



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

ALESSANDRA DA COSTA BARBOSA PIRES DE SOUZA

Avaliação da Compatibilidade Eletromagnética em Lâmpadas Inteligentes

NITERÓI

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

ALESSANDRA DA COSTA BARBOSA PIRES DE SOUZA

Avaliação da Compatibilidade Eletromagnética em Lâmpadas Inteligentes

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e de
Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense, como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica e de
Telecomunicações. Área de concentração:
Sistemas de Energia Elétrica

Orientador:
Márcio Zamboti Fortes

NITERÓI

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S719a Souza, Alessandra da Costa Barbosa Pires de
Avaliação da Compatibilidade Eletromagnética em Lâmpadas
Inteligentes / Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza ;
Márcio Zamboti Fortes, orientador. Niterói, 2022.
100 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2022.m.09919273708>

1. Lâmpada. 2. Certificação de produtos. 3.
Interferência (Física). 4. Produção intelectual. I.
Fortes, Márcio Zamboti, orientador. II. Universidade Federal
Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

ALESSANDRA DA COSTA BARBOSA PIRES DE SOUZA

AVALIAÇÃO DA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA DE LÂMPADAS
INTELIGENTES

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense como requisito parcial para a
Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações.

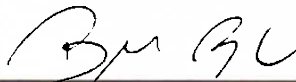
Área de concentração: Sistemas de Energia
Elétrica.

Aprovado em 11 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Bruno Soares Moreira Cesar Borba
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder
Universidade Federal de São João del-Rey – UFSJ



Dr. Isac Roizeblatt
Associação Brasileira da Indústria de Iluminação - ABILUX

Niterói
2022

Dedico este trabalho a minha querida Família.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais João Batista e Maria de Fátima e minha avó Lucinda (*in memoriam*), por todo apoio, força e amor incondicional, pelo exemplo de vida e pela educação e valores que me passaram e me fizeram a pessoa que sou hoje.

Agradeço também ao meu marido Thiago e meus filhos Gabriela, Gabriel e Gael, por serem minha inspiração e motivação nos momentos difíceis e por compreenderem a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Agradeço a todos os meus professores, em especial ao professor Márcio Zamboti, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Agradeço ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Eletrobras/Cepel por disponibilizar toda a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho, e a toda equipe envolvida que contribuiu, de alguma forma, além do apoio e confiança no meu trabalho.

Agradeço a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado e minha formação acadêmica e profissional.

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise do desempenho de lâmpadas LED inteligentes comercializadas no mercado brasileiro quanto à emissão de interferências eletromagnéticas, visando avaliar a conformidade com a norma específica para produtos de iluminação. Tendo em vista que o produto pode ser controlado por aplicativo através de um protocolo de comunicação, como por exemplo o *Wi-Fi*, a conformidade com a norma específica para equipamentos multimídias também foi avaliada. Por se tratar de um produto similar as lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base, cuja comercialização em território nacional está condicionada a um processo de certificação compulsória regulado pelo Inmetro, com a exigência de requisitos mínimos de desempenho, foi realizada também uma análise do desempenho elétrico e fotométrico desses produtos afim de verificar o atendimento a regulamentação específica do Inmetro para as lâmpadas LED convencionais. Os ensaios foram realizados conforme as normas pertinentes. Devido a grande variedade de configurações de tensão, potência e temperatura de cor que o produto pode ter durante o funcionamento, foram especificadas as configurações mais usuais para os ensaios em todas as amostras. Os resultados demonstraram que das amostras ensaiadas, apenas 50% estão em conformidade quanto aos limites de emissão de interferências eletromagnéticas, enquanto menos de 40% atendem a regulamentação específica do Inmetro para as lâmpadas LED convencionais. Seguindo a tendência universal de digitalização, o setor de iluminação está em constante processo de desenvolvimento visando a melhoria da eficiência energética, qualidade e inteligência embarcada dos equipamentos. Dentre as apostas de novas tecnologias para o setor, o *Light Fidelity - Li-Fi* se apresenta como uma grande promessa para os próximos anos, onde será possível se conectar e transportar dados através de ondas de luz visíveis.

Palavras-chaves: Lâmpadas LED, compatibilidade eletromagnética, eficiência energética, desempenho, internet das coisas.

Abstract

This work presents an analysis of the performance of smart LED lamps sold in the Brazilian market regarding the emission of electromagnetic interference, in order to assess compliance with the specific standard for lighting products. Considering that the product can be controlled by application through a communication protocol, such as Wi-Fi, compliance with the specific standard for multimedia equipment was also evaluated. As it is a product like LED lamps with a control device integrated into the base, whose commercialization in the national territory is conditioned to a compulsory certification process regulated by Inmetro, with the requirement of minimum performance requirements, an analysis of the electrical and photometric performance of these products in order to verify compliance with Inmetro's specific regulations for conventional LED lamps. The tests were carried out in accordance with the relevant standards. Due to the wide variety of voltage, power and color temperature settings that the product can have during operation, the most common settings for testing on all samples were specified. The results showed that of the samples tested, only 50% are in compliance with the limits for emission of electromagnetic interference, while less than 40% meet the specific regulation of Inmetro for conventional LED lamps. Following the universal trend of digitalization, the lighting sector is in a constant process of development aimed at improving energy efficiency, quality and embedded intelligence of equipment. Among the bets of new technologies for the sector, Light Fidelity - Li-Fi presents itself as a great promise for the coming years, where it will be possible to connect and transport data through visible light waves.

Keywords: LED Lamps, electromagnetic compatibility, energy efficiency, performance, internet of things.

Lista de Figuras

FIGURA 1 – QUANTIDADE DE EQUIPAMENTOS CONECTADOS ATÉ 2020. Fonte: ADAPTADO DE SIGNIFY, 2019	2
FIGURA 2 – FLUXO LUMINOSO DE UMA LÂMPADA. FONTE: ADAPTADO DE GOOGLE IMAGENS.....	5
FIGURA 3 – TEMPERATURA DE COR DA LUZ SOLAR AO LONGO DO DIA. FONTE: HTTPS://PLUGDESIGN.COM.BR/TEMPERATURA-COR/	6
FIGURA 4 – AMOSTRAS DE COR CIE 13.3-1995. FONTE: ARCHITECTURAL LIGHTING (ADAPTADO).....	7
FIGURA 5 – TRÁFEGO DE DADOS NO MUNDO. FONTE: ADAPTADO DE SIGNIFY, 2019.....	12
FIGURA 6 – TIPOS DE CONEXÃO. FONTE: SIGNIFY, 2019.....	13
FIGURA 7 – ATRIBUIÇÃO DE FAIXAS DE FREQUÊNCIAS NO BRASIL. FONTE: ANATEL EM JANEIRO DE 2016.....	14
FIGURA 8 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS E AS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO EXISTENTES. FONTE: SIGNIFY, 2019.....	14
FIGURA 9 – CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE COMUNICAÇÃO DO <i>Li-Fi</i>	16
FIGURA 10 – APLICAÇÃO DO <i>Li-Fi</i>	17
FIGURA 11 – COMPARAÇÃO ENTRE O ALCANCE DO Wi-Fi E O Li-Fi. FONTE: HTTPS://MEDIA2.PL/TECH/149423-LiFi-ZASTAPI-TECHNOLOGIE-WI-FI-NOWATECHNOLOGIA-KOMUNIKACJI-POPRZEZ-SWIATLO.HTML	18
FIGURA 12 – APLICAÇÕES DO Li-Fi. FONTE: SIGNIFY, 2019.....	23
FIGURA 13 – CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE TENSÕES DE PERTURBAÇÃO NOS TERMINAIS DE ALIMENTAÇÃO.....	26
FIGURA 14 – CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS RADIADAS DE CAMPO MAGNÉTICO.....	27
FIGURA 15 – CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO DE PERTURBAÇÃO RADIADA.....	28
FIGURA 16 – AMOSTRAS ENSAIADAS.....	34
FIGURA 17 - ÁREA DE ENSAIOS DE DESEMPENHO ELÉTRICO E FOTOMÉTRICO DO LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO CEPEL.....	35
FIGURA 18 - ÁREA DE ENSAIOS DE EMC (ANTENA TRIPLE LOOP) DO LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO CEPEL.....	35

FIGURA 19 - ÁREA DE ENSAIOS DE EMC (GTEM) DO LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO CEPEL.....	36
FIGURA 20 – EXEMPLO DO COMPORTAMENTO DAS GRANDEZAS COM A DIMERIZAÇÃO DAS LÂMPADAS INTELIGENTES.....	41
FIGURA 21 – AMOSTRA 01 – 2700 K.....	56
FIGURA 22 – AMOSTRA 01 – 4000 K.....	56
FIGURA 23 – AMOSTRA 01 – 6500 K.....	57
FIGURA 24 – AMOSTRA 02 – 2700 K.....	57
FIGURA 25 – AMOSTRA 02 – 4000 K.....	57
FIGURA 26 – AMOSTRA 02 – 6500 K.....	57
FIGURA 27 – AMOSTRA 03 – 2700 K.....	58
FIGURA 28 – AMOSTRA 03 – 4000 K.....	58
FIGURA 29 – AMOSTRA 03 – 6500 K.....	58
FIGURA 30 – AMOSTRA 04 – 2700 K.....	58
FIGURA 31 – AMOSTRA 04 – 4000 K.....	59
FIGURA 32 – AMOSTRA 04 – 6500 K.....	59
FIGURA 33 – AMOSTRA 05 – 2700 K.....	59
FIGURA 34 – AMOSTRA 06 – 6500 K.....	59
FIGURA 35 – AMOSTRA 07 – 2700 K.....	60
FIGURA 36 – AMOSTRA 07 – 4000 K.....	60
FIGURA 37 – AMOSTRA 07 – 6500 K.....	60
FIGURA 38 – AMOSTRA 08 – 2700 K.....	60
FIGURA 39 – AMOSTRA 08 – 4000 K.....	61
FIGURA 40 – AMOSTRA 08 – 6500 K.....	61
FIGURA 41 – AMOSTRA 01 – 2700 K.....	61
FIGURA 42 – AMOSTRA 01 – 4000 K.....	62
FIGURA 43 – AMOSTRA 01 – 6500 K.....	62
FIGURA 44 – AMOSTRA 02 – 2700 K.....	62
FIGURA 45 – AMOSTRA 02 – 4000 K.....	62
FIGURA 46 – AMOSTRA 02 – 6500 K.....	63
FIGURA 47 – AMOSTRA 03 – 2700 K.....	63
FIGURA 48 – AMOSTRA 03 – 4000 K.....	63
FIGURA 49 – AMOSTRA 03 – 6500 K.....	63

