL;
- Vida útil entre 3000 e 8000 horas;
- Classificação A, em termos de eficiência energética (exceto a marca ATRALUX que tem classificação B);
- Fator de potência entre 0,47 e 0,6;
- Frequência nominal 50/60 Hz;

- São fabricadas na China;
- Destinam-se ao mercado da América do Sul;
- Possuem alguns avisos de cuidado com o manuseio do produto;
- Estampam a frase: **“Este produto pode causar interferência em equipamentos eletroeletrônicos”**.

As características anteriores não são aplicadas a lâmpada SA econômica, por não ser uma lâmpada nacional. Ela é de origem portuguesa.

FABRICANTE	POTÊNCIA
ARAM	15 W
ATRALUX	18 W
AVANT	9, 15, 20 e 30 W
EMPALUX	7, 11, 15, 20 e 30 W
FLC	15 W
GE	14, 11 e 24 W
GOLDEN	6 W
GREAT VALUE	14 W
IMPACT	14 W
NEOTRON	18 W
OSRAM	15 W
PHILIPS	5, 14, 15 e 18 W
SA ECONOMICA	18 W
SYLVANIA	9,0 W

Quadro 4. 1– Relação de lâmpadas sobre teste.

No gráfico apresentado na Fig. 34 é ilustrada a relação entre vida útil das LFCs (eixo – y , esquerdo), as marcas testadas (eixo – x) e o preço de aquisição em reais (eixo – y , direito) de cada lâmpada. A vida útil é informada pelo fabricante na embalagem do produto (barras) e o preço (ano 2009) é o valor que as LFCs foram compradas (curva preta com pontos).

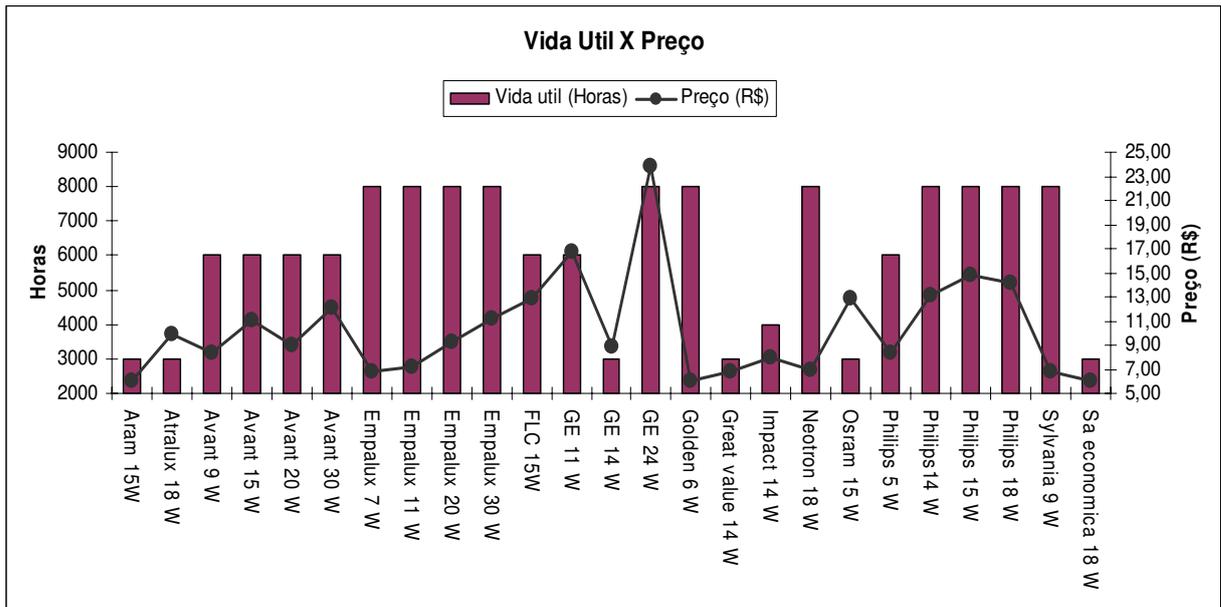


Figura 34 – Relação entre vida útil e o preço das LFCs.

Informações como corrente e tensão nominais, fator de potência, frequência de funcionamento e importador de cada lâmpada podem ser encontradas em anexo.

Em todos os resultados apresentados a seguir, em que se tenha mais de uma lâmpada presentes no teste e separadas por distância maior que zero, a curva da norma CISPR 15 serve apenas de referência para se ter uma ideia dos níveis de ruído produzidos pelas configurações estudadas. Na norma não é explicitado uma máscara para testes com mais de uma lâmpada a qualquer distância do ponto de alimentação.

4.1.1 Resultados para a marca ARAM

Nas Figs. 35 e 36 são mostrados os resultados da medição para a lâmpada ARAM 15 W, com uma e com duas lâmpadas na mesma luminária, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas.

No eixo -y é representado o valor da tensão do ruído de IEM em $\text{dB}\mu\text{V}$ e no eixo -x a faixa de frequência em escala semi-logarítmica de 100 kHz a 30 MHz.

Nos casos vistos nas Figs. 35 e 36, os espectros apresentam níveis de emissão de IEM conduzida que estão em desacordo com a norma utilizada. No gráfico exposto na Fig. 36, pode ser observado que o nível de ruído produzido pelas duas lâmpadas é inferior ao ruído produzido por uma única lâmpada.

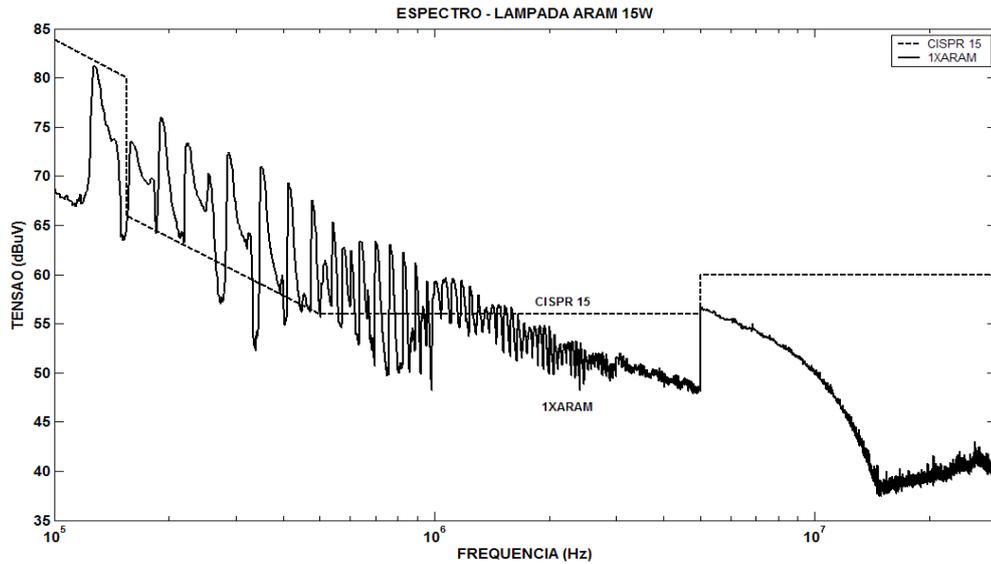


Figura 35 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada ARAM 15 W.

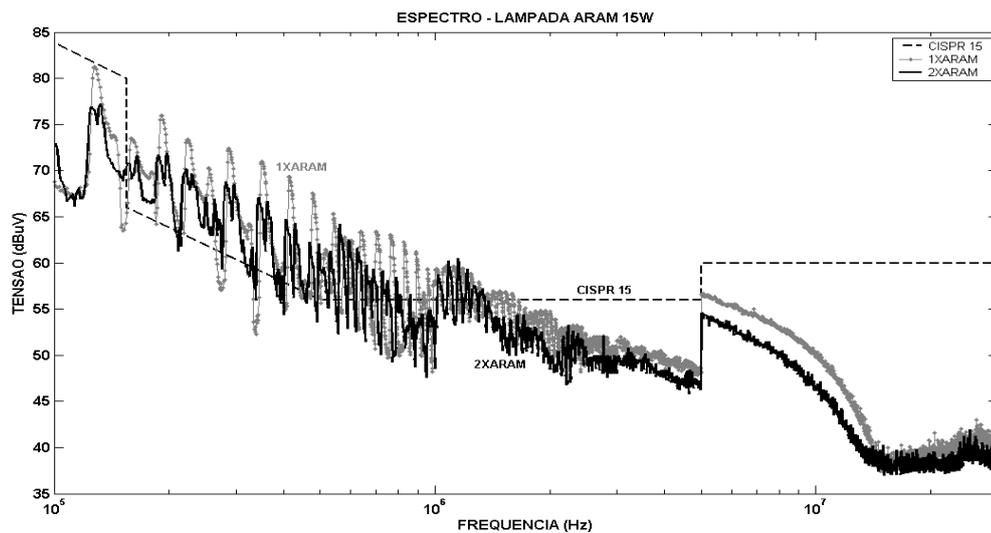


Figura 36 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas ARAM 15 W.

4.1.2 Resultados para a marca ATRALUX

Nas Figs. 37 e 38 são apresentados os resultados da medição para a lâmpada ATRALUX 18 W, com uma e com duas lâmpadas na mesma luminária, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas.

Nos gráficos mostrados nas Figs. 37 e 38, os espectros apresentam níveis de emissão de IEM conduzida que estão em desacordo com a norma utilizada.

É possível observar que o nível de ruído é menor quando se têm duas lâmpadas ATRALUX conectadas na mesma luminária ao invés de apenas uma.

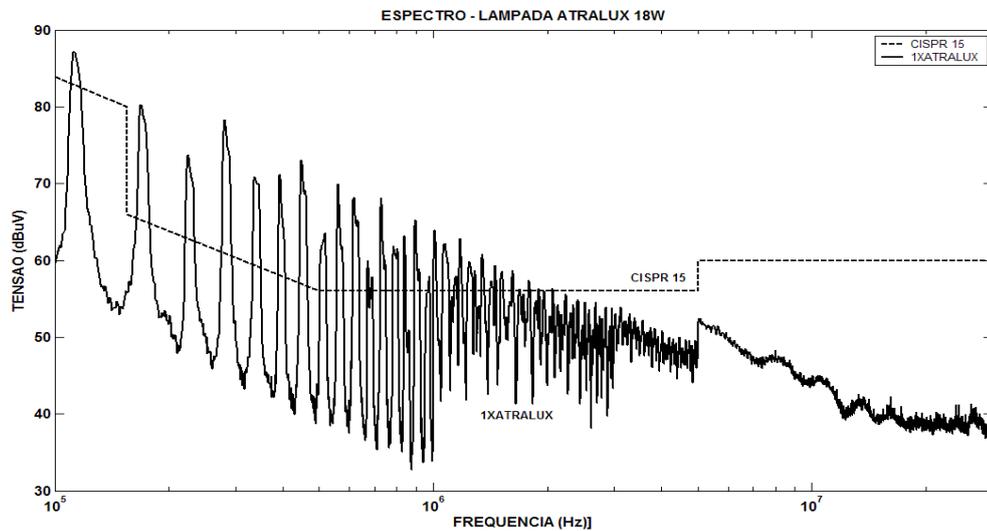


Figura 37 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada ATRALUX 18 W.

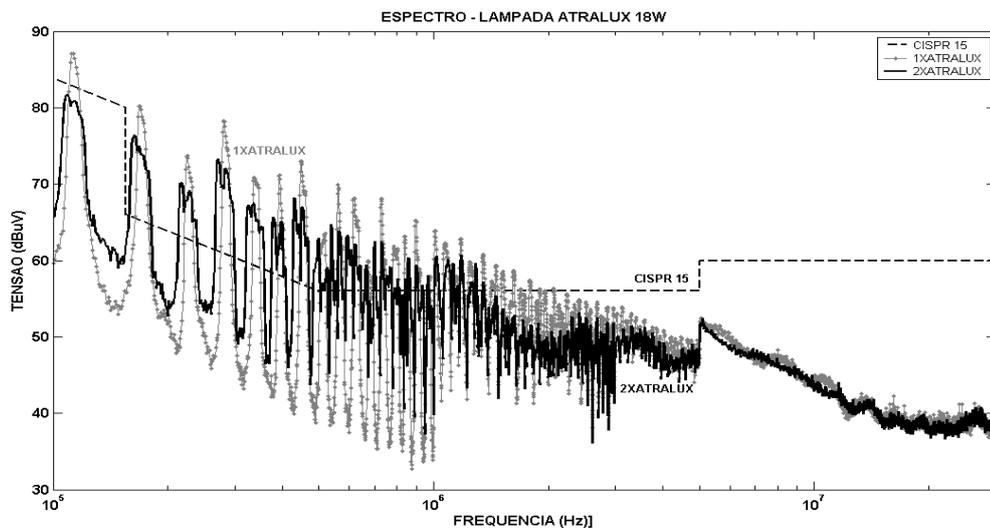


Figura 38 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas ATRALUX 18 W.

4.1.3 Resultados para a marca AVANT

Para este fabricante foram feitos testes de IEM conduzida em lâmpadas com valores de potências diferentes, a saber: AVANT 9, 15, 20 e 30 W. As medições abrangeram configurações de lâmpadas isoladas, juntas com distância desprezível entre elas e separadas de 30 cm e 50 cm para ilustrar a configuração de um lustre comum em estabelecimentos comerciais e residências.

Na Fig. 39 é apresentado o espectro do ruído de IEM produzido por uma lâmpada AVANT 15 W.

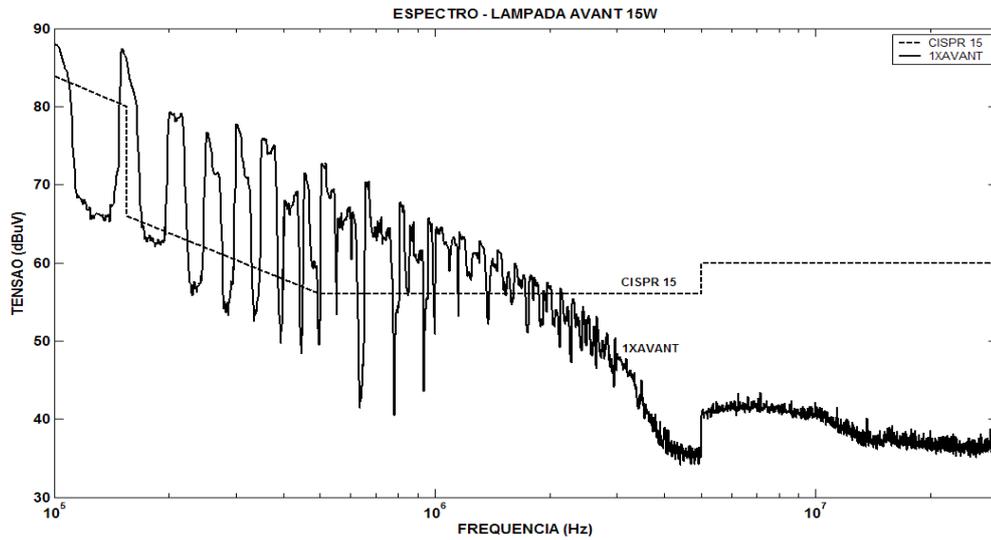


Figura 39 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada AVANT 15 W.

Na Fig. 40 é feita a comparação dos espectros de IEM para uma luminária que possui uma e duas lâmpadas.

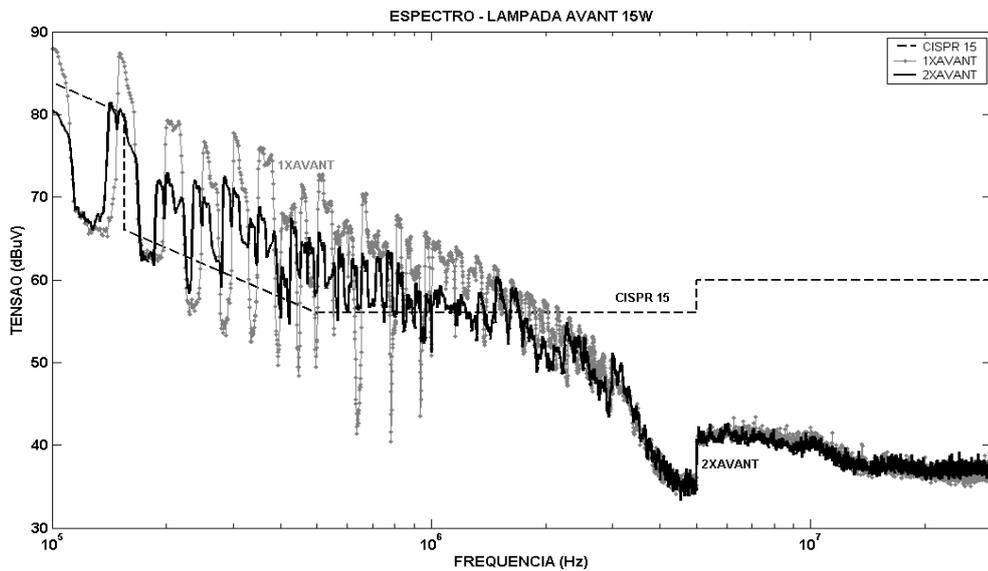


Figura 40 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas AVANT 15 W.

Na Fig. 41 destaca-se a região do espectro onde há uma diferença mais marcante dos espectros quando se tem duas e três lâmpadas na mesma luminária, separadas a uma distância desprezível.

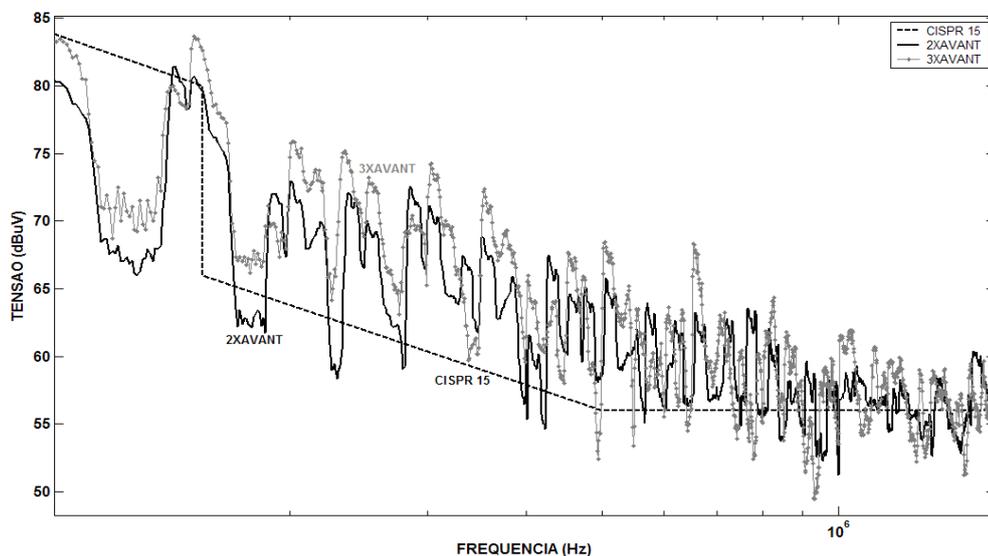


Figura 41 – Comparação dos espectros de IEM de duas e três lâmpadas AVANT 15 W.

Nos gráficos expostos nas Figs. 39, 40 e 41, os espectros apresentam níveis de emissão de IEM conduzida que ultrapassam os limites exigidos pela norma utilizada. Também é possível observar que o nível de ruído é menor quando se têm duas lâmpadas AVANT 15 W conectadas na mesma luminária ao invés de apenas uma e três lâmpadas. Mas ainda sim o nível de ruído é elevado.

Com o intuito de investigar o comportamento do espectro de IEM conduzida por lâmpadas de potências diferentes, foram levantados os espectros individuais das lâmpadas AVANT de potências 9, 20 e 30 W. A comparação desses espectros é mostrada na Fig. 42. Para maior visualização, os espectros são mostrados em dois intervalos: na Fig. 42.a o intervalo de 100 kHz a 1 MHz e na Fig. 42.b o intervalo de 1 MHz a 30 MHz.

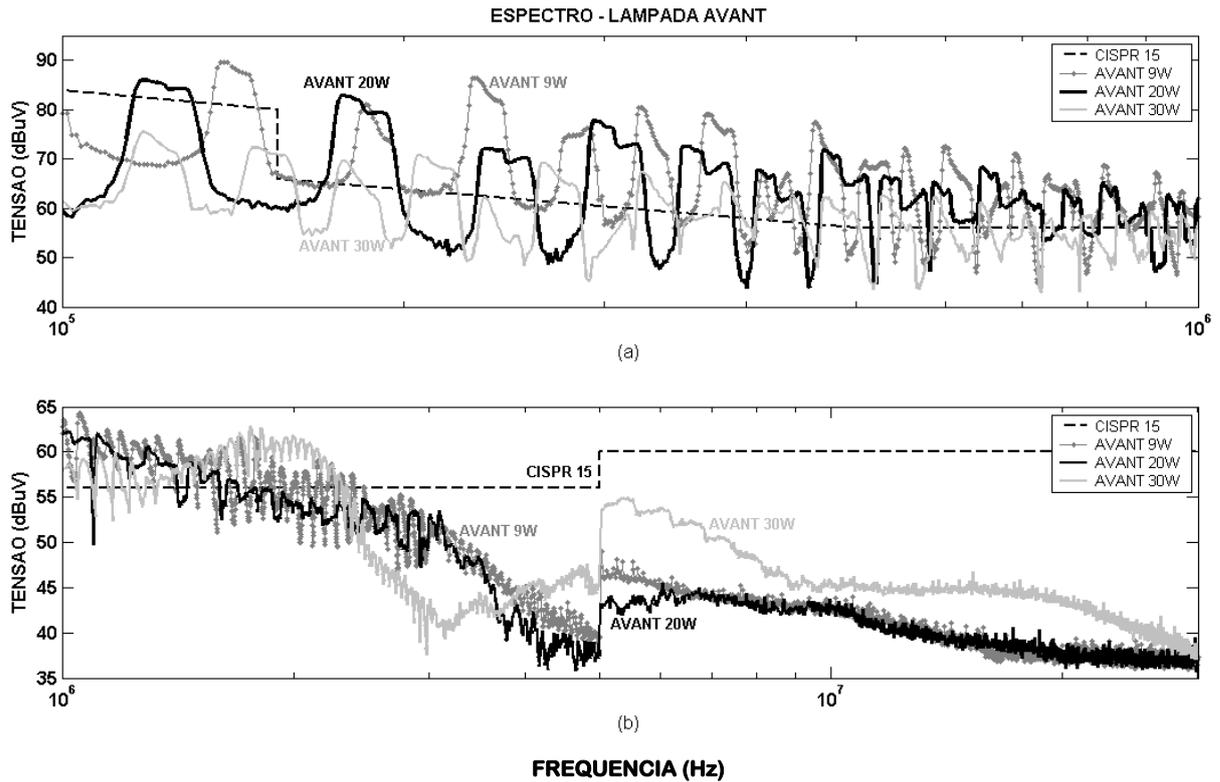


Figura 42 – Comparação dos espectros das lâmpadas AVANT de 9, 20 e 30 W.

Na Fig. 42 pode ser visto que há uma variação de valores nos níveis de ruído ao longo da faixa de medição. No intervalo de 100 kHz até 1 MHz a lâmpada de menor potência, 9 W ($I_{nominal} = 64$ mA), produz níveis de ruído maiores que as de 20 W ($I_{nominal} = 147$ mA) e 30 W ($I_{nominal} = 246$ mA), sendo que a de 20 W produz ruído mais elevado que a de 30 W. A partir de 1 MHz ocorre uma inversão nos níveis de ruído, a lâmpada de 30 W agora é a que produz o nível mais elevado e a lâmpada de 20 W é que apresenta menor nível de ruído. Esse fato é devido a modificação da impedância da lâmpada em função da frequência, conforme equação (30).

Esse resultado contraria as expectativas de que a lâmpada de maior potência/corrente nominal deveria ser fonte de maior ruído. Não há, portanto, uma relação entre a amplitude da potência/corrente nominal e o nível de ruído de alta frequência produzido por essa marca de lâmpadas. A diferença nos níveis de ruído pode estar associada ao próprio funcionamento do circuito interno da lâmpada, aos seus componentes e a frequência de chaveamento do circuito inversor, além de mudanças na impedância da lâmpada nas frequências mais elevadas, que podem aumentar o desbalanceamento e produzir mais corrente de modo comum.

Assim, para essa marca, não se pode dizer que ter maior potência significa que a lâmpada produzirá maiores níveis de ruído de IEM conduzida em toda a faixa de frequência de interesse.

Os resultados das medições feitas com as AVANT 15 W distante do ponto de alimentação 30 e 50 cm, como visto na Fig. 27, são apresentados na Fig. 43. Observa-se que essas configurações não produzem grande efeito em termos de redução dos níveis de ruído produzidos pelas LFCs.

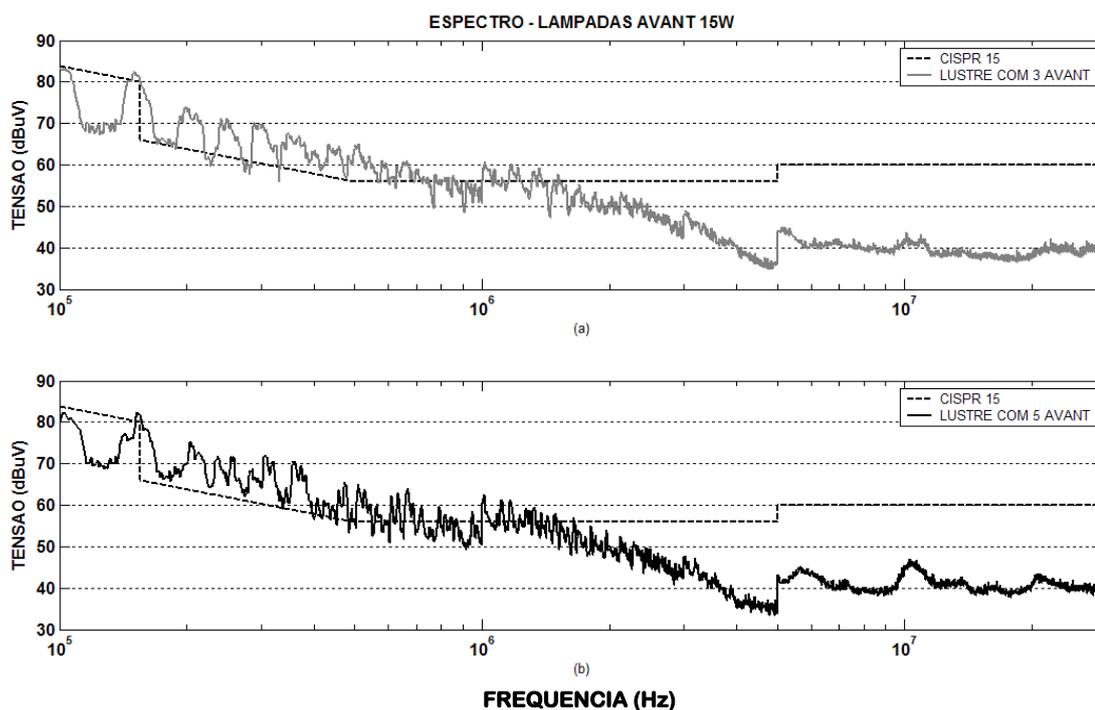


Figura 43 – (a) Lustre com três lâmpadas AVANT 15 W; (b) Lustre com cinco lâmpadas AVANT 15 W.

Quando se compara a configuração do lustre com três lâmpadas distantes de 30 cm com a situação em que as três estão juntas o resultado (Fig. 44.a) é praticamente o mesmo, ou seja, o fato das lâmpadas estarem separadas não modifica muito a composição do espectro total produzido por essa marca de LFCs mesmo o sinal sofrendo uma pequena atenuação nos fios de conexão, como calculado pela equação (3.29). Já quando se compara com o espectro de uma única lâmpada observa-se uma redução de no máximo 10 dB até 3 MHz, a partir daí os espectros são praticamente iguais (Fig. 44.b). Isso indica que houve um aumento na impedância do arranjo das lâmpadas e a composição das amplitudes do ruído de cada fonte se subtrairam, conforme equação (3.27).

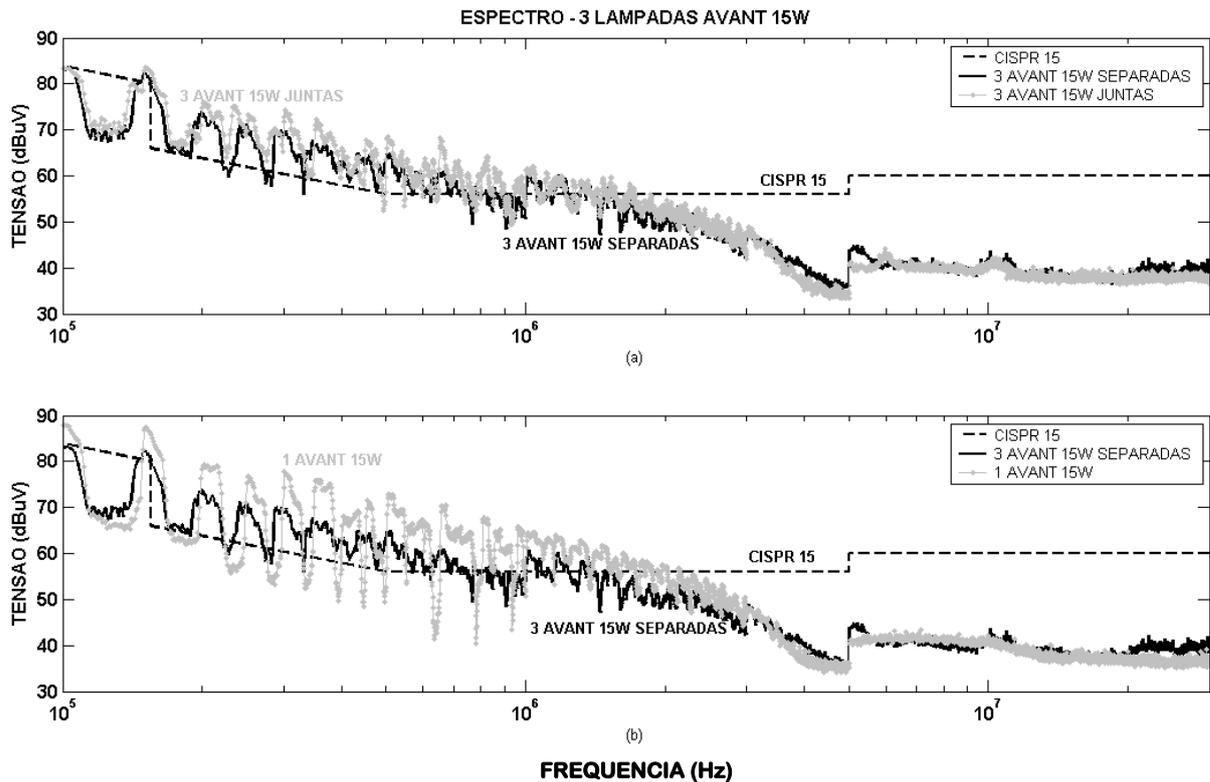


Figura 44 – (a) Comparação entre três lâmpadas AVANT 15 W separadas de 0 cm e 30 cm; (b) Comparação entre uma e três lâmpadas AVANT 15 W separadas de 30 cm.

Comparando o espectro do lustre com cinco lâmpadas distantes de 50 cm com uma única lâmpada observa-se uma redução de no máximo 10 dB até 3 MHz. De 3 MHz até 5 MHz os espectros são praticamente iguais. A partir de 5 MHz a amplitude do ruído da configuração com cinco lâmpadas é maior que apenas uma lâmpada (Fig. 45), ou seja, a combinação das lâmpadas em paralelo com a atenuação dos fios reduziu o nível de ruído total, mas isso não significou uma redução a níveis aceitáveis pela CISPR 15.

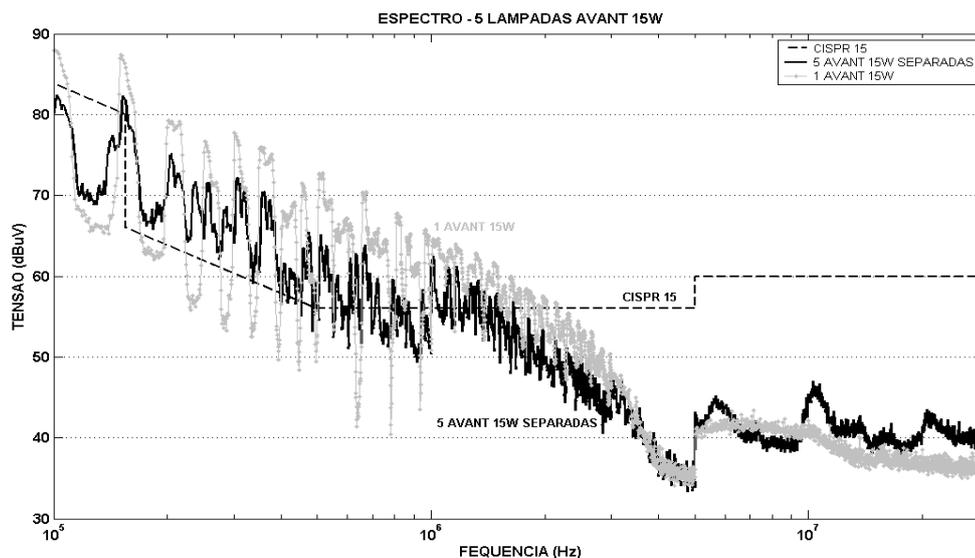


Figura 45 – Comparação entre uma e cinco lâmpadas AVANT 15 W separadas de 50 cm.

4.1.4 Resultados para a marca EMPALUX

Para este fabricante foram feitos testes de IEM conduzida em lâmpadas com valores de potências diferentes, a saber: EMPALUX 7, 11, 15, 20 e 30 W. As medições abrangeram configurações de lâmpadas isoladas, juntas com distância desprezível entre elas e separadas de 30 cm e 50 cm para ilustrar a configuração de um lustre comum em estabelecimentos comerciais e residências.

Nas Figs. 46 e 47 são expostos os espectros do ruído de IEM produzido por uma luminária com uma e com duas lâmpadas EMPALUX 7,0 W, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas.

O espectro da lâmpada EMPALUX 7,0 W (Fig. 46), apresenta níveis de emissão de IEM conduzida que não satisfazem as exigências da norma utilizada.

No gráfico apresentado na Fig. 47, nota-se que a combinação de duas lâmpadas na mesma luminária produz um nível de ruído inferior ao ruído gerado por uma única lâmpada.

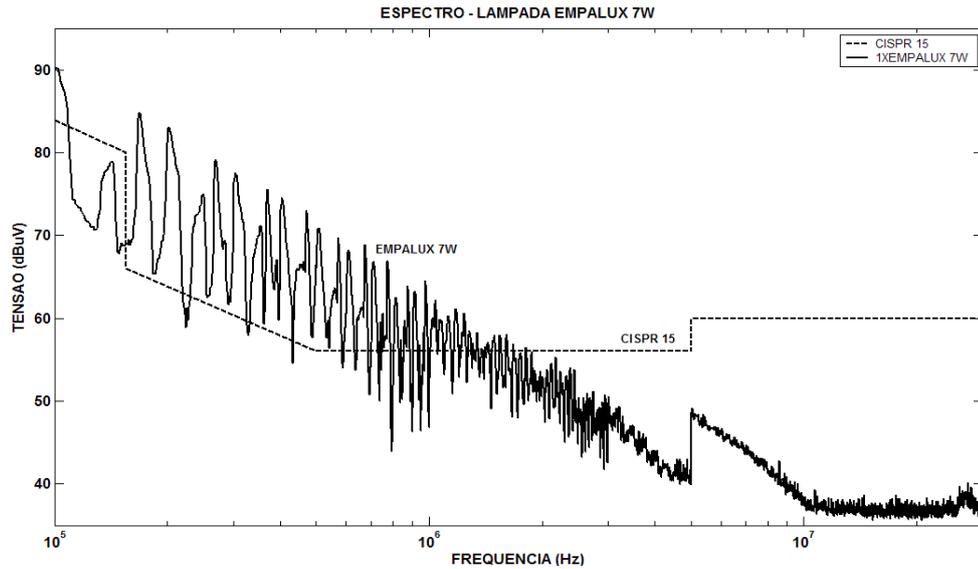


Figura 46 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada EMPALUX 7,0 W.

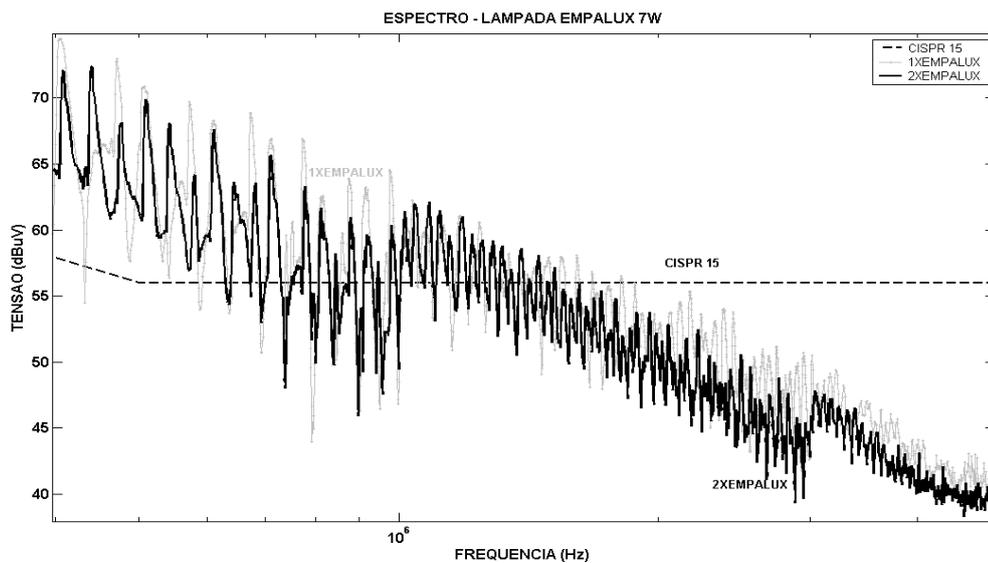


Figura 47 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas EMPALUX 7,0 W.

Na Fig. 48 é mostrada a comparação dos espectros individuais das lâmpadas EMPALUX de potências 11, 15, 20 e 30 W. Sendo que na Fig. 48.a é mostrado à comparação entre os espectros para as potências de 11 e 15 W e na Fig. 48.b para as potências de 20 e 30 W.

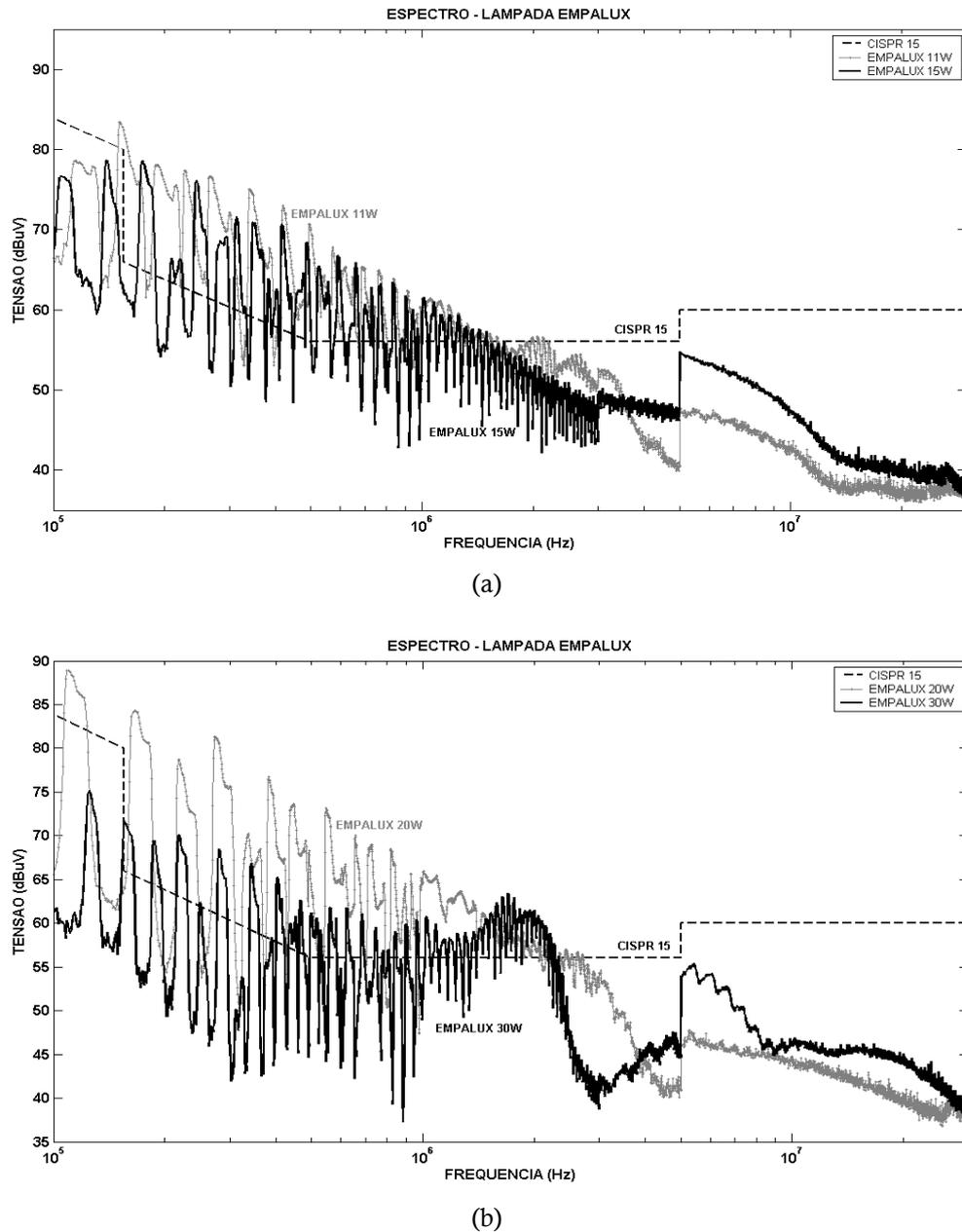


Figura 48 – Comparação dos espectros das lâmpadas EMPALUX: (a) 11 e 15 W; (b) 20 e 30 W.

Na Fig. 48 pode ser observado que há uma variação de valores nos níveis de ruído ao longo da faixa de medição. No intervalo de 100 kHz até 1 MHz a lâmpada de menor potência, 11 W ($I_{nominal} = 84,3$ mA), produz níveis de ruído praticamente iguais a de 15 W ($I_{nominal} = 115,49$ mA), maiores que a de 30 W ($I_{nominal} = 237,1$ mA) e inferiores a de 20 W ($I_{nominal} = 150,6$ mA). Nesse mesmo intervalo, a lâmpada de 20 W produz ruído mais elevado que as de 11, 15 e 30 W. Entre 1 MHz e 5 MHz o ruído produzido pela lâmpada de 30 W é superior a todas as outras. A partir daí, o espectro da lâmpada de 30

W é semelhante a de 15 W e o espectro da lâmpada de 20 W é semelhante a de 11 W, neste caso os espectros de 15 W e 30 W são superiores as de 11 e 20 W.

Esse resultado é semelhante aquele obtido para a marca AVANT e contraria as expectativas de que a lâmpada de maior potência/corrente nominal deveria ser fonte de maior ruído. O mesmo dito na seção 4.1.3 se aplica a marca EMPALUX, ou seja, a diferença nos níveis de ruído pode estar associada ao próprio funcionamento do circuito interno da lâmpada, aos seus componentes e a frequência de chaveamento do circuito inversor.

4.1.5 Resultados para a marca FLC

Nas Figs. 49 e 50 são expostos os resultados da medição para a lâmpada FLC 15 W, com uma e com duas lâmpadas na mesma luminária, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas.

Nos casos vistos nas Figs. 49 e 50, o espectro apresenta níveis de emissão de IEM conduzida que estão em desacordo com a norma utilizada (CISPR 15), mesmo quando se têm na mesma luminária duas lâmpadas FLC.

Na Fig. 50 pode-se notar que houve um pequeno aumento no nível de ruído na faixa de 3 a 8 MHz, quando as duas lâmpadas são conectadas juntas na mesma luminária. No restante o espectro de duas lâmpadas é inferior ao espectro de uma.