FIGURA 50 – AMOSTRA 04 – 2700 K.....	64
FIGURA 51 – AMOSTRA 04 – 4000 K.....	64
FIGURA 52 – AMOSTRA 04 – 6500 K.....	64
FIGURA 53 – AMOSTRA 05 – 2700 K.....	64
FIGURA 54 – AMOSTRA 06 – 6500 K.....	65
FIGURA 55 – AMOSTRA 07 – 2700 K.....	65
FIGURA 56 – AMOSTRA 07 – 4000 K.....	65
FIGURA 57 – AMOSTRA 07 – 6500 K.....	65
FIGURA 58 – AMOSTRA 08 – 2700 K.....	66
FIGURA 59 – AMOSTRA 08 – 4000 K.....	66
FIGURA 60 – AMOSTRA 08 – 6500 K.....	66
FIGURA 61 – AMOSTRA 01 – 2700 K.....	67
FIGURA 62 – AMOSTRA 01 – 4000 K.....	67
FIGURA 63 – AMOSTRA 01 – 6500 K.....	67
FIGURA 64 – AMOSTRA 02 – 2700 K.....	67
FIGURA 65 – AMOSTRA 02 – 4000 K.....	68
FIGURA 66 – AMOSTRA 02 – 6500 K.....	68
FIGURA 67 – AMOSTRA 03 – 2700 K.....	68
FIGURA 68 – AMOSTRA 03 – 4000 K.....	68
FIGURA 69 – AMOSTRA 03 – 6500 K.....	69
FIGURA 70 – AMOSTRA 04 – 2700 K.....	69
FIGURA 71 – AMOSTRA 04 – 4000 K.....	69
FIGURA 72 – AMOSTRA 04 – 6500 K.....	69
FIGURA 73 – AMOSTRA 05 – 2700 K.....	70
FIGURA 74 – AMOSTRA 06 – 6500 K.....	70
FIGURA 75 – AMOSTRA 07 – 2700 K.....	70
FIGURA 76 – AMOSTRA 07 – 4000 K.....	70
FIGURA 77 – AMOSTRA 07 – 6500 K.....	71
FIGURA 78 – AMOSTRA 08 – 2700 K.....	71
FIGURA 79 – AMOSTRA 08 – 4000 K.....	71
FIGURA 80 – AMOSTRA 08 – 6500 K.....	71
FIGURA 81 – AMOSTRA 01 – 2700 K.....	72
FIGURA 82 – AMOSTRA 01 – 4000 K.....	72

FIGURA 83 – AMOSTRA 01 – 6500 K.....	73
FIGURA 84 – AMOSTRA 02 – 2700 K.....	73
FIGURA 85 – AMOSTRA 02 – 4000 K.....	73
FIGURA 86 – AMOSTRA 02 – 6500 K.....	73
FIGURA 87 – AMOSTRA 03 – 2700 K.....	74
FIGURA 88 – AMOSTRA 03 – 4000 K.....	74
FIGURA 89 – AMOSTRA 03 – 6500 K.....	74
FIGURA 90 – AMOSTRA 04 – 2700 K.....	74
FIGURA 91 – AMOSTRA 04 – 4000 K.....	75
FIGURA 92 – AMOSTRA 04 – 6500 K.....	75
FIGURA 93 – AMOSTRA 05 – 2700 K.....	75
FIGURA 94 – AMOSTRA 06 – 6500 K.....	75
FIGURA 95 – AMOSTRA 07 – 2700 K.....	76
FIGURA 96 – AMOSTRA 07 – 4000 K.....	76
FIGURA 97 – AMOSTRA 07 – 6500 K.....	76
FIGURA 98 – AMOSTRA 08 – 2700 K.....	76
FIGURA 99 – AMOSTRA 08 – 4000 K.....	77
FIGURA 100 – AMOSTRA 08 – 6500 K.....	77
FIGURA 101 – AMOSTRA 01 – 2700 K.....	77
FIGURA 102 – AMOSTRA 01 – 4000 K.....	78
FIGURA 103 – AMOSTRA 01 – 6500 K.....	78
FIGURA 104 – AMOSTRA 02 – 2700 K.....	78
FIGURA 105 – AMOSTRA 02 – 4000 K.....	78
FIGURA 106 – AMOSTRA 02 – 6500 K.....	79
FIGURA 107 – AMOSTRA 03 – 2700 K.....	79
FIGURA 108 – AMOSTRA 03 – 4000 K.....	79
FIGURA 109 – AMOSTRA 03 – 6500 K.....	79
FIGURA 110 – AMOSTRA 04 – 2700 K.....	80
FIGURA 111 – AMOSTRA 04 – 4000 K.....	80
FIGURA 112 – AMOSTRA 04 – 6500 K.....	80
FIGURA 113 – AMOSTRA 05 – 2700 K.....	80
FIGURA 114 – AMOSTRA 06 – 6500 K.....	81
FIGURA 115 – AMOSTRA 07 – 2700 K.....	81

FIGURA 116 – AMOSTRA 07 – 4000 K.....	81
FIGURA 117 – AMOSTRA 07 – 6500 K.....	81
FIGURA 118 – AMOSTRA 08 – 2700 K.....	82
FIGURA 119 – AMOSTRA 08 – 4000 K.....	82
FIGURA 120 – AMOSTRA 08 – 6500 K.....	82

Lista de Tabelas

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DA VELOCIDADE ENTRE AS TECNOLOGIAS.....	12
TABELA 2 - COMPARAÇÃO LI-FI X WI-FI.....	12
TABELA 3 – REGULAMENTAÇÕES DE EMC UTILIZADAS NESTE TRABALHO.....	17
TABELA 4 – COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS CISPR 15 [7] E CISPR 32 [8].....	22
TABELA 5 – INFORMAÇÕES DAS EMBALAGENS DOS PRODUTOS.....	28
TABELA 6 – RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE DESEMPENHO.....	30
TABELA 7 – RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE EMC CONFORME CISPR 15.....	32
TABELA 8 – RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE EMC CONFORME ABNT IEC CISPR 32:2019.....	34
TABELA 9 – RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE DESEMPENHO VARIANDO POTÊNCIA NOMINAL.....	41

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
ANSI	American National Standards Institute
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIE	<i>Commission Internationale De L'eclairage</i>
CISPR	<i>Comite International Special des Perturbations Radioelectriques</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo da Aeronáutica
EMC	Compatibilidade Eletromagnética
EMI	Interferência Eletromagnética
GTEM	Giga-Hertz Transverso Eletromagnético
IEC	<i>Internacional Electrotechnical Comission</i>
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IES	<i>Illuminating Engineering Society</i>
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
<i>IoT</i>	<i>Internet of Things</i>
IRC	Índice de Reprodução de Cores
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
Li-Fi	<i>Light Fidelity</i>
LISN	<i>Line Impedance Stabilization Network</i>
OWC	Comunicações Ópticas Sem Fio
TCC	Temperatura de cor correlata
<i>Wi-Fi</i>	<i>Wireless Fidelity</i>

Sumário

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura do Trabalho	4
Capítulo 2 - Conceituação Teórica.....	5
2.1 Conceitos luminotécnicos	5
2.2 Compatibilidade Eletromagnética	8
2.3 Novas tecnologias	13
Capítulo 3 - Normalização	25
3.1 ABNT IEC CISPR 15:2019	26
3.2 ABNT IEC CISPR 32:2019	31
3.3 Comparação entre as normas ABNT IEC CISPR 15:2019 e ABNT IEC CISPR 32:2019	32
3.4 Resolução Anatel.....	33
Capítulo 4 - Metodologia.....	35
Capítulo 5 - Análise dos resultados	40
Capítulo 6 - Conclusão	48
6.1 Trabalhos Futuros	50
Bibliografia	51
Apêndice A – Resultado dos ensaios de desempenho variando a potência nominal ...	55
Apêndice B – Gráficos dos ensaios de EMC conforme CISPR 15	58
B.1 Medições das tensões de perturbação em terminais de alimentação	58
B.2 Medições de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo magnético	63
B.3 Medições de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico	68
Apêndice C – Gráficos dos ensaios de EMC conforme CISPR 32	74
C.1 Medições das tensões de perturbação em terminais de alimentação	74
C.2 Medições de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico	79

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Motivação

Diante do cenário energético atual, a busca por soluções que impulsionem ações de eficiência energética em todos os setores tem se intensificado. O setor de iluminação é o que melhor responde a essas demandas, proporcionando soluções eficientes, com alto potencial de redução de consumo de energia elétrica no curto prazo e com baixo investimento comparado aos demais setores. Como exemplo, pode-se citar a situação energética de 2001 que com o advento do apagão ocorrido neste ano, o governo precisou cortar em 20% o consumo de eletricidade no País e, para isso, estipulou benefícios para quem cumprisse a meta e punições para quem não conseguisse reduzir a conta de energia. Uma das medidas adotadas pela população para reduzir o consumo de energia residencial e atingir a meta estipulada pelo governo foi a substituição das lâmpadas incandescentes pelas fluorescentes compactas. A partir daí a demanda por esses produtos aumentou consideravelmente e as lâmpadas fluorescentes compactas invadiram de vez o mercado nacional.

Em processo de melhoria contínua, buscando não só o aumento da eficiência energética dos produtos, como também disponibilizar soluções mais sustentáveis e ambientalmente mais corretas com a redução do uso de elementos tóxicos no processo fabril e redução de geração de resíduos devido a maior durabilidade dos produtos, o setor de iluminação vem passando nos últimos anos por outra mudança tecnológica e se desenvolvendo muito rapidamente com a introdução do LED (do inglês, *light emitting diode*). Por ter alta durabilidade, a lâmpada de LED apresenta menor índice de descarte no meio ambiente — sem contar que todos os seus componentes podem ser reciclados [1].

Devido à alta eficiência já atingida por essa tecnologia, o setor atualmente vem investindo na automação, monitoramento e controle dos produtos e equipamentos utilizados na iluminação visando o uso racional da energia e evitar o desperdício energético, acompanhando não só o consumo como também a necessidade de manutenção dos pontos de iluminação.

As transformações no mundo digital têm alterado o comportamento das pessoas e o modo como estas interagem com os produtos e entre si. A demanda por produtos e serviços conectados cresce a cada dia, assim como o potencial econômico dessa rede de conexões que se forma, propiciando um ambiente dinâmico de atuação nas mais diversas indústrias,

setores e mercados. Atualmente, bens manufaturados, casas, cidades e sociedades estão cada vez mais vinculadas ao ambiente virtual [2]. Estima-se que o número de dispositivos conectados no mundo em 2020 tenha chegado a 50 bilhões, conforme mostrado na Figura 1.

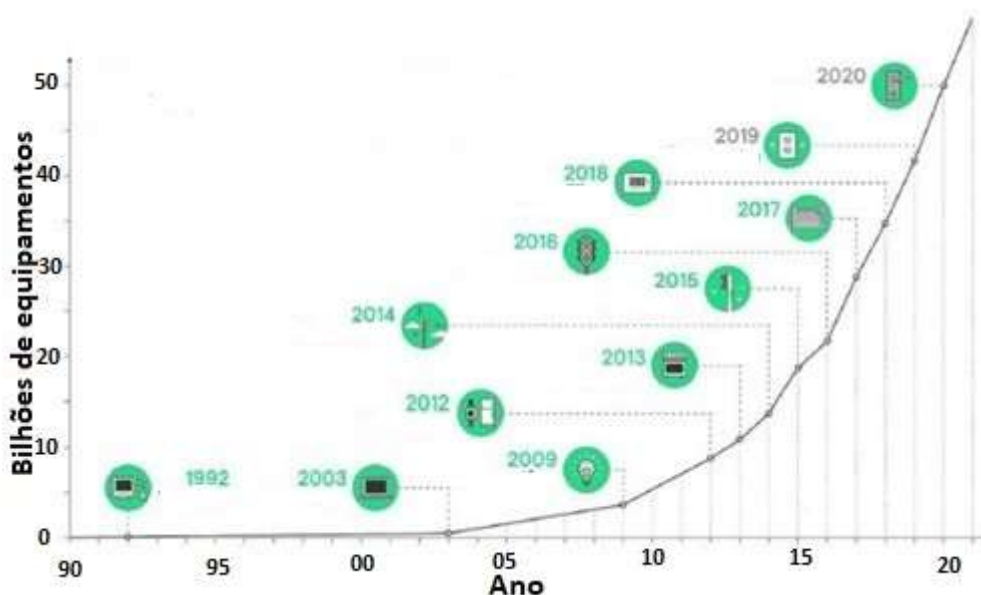


Figura 1 – Quantidade de equipamentos conectados até 2020. Fonte: Adaptado de Signify, 2019.

O setor de iluminação vem acompanhando essa tendência de modernização e digitalização e o advento da utilização da tecnologia LED nos equipamentos possibilitou o desenvolvimento de diversas soluções com inteligência embarcada que já estão disponíveis no mercado.