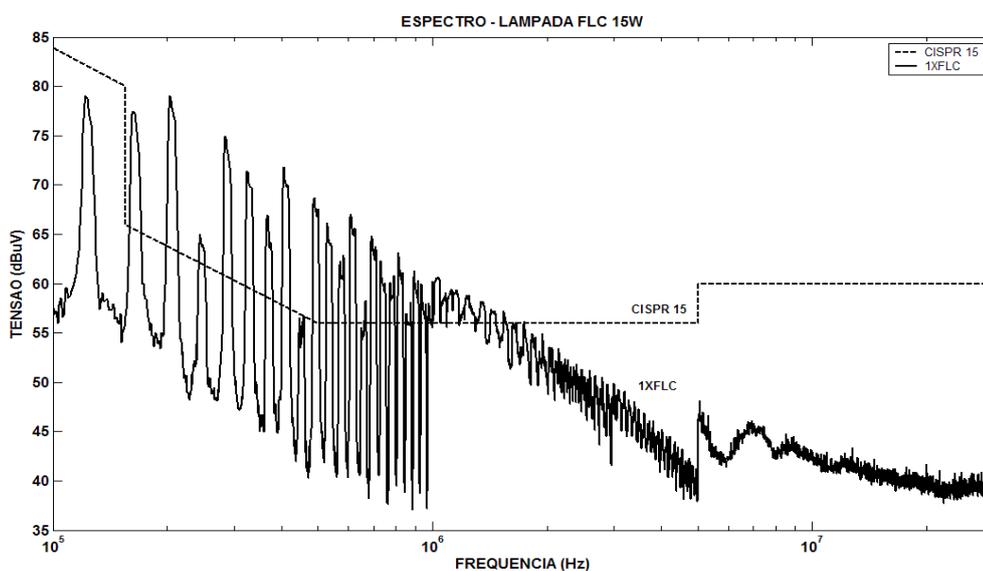


Figura 49 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada FLC 15 W.

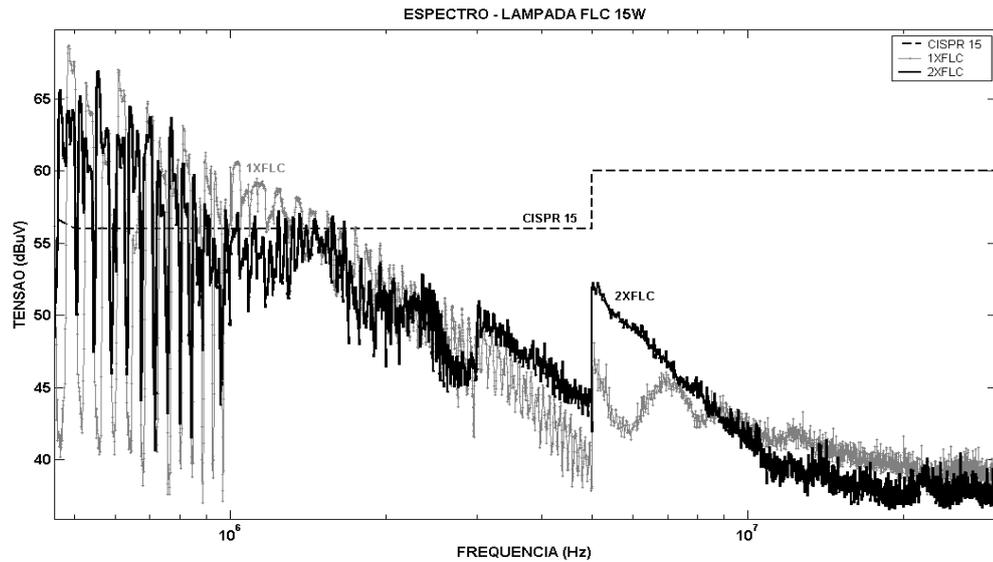


Figura 50 – Comparação entre os espectros de IEM de uma e duas lâmpadas FLC 15 W.

4.1.6 Resultados para a marca GREAT VALUE

Os resultados da medição para a lâmpada GREAT VALUE 14 W podem ser vistos na Fig. 51.

Conforme constatado em outras marcas, a lâmpada GREAT VALUE apresenta níveis de emissão de IEM conduzida que estão acima dos limites máximos permitidos pela CISPR 15.

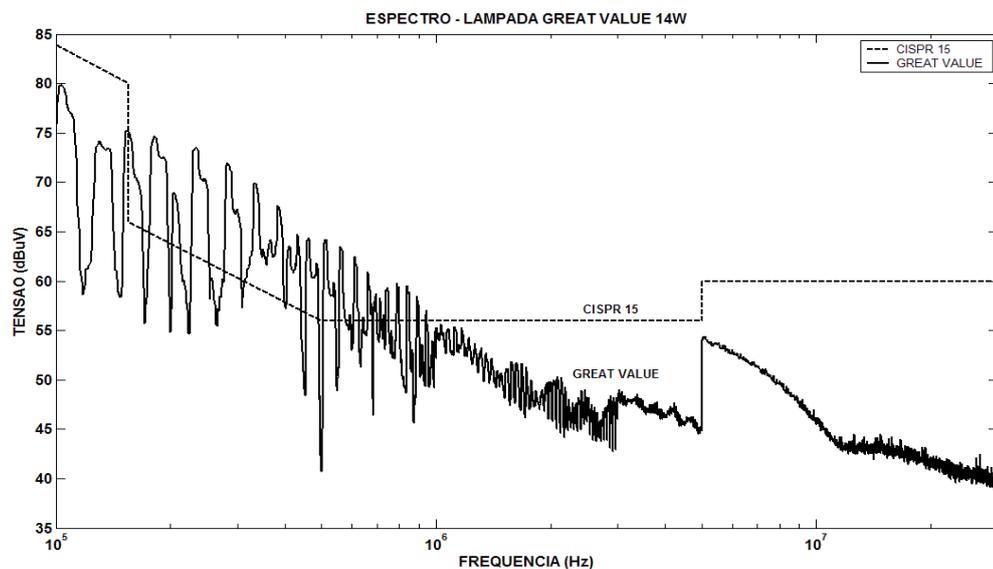


Figura 51 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada GREAT VALUE 14 W.

4.1.7 Resultado para a marca GOLDEN

Nas Figs. 52 e 51 são apresentados os resultados da medição para a lâmpada GOLDEN 6,0 W, com uma e com duas lâmpadas na mesma luminária, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas.

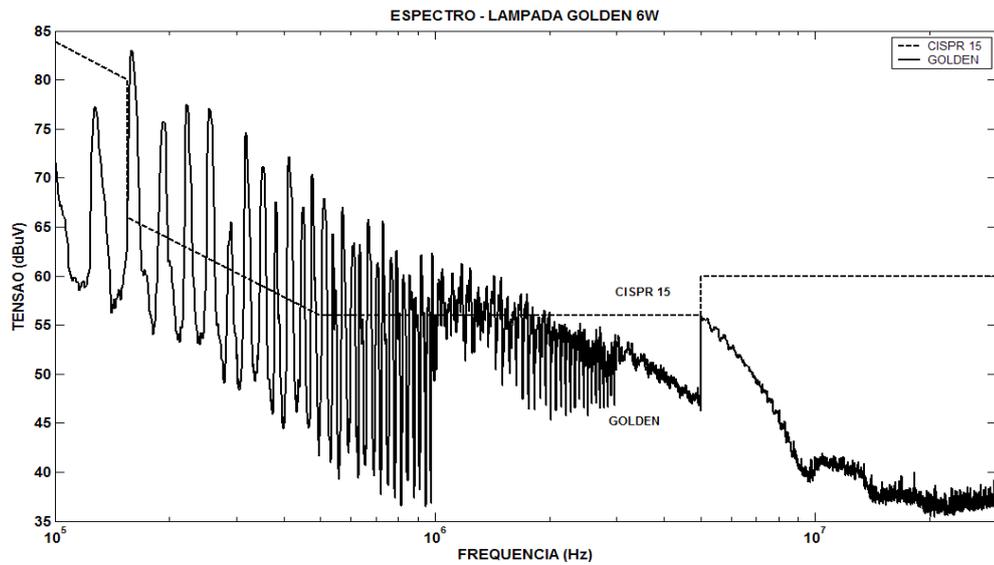


Figura 52 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada GOLDEN 6,0 W.

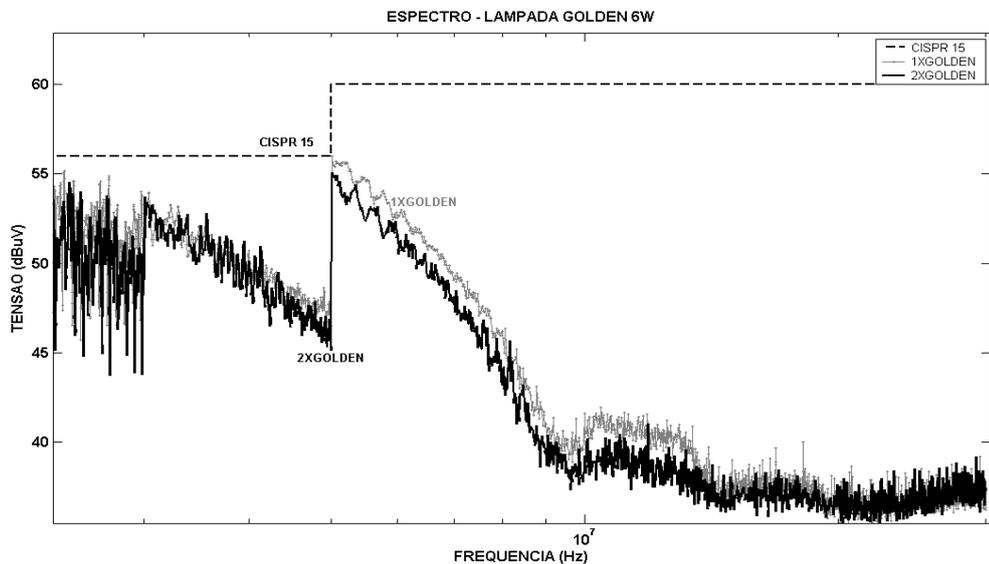


Figura 53 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas GOLDEN 6,0 W.

Como visto na Fig. 52, entre 50 kHz e 2 MHz, o espectro da lâmpada GOLDEN apresenta níveis de emissão de IEM conduzida que não estão de acordo com a norma utilizada. Em 5 MHz o nível atinge o limite máximo permitido pela CISPR15.

Com duas lâmpadas GOLDEN conectadas na mesma luminária têm-se o nível de ruído gerado menor que o ruído causado por uma única lâmpada apenas na faixa de 5 MHz a 30 MHz, como destacado na Fig. 53. Na faixa inferior a 5 MHz os espectros são praticamente iguais, essa faixa não é mostrada na Fig. 53.

4.1.8 Resultados para a marca GE

Nas Figs. 54 e 55 são expostos os resultados da medição para a lâmpada GE 14 W, com uma, com duas e com três lâmpadas na mesma luminária, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas.

Em ambas as figuras o espectro apresenta níveis de emissão de IEM conduzida que contrariam as exigências da norma utilizada.

No gráfico apresentado na Fig. 55, pode ser constatado que o nível de ruído gerado pelas duas lâmpadas é inferior ao ruído gerado por uma única lâmpada e praticamente igual ao ruído produzido por três lâmpadas, entre 9 kHz e 2 MHz. A partir de 3 MHz os níveis são praticamente iguais.

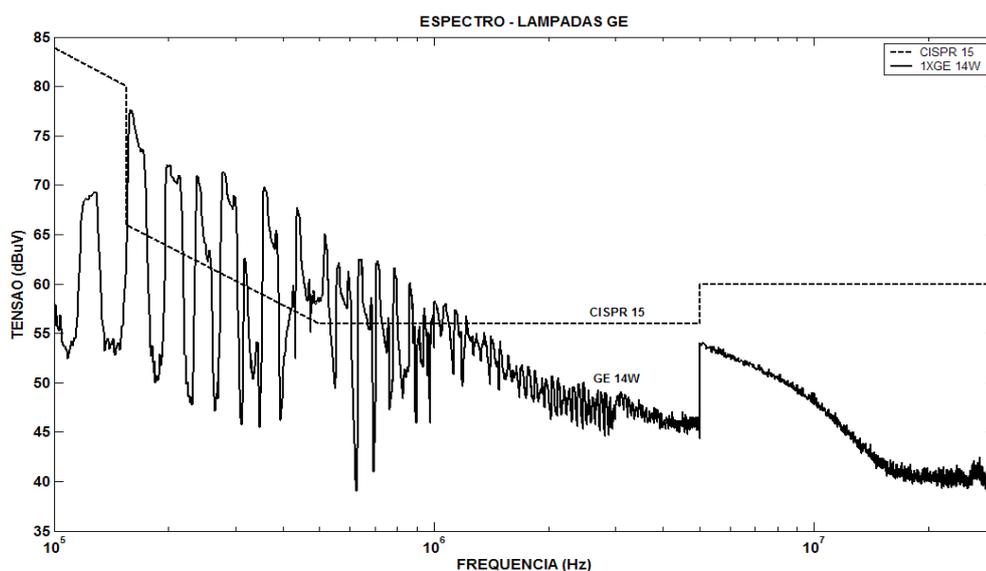


Figura 54 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada GE 14 W.

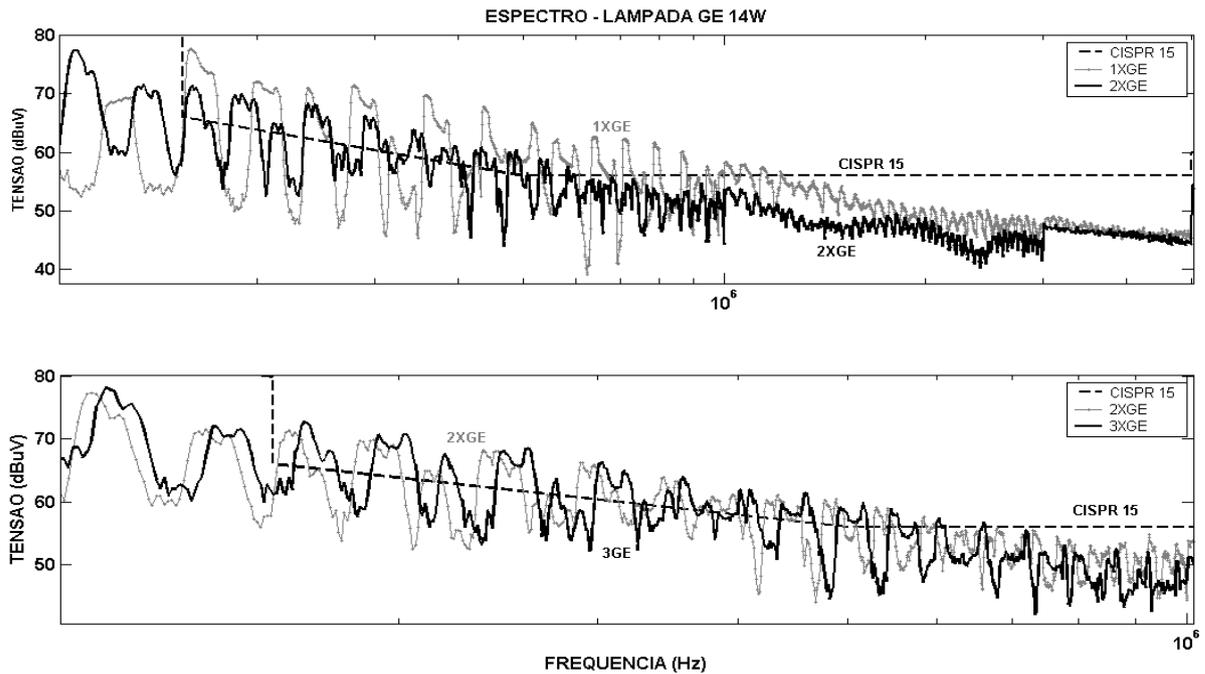


Figura 55 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas GE 14 W e entre duas e três GE 14 W.

Na Fig. 56 são mostrados os espectros individuais das lâmpadas GE de potências 11 e 24 W para o modelo chamado *twister* que é diferente do modelo da GE 14 W. Sendo que na, Fig. 56.a é apresentado o espectro para a potência 11 W e na Fig. 56.b para a potência de 24 W.

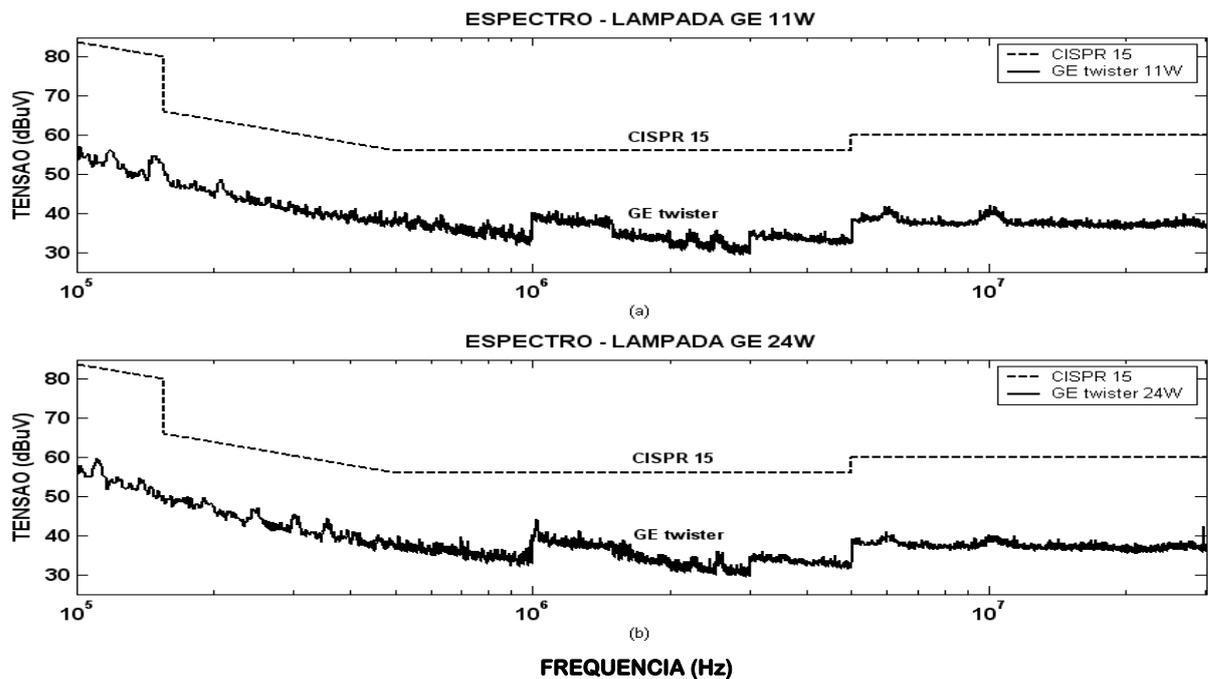


Figura 56 – Espectros das lâmpadas GE *twister*. (a) 11 W; (b) 24 W.

O espectro da marca GE (Fig. 56) modelo *twister* atende os limites máximos exigidos pela norma CISPR 15 para ambas as potências 11 e 24 W. Diferentemente do outro modelo de potência 14 W, cujos níveis de ruído estão acima do que é permitido. Esse fato demonstra que existem diferenças no projeto do circuito interno de cada modelo dessa marca de lâmpada.

Os resultados das medições feitas com as GE 14 W distante do ponto de alimentação 30 e 50 cm, como visto na Fig. 27, são apresentados na Fig. 57. Observa-se que essas configurações não produzem grande efeito em termos de redução dos níveis de ruído produzidos pelas LFCs.

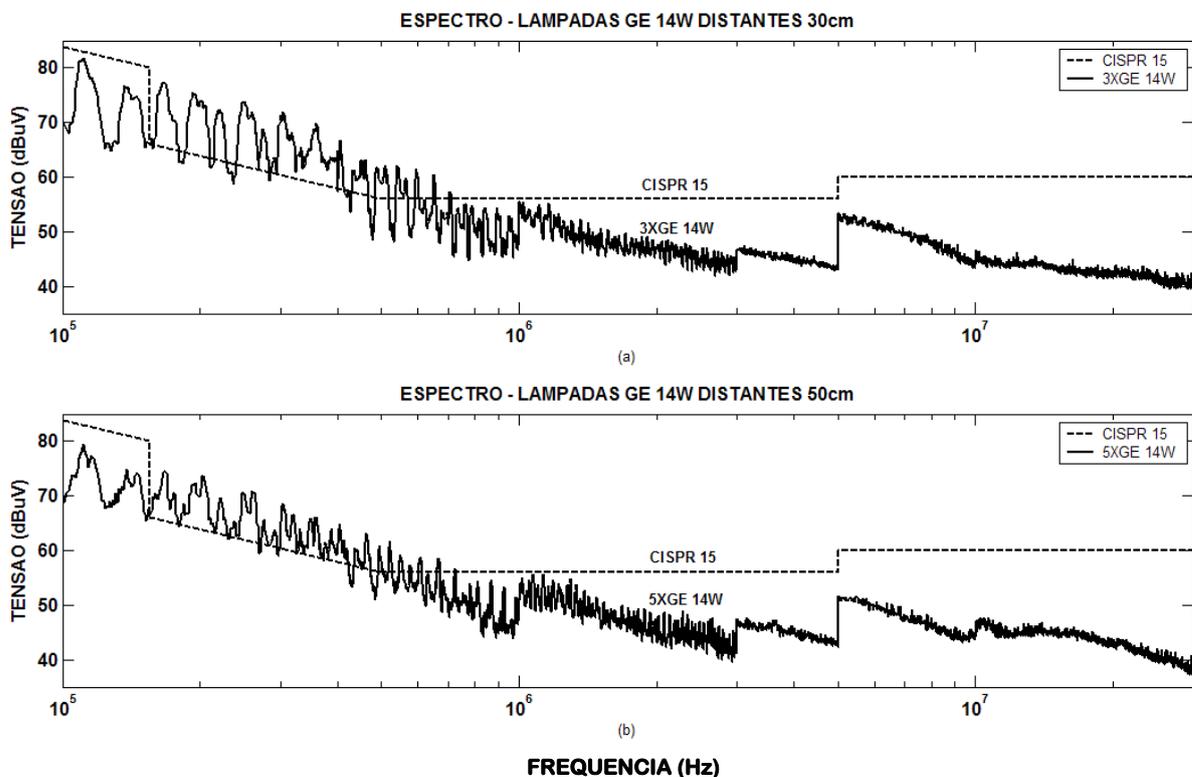


Figura 57 – (a) Lustre com três lâmpadas GE 14 W; (b) Lustre com cinco lâmpadas GE 14 W.