A utilização de equipamentos eletroeletrônicos na área de iluminação cresceu muito nos últimos anos e a compatibilidade eletromagnética desses equipamentos era um fenômeno que até há poucos anos não era avaliado no Brasil [3]. A Portaria nº 389, de 25 de agosto de 2014 [4] e a Portaria nº 20, de 15 de fevereiro de 2017 do Inmetro [5] tornou essa avaliação obrigatória para lâmpadas de LED com dispositivos de controle integrados à base e luminárias públicas viárias, respectivamente. Recentemente, a Portaria nº 20/2017 foi revisada sendo substituída pela Portaria nº 62, de 17 de fevereiro de 2022.

A implantação dessas Portarias exigindo os ensaios para a avaliação da compatibilidade eletromagnética desses produtos de iluminação melhorou significativamente a sua qualidade, porém as Portarias atingem apenas uma parcela pequena dentro da variedade de produtos existentes no mercado. E a introdução de novos produtos e

tecnologias devem ser acompanhadas pelos órgãos regulamentadores para garantir a confiabilidade dos produtos disponíveis ao consumidor.

É notável a melhoria na qualidade e segurança elétrica atingida pelos produtos que fazem parte do escopo dessas Portarias. Segundo estudo realizado no Cepel (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobras [6], antes da exigência da avaliação da compatibilidade eletromagnética no processo de certificação desses produtos, apenas 10% das lâmpadas de bulbo e tubulares disponíveis no mercado atendiam os limites das normas pertinentes, enquanto para as luminárias públicas, esse percentual era de 25%. Enquanto para os produtos que não fazem do escopo das Portarias, 100% dos produtos disponíveis no mercado não atendem os limites das normas pertinentes, dentre eles, produtos bastante utilizados pelos consumidores residenciais, comerciais e industriais, como os painéis de LED, refletores e lâmpadas bulbo com potências superior a 60 W.

Diante desse cenário, é importante a avaliação da compatibilidade eletromagnética das lâmpadas LED inteligentes, pois esses produtos conquistaram o consumidor, invadiram o mercado, não fazem parte do escopo das Portarias do Inmetro para produtos de iluminação e não possuem regulamentação específica para o controle de sua qualidade.

Um estudo realizado por Araújo (2019) [7] evidencia a necessidade de valorização dos parâmetros de EMC e ainda o esclarecimento sobre a influência EMI provenientes das lâmpadas LED aos usuários finais desta tecnologia. A partir dos resultados encontrados, apresenta-se a sugestão da inserção desta classificação na embalagem do produto, através de um selo que permita identificar as categorias de alta, média e baixa influência EMI, ou ainda em relação aos níveis de EMC destas lâmpadas, permitindo aos consumidores realizar uma correta escolha da lâmpada de acordo com a finalidade da aplicação, sem que haja necessidade de conhecimento específico sobre os critérios utilizados na avaliação.

Portanto, a avaliação da compatibilidade eletromagnética é importante não só pela influência no funcionamento e segurança elétrica dos equipamentos, como também pela influência na eficiência energética e outros parâmetros de qualidade dos mesmos.

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho consiste na avaliação da compatibilidade eletromagnética das lâmpadas LED inteligentes disponíveis no mercado nacional conforme as referências normativas existentes.

Objetiva-se também apresentar os resultados de ensaios de desempenho elétrico e fotométrico realizados nos equipamentos sem certificação informando ao consumidor como estes equipamentos se comportam e comparar esses resultados com os requisitos mínimos exigidos para a comercialização de lâmpadas LED convencionais.

1.3 Estrutura do Trabalho

O desenvolvimento dessa dissertação está estabelecido como descrito a seguir.

Neste primeiro capítulo introdutório, foi apresentado o contexto em que o trabalho está envolvido, assim como suas principais motivações e objetivos.

O Capítulo 2, apresenta os fundamentos da Compatibilidade Eletromagnética e uma breve introdução sobre as lâmpadas inteligentes e a tecnologia *Li-Fi*.

O Capítulo 3, trata das normas e as legislações pertinentes.

O Capítulo 4, apresenta a metodologia utilizada para a execução dos ensaios realizados, de acordo com as normas pertinentes.

O Capítulo 5, apresenta a análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados, de acordo com cada norma utilizada e configurações do produto.

O Capítulo 6, finaliza esta dissertação com as conclusões sobre o trabalho, evidenciando a importância e contribuição das análises aqui realizadas, além de indicar os trabalhos que possam ser desenvolvidos em complemento ao proposto neste trabalho.

Nos Apêndices são apresentados os resultados dos ensaios e gráficos em todas as configurações realizadas para todos os modelos de lâmpadas inteligentes ensaiadas para a elaboração deste trabalho.

Capítulo 2 - Conceituação Teórica

O capítulo 2 aborda brevemente alguns conceitos importantes de luminotécnica e de compatibilidade eletromagnética utilizados neste trabalho, além de apresentar as tendências futuras para o setor de iluminação.

2.1 Conceitos luminotécnicos

As principais grandezas luminotécnicas abordadas neste trabalho estão descritas abaixo:

Fluxo luminoso: É a radiação total emitida em todas as direções por uma fonte luminosa ou fonte de luz que pode produzir estímulo visual. Estes comprimentos de onda estão compreendidos entre 380 a 780 nm. Sua unidade é o lúmen (lm). A Figura 2 mostra a distribuição do fluxo luminoso de uma lâmpada.



Figura 2: Fluxo luminoso de uma lâmpada. Fonte: Adaptado de Google Imagens.

Potência: Grandeza elétrica medida em Watt (W), que determina a quantidade de energia consumida por uma fonte a cada unidade de tempo. Embora existam outros benefícios para a iluminação LED em relação à iluminação tradicional, seu consumo de energia reduzido ainda é sua maior vantagem.

Eficiência energética: A eficiência energética de uma lâmpada LED, medida em lm/W, é a relação entre o fluxo luminoso produzido pela lâmpada e a potência elétrica consumida para gerar esse fluxo luminoso. Quanto maior essa relação, mais eficiente é o produto.

Fator de potência: Fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência total de um circuito elétrico. Esta relação demonstra se o dispositivo está consumindo energia

elétrica adequadamente ou não, e relaciona o uso eficiente da energia ativa e reativa de um dispositivo, sendo um dos principais indicadores de eficiência energética.

Temperatura de Cor Correlata (TCC): A temperatura de cor correlata (TCC) expressa a aparência de cor da luz emitida por uma fonte. É medida na unidade Kelvin. Quanto mais alta a temperatura de cor, mais azulada é a tonalidade de cor da luz e, quanto mais baixa, mais amarelada é essa tonalidade.

Fontes de luz quentes, como lâmpadas incandescentes, têm uma temperatura de cor baixa (2400-3000 K) e apresentam mais luz na faixa vermelha, laranja e amarelo. Enquanto as fontes de luz fria, como as lâmpadas fluorescentes, têm uma alta temperatura de cor (> 4000 K) e apresentam mais luz na faixa azul. A temperatura de cor correlata dos produtos com a tecnologia LED é definida pela norma ANSI C78.377 [8].

Muito mais que os efeitos estéticos, a temperatura de cor na iluminação de um ambiente pode interferir no rendimento das atividades diárias, no sono e até mesmo na saúde do ser humano. O corpo humano é regulado pelo ciclo circadiano, conhecido como “ritmo biológico”, o qual está diretamente ligado à influência da luz natural e ao ciclo do sol. No início e no fim do dia o sol proporciona uma luz amarelada que geralmente causa relaxamento. Ao longo do dia tem-se um aumento da temperatura de cor da luz solar, atingindo cerca de 6500K ao meio-dia, o que aumenta a concentração e apura o estado de performance nas atividades [9]. A Figura 3 mostra a mudança da temperatura de cor da luz solar ao longo do dia e as atividades indicadas em cada situação.

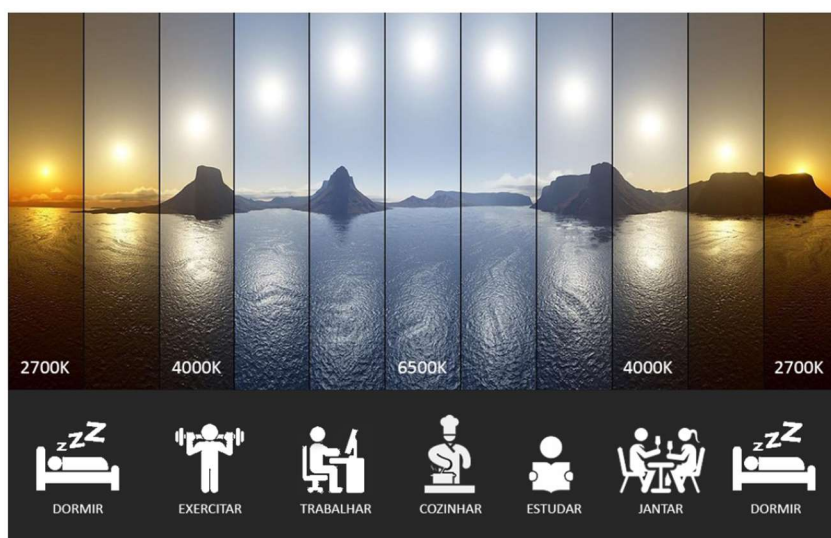


Figura 3 - Temperatura de cor da luz solar ao longo do dia. Fonte:
<https://plugdesign.com.br/temperatura-cor/>

Índice de Reprodução de Cor (IRC): É a relação entre a cor real de um objeto ou superfície e a aparência percebida diante de uma fonte luminosa. Esse índice é calculado conforme método descrito na norma CIE 13.3 [10] e seu valor varia de 0 a 100, sendo que, quanto mais próximo de 100, maior a fidelidade das cores dos objetos.

A norma [10] apresenta os 14 índices de reprodução de cor especiais, Figura 4, sendo o Ra a média aritmética dos oito primeiros índices que representam oito cores em tons pastéis. Os demais índices de reprodução de cores especiais são quatro cores fortes e vibrantes como o vermelho (R9), amarelo (R10), verde (R11) e azul (R12), e mais duas cores pastéis, o rosa amarelado (R13) e verde oliva (R14).

O índice R9, que está relacionado a vermelhos fortes e vibrantes, é um dos índices que não estão incluídos na medição do Ra, no entanto, sempre que a qualidade da luz do LED é discutida, o R9 é importante, pois a capacidade específica de um produto de iluminação para reproduzir com fidelidade o vermelho é fundamental para uma reprodução fiel de cores em geral.

Os valores do IRC e R9 são duas características importantes quando se trata de selecionar a lâmpada LED correta para a sua aplicação. Para algumas aplicações o índice R9 é importantíssimo, tais como: hospitais, porque é a cor mais crítica para procedimentos cirúrgicos; restaurantes, para demonstração da qualidade e apresentação dos alimentos; galerias de arte, para a exibição, com fidelidade, das obras; comércio, onde a iluminação de destaque precisa ter uma alta qualidade para mostrar com fidelidade as cores reais aos clientes, entre outros.



Figura 4 - Amostras de cor CIE 13.3-1995. Fonte: Architectural Lighting (Adaptado).

Assim como o R9, seria relevante que outros índices também com aplicações importantes, como o R13 (cor caucasiano) e R15 (cor oriental) sejam levados em consideração, pois são cores utilizadas para reprodução de cor da pele.

A tecnologia de iluminação com base nos LEDs colocou em dúvida os métodos de avaliação de qualidade até então utilizados. Por essa razão, novos procedimentos estão sendo estudados e serão futuramente adotados, objetivando a correção de limitações e distorções impostas pelos métodos atuais. A CIE já está analisando alternativas para a avaliação da reprodução de cores, já que o método atual apresenta limitações.