Na configuração do lustre com cinco lâmpadas separadas de 50 cm do ponto de alimentação (Fig. 57) o nível de ruído não é muito diferente daquela com três lâmpadas separadas de 30 cm. Nota-se uma pequena redução na faixa de 100 kHz até 1 MHz. Também ocorre um pequeno aumento no nível de ruído do lustre com cinco em relação ao lustre com três lâmpadas a partir de 5 MHz.

Quando se compara a configuração do lustre com três lâmpadas distantes de 30 cm com a situação em que as três estão juntas (ver Fig. 58) observa-se diferenças de

amplitudes no espectro do ruído acima de 500 kHz. O ruído de três lâmpadas distantes 30 cm é superior as lâmpadas juntas. Essa diferença é em torno de 2 dB, ou seja, é bem pequena, praticamente as duas configurações apresentam o mesmo nível de ruído.

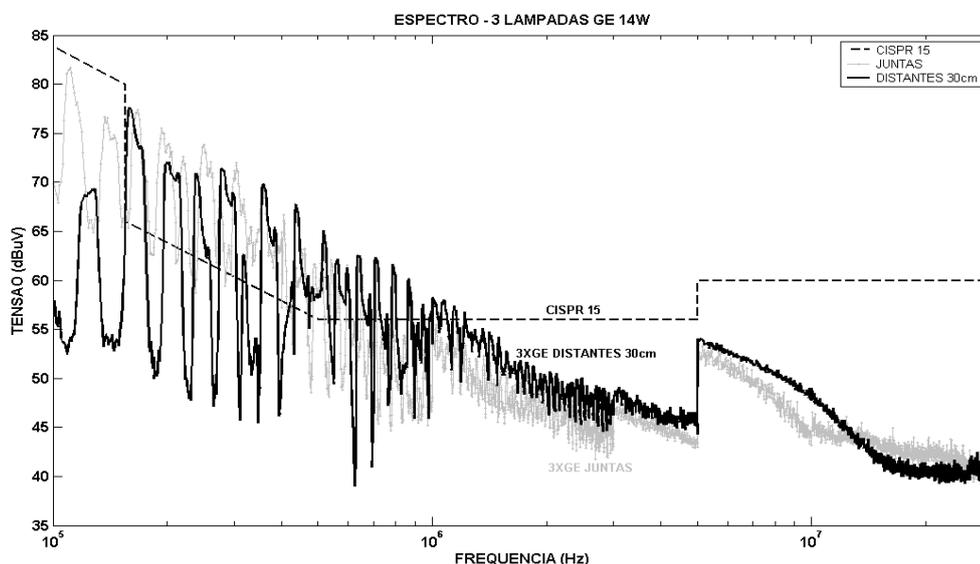


Figura 58 – Comparação entre três lâmpadas GE 14 W separadas de 0 cm e 30 cm.

O fato das lâmpadas estarem separadas não modificou significativamente a composição do espectro total produzido por essa marca de LFC mesmo o sinal sofrendo uma pequena atenuação nos fios de conexão.

4.1.9 Resultados para a marca IMPACT

Nas Figs. 59 e 60 são expostos os resultados da medição para a lâmpada IMPACT 14 W, com uma e com duas lâmpadas na mesma luminária, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas.

Para essa marca nota-se que o espectro apresenta níveis de emissão de IEM conduzida bem elevados, mesmo quando se têm duas lâmpadas na mesma luminária (ver Figs. 59 e 60). Na Fig. 60 está destacada a faixa de frequência onde há diferença significativa entre os espectros de uma e duas lâmpadas. No restante os espectros são praticamente iguais (não mostrado na figura).

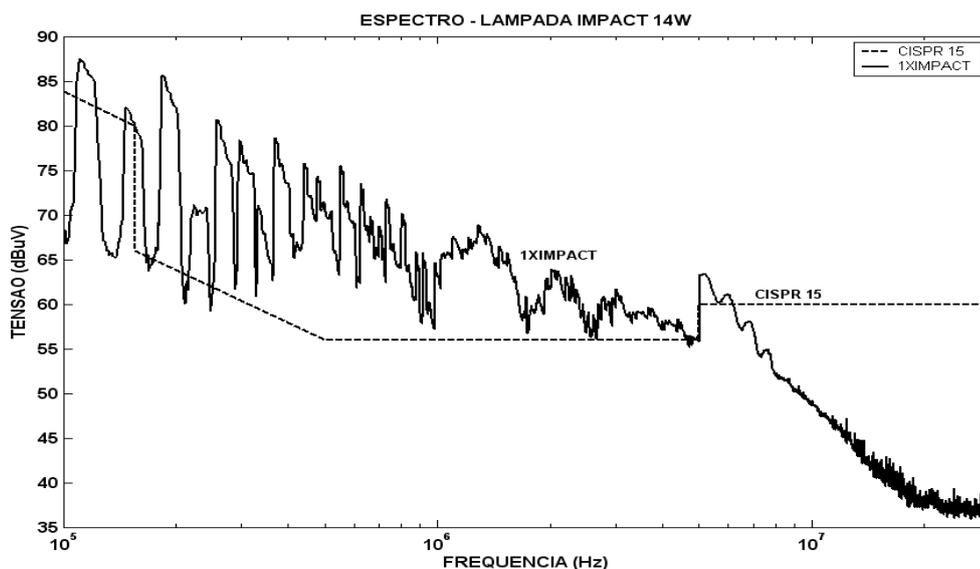


Figura 59 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada IMPACT 14 W.

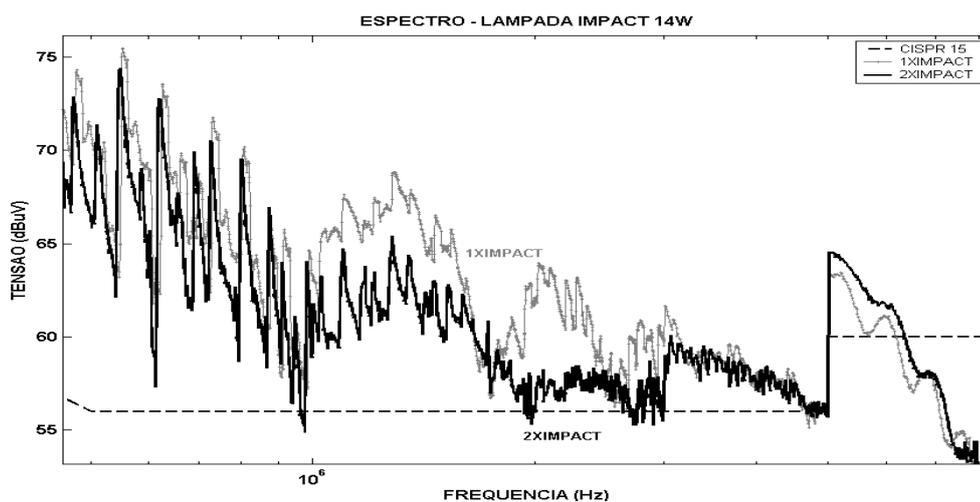


Figura 60 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas IMPACT 14 W.

Essa marca apresenta a maior faixa de frequência, cujos valores de amplitude do ruído estão acima da norma. Enquanto as outras marcas testadas normalmente apresentam valores fora da norma até 2 MHz esta se estende até 7 MHz.

4.1.10 Resultados para a marca NEOTRON

Nas Figs. 61 e 62 são apresentados os resultados da medição para a lâmpada NEOTRON 18 W, com uma e com duas lâmpadas na mesma luminária, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas.

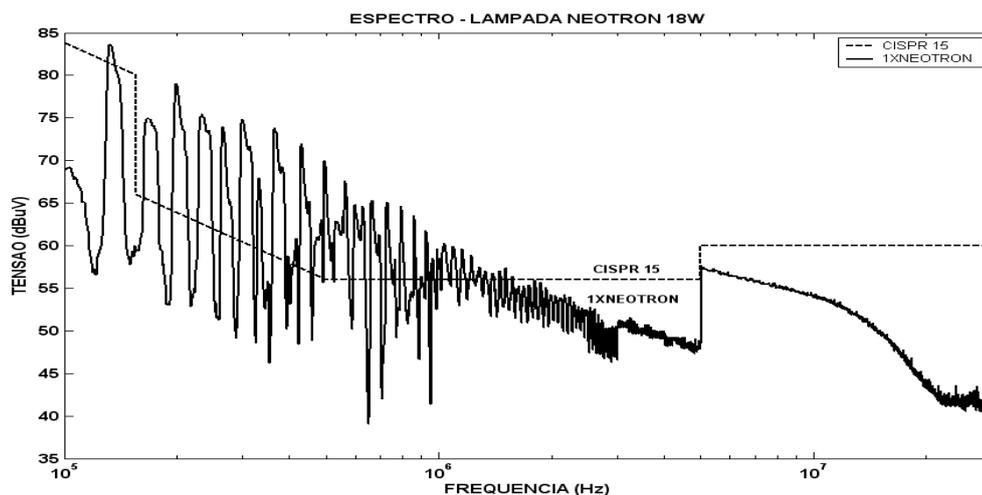


Figura 61 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada NEOTRON 18 W.

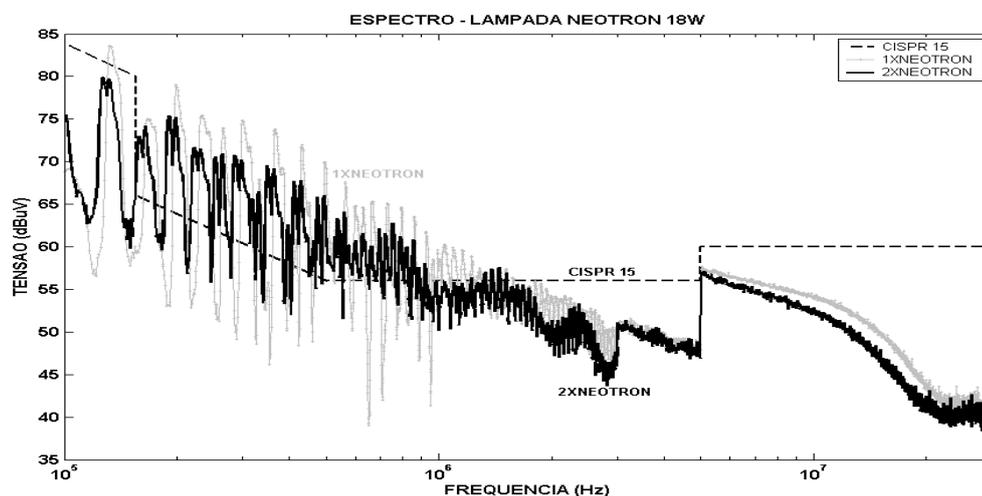


Figura 62 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas NEOTRON 18 W.

Como a maioria das outras marcas esta também apresenta níveis de ruído acima do permitido pela norma e ter duas lâmpadas na mesma luminária produz uma redução nas amplitudes do ruído, mas o nível de ruído ainda é elevado.

4.1.11 Resultados para a marca OSRAM

Na Fig. 63 são expostos resultados da medição para uma lâmpada OSRAM 15 W. Na Fig. 64, é feita uma comparação do nível de ruído dos espectros de IEM para uma luminária com duas e com três lâmpadas, sendo que, na Fig. 64.a compara-se uma e duas lâmpadas e na Fig. 64.b duas e três lâmpadas a uma distância desprezível entre elas.

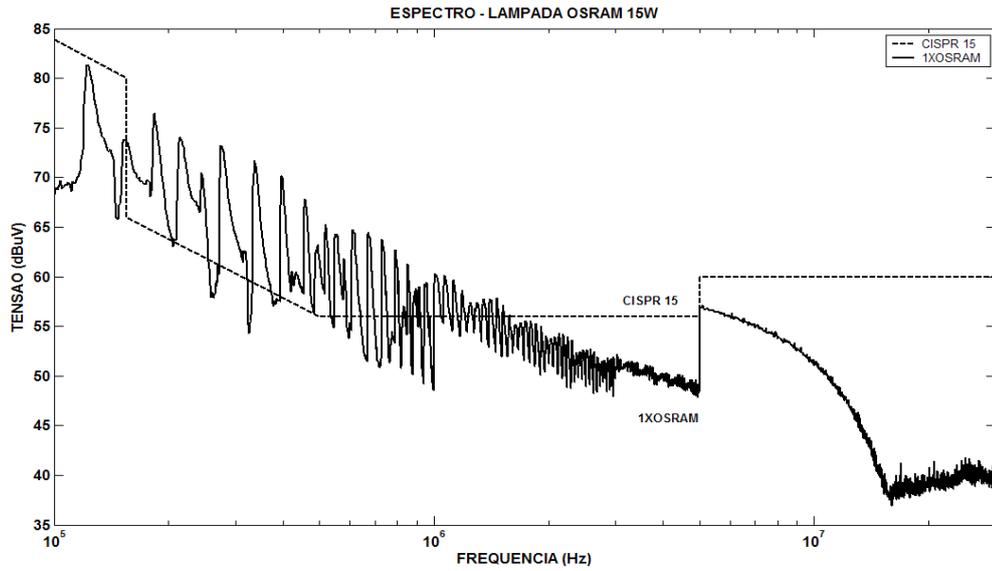


Figura 63 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada OSRAM 15 W.

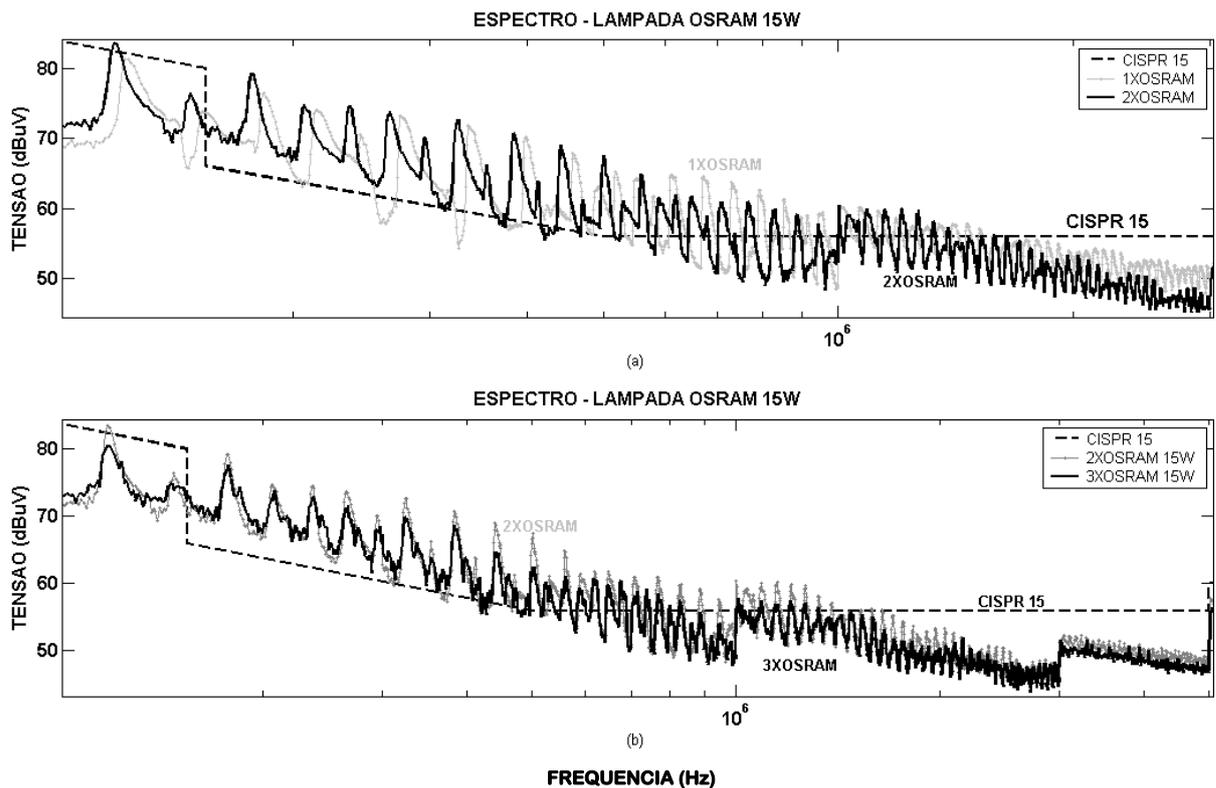


Figura 64 – Comparação do espectro de IEM de lâmpadas OSRAM 15 W: (a) uma e duas; (b) duas e três.

Nos casos vistos nas Figs. 63 e 64 podem ser vistos que o espectro apresenta níveis de emissão de IEM conduzida que foge aos limites máximos exigidos pela norma CISPR 15.

Quando se tem, na mesma luminária, duas lâmpadas o nível de ruído gerado é inferior aquele gerado por uma única lâmpada e com três lâmpadas o nível gerado é ainda menor (ver Fig. 64).

Na Fig. 65.a é feita uma comparação dos níveis de ruído entre a montagem em que se têm três lâmpadas juntas e separadas na mesma luminária (lustre) e na Fig. 65.b compara-se o espectro da montagem de três lâmpadas separadas com o espectro de apenas uma lâmpada.

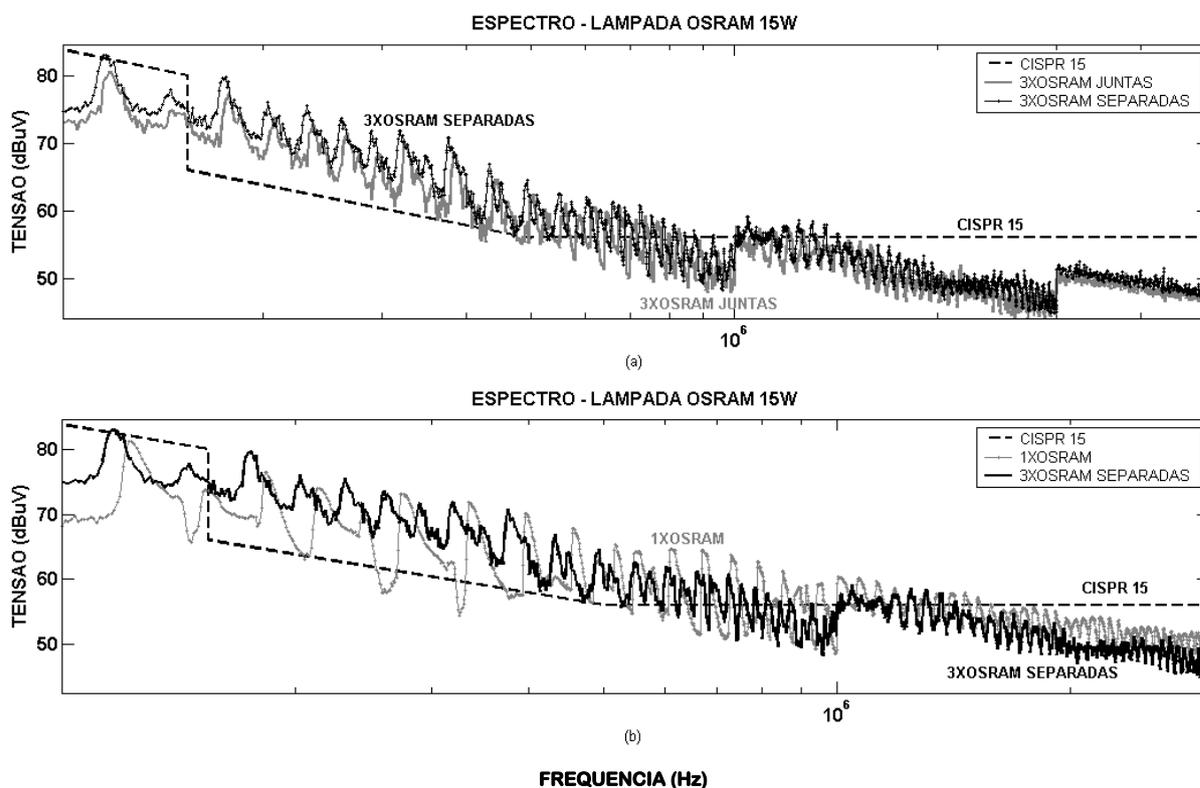


Figura 65 – Comparação dos espectros de IEM das lâmpadas OSRAM 15 W: (a) três lâmpadas juntas e separadas; (b) uma e três lâmpadas separadas.

É possível notar na Fig. 65 que o ruído das três lâmpadas é praticamente igual nas duas situações, lâmpadas juntas e separadas. Quando se compara a configuração de três lâmpadas separadas com apenas uma lâmpada, observa-se uma redução do nível de ruído.

Nos casos vistos para a lâmpada OSRAM 14 W todos apresentam níveis de ruído superiores aos exigidos pela CISPR 15.

4.1.12 Resultados para a marca PHILIPS

Na Fig. 66 são expostos os resultados da medição para uma lâmpada PHILIPS 15 W. Na Fig. 67 são feitas comparações dos níveis de ruído do espectro de IEM para uma luminária com uma e com duas lâmpadas (Fig. 67.a), com duas e com três lâmpadas (Fig. 67.b), respectivamente, a uma distância desprezível.

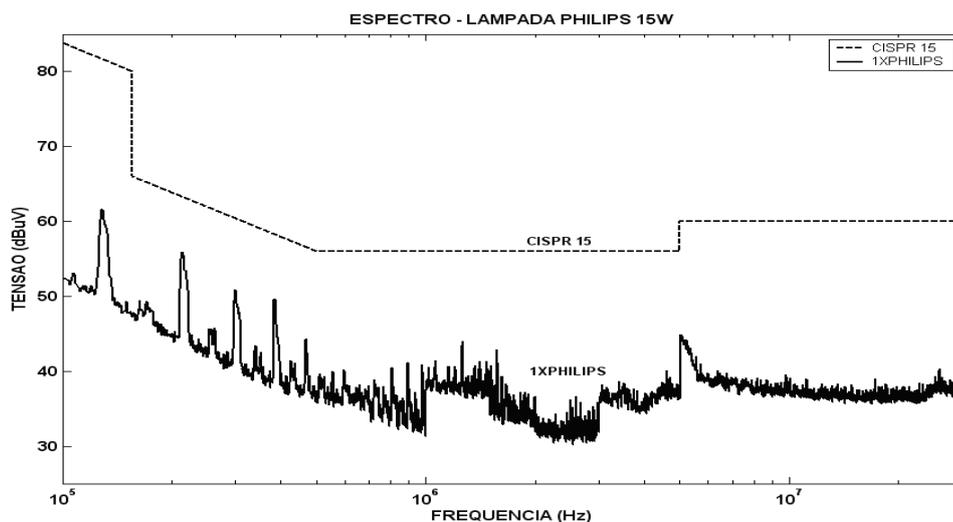


Figura 66 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada PHILIPS 15 W.

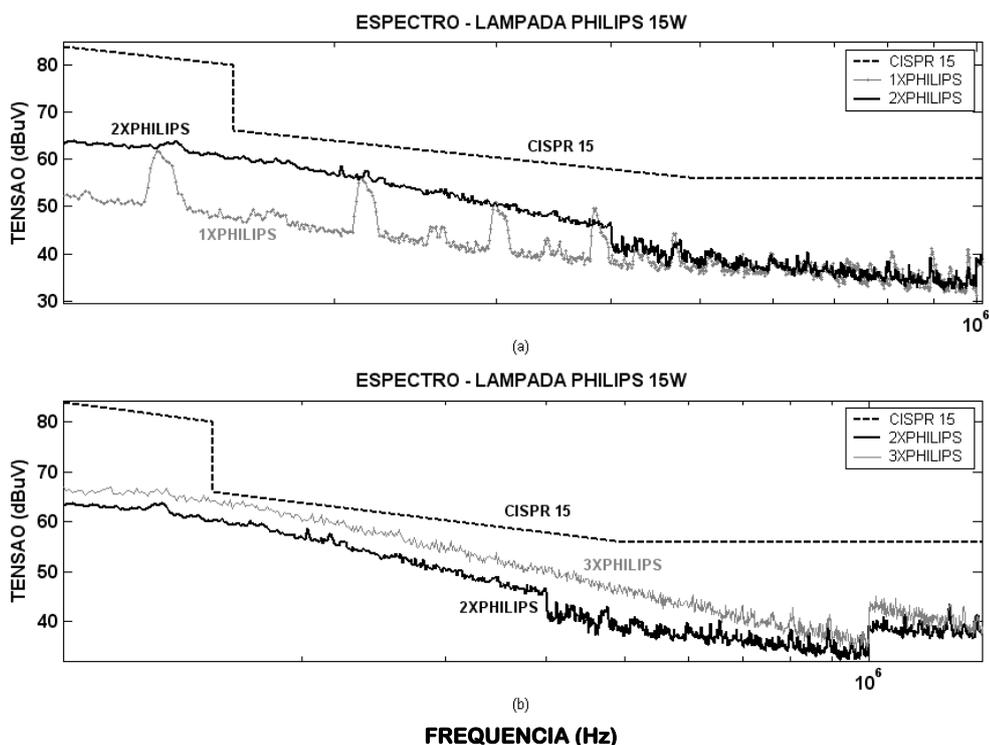


Figura 67 – Comparação dos espectros de IEM: (a) de uma e duas lâmpadas PHILIPS 15 W; (b) de duas e três lâmpadas PHILIPS 15 W.

Quando se observa a Fig. 67.a vê-se que houve um aumento no nível de ruído gerado pelas duas lâmpadas até 700 kHz e redução dos picos em relação a uma lâmpada. A partir daí o nível de ruído tem amplitude idêntica ao produzido por uma única lâmpada. De maneira semelhante, ocorre quando se tem três lâmpadas, Fig. 67.b. O nível de ruído aumentou em relação a duas e conseqüentemente em relação a uma lâmpada, ou seja, na faixa de 100 kHz até ≈ 1 MHz o nível de ruído produzido por três lâmpadas Philips 15 W juntas na mesma luminária é maior que aquele produzido por uma e por duas lâmpadas.

Nas Figs. 66 e 67, os níveis de emissão de IEM conduzida são inferiores aos limites máximos exigidos pela norma CISPR 15, ou seja, são eletromagneticamente compatíveis.

Para verificar o comportamento do espectro de IEM conduzida por lâmpadas PHILIPS de potências diferentes, foram levantados os espectros individuais das potências 5, 14 e 18 W. A comparação desses espectros é mostrada na Fig. 68. A comparação dos espectros das lâmpadas de potência 5 e 14 W é feita na Fig. 68.a e as de potência de 14 e 18 W na Fig. 68.b.

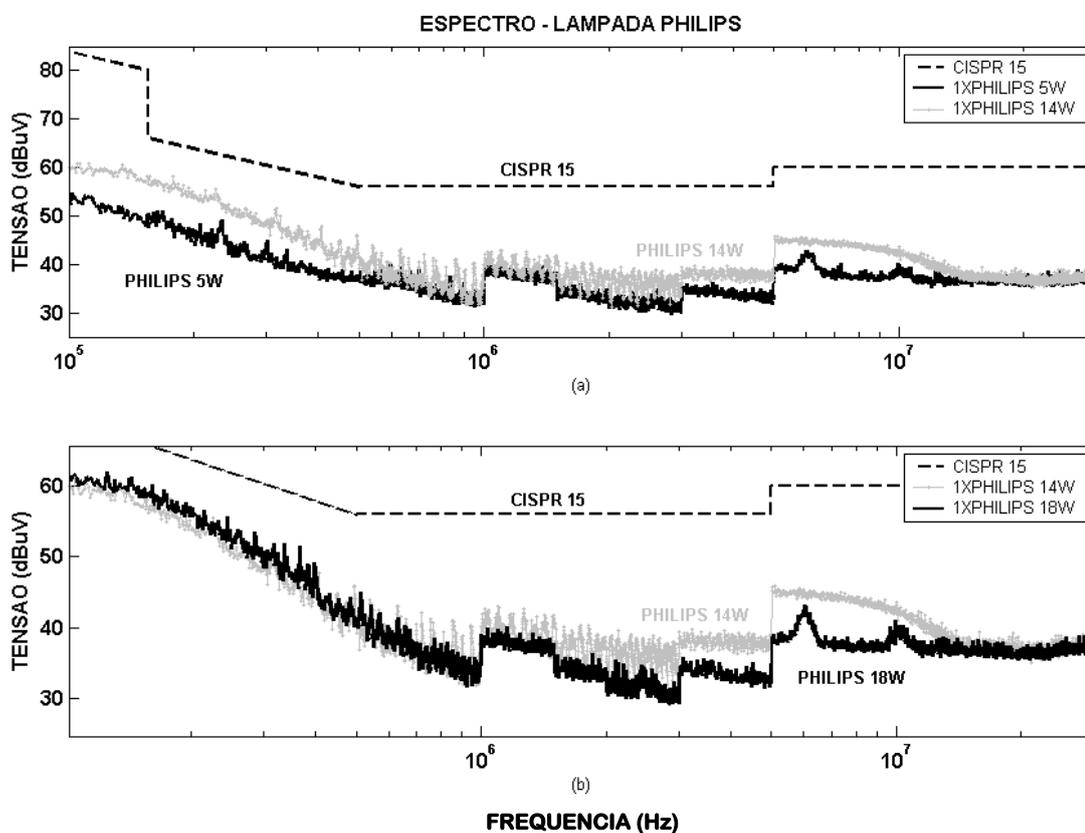


Figura 68 – Comparação dos espectros das lâmpadas PHILIPS de 5, 14 e 18 W.

Na Fig. 68 pode ser visto que há uma variação de valores nos níveis de ruído ao longo da faixa de medição. Em toda a faixa o nível do espectro da lâmpada de 14 W ($I_{nominal} = 100$ mA) é superior a de 5 W ($I_{nominal} = 35$ mA) (Fig. 68.a) e praticamente o mesmo da lâmpada de 18 W ($I_{nominal} = 130$ mA) na faixa de 100 kHz a 1 MHz (Fig. 68.b); a partir daí o espectro de 14 W é superior a de 18 W. No intervalo de 100 kHz até 600 kHz a lâmpada de 18 W produz níveis de ruído maiores que a de 5 W, acima dessa frequência os níveis são idênticos.

Esse resultado, assim como para as marcas AVANT e EMPALUX, contraria as expectativas de que a lâmpada de maior potência/corrente nominal deveria ser fonte de maior ruído. A diferença entre os níveis de amplitude de ruído entre as potências de 5, 14 e 18 W são muito pequenas. Essa diferença pode ser causada pelas mesmas razões ditas na seção 4.1.3.

Os resultados das medições feitas com a PHILIPS 14 W distantes do ponto de alimentação 50 cm, como visto na Fig. 27, são expostos na Fig. 69.

Essa configuração não produz grande efeito em termos de redução dos níveis de ruído produzidos pelas LFCs. Ao contrário do que aconteceu com outras marcas (AVANT e GE), houve um aumento no nível de ruído produzido por essa configuração a ponto de superar a curva de referência na faixa entre 150 e 300 kHz. O aumento no nível de ruído pode ter ocorrido pela soma construtiva do ruído produzido por cada lâmpada individual e por uma redução da impedância total da configuração.

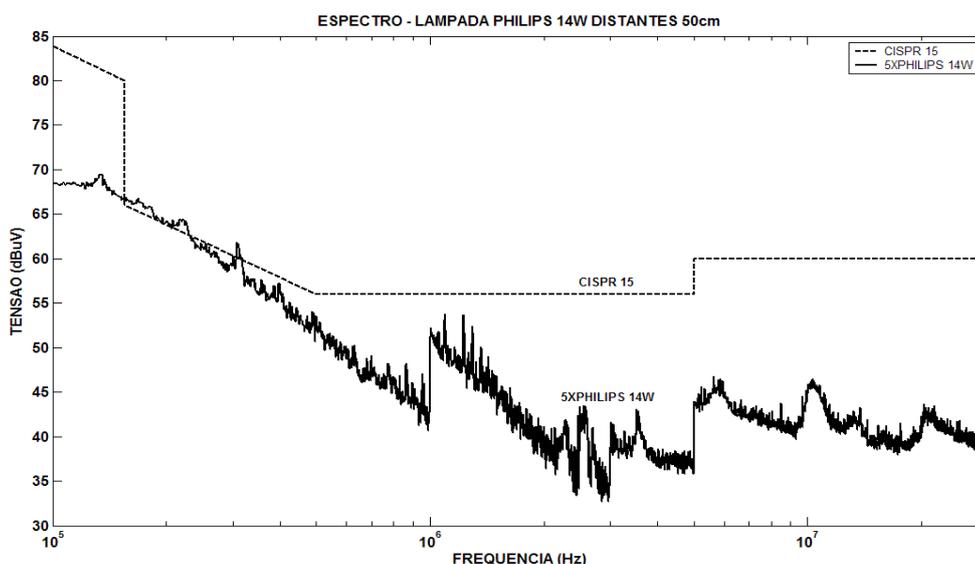


Figura 69 – Espectro de IEM conduzida para o lustre com cinco lâmpadas PHILIPS 14 W.

4.1.13 Resultados para a marca SYLVANIA

Os resultados da medição para a lâmpada SYLVANIA 9,0 W, com uma e com duas lâmpadas na mesma luminária, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas, podem ser vistos nas Figs. 70 e 71.

Como visto na maioria das outras marcas, o espectro da lâmpada SYLVANIA 9,0 W apresenta nível de emissão de IEM conduzida que excedem os limites máximos da norma utilizada. Com duas lâmpadas da marca SYLVANIA conectadas na mesma luminária têm-se o nível de ruído gerado menor que o ruído causado por uma única lâmpada (ver Fig. 71).

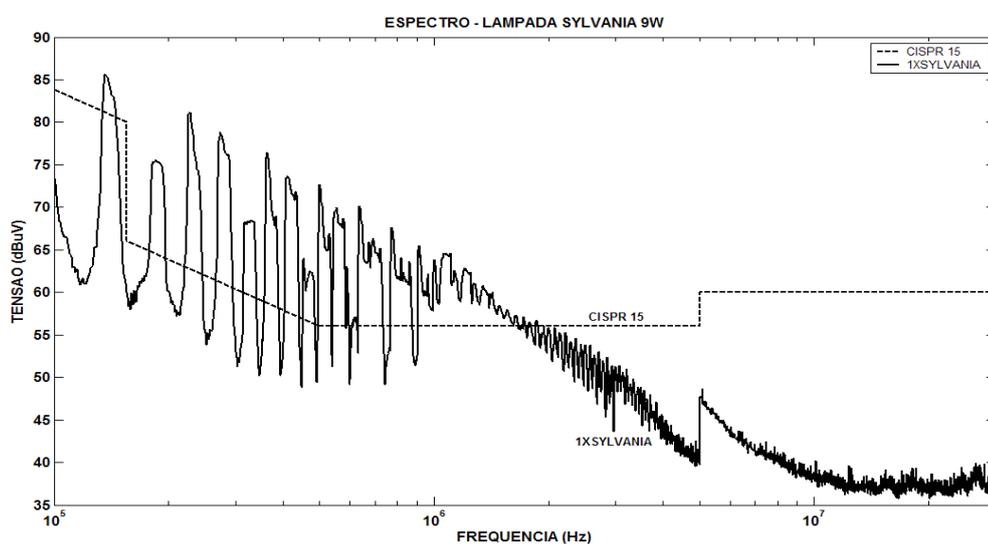


Figura 70 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada SYLVANIA 9,0 W.

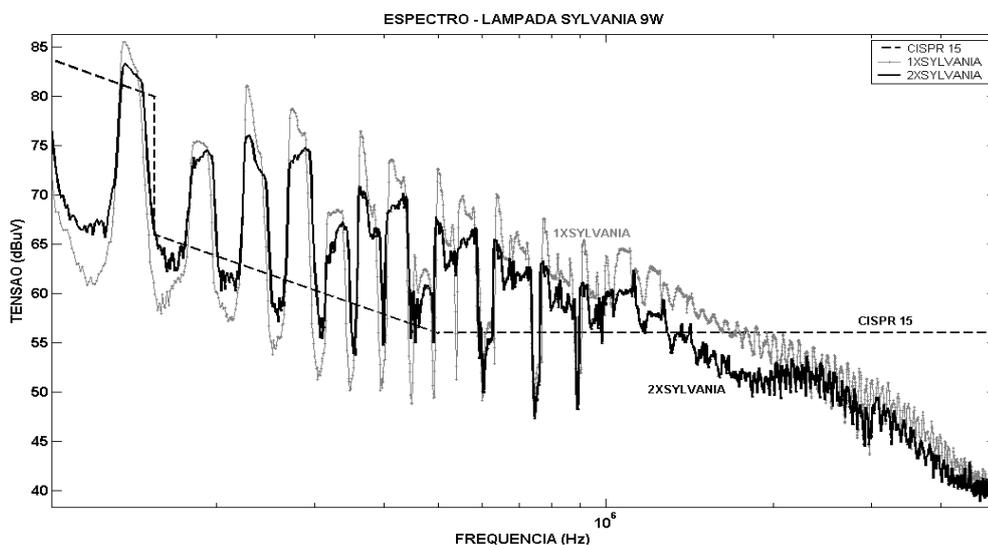


Figura 71 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas SYLVANIA 9,0 W.

4.1.14 Resultados para a marca SA ECONÔMICA

A lâmpada SA ECONÔMICA é de origem portuguesa e serve de amostra para comparação com as marcas vendidas no Brasil e testadas nesse trabalho.

Os resultados da medição para a lâmpada SA ECONÔMICA 18 W, com uma e com duas lâmpadas na mesma luminária, respectivamente, a uma distância desprezível entre elas, podem ser vistos nas Figs. 72 e 73.

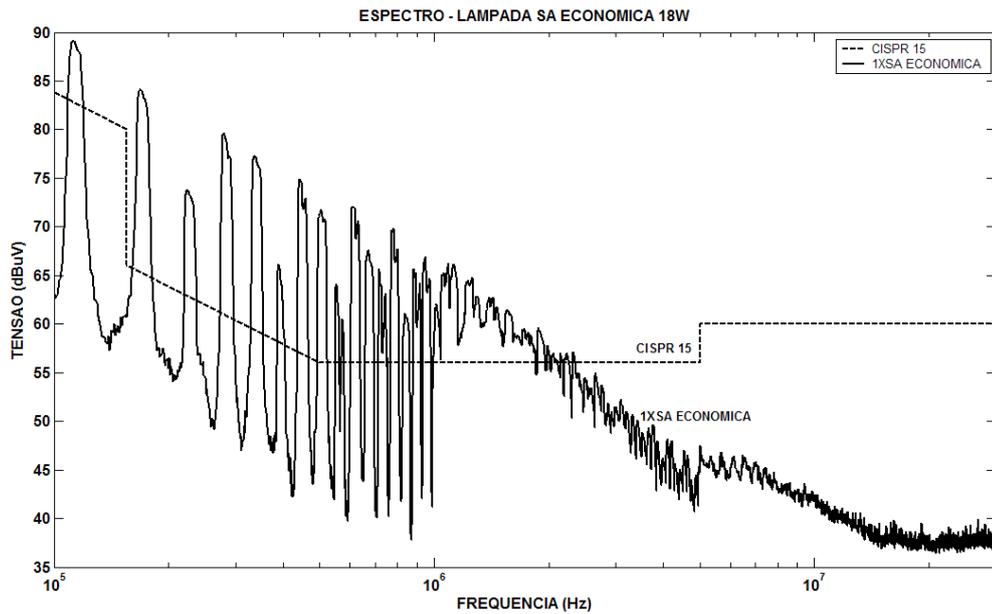


Figura 72 – Espectro de emissão conduzida de IEM de uma lâmpada SA ECONÔMICA 18 W.

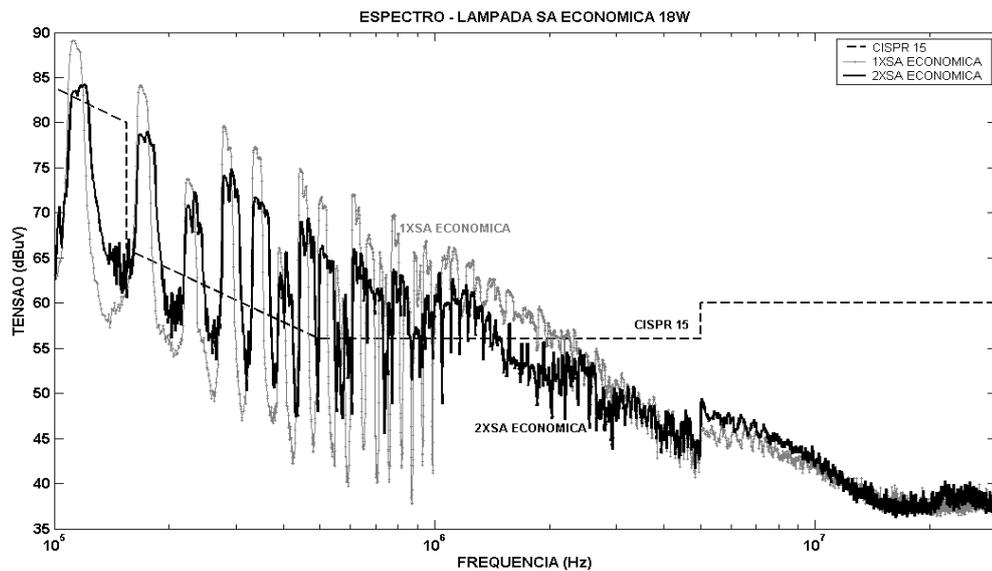


Figura 73 – Comparação dos espectros de IEM de uma e duas lâmpadas SA ECONÔMICA 18 W.

Como visto na maioria das outras marcas vendidas no Brasil, o espectro da lâmpada SA ECONÔMICA 18 W apresenta níveis de emissão de IEM conduzida que não estão de acordo com a norma utilizada.

Com duas lâmpadas da marca SA ECONÔMICA conectadas na mesma luminária têm-se o nível de ruído total menor que o ruído produzido por uma única lâmpada (ver Fig. 73).

Como pode ser observado nos gráficos do espectro de emissão conduzida de IEM expostos nesta seção, apenas duas marcas testadas estão dentro dos limites máximos exigidos pela CISPR 15 (GE modelo *twister* e PHILIPS). Assim, é necessário procurar maneiras de adequar os níveis de emissão eletromagnética conduzida pelas LFCs às exigências da norma CISPR 15, tornando-as assim um produto compatível eletromagneticamente.

4.2 SOLUÇÃO PARA REDUZIR OS NÍVEIS DE IEM CONDUZIDA PELAS LFCs

Nesta seção são apresentados os procedimentos para projetar um filtro para reduzir os níveis de IEM conduzida e os resultados das medições para cada lâmpada com o filtro projetado. O filtro foi aplicado para o caso em que a lâmpada apresentou nível de ruído superior ao máximo exigido pela norma.

Dentro das várias configurações possíveis de filtros, expostos na seção 3.1.2, optou-se por utilizar o filtro LC com *choke* de modo comum, devido a sua ação de bloqueio da corrente de modo comum, além da simplicidade e quantidade de componentes.

O projeto do núcleo do indutor com toróide de alta permeabilidade, permite conseguir valores elevados de indutância com tamanho reduzido e bloquear a corrente de modo comum (HAUSMANN, 2000).

A estrutura do filtro e o circuito equivalente podem ser observados na Fig. 74. Nesta figura o R_{eq} representa a resistência equivalente da rede elétrica na frequência de projeto.

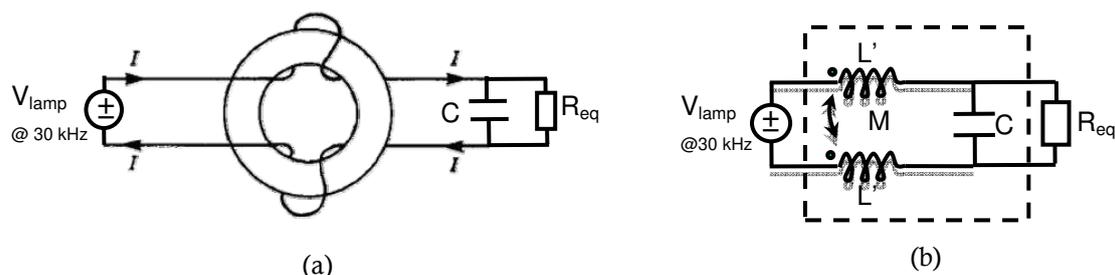


Figura 74 – (a) Estrutura do filtro LC com *choke* de modo comum; (b) circuito equivalente.