Para tentar tornar a avaliação de cores mais criteriosa, a IESNA – Illuminating Engineering Society North America – introduziu a IES TM- 30, um novo método de avaliação de cores para fontes de luz. Este procedimento usa como base a comparação de cores reproduzidas por uma determinada fonte em comparação com uma fonte padrão, sob um determinado iluminante na mesma temperatura de cor. Ele adota 99 amostras de cores estaticamente selecionadas de um grupo de mais de 100.000 espectros avaliados e medidos. Por essa razão, podemos considerar que estas 99 amostras de cores são representações das muitas possíveis cores disponíveis.

2.2 Compatibilidade Eletromagnética

A habilidade de um equipamento ou de um sistema de funcionar satisfatoriamente em seu ambiente eletromagnético sem introduzir perturbação eletromagnética intolerável para qualquer coisa neste ambiente é conhecido normativamente como compatibilidade eletromagnética [11].

A compatibilidade eletromagnética pode ser dividida em duas partes: Interferência e Susceptibilidade. A primeira trata da quantidade de ruído eletromagnético que determinado equipamento insere no ambiente, seja de forma conduzida ou radiada. Já susceptibilidade se refere à robustez de determinado equipamento a perturbações eletromagnéticas conduzidas ou radiadas [12].

Interferência eletromagnética (EMI, do inglês *Electromagnetic Interference*) é qualquer emissão ou sinal, radiado no espaço livre ou conduzido por cabos de alimentação,

que coloca em risco o funcionamento de outros equipamentos que estão próximos ou conectados à mesma rede de alimentação [12].

A interferência eletromagnética radiada é dependente de parâmetros construtivos do circuito e é geralmente evitada através da blindagem, sendo difícil estabelecer um modelo que estime de forma adequada seus efeitos durante a fase do projeto do equipamento. Por esta razão, usualmente abordam-se as interferências radiada e conduzida de forma distinta em diferentes etapas do projeto [12].

Equipamentos eletroeletrônicos podem gerar perturbações eletromagnéticas que podem prejudicar o desempenho de outros equipamentos. O ideal é que todos os equipamentos eletroeletrônicos convivam em um ambiente de equilíbrio onde os dispositivos não sofram interferências por perturbações eletromagnéticas do ambiente e nem interfiram no funcionamento dos demais dispositivos do sistema.

Um equipamento é dito compatível eletromagneticamente quando: não causa interferência em outros equipamentos, é imune às emissões de outros equipamentos e não causa interferência em si próprio [13].

As perturbações eletromagnéticas podem provocar desde pequenos danos de funcionamento, como interferências em televisões ou rádios e a queima do equipamento até danos mais sérios como queda de aviões devido a falhas de controles eletrônicos e vítimas humanas por interferências em equipamentos hospitalares.

Estudos revelaram que o telefone celular é uma das fontes potenciais de interferência para o funcionamento de muitos dispositivos médicos. A radiação dos telefones celulares fará com que o dispositivo médico próximo funcione mal ou altere os parâmetros medidos. Além disso, poderia fazer alterações nos monitores. Na literatura, os dispositivos médicos mais vulneráveis às radiações do telefone celular são os ventiladores mecânicos, bombas de infusão, gravador de Eletrocardiograma (ECG), monitores de pacientes, desfibriladores e marca-passos [14].

E a tão aguardada tecnologia 5G, que impulsionará as aplicações dos equipamentos inteligentes e internet das coisas, tem sido tema bastante estudado no campo da compatibilidade eletromagnética, por ser um emissor intencional de alta potência capaz de causar graves interferências eletromagnéticas [15]. Maxim Solkin (2021) cita os resultados

de um estudo realizado pela RTCA (Comissão Técnica de Rádio para Aeronáutica) que fornece uma conclusão muito perturbadora: “Os resultados apresentados neste relatório revelam um grande risco de que os sistemas de telecomunicações 5G causem interferência prejudicial aos altímetros de radar em todos os tipos de aeronaves civis, incluindo aviões de transporte comercial, executiva, helicópteros de transporte e aviação em geral.”

A interferência eletromagnética é algo que sempre esteve presente no dia-a-dia dos engenheiros e técnicos. Porém, nos últimos anos com o aumento da oferta de controladores e a eficiência de comutadores houve um aumento nas frequências de operação dos conversores [12].

Quando se trata de compatibilidade eletromagnética, existem duas vertentes:

- Imunidade eletromagnética, na qual o equipamento é submetido a uma perturbação eletromagnética;
- Emissão eletromagnética, quanto o equipamento está gerando de perturbação para o ambiente.

Na Europa, tanto as normas de emissão de perturbações quanto de imunidade são obrigatórias. Nos Estados Unidos, as normas de emissão de perturbações são obrigatórias e as normas de imunidade são voluntárias, pois se entende que produtos com baixa imunidade serão rejeitados pelo mercado.

No Brasil, conforme descrito anteriormente, essa avaliação torna-se obrigatória apenas para lâmpadas de LED com dispositivos de controle integrados à base e luminárias públicas de LED com a publicação das Portarias nº 389, de 25 de agosto de 2014 [4] e a Portaria nº 20, de 15 de fevereiro de 2017 do Inmetro [5], mas não é extensiva a produtos como refletores, painéis de LED e luminárias de uso interno.

Porém, a questão das interferências eletromagnéticas em sistemas de iluminação é antiga e começa com a introdução das lâmpadas fluorescentes em substituição às lâmpadas incandescentes.

Um dos primeiros trabalhos sobre interferência eletromagnética (EMI) gerada por sistemas de iluminação com reatores eletrônicos, foi feito por Arthur et al. (1982), que

estudaram o impacto destas interferências conduzidas e radiadas sobre alguns equipamentos eletromédicos [16].

Para Schwabe et al. (1998), os sistemas de comunicação eletrônica e os sistemas de controle são afetados pelas lâmpadas fluorescentes. Como exemplo de problemas podem ser citados os seguintes: sistemas de segurança falham, atrasos em relógios de aviso de horários de aula em escola, sistema de áudio captam as interferências radiadas das lâmpadas e as amplificam e misturam ao som transmitido, luz oscilante (flicker) devido às variações de tensão amplificadas pelo reator eletrônico [16].

De acordo com Nyland et al. (2002), a utilização de reatores eletrônicos em substituição aos reatores eletromagnéticos foi impulsionada pelo maior rendimento (quase 75% destes contra 50% dos reatores eletromagnéticos), o menor peso e volume destes, além das agências governamentais reguladoras brasileiras começar a exigir a utilização de cargas com maior fator de potência (passou de 0,86 para 0,92) em ambientes residenciais, comerciais e industriais. Os resultados obtidos por Nyland et al. (2002) para as emissões conduzidas por sistemas de iluminação com reatores eletromagnéticos mostraram que nenhuma frequência ficou acima do valor estipulado pela norma adotada (CISPR 15). Porém, para os sistemas com reatores eletrônicos várias frequências apresentaram níveis de emissão conduzida acima do limite estipulado na norma CISPR 15, provavelmente devido às altas frequências de funcionamento dos conversores estáticos [16].

A avaliação da compatibilidade eletromagnética desses produtos é importantíssima, principalmente para órgãos como a Agência Nacional de Telecomunicações – Anatel e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo da Aeronáutica – DECEA, pois estudos recentes mostraram que uma simples lâmpada de LED a poucos quilômetros de distância é capaz de interferir no espectro eletromagnético das redes de telefonia e banda larga, bem como no controle e operação dos aeroportos [17].

Especialistas de diferentes áreas alertaram durante o I Workshop de compatibilidade eletromagnética, que aconteceu no Cepel em agosto de 2018, sobre o risco provocado pelas fontes emissoras, por não estarem em conformidade com as normas relacionadas à compatibilidade eletromagnética. Durante o evento foram citadas situações cotidianas de interferência eletromagnética, dentre elas, pode-se destacar os casos de celulares alterando a programação de bombas infusoras de fármacos em hospitais [13], lâmpadas LED [17] e

câmeras *Wi-Fi* interferindo na operação e segurança de aeroportos e babás eletrônicas interferindo em redes de telefonia.

Estudo realizado por Rietveld et al. [18], mostra que a interferência eletromagnética conduzida (EMI) pode levar a grandes erros de leituras de medidores de eletricidade estática, os autores realizaram um estudo de verificação completo confirmando que as correntes de banda larga produzidas por cargas não lineares e de comutação rápida podem levar a erros significativos de leituras de medidores estáticos. Os principais parâmetros da EMI que causam os erros são um tempo de subida curto e um alto valor de pico do degrau atual. Ao regular cargas lineares ou não lineares, como aquecedores e lâmpadas economizadoras de energia, a (falta de) filtro interno no *dimmer* tem uma grande influência nesses parâmetros-chave [18].

Em ambientes hospitalares, as lâmpadas de LED foram amplamente introduzidas em para conservação de energia e redução de custos. No entanto, a interferência eletromagnética (EMI) por lâmpadas LED tem sido relatada. Em hospitais, pode ocorrer EMI com sistemas de telemetria médica sem fio. Os sistemas de telemetria médica sem fio são dispositivos médicos que transmitem sinais vitais do paciente, como eletrocardiogramas, formas de onda respiratórias, pressão arterial, eletromiogramas e saturação de oxigênio do sangue arterial, para um monitor de paciente por ondas de rádio. Um estudo realizado por Ishida et al. (2018) investigou o ruído de radiação de lâmpadas LED e a possibilidade de interferência com sistemas de telemetria médica sem fio e confirmou que várias lâmpadas LED irradiavam um campo elétrico de 420 a 450 MHz (frequência comumente utilizada por equipamentos eletromédicos) com alta intensidade no campo muito próximo. A EMI com sistemas de telemetria médica sem fio por lâmpadas LED tem o potencial de ocorrer no campo extremamente próximo, ou seja, dentro ou sob o teto do hospital. A má recepção de sinais de sistemas de telemetria médica sem fio pode causar sérios problemas médicos, como interferência no monitoramento cardíaco. Determinar a possibilidade e o efeito da EMI é uma tarefa urgente agora que as lâmpadas LED são amplamente utilizadas em hospitais [19].

Essa constatação foi confirmada também por outros estudos, e a preocupação com os sistemas de iluminação em ambientes hospitalares levou a CISPR a revisar a norma de iluminação e aumentar a faixa de frequência de ensaio de perturbação eletromagnética no campo elétrico que era de 30 a 300 MHz para 30 MHz a 1 GHz.

2.3 Novas tecnologias

O uso da Internet e o tráfego de dados nas redes estão crescendo exponencialmente com *streamings* de vídeo, dispositivos *IoT*, serviços baseados em nuvem, e com isso muitas redes internas estão ficando sem largura de banda. A Figura 5 ilustra a evolução do tráfego de dados no mundo nos últimos anos.

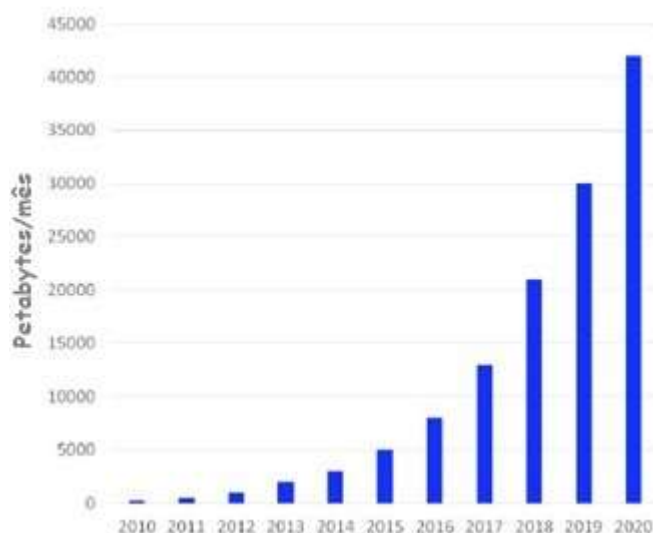


Figura 5 – Tráfego de dados no mundo. Fonte: Adaptado de Signify, 2019.