O procedimento para obtenção dos valores do indutor e capacitor do filtro LC não seguiu o procedimento tradicional. A partir da análise dos níveis de ruído gerado pelas LFCs, que não estão de acordo com a norma, viu-se que seria necessário um circuito de filtragem que fornecesse uma atenuação em torno de 20 dB na frequência de funcionamento do circuito interno das lâmpadas, 30 e/ou 40 kHz.

É importante ressaltar que nem todas as lâmpadas testadas funcionam em 30 kHz, como pode ser visto no Quadro em anexo. Essa frequência foi escolhida por ser a de menor valor entre todas as marcas testadas, com isso evitando a fabricação de um circuito diferente para cada marca. O filtro deve agir a partir de frequências acima de 30 kHz. O procedimento a seguir pode ser aplicado a frequências diferentes de 30 kHz.

Para viabilizar o projeto do filtro de IEM é preciso conhecer a impedância da carga (no caso, a rede elétrica) vista pela fonte de ruído (LFC). Como não se sabe qual é o valor exato da impedância da rede elétrica em altas frequências usou-se o recomendado em (PAUL, 1992) que é 50Ω , na faixa de frequência de interesse (9 kHz – 30 MHz). Para garantir que a impedância da linha seja 50Ω em 30 kHz, um capacitor de 106 nF foi colocado em paralelo com a rede elétrica, ou seja, entre os terminais de fase e neutro (FERREIRA, 2010). Como dito na seção 3.1.2 esse capacitor servirá para desviar o ruído causado pela corrente de modo diferencial e também pela corrente de modo comum.

O valor do capacitor foi obtido pela equação (4.1) (SANCHES, 2003).

$$C = \frac{1}{2\pi f Z_c}. \quad (4.1)$$

Uma vez garantida à impedância máxima de 50Ω , foi realizado o cálculo do *choke* de modo comum, a fim de reduzir os níveis de ruído em cerca de 20 dB em 30 kHz.

Considerando o circuito mostrado na Fig. 75, pode-se escrever a relação entre a entrada (v_e) e a saída (v_s) do filtro, partindo da análise de divisor de tensão.

$$\frac{v_s}{v_e} = A = \frac{Z_{carga}}{Z_{carga} + Z_{ind}}. \quad (4.2)$$

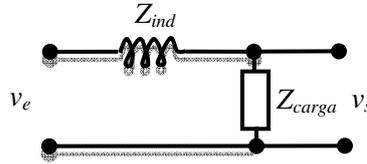


Figura 75 – Circuito do filtro LC.

Manipulando matematicamente a equação (4.2), chega-se a

$$Z_{ind} = \frac{Z_{carga}(1-A)}{A}. \quad (4.3)$$

Em que, A é o valor de atenuação da tensão, expresso em grandezas lineares.

Para transformar a unidade dB, grandeza logarítmica, para linear, usa-se

$$A = 10^{\frac{A_{dB}}{20}}. \quad (4.4)$$

Lembrar que se estar tratando de atenuação, portanto o valor de A_{dB} tem que ser negativo.

Por meio da equação (4.5) pode ser calculado o valor de indutância total do circuito do *choke* de modo comum.

$$Z_{ind} = 2\pi fL \Rightarrow L = \frac{Z_{ind}}{2\pi f}. \quad (4.5)$$

Substituído os valores numéricos nas equações (4.3, 4.4 e 4.5) encontra-se um valor de indutância de 2,4 mH. Como os enrolamentos dos indutores devem estar presentes nos dois condutores (veja Fig. 74.b) a indutância para cada um deve ser metade da calculada, ou seja, 1,2 mH.

Para determinar o número de espiras necessárias para se obter a indutância desejada deve-se conhecer as características do toróide: o valor da permeabilidade relativa do núcleo (μ_r), altura (h), Raio externo e Raio interno (ver Fig. 76). Substituindo esses valores na equação (4.6) encontra-se o valor de N_{esp} (NUSSENZVEIG, 1997).

$$N_{esp} = \sqrt{\frac{2\pi L}{(\mu_0 \mu_r) h \ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{int}}\right)}}, \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H/m). \quad (4.6)$$

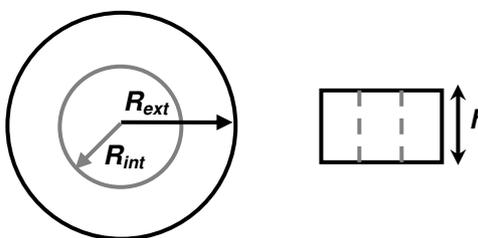


Figura 76 – Ilustração das dimensões de um toróide.

No caso estudado, foi usado um toróide de núcleo de ferrite, referência FT 50A 43, com $\mu_r = 850$, $R_{ext} = 6,45$ mm, $R_{int} = 3,72$ mm e $h = 6,6$ mm. Poderia ter sido usado outros tipos de ferrite como, por exemplo, MnZn, cobalto, que funcionem na faixa de frequência de interesse. Assim, o número de espiras para se obter uma indutância de 1,2 mH é 44.

Resumindo:

- Indutância do *choke* de modo comum = 2,4 mH;
- Atenuação desejada = - 20 dB;
- Capacitor comercial = 100 nF/400 V;
- Toróide = FT 50A 43;
- Número de espiras = 44.

Na Fig. 77 é mostrado a foto do circuito do filtro projetado.

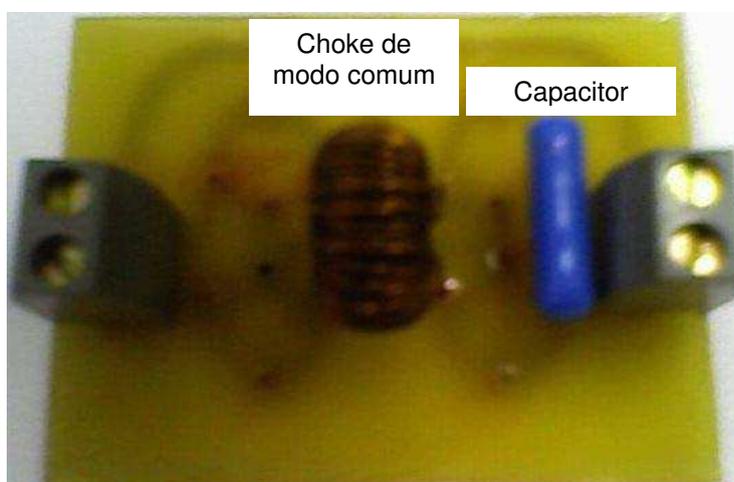


Figura 77 – Foto do filtro de IEM projetado.

A resposta em frequência do filtro projetado é mostrada na Fig. 78.

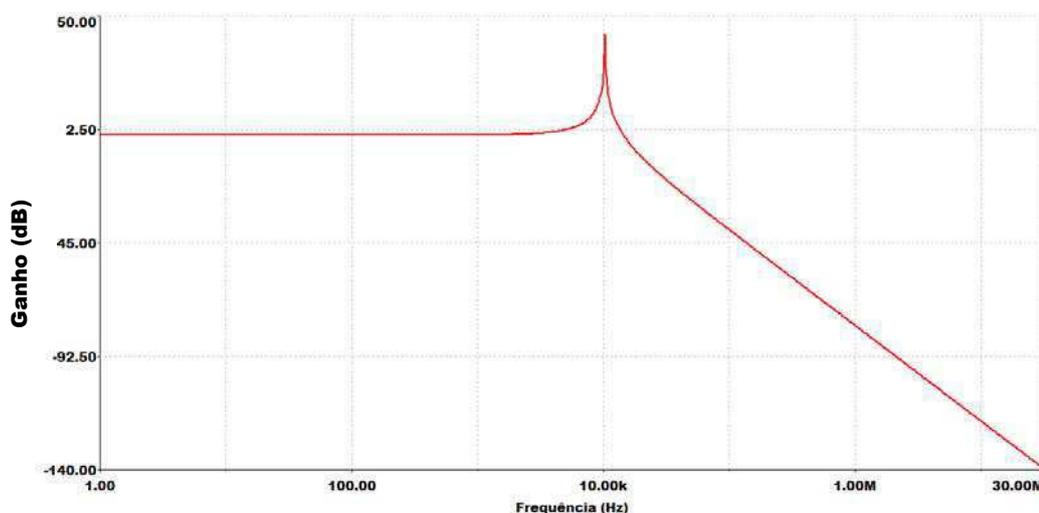


Figura 78 – Diagrama de Bode do filtro de IEM projetado.

A frequência de ressonância do filtro é 10,27 kHz e em 30 kHz a atenuação atingida na simulação foi de -18 dB, exatamente em 34 kHz a atenuação desejada (-20 dB) é atingida. O filtro decai a uma taxa de 20 dB por década. A resposta desse filtro é uma resposta tipo *Butterworth*.

Segundo (RECH, 2009) o fator de qualidade de um filtro determina seu grau de seletividade. Quanto menor o Q menor é o pico de ressonância no gráfico da resposta do filtro. O fator de qualidade do filtro é dado por

$$Q = \frac{R}{2\pi f_o L}$$

O filtro projetado possui $Q = 0,323$. Isso demonstra, juntamente com a resposta do filtro que o procedimento adotado aqui, para o cálculo do filtro, está dentro do esperado.

Para verificar a ação dos elementos do filtro no bloqueio da IEM conduzida mediram-se separadamente cada elemento. O resultado, para mostrar a faixa de frequência em que se observa com maior clareza os espectros, é exposto na Fig. 79.

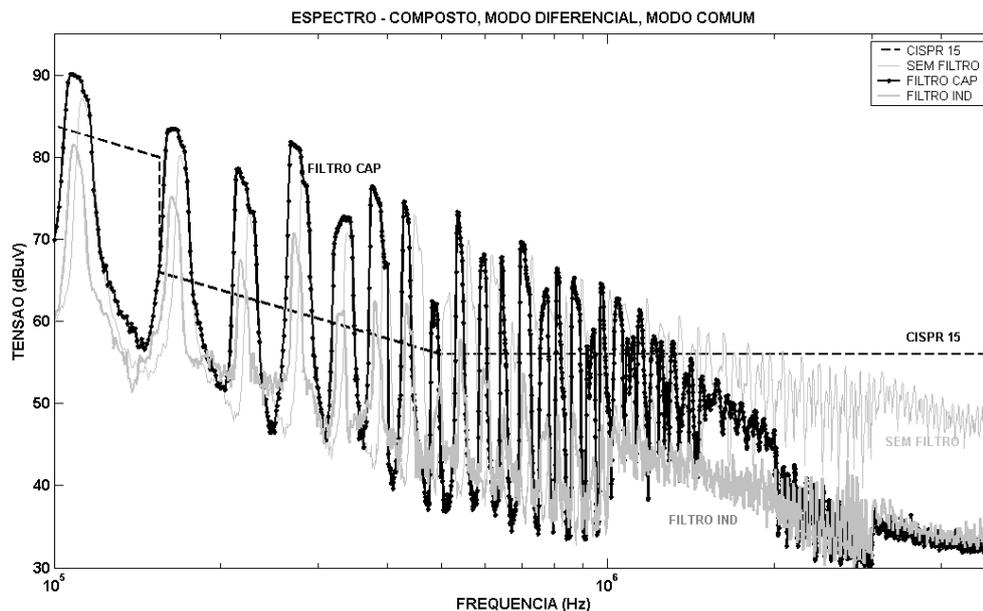


Figura 79 – Curvas de IEM conduzida sem filtro, com filtro apenas capacitivo e com filtro apenas indutivo.

Observando as curvas expostas na Fig. 79 ver-se que realmente existe a presença de dois tipos de ruído originários das correntes de modo comum e diferencial e que o capacitor age no bloqueio do ruído proveniente da corrente de modo diferencial e o *choke* no bloqueio do ruído proveniente da corrente de modo comum. Mas, isoladamente eles não são capazes de reduzir o ruído a níveis aceitáveis pela CISPR 15 em toda a faixa de interesse. Portanto, é necessária a presença de ambos.

Adicionando a lâmpada, o filtro de IEM projetado, pode-se fazer novas medições para verificar se ele realmente é capaz de reduzir o nível de ruído gerado pelas LFCs.

4.2.1 Resultados para a marca ARAM com filtro de IEM

Na Fig. 79 são mostrados os resultados da medição para a lâmpada ARAM 15 W com e sem a presença do filtro de redução de IEM.

Pode ser observado, na Fig. 80, que na faixa de 150 kHz a 1,6 MHz existem muitos valores acima do permitido pela norma na curva sem o filtro. O valor máximo de ruído medido, nessa curva, é 76 dBμV em 178 kHz e o valor mínimo é 49 dBμV, em 971 kHz. Quando o filtro é introduzido todo o ruído, na faixa de interesse, é reduzido

consideravelmente para valores aceitáveis pela CISPR 15. Em alguns pontos do espectro o filtro chegou a atingir uma atenuação máxima de 25 dB e um mínimo de 2 dB.

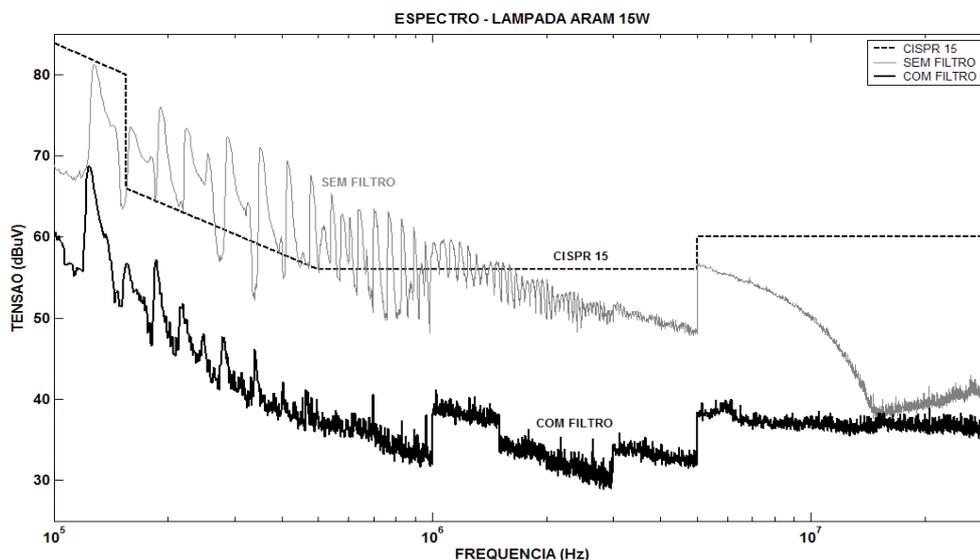


Figura 80 – Comparação dos espectros de IEM de uma lâmpada ARAM 15 W com e sem o filtro de IEM.

4.2.2 Resultados para a marca ATRALUX com filtro de IEM

Na Fig. 81 são apresentados os resultados da medição para a lâmpada ATRALUX 18 W com e sem o filtro de redução de IEM conduzida. Nesta figura nota-se que a inclusão do filtro propiciou a redução nos níveis de ruído produzidos pela ATRALUX 18 W em toda a faixa medida. A maior atenuação (33 dB) ocorreu na frequência de 450 kHz, bem acima do que foi projetado. Na frequência de 156 kHz o pico do ruído, após a inclusão do filtro, ficou próximo do limite da curva CISPR 15, distante apenas 2,5 dB. Mesmo assim pode-se dizer que com o filtro a ATRALUX 18 W é agora compatível eletromagneticamente.

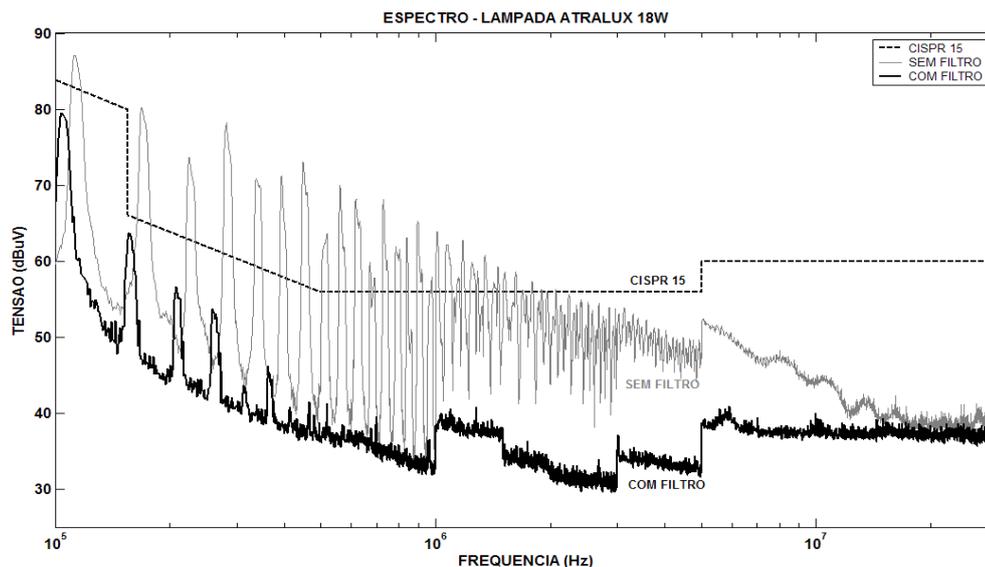


Figura 81 – Comparação dos espectros de IEM conduzida por uma lâmpada ATRALUX 18 W com e sem o filtro de IEM.

4.2.3 Resultados para a marca AVANT com filtro de IEM

Na Fig. 82 são expostos os resultados da medição para apenas as lâmpadas AVANT de 9 e 20 W com e sem a presença do filtro de redução de IEM. Essas duas potências foram escolhidas por produzirem individualmente níveis de ruído mais elevados.

Como pode ser visto na Fig. 82, na faixa de 150 kHz a 2 MHz existem muitos valores acima do permitido pela norma nas curvas sem o filtro. O valor máximo de ruído medido, na curva da lâmpada de 9 W, é 88 dB μ V em 138 kHz e o valor mínimo é 50 dB μ V, em 700 kHz. Quando o filtro é introduzido todo o ruído na faixa medida é reduzido consideravelmente para valores permitidos pela CISPR 15. Os três primeiros picos têm amplitudes próximas do limite exigido pela norma, mas ainda sim se pode considerar a AVANT 9 W compatível eletromagneticamente.

Para o caso da AVANT 20 W a situação é semelhante, o pico máximo na curva sem filtro é 86 dB μ V em 117 kHz e o valor mínimo é 44 dB μ V, em 400 kHz. A inclusão do filtro fez o nível de ruído cair para valores compatíveis com a CISPR 15. A atenuação máxima conseguida foi de 30 dB μ V em 645 kHz. Apenas o segundo pico tem amplitude próxima do limite exigido pela norma, uma diferença de apenas 2,5 dB.

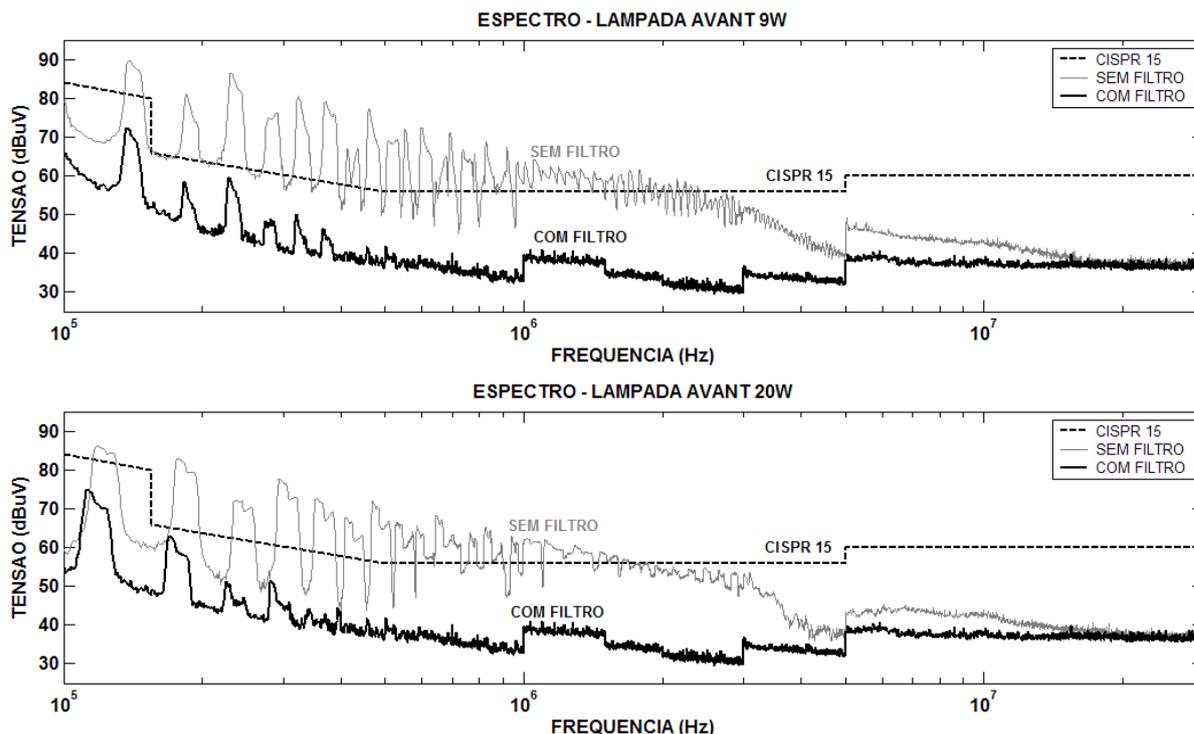


Figura 82 – Espectros de IEM das lâmpadas AVANT 9 e 20 W, com e sem o filtro de IEM.

4.2.4 Resultados para a marca EMPALUX com filtro de IEM

Na Fig. 83 são apresentados os resultados da medição para as lâmpadas EMPALUX de potências 7 e 30 W com e sem o filtro de redução de IEM conduzida.