A Figura 6 traz os tipos de comunicação e atualmente o tráfego de dados é distribuído por fio ou via comunicação de rádio. Então tem-se a conexão por cabos, fibra óptica e os tipos de conexão sem fio, *Wi-Fi*, *zigbee*, 4G, entre outros.



Figura 6 – Tipos de conexão. Fonte: Signify, 2019.

Com tantas tecnologias, o espectro de radiofrequência já está congestionado e não oferece espaço suficiente para crescer, como pode ser mostrado na Figura 7, onde apenas os espaços em branco estão sem uso. Isso se manifesta em estabilidade reduzida, cobertura sem fio ineficaz e taxa de transferência mais lenta, frustrando as necessidades e expectativas dos usuários, com redes não confiáveis, interferências eletromagnéticas, uma série de problemas que surgem com esse *boom* de equipamentos inteligentes conectados.

Diante do exposto, precisa-se pensar em soluções seguras para que o congestionamento do espectro de rádio frequência não se torne um gargalo para a evolução da tecnologia. Daí surgiu uma grande ideia, por que não usar as ondas do espectro visível para transportar dados? É uma mudança de paradigma usar ondas de luz para se comunicar. Mas, uma solução bastante eficaz e promissora. Daí surgiu o *Light Fidelity - Li-Fi*. Essa tecnologia usa uma parte do espectro eletromagnético que ainda não é muito utilizado - o espectro visível, em vez de ondas de rádio Gigahertz para transferência de dados. A Figura 8 apresenta a distribuição das tecnologias no espectro de frequências.

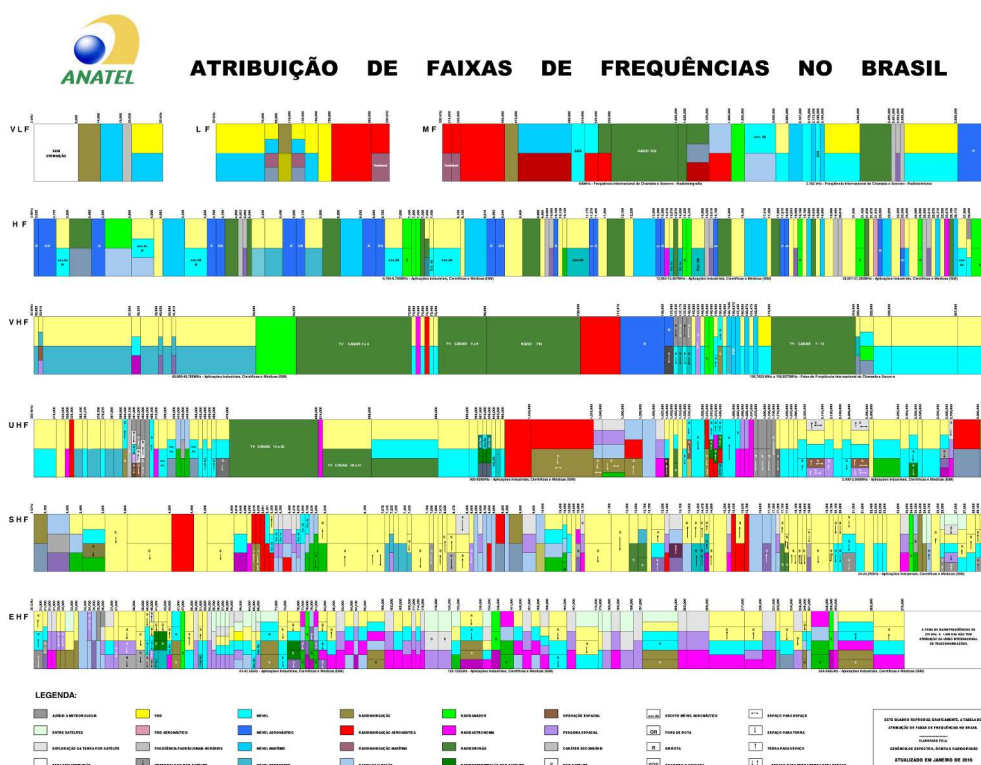


Figura 7 – Atribuição de faixas de frequências no Brasil. Fonte: Anatel em Janeiro de 2016.

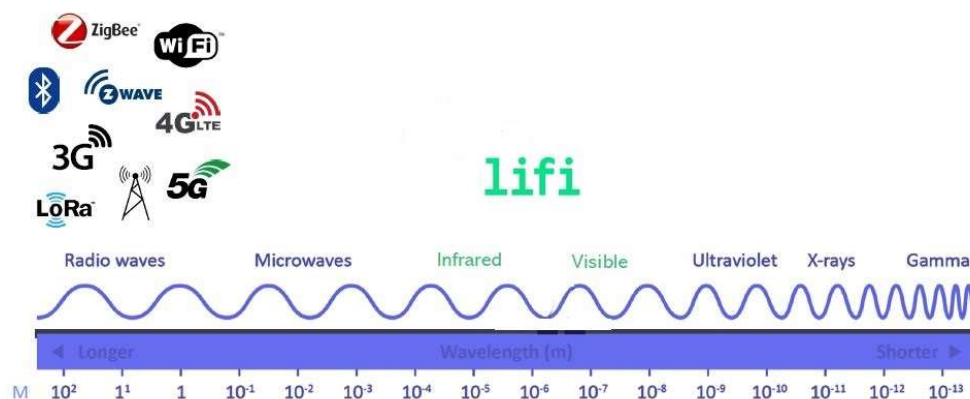


Figura 8 – Espectro de frequências e as tecnologias de comunicação existentes.

Fonte: Signify, 2019.

O *Light Fidelity (Li-Fi)* é um termo derivado de *Wireless Fidelity (Wi-Fi)* e uma das tecnologias de comunicação mais recentes, buscando aprimorar a tecnologia atual usando a luz visível como meio de transmissão de dados, em vez da tecnologia atual de radiofrequência. *Li-Fi* faz parte das Comunicações Ópticas Sem Fio (OWC). OWC inclui comunicações ultravioleta e infravermelha, bem como luz visível.

A ideia do *Li-Fi* foi apresentada pela primeira vez pelo físico alemão Harald Hass em julho de 2011, referindo-se a ela como “dados por meio de iluminação”. Contudo, o primeiro sistema de comunicação sem fio através de um feixe de luz foi desenvolvido em 1880 por Alexandre Graham Bell quando inventou o fotofone. O fotofone funcionava de forma semelhante ao telefone, exceto que o fotofone usava a luz como meio de projetar informações, enquanto o telefone dependia de um sinal elétrico modulado transportado por um circuito de fio condutor [k].

Harold Hass usou um abajur com lâmpada de LED para transmitir um vídeo de uma flor desabrochando que foi projetada em uma tela. Em termos simples, o *Li-Fi* pode ser pensado como um *Wi-Fi* baseado em luz, ou seja, em vez de ondas de rádio, ele usa luz para transmitir dados. No lugar dos modems *Wi-Fi*, o *Li-Fi* usaria transceptores equipados com lâmpadas LED que poderiam iluminar uma sala, bem como transmitir e receber informações. Ao adicionar largura de banda nova e não utilizada de luz visível às ondas de rádio atualmente disponíveis para transferência de dados, o *Li-Fi* pode desempenhar um papel importante no alívio das cargas pesadas que o sistema sem fio atual está enfrentando.

Pela comunicação através da luz visível, a tecnologia *Li-Fi* tem a possibilidade de mudar a forma de acesso a Internet, transmissão de vídeos, recebimento de e-mails e muito mais. A segurança não seria um problema, pois os dados não podem ser acessados na ausência de luz.

O *Li-Fi* usa a luz como meio para fornecer comunicação de alta velocidade de maneira semelhante ao *Wi-Fi* e está em conformidade com o padrão IEEE 802.15.7 que é um padrão baseado em tecnologia de comunicação sem fio de alta velocidade, bidirecional e totalmente em rede semelhante ao IEEE 802.11 do *Wi-Fi*.

O princípio de funcionamento do *Li-Fi* é baseado no envio de dados por modulação em amplitude da fonte de luz de forma bem definida e padronizada. Os LEDs podem ser ligados e desligados mais rápido do que os olhos humanos podem detectar, já que a velocidade de operação dos LEDs é inferior a 1 microssegundo. Esta atividade invisível liga-desliga permite a transmissão de dados usando códigos binários. Se o LED estiver ligado, um '1' digital é transmitido e se o LED estiver desligado, um '0' digital é transmitido. Além disso, esses LEDs podem ser ligados e desligados muito rapidamente, o que traz uma oportunidade muito boa para transmitir dados através de luzes LED, porque não há frequências de luz interferentes como as de frequências de rádio em *Wi-Fi*. Acredita-se que o *Li-Fi* seja 80% mais eficiente, o que significa que pode atingir velocidades de até 1 Gbps e até mais. O *Li-Fi* difere da fibra óptica porque as camadas do protocolo *Li-Fi* são adequadas para comunicação sem fio em distâncias curtas (até 10 metros).

Isso coloca o *Li-Fi* em uma posição única de comunicação sem fio extremamente rápida em curtas distâncias.

Em uma configuração típica, como desse diagrama de blocos apresentado na Figura 9, o transmissor (LED) é conectado à rede de dados (Internet através do modem) e o receptor (fotodetector / sensor de luz) na extremidade receptora recebe os dados como sinal de luz e decodifica a informação, que é então exibido no dispositivo conectado ao receptor. O receptor (fotodetector) registra um binário '1' quando o transmissor (LED) está ligado e um binário '0' quando o transmissor (LED) está desligado. Assim, piscar o LED várias vezes ou usar uma série de LEDs (talvez de algumas cores diferentes) acabará por fornecer taxas de dados na faixa de centenas de Mbps.

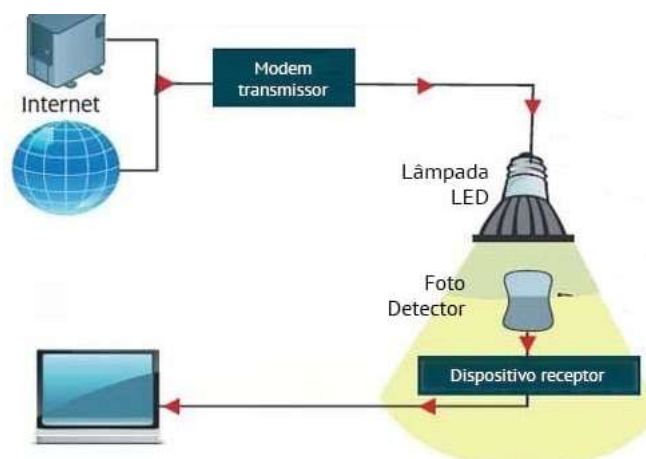


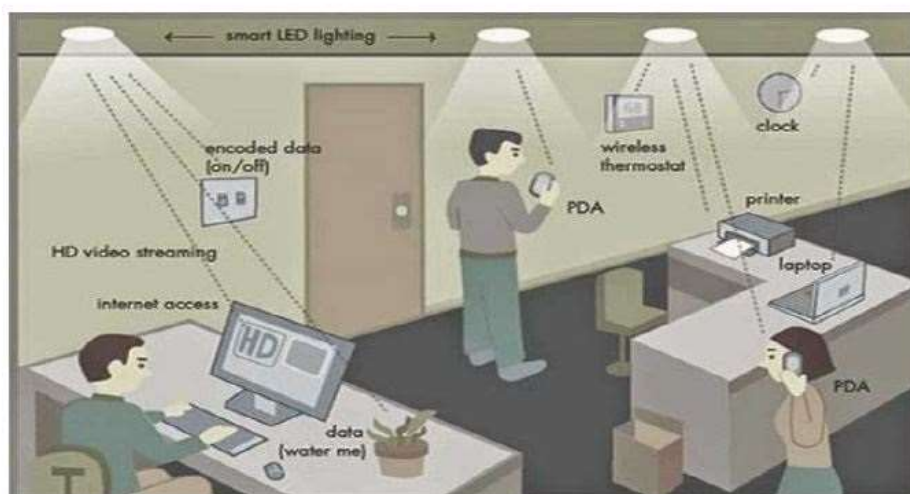
Figura 9 – Configuração típica de comunicação do *Li-Fi*. Fonte:

<https://www.oficinadanet.com.br/post/15644-o-que-e-lifi-e-como-funciona>

Portanto, tudo o que é necessário é uma matriz de LEDs e um controlador que controla / codifica os dados nesses LEDs. Tudo o que se precisa fazer é variar a taxa em que os LEDs piscam dependendo da entrada de dados nos LEDs. Outros aprimoramentos de taxa de dados podem ser feitos neste método, usando matriz de LEDs para transmissão de dados paralela ou usando misturas de LEDs vermelhos, verdes e azuis para alterar a frequência da luz, com cada frequência codificando um canal de dados diferente.

Tanto o *Wi-Fi* quanto o *Li-Fi* podem fornecer acesso à Internet sem fio aos usuários, e ambas as tecnologias transmitem dados pelo espectro eletromagnético. O *Li-Fi* é uma tecnologia de comunicação de luz visível útil para obter comunicação sem fio de alta velocidade. A diferença entre as tecnologias é que o *Wi-Fi* usa ondas de rádio para transmissão, enquanto o *Li-Fi* usa ondas de luz. O *Wi-Fi* funciona bem para cobertura sem fio geral dentro de edificações, e o *Li-Fi* é ideal para cobertura de dados sem fio de alta densidade dentro de uma área ou sala confinada e está livre de problemas de interferência, ao contrário do *Wi-Fi*. Já existem trabalhos conhecidos comparando a aplicação desta tecnologia como em Saadallah *et al.* [21], Damerdash *et al.* [22] e Anbalagan *et al.* [23].

A Figura 10 apresenta uma ilustração da aplicação da conexão através do *Li-Fi*.



(Source: http://ijartie.com/AdminUploadPdf/Review_Paper_on_Li-Fi_Light_Fidelity_ijartie2056.pdf)

Figura 10 – Aplicação do *Li-Fi*.

A Tabela 1 mostra uma comparação da velocidade de transferência de várias tecnologias sem fio.

Tabela 1 - Comparação da velocidade entre as tecnologias.

Tecnologia	Velocidade
<i>Li-Fi</i>	~1 Gbps
<i>Wi-Fi</i> – IEEE 802.11	~150 Mbps
IrDA	~ 4 Mbps
Bluetooth	~ 3 Mbps
NFC	~ 424 Kbps

A Tabela 2 mostra uma comparação entre o *Li-Fi* e o *Wi-Fi*.

Tabela 2 - Comparação *Li-Fi* x *Wi-Fi*.

Parâmetro	<i>Li-Fi</i>	<i>Wi-Fi</i>
Espectro usado	Luz visível	RF
Padrão	IEEE 802.15.7	IEEE 802.11
Alcance	Baseado na luz visível (< 10 m)	Baseado na propagação das rádios interferências (< 300 m)

Taxa de transferência de dados	Muito alta (~1 Gbps)	Baixa (~150 Mbps)
Consumo	Baixo	<i>Alto</i>
Custo	Baixo	Alto
Largura de banda	Ilimitada	Limitada

A Figura 11 ilustra a comparação do alcance das duas tecnologias.

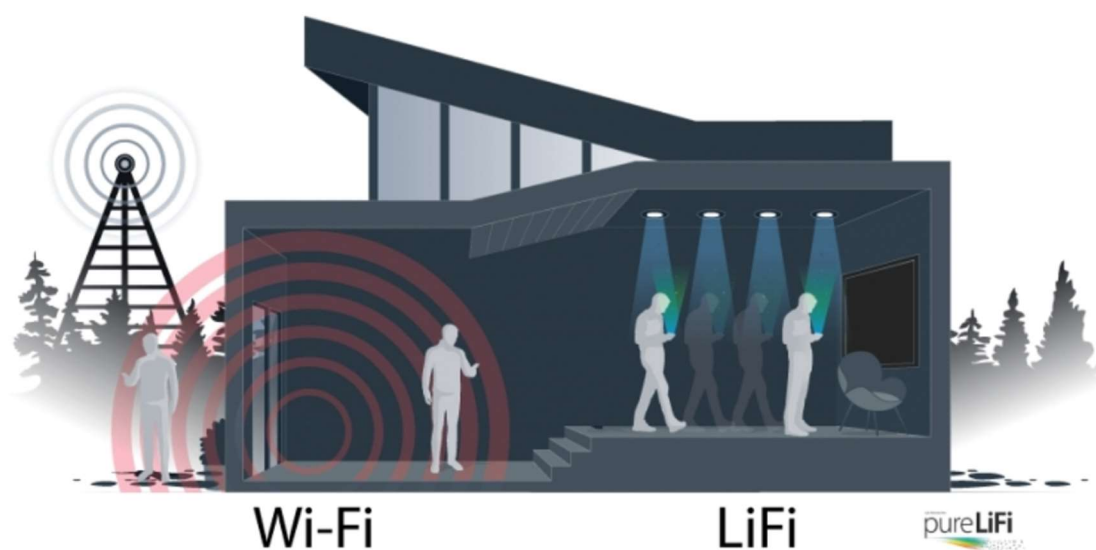


Figura 11 – Comparação entre o alcance do *Wi-Fi* e o *Li-Fi*. Fonte:

<https://media2.pl/tech/149423-LiFi-zastapi-technologie-Wi-Fi-Nowa-technologie-komunikacji-poprzez-swiatlo.html>

Sobre as deficiências da transmissão de ondas de rádio em relação à transmissão *Li-Fi* destaca-se:

1 - Capacidade: os dados sem fio são transmitidos por ondas de rádio que são limitadas e caras. Tem uma largura de banda limitada, em relação ao *Li-Fi*. Com o mundo em rápido crescimento e o desenvolvimento de tecnologias como 3G, 4G e assim por diante, estamos ficando sem espectro de rádio.

2 - Eficiência energética: Há um grande número de estações base de rádio celular que consomem grande quantidade de energia. A maior parte da energia é usada para resfriar a estação base, em vez da transmissão. Portanto, a eficiência dessas estações base de rádio é muito baixa.

3 - Disponibilidade: a disponibilidade de ondas de rádio é uma grande preocupação. Além disso, não é recomendável usar ondas de rádio em aviões e em locais onde a interferência de rádio pode causar resultados indesejáveis.

4 - Segurança: As ondas de rádio podem penetrar nas paredes. Elas podem ser interceptadas. Se alguém tem conhecimento e más intenções, eles podem abusar disso. Isso causa uma grande preocupação de segurança para o *Wi-Fi*.

Dentre as vantagens da tecnologia *Li-Fi*, destaca-se:

a) Eficiência: O consumo de energia pode ser minimizado com o uso de iluminação LED que já está disponível em casa, escritórios e shopping etc. para fins de iluminação. Daí a transmissão de dados que requerem energia adicional insignificante, o que o torna muito eficiente em termos de custos e também de energia.

b) Alta velocidade: Combinação de baixa interferência, larguras de banda altas e saída de alta intensidade, ajuda o *Li-Fi* a fornecer altas taxas de dados, ou seja, 1 Gbps ou até mais.

c) Disponibilidade: a disponibilidade não é um problema, pois as fontes de luz estão presentes em todos os lugares.

Onde quer que haja uma fonte de luz, pode haver Internet. As lâmpadas estão presentes em todos os lugares - em residências, escritórios, lojas, shoppings e até aviões, que podem ser utilizadas como meio de transmissão de dados.

d) Mais barato: *Li-Fi* não só requer menos componentes para seu funcionamento, mas também usa apenas uma energia adicional insignificante para a transmissão de dados.

e) Segurança: uma das principais vantagens do *Li-Fi* é a segurança. Uma vez que a luz não pode passar por estruturas opacas, a Internet *Li-Fi* está disponível apenas para os usuários em uma área confinada e não pode ser interceptada e mal utilizada fora da área em operação.

f) A tecnologia *Li-Fi* tem um grande escopo no futuro. O amplo crescimento no uso de LEDs para iluminação oferece, de fato, a oportunidade de integrar a tecnologia em uma infinidade de ambientes e aplicações.

Algumas das principais limitações do *Li-Fi* são:

- A Internet não pode ser acessada sem uma fonte de luz. Isso pode limitar os locais e situações em que o *Li-Fi* pode ser usado.
- Requer uma linha de visão próxima ou perfeita para transmitir dados.
- Obstáculos opacos nas vias podem afetar a transmissão de dados.
- Luz natural, luz solar e luz elétrica normal podem afetar a velocidade de transmissão de dados.
- As ondas de luz não penetram nas paredes e, portanto, o *Li-Fi* tem um alcance muito menor do que o *Wi-Fi*.
- Alto custo de instalação inicial, se usado para configurar uma rede de dados completa.
- Ainda a ser desenvolvido para adoção em grande escala.

Existem inúmeras aplicações da tecnologia *Li-Fi*, desde o acesso público à Internet até a iluminação existente (LED), até carros com piloto automático que se comunicam através de seus faróis (baseados em LED). As aplicações de *Li-Fi* podem se estender em áreas onde a tecnologia *Wi-Fi* carece de presença, como aeronaves e hospitais (salas de operação), usinas de energia e várias outras áreas, onde a interferência eletromagnética (rádio) é uma grande preocupação para a segurança e proteção dos equipamentos e pessoas. Como o *Li-Fi* usa apenas a luz, ele pode ser usado com segurança em tais locais ou áreas. No futuro, com o aprimoramento *Li-Fi*, todos os postes de luz podem ser transformados em pontos de conexão *Li-Fi* para transferir dados. Com isso, será possível acessar a internet em qualquer logradouro e via pública. Algumas das aplicações futuras do *Li-Fi* podem ser as seguintes:

a) Sistemas de educação: *Li-Fi* é a tecnologia mais recente que pode fornecer velocidade mais rápida para acesso à Internet. Assim, ele pode aumentar / substituir o *Wi-Fi* em instituições de ensino e empresas para que as pessoas possam fazer uso do *Li-Fi* em alta velocidade.

b) Aplicações médicas: Os teatros de operação (OTs) não permitem *Wi-Fi* devido a questões de radiação. O uso de *Wi-Fi* em hospitais interfere / bloqueia os sinais dos equipamentos de monitoramento. Portanto, pode ter efeito prejudicial à saúde do paciente, devido ao mau funcionamento de aparelhos médicos. Para superar isso e tornar mais experiente a tecnologia OT, o *Li-Fi* pode ser usado para acessar a internet e também para

controlar equipamentos médicos. Isso será benéfico para a realização de cirurgias robóticas e outros procedimentos automatizados.

c) Internet Mais Barata em Aeronaves: Os passageiros que viajam em aeronaves têm acesso à Internet de baixa velocidade a um custo altíssimo. Além disso, o *Wi-Fi* não é usado porque pode interferir nos sistemas de navegação dos pilotos. Em aeronaves, o *Li-Fi* pode ser usado para transmissão de dados. O *Li-Fi* pode fornecer facilmente Internet de alta velocidade por meio de qualquer fonte de luz, como lâmpada de leitura suspensa, etc. presente dentro do avião.

d) Aplicações subaquáticas: ROVs subaquáticos (veículos operados remotamente) operam a partir de grandes cabos que fornecem sua energia e permitem que eles recebam sinais de seus pilotos acima. Mas a corda usada nos ROVs não é longa o suficiente para permitir que explorem áreas maiores. Se seus fios fossem substituídos por luz, por exemplo, de uma lâmpada submersa de alta potência, eles ficariam muito mais livres para explorar. Eles também podiam usar seus faróis para se comunicarem, processando dados de forma autônoma e enviando suas descobertas periodicamente de volta à superfície. *Li-Fi* pode até funcionar debaixo d'água onde o *Wi-Fi* falha completamente, abrindo assim oportunidades infinitas para operações militares subaquáticas.