A inclusão do filtro propiciou a redução nos níveis de ruído tanto para a potência de 7 W quanto para a potência de 30 W em toda a faixa medida (Fig. 83).

A atenuação máxima, no caso da EMPALUX 7 W, foi de 35 dB na frequência de 370 kHz, bem acima do que foi projetado. Na frequência de 166 kHz o pico do ruído após a inclusão do filtro ficou muito próximo do limite da curva CISPR 15, distante apenas 1 dB. Isso indica que o projeto do filtro, para essa potência, deveria permitir uma atenuação maior. Apesar dessa condição todo o espectro se encontra abaixo dos limites máximos exigidos pela norma.

No caso da EMPALUX de 30 W sem o circuito de filtragem, o ponto de maior amplitude fora da norma chegou a 70 dB μ V em 220 kHz, com a inclusão do filtro esse ponto passou para 50 dB μ V, uma atenuação de 20 dB. Para essa potência o filtro projetado produziu um efeito maior na atenuação do ruído, até porque o ruído

produzido por ela possui amplitudes menores do que a EMPALUX 7 W na faixa de frequência onde o espectro está fora da norma.

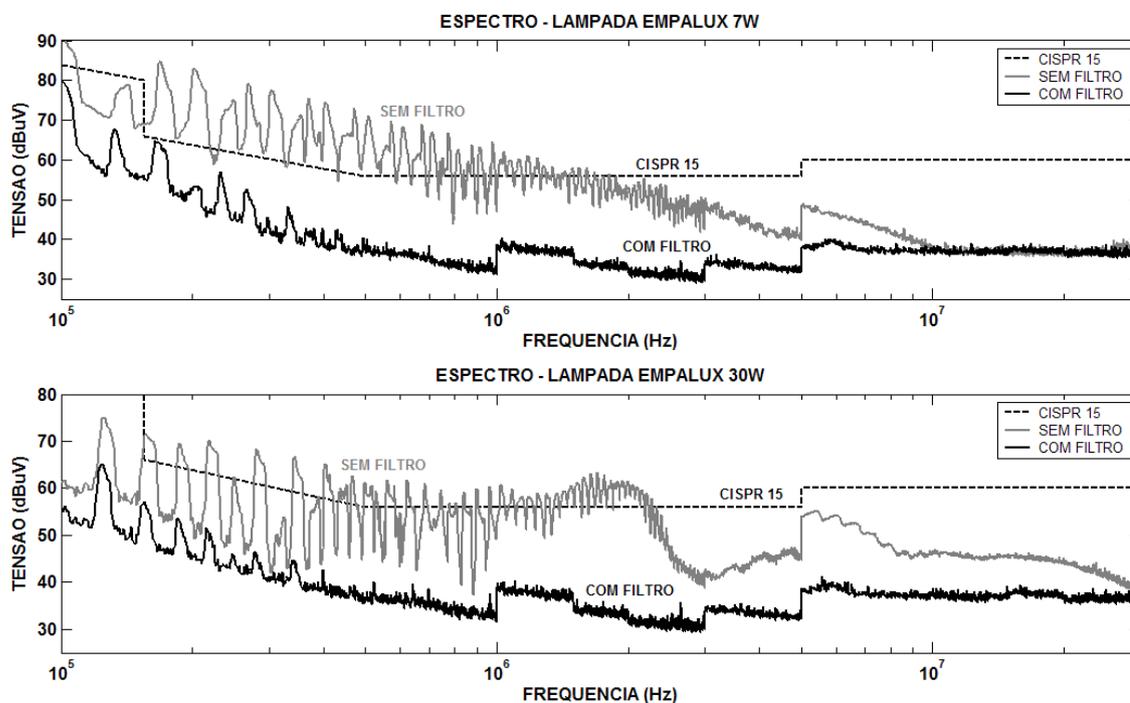


Figura 83 – Comparação dos espectros de IEM das lâmpadas EMPALUX 7,0 e 30 W, com e sem filtro.

4.2.5 Resultados para a marca FLC com filtro de IEM

Na Fig. 84 são mostrados os resultados da medição para a lâmpada FLC 15 W com e sem o filtro de redução de IEM conduzida.

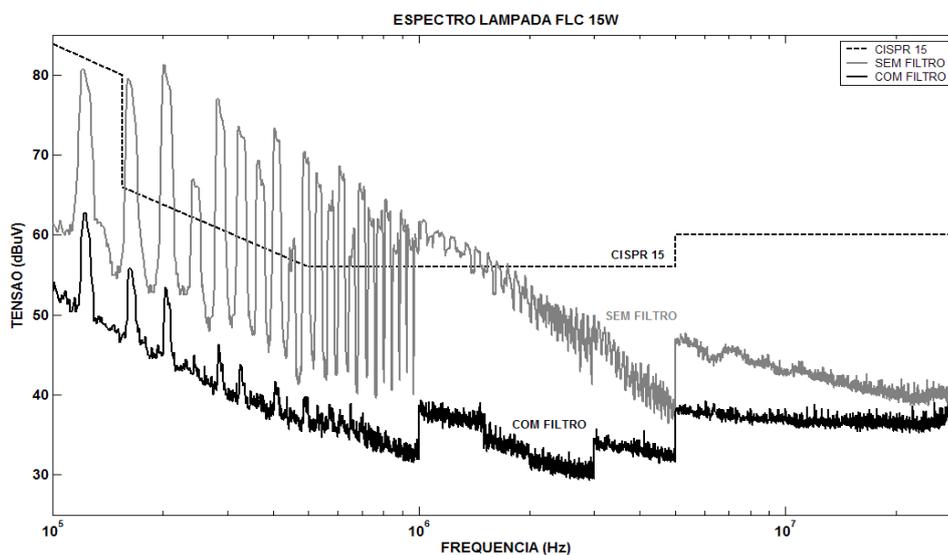


Figura 84 – Espectros de IEM de uma lâmpada FLC 15 W com e sem o filtro de IEM.

Com adição do filtro (Fig. 84) pode ser observado que ocorreu redução dos níveis de ruído produzidos pela FLC 15 W em toda a faixa medida. Há pontos em que a redução foi de 31 dB na frequência de 200 kHz, por exemplo. Nas frequências acima de 5 MHz o ruído médio está em torno de 38 dB μ V, bem abaixo do exigido pela norma (60 dB μ V). Portanto, o filtro de IEM funcionou satisfatoriamente no bloqueio do ruído produzido por essa marca de lâmpada.

4.2.6 Resultados para a marca GREAT VALUE com filtro de IEM

Na Fig. 85 são expostos os resultados da medição para a lâmpada GREAT VALUE 14 W com e sem a presença do filtro de redução de IEM. Nessa figura pode ser observado que na faixa de 150 kHz a 1 MHz existem muitos valores acima do permitido pela norma na curva sem o filtro.

O valor máximo do ruído medido, na curva sem filtro, chega a atingir 75 dB μ V em 150 kHz e o valor mínimo 41 dB μ V, em 500 kHz. Quando o filtro é introduzido todo o ruído na faixa medida, é reduzido consideravelmente para valores permitidos pela norma CISPR 15. Os valores 75 e 41 dB μ V foram reduzidos para 59 e 37 dB μ V, respectivamente, após a inclusão do filtro.

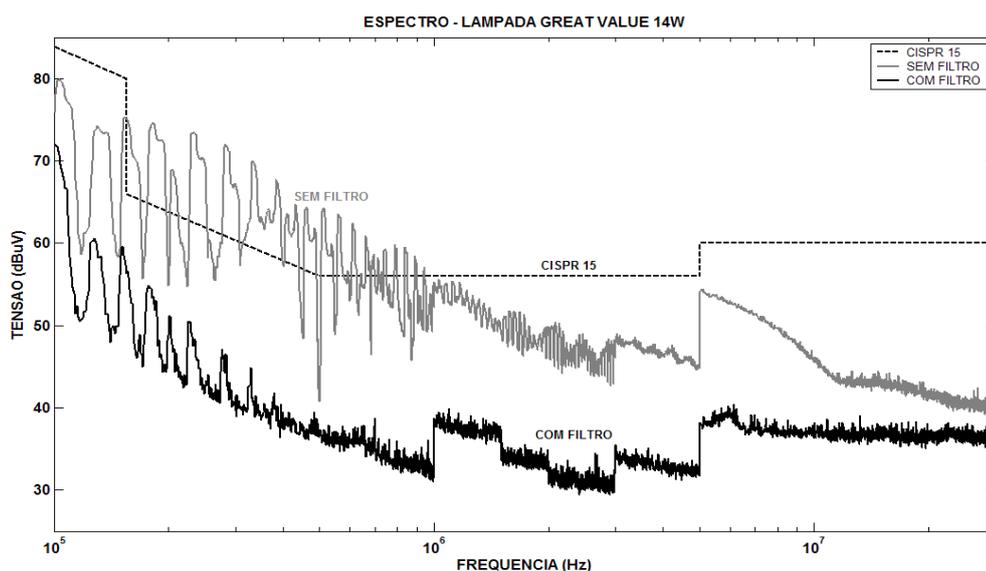


Figura 85 – Espectros de IEM de uma lâmpada GREAT VALUE 14 W, com e sem filtro de IEM.

4.2.7 Resultado para marca GOLDEN com filtro de IEM

Na Fig. 86 são mostrados os resultados da medição para a lâmpada GOLDEN 6 W com e sem a presença do filtro de redução de IEM.

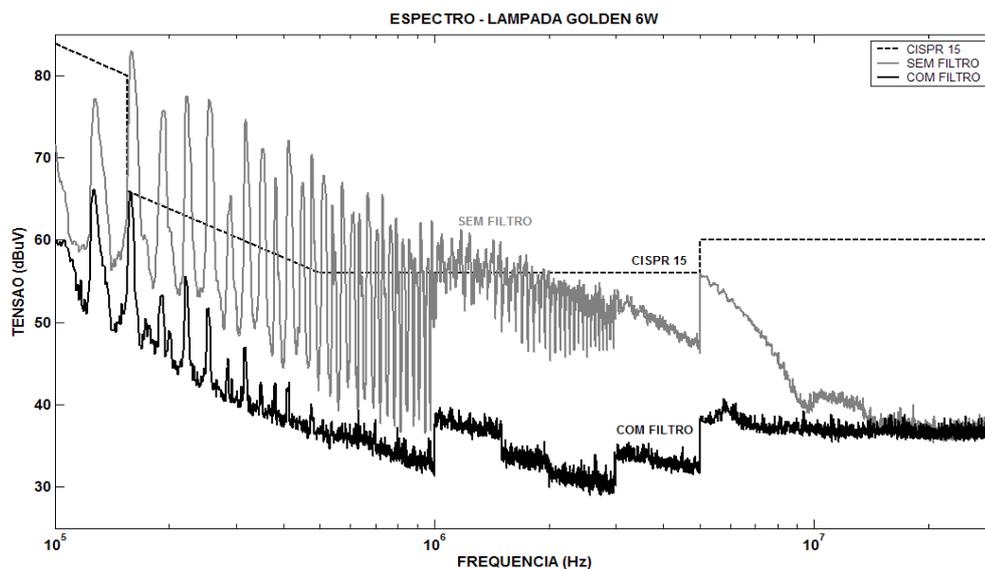


Figura 86 – Espectros de IEM de uma lâmpada GOLDEN 6,0 W, com filtro e sem filtro de IEM.

Pode ser observado, na Fig. 86, que na faixa de 150 kHz a 2 MHz o espectro da lâmpada GOLDEN 6 W apresenta níveis de emissão de IEM conduzida acima do permitido pela norma, no caso da curva sem o filtro. O valor máximo de ruído medido, nessa curva, é 86 dB μ V em 158 kHz. Quando o filtro é introduzido esse valor passa para 66 dB μ V, que é o limite máximo permitido para essa frequência. Nas demais frequências, dentro da banda estudada, o nível de ruído está bem abaixo da máscara da norma CISPR 15.

4.2.8 Resultados para a marca GE com filtro de IEM

Na Fig. 87 são apresentados os resultados da medição para a lâmpada GE 14 W com e sem o filtro de redução de IEM conduzida.

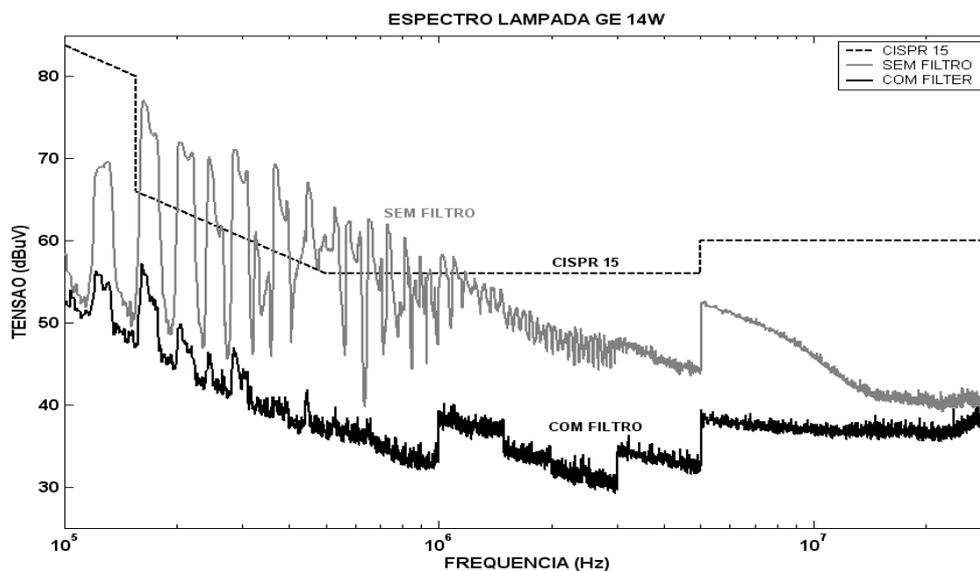


Figura 87 – Espectros de IEM de uma lâmpada GE 14 W, com e sem o filtro de IEM.

Na Fig. 87 pode ser visto que a inclusão do filtro resultou na redução nos níveis de ruído produzidos pela GE 14 W em toda a faixa medida. Há pontos, por exemplo, em 450 kHz, que a redução foi de 28 dB. Nas frequências acima de 5 MHz o ruído médio está em torno de 38 dB μ V, bem abaixo do exigido pela norma (60 dB μ V). Portanto, o filtro de IEM funcionou satisfatoriamente no bloqueio do ruído produzido por essa marca de lâmpada.

4.2.9 Resultados para a marca IMPACT com filtro de IEM

Na Fig. 88 são expostos os resultados da medição para a lâmpada IMPACT 14 W para os casos com e sem o filtro de redução de IEM conduzida. No caso da curva sem o filtro, nota-se, nesta figura, que o nível de ruído fora da norma se estende desde 100 kHz até 7 MHz com amplitudes bem superiores aos limites máximos permitidos. Com a inclusão do filtro essa faixa fica entre 150 kHz e 500 kHz, ou seja, o filtro propiciou a redução nos níveis de ruído para valores aceitáveis em toda a faixa acima de 500 kHz, mas não para toda a faixa de interesse. Existem poucos pontos que tocam a mascara ou ultrapassam-na de mais ou menos 3 dB. Isso indica que o projeto do filtro para essa marca deveria permitir uma atenuação maior.

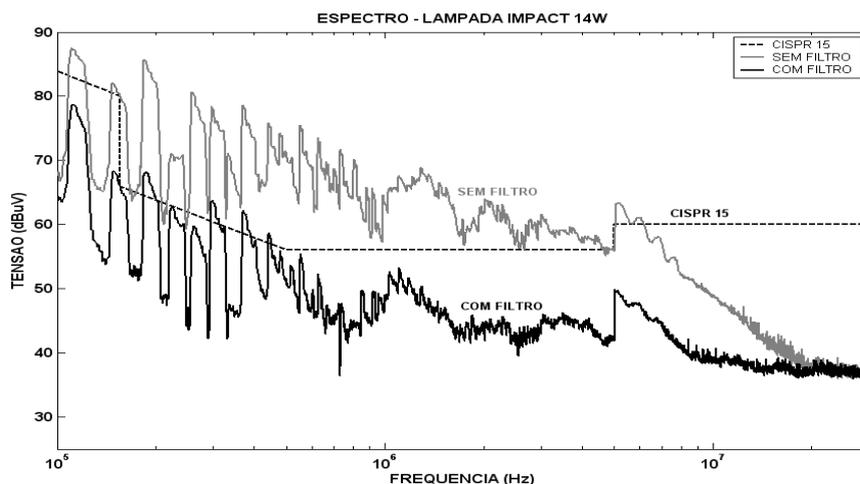


Figura 88 – Espectros de IEM de uma lâmpada IMPACT 14 W, com e sem filtro de IEM.

4.2.10 Resultados para a marca NEOTRON com filtro de IEM

Na Fig. 89 são mostrados os resultados da medição para a lâmpada NEOTRON 18 W com e sem a presença do filtro de redução de IEM. Nessa figura pode ser observado que na faixa de 130 kHz a 1,6 MHz existem muitos valores acima do permitido pela norma, na curva sem o filtro.

O valor máximo de ruído medido, na curva sem filtro, chega a atingir 83 dB μ V em 130 kHz e o valor mínimo 39 dB μ V, em 650 kHz. Quando o filtro é introduzido todo o ruído, na faixa medida, é reduzido consideravelmente para valores permitidos pela norma CISPR 15. Os valores 83 e 39 dB μ V foram reduzidos para 69 e 36 dB μ V, respectivamente.

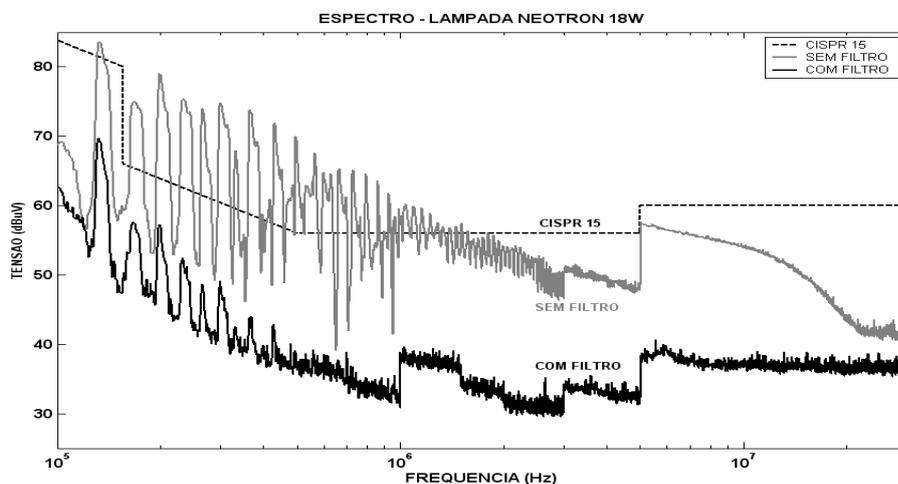


Figura 89 – Espectros de IEM de uma lâmpada NEOTRON 18 W, com e sem filtro de IEM.

4.2.11 Resultados para a marca OSRAM com filtro de IEM

Na Fig. 90 são apresentados os resultados da medição para a lâmpada OSRAM 15 W com e sem o filtro de redução de IEM conduzida.

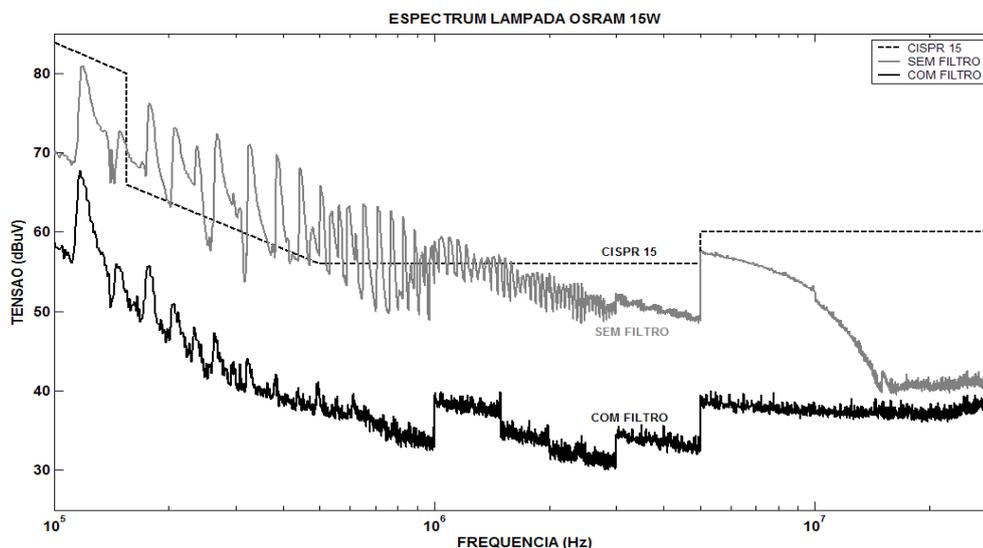


Figura 90 – Espectros de IEM de uma lâmpada OSRAM 15 W, com e sem filtro de IEM.

A inclusão do filtro (Fig. 90) resultou na redução nos níveis de ruído produzidos pela OSRAM 15 W em toda a faixa medida. Há pontos, por exemplo, em 320 kHz, que a redução foi de 28 dB. Na frequência de 5 MHz a atenuação foi de 18 dB em relação à curva sem o filtro e de 22 dB em relação ao nível da máscara da norma CISPR 15 (60 dB μ V). Portanto, o filtro de IEM funcionou satisfatoriamente no bloqueio do ruído produzido por essa marca de lâmpada.

4.2.12 Resultados para a marca SYLVANIA com filtro de IEM

Os resultados da medição, para a lâmpada SYLVANIA 9 W com e sem a presença do filtro de redução de IEM, são mostrados na Fig. 91.

Pode ser observado, na Fig. 91, que na faixa de 138 kHz a 2 MHz o espectro da lâmpada SYLVANIA 9 W apresenta níveis de emissão de IEM conduzida acima do permitido pela norma, no caso da curva sem o filtro. O valor máximo de ruído medido, nessa curva, é 85 dB μ V em 138 kHz. Quando o filtro é introduzido todo o ruído na faixa de interesse é reduzido consideravelmente para valores permitidos pela CISPR 15 e o

valor de 85 dB μ V é reduzido para 71 dB μ V, que está dentro do limite máximo aceitável para essa frequência. Nas demais frequências, dentro da banda estudada, o nível de ruído está bem abaixo da máscara da norma CISPR 15.