e) Gerenciamento de desastres: *Li-Fi* pode ser usado como um poderoso meio de comunicação em tempos de desastres, como terremotos ou furacões. A média das pessoas pode não conhecer os protocolos durante esses desastres. Estações de metrô e túneis, zonas mortas comuns para a maioria das comunicações de emergência, não representam obstáculos para o *Li-Fi*.

f) Aplicações em áreas sensíveis: As usinas precisam de sistemas de dados rápidos e interconectados para que a demanda, a integridade da rede e a temperatura central (no caso de usinas nucleares) possam ser monitoradas. A interferência de comunicação de rádio é considerada ruim para essas áreas sensíveis ao redor dessas usinas. *Li-Fi* pode oferecer conectividade segura e abundante para todas as áreas desses locais sensíveis. Além disso, a pressão sobre as próprias reservas de uma usina (consumo de energia para implantações de radiocomunicação) será reduzida.

g) Gestão de tráfego: Nos sinais de trânsito, o *Li-Fi* pode ser usado para se comunicar com os veículos que passam (através das luzes LED dos carros, etc.), o que pode ajudar no gerenciamento do tráfego de uma maneira melhor, resultando em um fluxo suave do tráfego e redução do número de acidentes. Além disso, as luzes LED do carro podem alertar os motoristas quando outros veículos estão muito próximos.

h) Conectividade móvel: Dispositivos móveis, *laptops*, *tablets* e outros *smartphones* podem se conectar facilmente entre si. A rede de curto alcance do *Li-Fi* pode render taxas de dados excepcionalmente altas e maior segurança.

i) Substituição por outras tecnologias: *Li-Fi* não funciona usando ondas de rádio. Portanto, ele pode ser facilmente usado em locais onde *Bluetooth*, infravermelho, *Wi-Fi*, etc. são proibidos.

Essa tecnologia está em pleno desenvolvimento e com diversos estudos em andamento para achar soluções aos pontos considerados como desvantagens em relação a outras tecnologias, como por exemplo, o curto alcance devido a limitação da distribuição do fluxo luminoso e a necessidade da fonte estar ligada para a transmissão dos dados. Harald Hass e Shuji Nakamura estão desenvolvendo em conjunto o *Li-Fi* baseado em laser que visa aumentar a velocidade de transmissão e o alcance, além de manter a transmissão a qualquer tempo através de uma iluminação infravermelha [24].

A Figura 12 apresenta algumas aplicações possíveis para o *Li-Fi*.

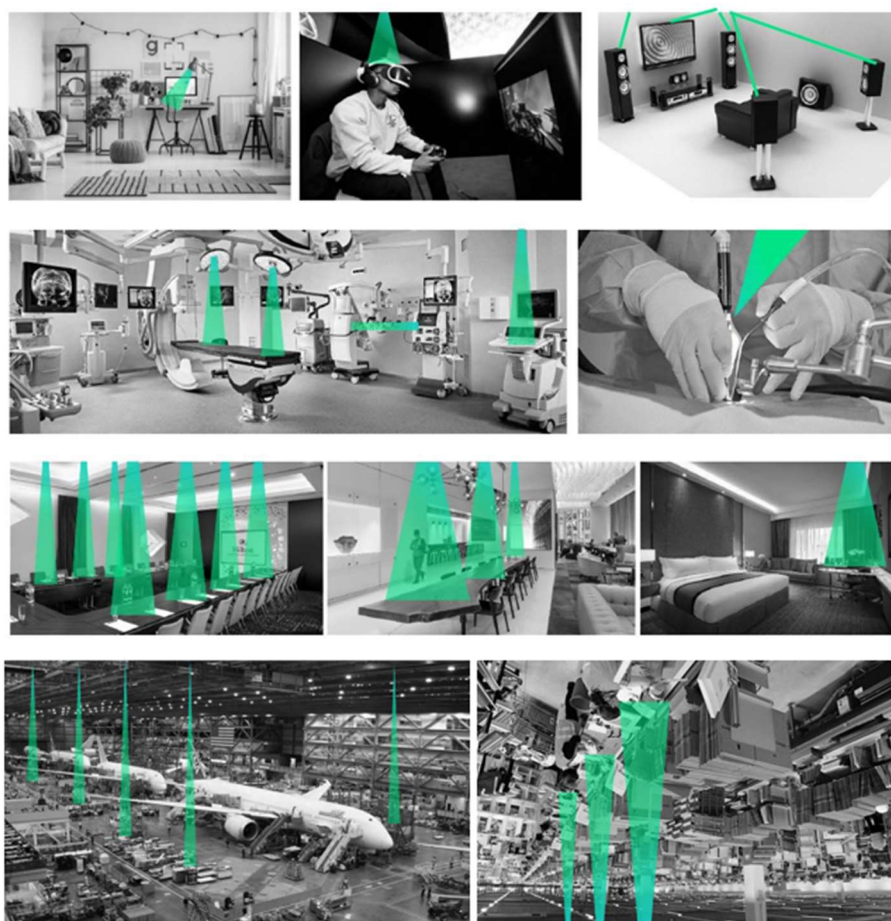


Figura 12 – Aplicações do *Li-Fi*. Fonte: Signify, 2019.

Neste capítulo apresentou-se os principais conceitos de luminotécnica e compatibilidade eletromagnética que serão abordados ao longo do trabalho e serão úteis para melhor entendimento do texto. Também foi apresentada a nova tecnologia *Li-Fi* que está sendo desenvolvida no setor de iluminação visando a digitalização do setor e se apresentando como uma opção de comunicação frente ao congestionamento do espectro de frequências, bem como aumenta a segurança cibernética dos usuários.

Capítulo 3 - Normalização

O Capítulo 3 apresenta as normas vigentes de compatibilidade eletromagnética utilizadas no Brasil aplicáveis aos equipamentos de iluminação e equipamentos multimídias.

As normas desenvolvidas pelo Comitê Internacional Especial de Rádio Interferência (CISPR – *Comite International Special des Perturbations Radioelectriques*) têm sido adotadas como referência para as normas internacionais de compatibilidade eletromagnética.

A CISPR faz parte da IEC - *Internacional Eletrotechnical Comission* e teve origem em 1934 quando vários organismos internacionais formaram um comitê para determinar procedimentos de medições e limites para as emissões de rádio frequência.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) faz uma adoção idêntica, em conteúdo técnico, estrutura e redação das normas CISPR e tem caráter voluntário. Os regulamentos específicos do Inmetro, tem caráter compulsório e adota como referência as normas ABNT ou CISPR específica, a que estiver na versão mais atualizada.

Os regulamentos da Anatel também são compulsórios. A Agência institui várias resoluções que estabelecem regras e procedimentos gerais relativos à certificação e homologação de produtos de telecomunicações, bem como requisitos específicos de compatibilidade eletromagnética a serem atendidos pelos produtos de telecomunicações para que sejam comercializados legalmente no país, como o Regulamento nº 442/2006 [25] que estabelecer os requisitos de compatibilidade eletromagnética a serem atendidos pelos produtos de telecomunicações, tendo em vista complementar os regulamentos específicos destes produtos, para fins de Certificação junto à Agência Nacional de Telecomunicações – Anatel e a Resolução nº 715/2019 [26] que estabelece os princípios e regras gerais relativos à avaliação da conformidade e à homologação de produtos para telecomunicações.

Para os fins deste trabalho, serão utilizadas as regulamentações descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Regulamentações de EMC utilizadas neste trabalho.

Norma/Regulamento	Descrição
ABNT IEC CISPR 15:2019 [27]	Limites e métodos de medição das características de radioperturbação dos equipamentos elétricos de iluminação e similares.
ABNT IEC CISPR 32:2019 [28]	Compatibilidade eletromagnética de equipamentos de multimídia — Requisitos de emissão.
Portaria nº 389/2014, do Inmetro [4]	Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à Base.
Portaria nº 20/2017, do Inmetro [5]	Regulamento Técnico da Qualidade para Luminárias para Iluminação Pública Viária.
Resolução nº 715/2019, da Anatel [26]	Regulamento de Avaliação da Conformidade e de Homologação de Produtos para Telecomunicações.

Antes de descrever os ensaios exigidos em cada norma, algumas considerações devem ser colocadas.

Os ensaios de emissões envolvem a medição da intensidade do campo eletromagnético das emissões que são geradas involuntariamente pelo produto e são inerentes às tensões e correntes de comutação dentro de qualquer circuito digital.

As ondas eletromagnéticas não se estendem do produto de forma radial e tendem a ser bastante direcionais.

Um campo eletromagnético é caracterizado por três coisas [29]:

- Fonte.
- Meios de comunicação.
- Distância.

A distância entre a fonte e o ponto de observação pode ser perto (em comparação com o comprimento de onda λ) da fonte, as propriedades do campo são determinadas principalmente pelas características da fonte (impedância da onda) ou longe da fonte, o campo depende principalmente do meio pelo qual o campo se propaga.

Portanto, o espaço ao redor de uma fonte de radiação pode ser dividido em duas regiões: o campo próximo e o campo distante.

Para medições de emissões de interferências, é importante saber se uma determinada medição ocorre no campo próximo ou no campo distante, pois os equipamentos de medições são especificados em função dessa informação.

No campo próximo, a impedância característica depende principalmente da fonte e os campos elétrico e magnético devem ser considerados separadamente (porque a relação E / H não é constante) [30].

A distância de medição é importante porque você deseja garantir que está medindo a intensidade do campo no campo distante em oposição ao campo próximo.

Em 30 MHz, o comprimento de onda é 10m. À medida que você se aproxima do campo próximo ou da região de Fresnel (região entre o campo próximo e distante), o campo elétrico pode ainda não estar estável e as medições serão menos precisas [31].

A metodologia de medição descritas pelas normas da CISPR são realizadas em campo próximo, por isso os ensaios de emissões radiadas de campo elétrico e magnético são realizados separados.

Com relação a faixa de frequência de medição que um laboratório de ensaios precisa investigar e que são consideradas pelas normas específicas para cada produto, geralmente varia de acordo com a taxa de clock de maior velocidade presente no dispositivo. Para alguns padrões específicos da indústria e do produto, a faixa de frequência é fixa, mas é possível ver como a faixa de medição de frequência superior se relaciona com a frequência de clock mais alta do projeto.

A medição de frequências abaixo de 30 MHz geralmente requer o uso de uma antena que capta campos magnéticos. Os campos magnéticos tendem a ser dominantes em frequências mais baixas. Sendo indicado nestes casos as medições com antena loop que são muito mais precisas e com boa repetibilidade do que com antena monopolo, além de que qualquer superfície metálica ou presença de pessoas influencia muito mais as medições com monopolo do que com loop.

3.1 ABNT IEC CISPR 15:2019

O ensaio para a avaliação das emissões radiadas e conduzidas de perturbações de rádio frequência de equipamentos de iluminação é realizado conforme a norma ABNT IEC CISPR 15:2019 - Limites e métodos de medição das características de radioperturbação dos equipamentos elétricos de iluminação e similares e, faz parte dos ensaios de segurança exigidos para certificação de lâmpadas e luminárias públicas de LED no Brasil. Exemplos de pesquisas realizadas baseadas nesta norma podem ser encontradas em Silva *et al.* (2019) [32] e Bittencourt *et al.* (2019) [33].