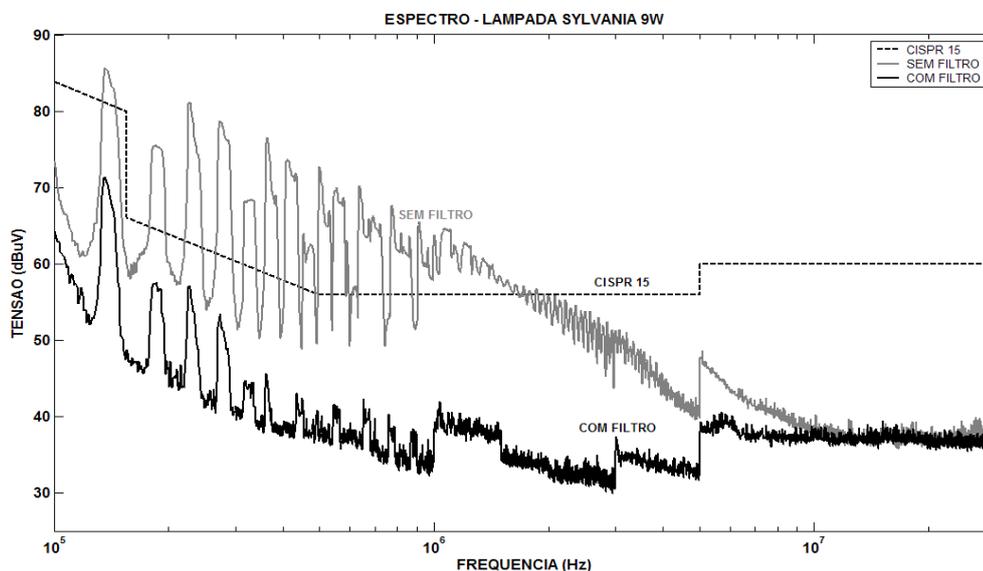


Figura 91 – Espectros de IEM de uma lâmpada SYLVANIA 9,0 W, com e sem filtro de IEM.

4.2.13 Resultados para a marca SA ECONÔMICA com filtro de IEM

Os resultados da medição, para a lâmpada SA ECONÔMICA 18 W com e sem a presença do filtro de redução de IEM, são mostrados na Fig. 92. Nessa figura pode ser observado que na faixa de 112 kHz a 2,3 MHz existem muitos valores acima do permitido pela norma, na curva sem o filtro.

O valor máximo de ruído medido, na curva sem filtro, chega a atingir 89 dB μ V em 112 kHz e o valor mínimo 38 dB μ V, em 870 kHz. Quando o filtro é introduzido todo o ruído, na faixa medida, é reduzido para valores aceitáveis pela norma CISPR 15. Os valores 89 e 38 dB μ V foram reduzidos para 76 e 37 dB μ V, respectivamente. Em aproximadamente 150 kHz há um pico que está apenas 2 dB do limite da máscara da norma, mas mesmo acima a SA ECONÔMICA 18 W com o filtro está dentro das condições exigidas para ser um dispositivo considerado compatível eletromagneticamente.

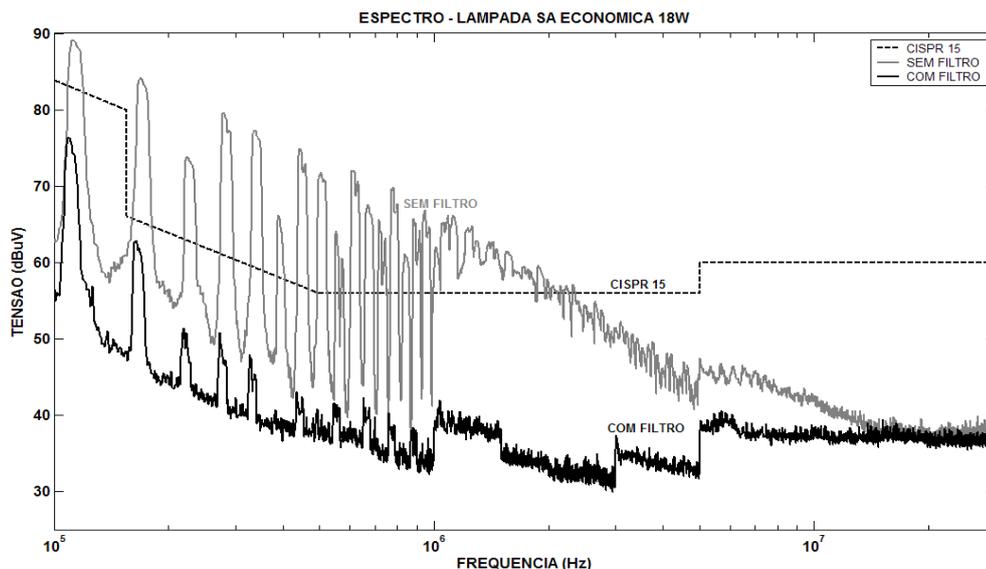


Figura 92 – Espectros de IEM de uma lâmpada SA ECONÔMICA 18,0 W, com e sem filtro de IEM.

Para as diversas marcas testadas em que o filtro foi aplicado como forma de reduzir o nível de ruído em apenas uma (IMPACT) ele não foi totalmente eficaz. Em outras (AVANT 9 e 20 W, ATRALUX 18 W, EMPALUX 7 W, GOLDEN 6 W e SA ECONÔMICA 18 W) ele conseguiu reduzir o nível de ruído para valores abaixo da norma, mas muito próximo do limite máximo permitido, em uma ou duas frequências. No restante das marcas (ARAM 15 W, EMPALUX 30 W, FLC 15 W, GREAT VALUE 14 W, GE 14 W, NEOTRON 18 W, OSRAM 15 W e SYLVANIA 9 W) o filtro reduziu o nível de ruído para valores bem abaixo dos limites máximos exigidos pela CISPR 15. Portanto, o filtro projetado pode ser usado para adequar a maior parte das marcas de lâmpadas testadas às exigências dos níveis máximos de emissão de interferência eletromagnética conduzida, mesmo quando elas possuem potências nominais diferentes ou possuem o circuito de chaveamento funcionando em frequências diferentes.

Capítulo 5

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados os espectros de interferência eletromagnética conduzida de diversas marcas de lâmpadas fluorescentes compactas comercializadas no Brasil, mais especificamente na Paraíba. Várias configurações foram estudadas como: lâmpadas isoladas de potências diferentes; composição de duas e três lâmpadas juntas na mesma luminária à distância zero; lustre com três e cinco lâmpadas distantes 30 e 50 cm do ponto de alimentação, respectivamente. As lâmpadas testadas foram marcas pouco conhecidas e marcas bem conhecidas a nível nacional e internacional. Todos os resultados tiveram como referência os limites máximos de IEM conduzida exigidos pela norma internacional CISPR 15.

A comparação dos valores medidos com aqueles exigidos pela norma revelou que muitas das marcas testadas emitem níveis de ruído que transgridem os limites máximos permitidos pela norma.

Observou-se também que na maior parte dos casos a combinação de duas lâmpadas juntas numa mesma luminária resulta em pequena redução no nível de ruído, mas pouco significativa. Demonstrando a necessidade de uma ação mais significativa para reduzir a IEM conduzida para que as LFCs possam se tornar compatíveis eletromagneticamente.

As configurações formando um lustre de três e cinco lâmpadas não resultaram em redução significativa do ruído total emitido pelo conjunto. Os fios de conexão não têm grande influência na atenuação do ruído. Mesmo quando se tem mais lâmpadas na mesma luminária/lustre isso não significa necessariamente que o nível de espectro do ruído produzido seja maior que aquele produzido por uma única lâmpada.

Quando se investigou a relação entre a potência das LFCs e o nível de ruído produzido por elas, observou-se que ter potência maior não implica necessariamente em maior geração de ruído em toda a faixa de frequência de interesse. Há casos em que numa faixa de frequência a lâmpada de menor potência produz ruído superior a de maior potência e em outras faixas isso se inverte. O que demonstra que não há uma relação direta entre potência e nível de ruído produzido pelas LFCs.

Numa comparação dos resultados simulados pode ser observado que o modelo do circuito simplificado equivalente e o modelo proposto apresentam diferenças nas formas de onda da corrente e nos seus respectivos espectros. O modelo proposto inclui ao modelo simples a parte de chaveamento presente no circuito real da lâmpada. Essa modificação mostrou-se mais compatível com os resultados práticos apresentados na bibliografia. Os harmônicos da frequência de chaveamento não aparecem no espectro de corrente do modelo simples, mas estão presentes no modelo proposto.

Usando o modelo simples do circuito da LFC observou-se que com um valor menor de capacitância do filtro CC, após a ponte retificadora, produz uma menor THDI. Como não era objetivo entrar no circuito da lâmpada e propor modificações em termos de componentes, não foram realizados testes experimentais para verificar se a mudança no valor do capacitor resultaria em níveis de ruído menor, na faixa de frequência de interesse (9 kHz a 30 MHz). Já que a lâmpada foi considerada um dispositivo único, inseparável. Na bibliografia pesquisada encontram-se casos em que se obtém boa redução da IEM conduzida usando *beads* de ferrite em cada diodo da ponte retificadora. Essa solução não foi cogitada, nesse trabalho, por se enquadrar no caso de intervir no circuito interno da lâmpada e por ser uma solução inviável de se implementar em laboratório, já que eles não são vendidos no mercado local. Em nível dos fabricantes das lâmpadas poderia ser implementada, mas se acredita que encareceria muito o produto.

Como na grande maioria da LFCs observaram-se excessos nos limites de IEM, esses dispositivos podem produzir IEM em outros equipamentos prejudicando seu funcionamento.

A solução efetivamente proposta, o circuito de filtragem LC, revelou-se ser satisfatória no bloqueio da IEM conduzida pelas LFCs. O circuito projetado possui menos componentes do que outros propostos na bibliografia. Mesmo assim é capaz de atenuar o ruído em torno de 20 a 30 dB na faixa mais crítica (de forma geral de 100 kHz a 2 MHz) das marcas testadas. Isso é suficiente para que elas passem a obedecer aos limites exigidos pela norma CISPR 15. Exceção feita à marca IMPACT 18 W.

O filtro funciona para todas as lâmpadas sem a necessidade de alguma adaptação em frequência ou nível de potência, sendo, portanto um circuito que pode ser facilmente usado para uma grande variedade de marcas de LFCs.

Em termos de valores financeiros não foi possível determinar efetivamente o custo do circuito projetado e assim fazer uma avaliação de quanto seria o aumento no custo da lâmpada. Conseguiu-se apenas o valor comercial do capacitor do filtro, R\$ 0,50.

Os fabricantes de toróides no Brasil, não responderam as solicitações de preço que foram feitas. O toróide usado no *choke* de modo comum foi adquirido em sucata.

As pouquíssimas marcas de lâmpadas que atenderam os limites da norma certamente possuem uma preocupação maior com o projeto e com a qualidade dos dispositivos usados no circuito.

Com a implementação do circuito no projeto da lâmpada ela se tornará compatível eletromagneticamente.

De maneira geral a faixa de frequência em que as lâmpadas testadas apresentam nível de IEM superior à norma vai de 120 kHz até 2 MHz. Num universo de 14 marcas, entre elas algumas de potências diferentes, apenas duas estavam de acordo com a norma. Isso é um fato preocupante porque demonstra a falta de compromisso dos fabricantes com a qualidade dos produtos vendidos no mercado brasileiro e consequentemente com a qualidade de energia. A falta de normalização brasileira com respeito a CEM das LFCs favorece esse descaso com a qualidade das LFCs colocando em questão os programas governamentais de qualidade e eficiência energética.

É importante que os órgãos reguladores e as empresas fabricantes se esforcem na especificação de padrões de qualidade para as lâmpadas fluorescentes compactas, incluindo necessariamente a elevação do fator de potência, com a consequente minimização da poluição da rede elétrica, e a preocupação com os níveis de emissão de interferência eletromagnética conduzida produzida por elas.

Ao longo desse trabalho, pode-se observar outros campos de interesse que podem ser aprofundados e explorados. São apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- ✓ Medição da impedância da lâmpada em altas frequências;
- ✓ Melhoramento no modelo do circuito equivalente da LFC e medição;
- ✓ Estudo mais detalhado sobre o circuito elétrico e sobre cada componentes das LFCs;
- ✓ Verificar se a substituição do valor do capacitor do filtro CC por um valor menor resultará em níveis de ruído de IEM menores.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, W. A., HAMMER, E. E., SERES, A. The Interaction of infra-red controls and electronic compact fluorescent lamps. Industry Applications Conference. Conference Record of the IEEE. Vol. 3, 1995, p. 2066–2068.

ASTORGADO, O. A. Maldonado, CAMPOS, E. C. Diniz, Fujino, Karina, SILVA, Diogo R. M. da e KOBAYASHI, M. Hideki. Estudo da substituição das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas em instalações elétricas residenciais e o compromisso entre conservação e a qualidade de energia. XVI SNPTEE'01, 2001, p. 1 – 6.

BRIOSCHI, R. de Oliveira, LAMEGO, M. Malini e VIEIRA, J. L. Freitas. “Reator eletrônico de baixo custo e alto fator de potência. SBA Controle & Automação Vol. 9 no. 3 / Set., Out., Nov. e Dezembro de 1998.

CABRAL, Cristina Bruno. Interferência eletromagnética em equipamento eletromédico ocasionada por telefonia móvel celular. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas – SP, 2001.

CISPR 15, International Electrotechnical Commission (IEC). Limits and methods of measurement radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment. Edition 7.1, 2007 – 01.

CREDER, Hélio, Instalações Elétricas, 14^a Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2000.

FERREIRA P. Ixtânio L., FONTGALLAND Glauco, FALCÃO Galba and NASCIMENTO, A. Ricardo Z. Investigation of the conducted EMI from compact fluorescents lamps put together in the same luminaries. In ISEF'09, 2009, paper 156.

FERREIRA P. Ixtânio L., FONTGALLAND Glauco, FALCÃO Galba and NASCIMENTO, A. Ricardo Z, FREIRE, R. Carlos S., BARBIN, S. E. Conducted interference reduction from compact fluorescent lamps. In APEMC'10, , 12 -16 April, aceito para publicação.

FERREIRA P. Ixtânio L., FONTGALLAND Glauco, FALCÃO Galba and NASCIMENTO, A. Ricardo Z. Survey of Conducted EMI from Compact Fluorescent Lamps. Aceito para publicação na revista – COMPEL and Electrical Review Journals and monographs by Springer/IOS Press, abril de 2010.

HAUSMANN, Romeu. Sistema Inteligente de Iluminação para duas Lâmpadas Fluorescente de 40 W. Dissertação de Mestrado, UFSC, 2000.

http://www.acdeliberato.net/Senai/_Professores/Thiago/Eficiencia%20energ%E9tica.pdf. Eficiência Energética – Lâmpadas Fluorescentes Compactas, Circulares e Tubulares – Especificações e Etiquetagem – visitado em junho de 2009.

LI, Zhi, MOK, Philip K. T., KI, Wing-Hung, SIN, Johnny .K.O. A simple method to design resonant circuits of electronic ballast for fluorescent lamps. Circuit and Systems. Proc. of the IEEE Int. Symp. Vol. 3, 1997, p. 1744–1747.

LUCIANO, Benedito Antonio. Lâmpadas e eficiência energética. Artigo publicado no Diário da Borborema, em 31 de julho de 2008.

MIELCZARSKI, W., MICHALIK, G., LAWRAND, W. B., GABRYJELSKI, Z. Side effects of energy saving lamps. ICHQP 98, Athens, Greece, October 14-16, 1998.

MONTERO, Oscar, BÁEZ, David, ALVAREZ, Fernando, ALEJOS, Rubén and FLORES-VERDAD, Guillermo Espinosa. Simulation and experimental results for a compact fluorescent lamp with electronic adapter. Circuit and Systems, Proc. of the 38th Midwest Symposium on, Vol. 1, 1995, p. 216–218.

MONTROSE, Mark I. e NAKAUCHI, Edward M. Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques, 1ª Ed., NY, Wiley & Sons, 2004.

MORAES, Ingrid. RESPOSTA TÉCNICA: fabricação de reator eletrônico para lâmpadas compactas. Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas (SBRT), Disponível em: <www.sbrt.ibict.br>. 04 ago. 2009.

NUSSENZVEIG, H. M., 3 Eletromagnetismo – Curso de Física Básica, 1ª Ed., São Paulo, Edgard Bücher, Brazil, 1997.

PAUL, Clayton. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility, 3ª ed., NY, Wiley & Sons, 1992.

PIRES, Igor Amariz. Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica. Dissertação de mestrado, UFMG, 2006;

POMILIO, José Antenor. Fator de potência e distorção harmônica. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap1.html>>. Acessado em: 10 nov. 2009.

PORTARIA INTERMINISTERIAL, Nº 132, de 12 de junho de 2006. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bpri2006132.pdf>>. Acessado em: 17 jun. 2009.

PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM: regulamento de avaliação da conformidade de lâmpadas fluorescentes compactas com reator integrado. Emissão: 13/05/2004. Revisão 01, 09/09/2006. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtosPBE/regulamentos/reator_integrad_o_2006.pdf>. Acessado em: 21 jul. 2009.

RAJAMAKI, Jyri. Lighting interferences - an ever increasing threat! Will the proposed changes in CISPR 15 correct the situation? Int. Symp. on EMC, Vol. 1, 2005, p. 7-12.

RECH, Cassiano. Eletrônica de potência II. Capítulo 4: modulação PWM, Disponível em:

<http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/cassiano/materiais/EPOII___Capitulo_4___Modulo_PWM.pdf>. Acessado em: 28 jan. 2010.

SAMESIMA, M. Itsuo, RESENDE, J. Wilson, PEREIRA, G. Marques V. Avaliação Econômica e de Suportabilidade a Chaveamentos quando da Substituição de Lâmpadas Incandescentes por Fluorescentes Compactas. VI SBQEE'05, 2005, p. 105 – 109.

SANCHES, Durval, Interferência Eletromagnética, 1ª Ed., Rio de Janeiro, Interciência, 2003.

TEIXEIRA, Mateus D., PAULILLO, Gilson, AOKI, Alexandre R., PENICHE, Rodrigo A. e ARCHANJO, Daniel L. Análise do impacto de lâmpadas fluorescentes compactas na rede de distribuição da COPEL. VI SBQEE'05, 2005, p. 309 – 315.

THIAGO, professor. Eficiência energética – lâmpadas fluorescentes compactas, circulares e tubulares – especificações e etiquetagem. Disponível em: <http://www.acdeliberato.net/Senai/_Professores/Thiago/Eficiencia%20energ%C3%94tica.pdf>. Acessado em: 30 nov. 2009.

TORRES, Igor S. M., F. SOUSA, Paulo F. de, FERREIRA, T. V. e LUCIANO, Benedito A. Lâmpadas fluorescentes e distorções harmônicas: eficiência energética e aualidade de energia elétrica. In CBQEE VIII'09, paper 033, 2009.

UYAISOM, C. and KHAN-NGERN, W. The comparison of conducted EMI emission and electrical performances of lamps. Power Electronics and Drive Systems 2007, PEDS '07, 2007, p. 1649–1653.

WEI, Z., WATSON, N. R., FRATER, L. P. Modelling of compact Fluorescent lamps In Proc. ICHQP'08, 2008, p. 1-6.

6. ANEXO A – Informações Técnicas sobre as LFCs

Marcas	Potência nominal (W)	I _{rms} nominal (mA)	FP nominal	F _{oscilação} (kHz)	Preço (R\$) – ano 2009	Importador
Aram ⁽¹⁾	15	110	0,6	32	7,98	Osam do Brasil Lâmpadas Elétricas Ltda
Atralux ⁽¹⁾	18	130	0,55	57	9,90	Philips do Brasil SA
Avant ⁽¹⁾	9	64	0,55	46	8,31	LPS Distrib. de Materiais Elétricos Ltda
	15	115	0,55	50	11,07	
	20	147	0,55	60	8,98	
	30	246	0,55	30	12,10	
Empalux ⁽²⁾	7	52,3	0,60	35	6,87	Empalux Ltda - PR
	11	84,3	0,50	38	7,23	
	15	115,49	0,50	35	8,49	
	20	150,6	> 0,5	55	9,20	
	30	237,1	0,55	32	11,22	
FLC ⁽²⁾	15	117	0,55	35	12,87	Race Comercio Imp. e Exp. Ltda
Golden ⁽²⁾	6	42	> 0,5	32	6,67	
GE ⁽¹⁾	11*	77	≥ 0,5	Não identificado	16,69	General Electric do Brasil Ltda - RJ
	14	110	≥ 0,5	40	8,90	
	24*	180	≥ 0,5	30	23,80	
Great Value ⁽¹⁾	14	110	≥ 0,5	30	6,87	General Electric do Brasil Ltda - RJ
Impact ⁽¹⁾	14	182	≥ 0,5	37	8,00	V. C. Cardoso Ferramentas - SP
Neutron ⁽¹⁾	18	169,9	0,47	34	7,00	Impoluz Comercio Imp. e Exp. Ltda
Osram ⁽¹⁾	15	100	0,60	30	12,87	Osam do Brasil Lâmpadas Elétricas Ltda – SP
Philips ⁽¹⁾	5	35	0,60	30	8,32	Philips do Brasil AS
	14	100	0,60	30	13,11	
	15	100	0,60	43	14,87	
	18	130	0,60	30	14,13	

Marcas	Potência nominal (W)	I_{rms} nominal (mA)	FP nominal	$F_{oscilação}$ (kHz)	Preço (R\$)	Importador
SA econômica ⁽¹⁾	18	Não é indicado	Não é indicado	55	6,00	Iberoasia Comercio Internacional Ltda
Sylvania ⁽²⁾	9	75	> 0,5	45	6,85	Havelles Sylvania Brasil Iluminação Ltda – SP
(1) Lâmpadas alimentadas em 220/240 V. (2) Lâmpadas alimentadas em 220 V. * Lâmpada com formato espiral (<i>twister</i>), as demais tem formato em U.						

Quadro 7. 1 – Características elétricas e comerciais das LFCs.

OBSERVAÇÃO: Todas as lâmpadas são fabricadas na China. A marca SA econômica é uma marca Portuguesa, mas também é fabricada na China.