A norma define três ensaios para avaliação da compatibilidade eletromagnética nestes produtos, são eles: Tensões de perturbação em terminais de alimentação, Perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo magnético e Perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico.

a) Ensaio de tensões de perturbação em terminais de alimentação

Esse ensaio avalia a interferência conduzida que ocorre quando a energia causadora da perturbação é transmitida através de um meio material (cabos de alimentação ou de conexão) e é realizado na faixa de frequência de 9 kHz a 30 MHz, pois acima deste valor outras formas de emissão de interferência se tornam dominantes.

A Figura 13 apresenta a configuração para execução desse ensaio. Os equipamentos utilizados neste ensaio são:

- Fonte estabilizada para alimentação do equipamento sob teste;
- LISN (*Line Impedance Stabilization Network*) que tem a função de isolar eletricamente a rede de alimentação do equipamento sob teste e manter uma impedância constante, evitando que o ruído provocado pela rede chegue ao equipamento sob teste e que este envie ruído à rede, garantindo que o ruído medido é proveniente do equipamento;
- Analisador de espectro – é o equipamento responsável por medir os níveis de sinal provenientes do equipamento sob teste, em termos de amplitude e frequência.

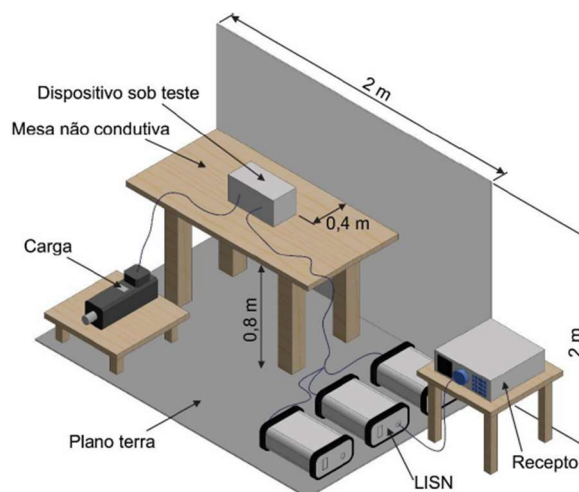


Figura 13 – Configuração do ensaio de tensões de perturbação nos terminais de alimentação. Fonte: [12]

b) Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo magnético

A interferência radiada ocorre quando a transmissão da energia causadora da perturbação é através do ar (ondas eletromagnéticas, acoplamento elétrico e acoplamento magnético). Esse ensaio avalia a intensidade do campo magnético nos eixos X, Y e Z, na faixa de frequência de 9 kHz a 30 MHz.

A Figura 14 apresenta a configuração para execução do ensaio. Os equipamentos utilizados neste ensaio são:

- Fonte estabilizada para alimentação do equipamento sob teste;
- Antena *Triple Loop* que funciona como um sensor, nas três direções X, Y e Z, com alta sensibilidade ao campo magnético radiado pelo equipamento sob teste e baixíssima sensibilidade ao campo elétrico e aos campos eletromagnéticos externos à antena;
- Analisador de espectro – é o equipamento responsável por medir os níveis de sinal provenientes do equipamento sob teste, em termos de amplitude e frequência.

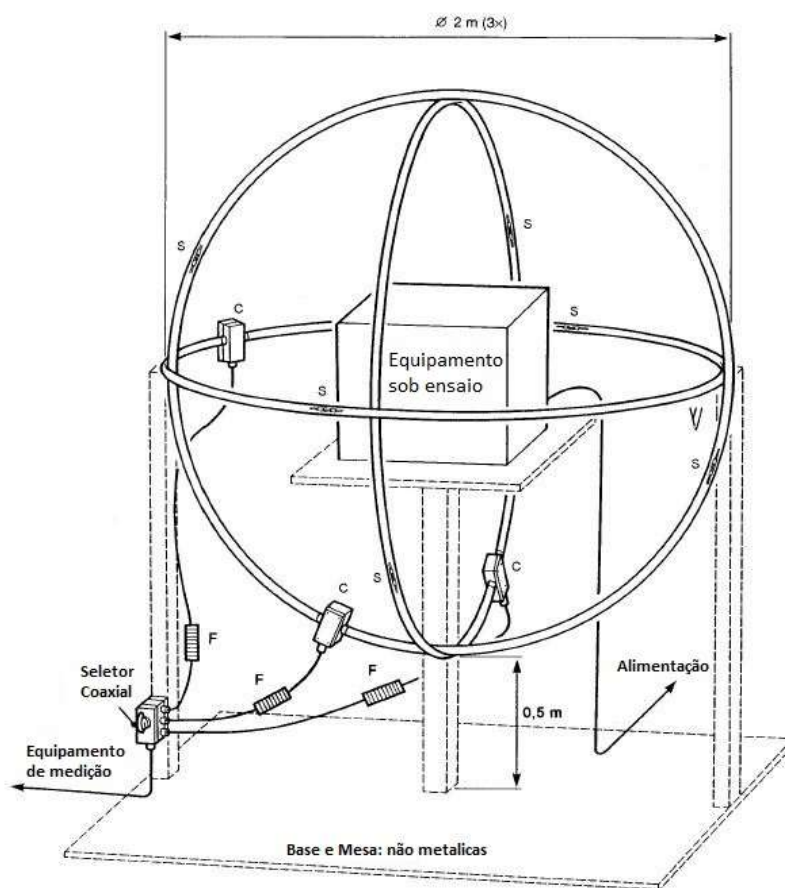


Figura 14 – Configuração do ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas de campo magnético. Fonte IEC CISPR 16-1-4:2019

c) Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico

A radiação eletromagnética é o fenômeno em que a energia na forma de onda eletromagnética é emanada da fonte para o espaço. Nesta medição, tem-se interesse na intensidade de campo elétrico a certa distância do equipamento sob teste e é realizado na faixa de frequência de 30 MHz a 1 GHz.

Os testes foram realizados em uma célula GTEM, célula Giga-Hertz Transverso Eletromagnético. A célula GTEM é um tipo de linha de transmissão expandida em formato de cunha para simulação da onda eletromagnética propagando no espaço livre. Os testes são feitos em ambientes blindados e sua estrutura pode ultrapassar nove metros de comprimento. A ideia é formar um campo uniforme na região interna da célula onde será colocado o equipamento em teste. A faixa de frequência de operação vai de 30 MHz até 20 GHz, dependendo das dimensões da célula e do projeto de atenuação da onda no final dela.

O equipamento sob ensaio é posicionado dentro da célula GTEM e então é energizado para fique em modo de operação normal. Através de uma antena existente na célula GTEM as radiofrequências geradas pelo equipamento sob teste são acopladas e mensuradas através do analisador de espectro. Uma configuração típica de teste é ilustrada na Figura 15.

A intensidade do ruído é medida na unidade de decibel microvolt por metro (dBuV/m), por se tratar de campo elétrico a distância também aparece na unidade de medição.

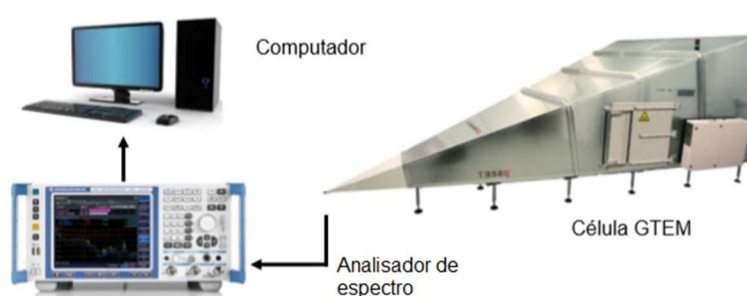


Figura 15 – Configuração do ensaio de perturbação radiada.

3.2 ABNT IEC CISPR 32:2019

A norma ABNT IEC CISPR 32:2019 - Compatibilidade eletromagnética de equipamentos de multimídia — Requisitos de emissão [28], é aplicável aos equipamentos multimídia (MME), com tensão nominal de alimentação rms c.a. ou c.c. não superior a 600 V. Os equipamentos multimídia compreendem os equipamentos de tecnologia da informação, equipamentos de áudio, equipamentos de vídeo, equipamentos receptores de radiodifusão, equipamentos de controle de iluminação de entretenimento ou combinações destes.

Esta norma define apenas dois ensaios para avaliação da compatibilidade eletromagnética nestes produtos, são eles: Tensões de perturbação em terminais de alimentação e Perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico. Os ensaios são realizados conforme os itens a e c da Seção 3.2, diferindo apenas pela frequência de varredura que para o ensaio de Tensões de perturbação em terminais de alimentação é

realizado de 150 kHz a 30 MHz e para o ensaio de Perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico é realizado de 30 MHz a 6 GHz.

Esta norma também classifica os equipamentos multimídias em duas classes (Classe A e Classe B) de acordo com o ambiente de uso final. Os requisitos de Classe B para equipamentos visam oferecer proteção adequada aos serviços de radiodifusão dentro do ambiente residencial. Os equipamentos destinados principalmente a serem utilizados em ambientes residenciais devem satisfazer os limites de Classe B. Todos os outros equipamentos devem obedecer aos limites da Classe A.

Os limites exigidos para os equipamentos Classe B são mais rigorosos que para os equipamentos Classe A devido a utilização em ambientes onde os equipamentos têm mais proximidade entre si.

3.3 Comparação entre as normas ABNT IEC CISPR 15:2019 e ABNT IEC CISPR 32:2019

Os ensaios exigidos em [27] e [28] são similares, porém com algumas particularidades. A Tabela 4 apresenta as diferenças existentes em cada norma.

Tabela 4 – Comparação entre as normas CISPR 15 [27] e CISPR 32 [28].

Ensaio	ABNT IEC CISPR 15:2019 [27]	ABNT IEC CISPR 32:2019 [28]
Ensaio de tensões de perturbação em terminais de alimentação	9 kHz a 30 MHz	150 kHz a 30 MHz
Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo magnético	30 a 300 MHz	Não exigido
Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico	30 MHz a 1 GHz	30 MHz a 6 GHz

Quanto aos limites máximos de emissão exigidos pelas normas [27] e [28] tem-se as seguintes situações:

- Para produtos de iluminação de uso residencial, como é o caso das lâmpadas LED inteligentes avaliadas neste trabalho, os limites máximos de emissão exigidos pelas normas [27] e [28] são iguais.

- Para produtos cujo uso não seja em ambientes residenciais, como exemplo as luminárias públicas, a norma [27] é mais rigorosa que a [28], e, portanto, mesmo no caso de luminárias públicas inteligentes a avaliação da compatibilidade eletromagnética deve seguir a norma [27], pois a própria CISPR recomenda que seja utilizada a norma específica que trata da função primária do equipamento.

3.4 Resolução Anatel

A avaliação da conformidade e a homologação de produtos para telecomunicações são regidas pelos princípios e regras contidos na Constituição Federal, na Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997, na regulamentação da Anatel e, em especial, pelos seguintes princípios [25]:

- I - Proteção e segurança dos usuários dos produtos para telecomunicações;
- II - Atendimento aos requisitos de segurança, de compatibilidade eletromagnética, de proteção ao espectro radioelétrico e de não agressão ao meio ambiente;
- III - Uso eficiente e racional do espectro radioelétrico;
- IV - Compatibilidade, operação integrada e interconexão entre as redes;
- V - Acesso dos consumidores a produtos diversificados, com qualidade, e regularidade adequados à natureza dos serviços e aplicações aos quais os produtos se destinam;
- VI - Comercialização ou utilização de produtos em conformidade com as normas técnicas expedidas pela Agência;
- VII - Adoção de formas simples e céleres na supervisão da avaliação da conformidade e da homologação;
- VIII - Isonomia no tratamento dispensado aos interessados na avaliação da conformidade e na homologação de produtos para telecomunicações;
- IX - Tratamento confidencial às informações técnicas que assim o exijam, dentre as disponibilizadas pelas partes interessadas por força deste Regulamento;
- X - Liberdade econômica e livre concorrência;

XI - Criação de oportunidades de investimento e de estímulo ao desenvolvimento tecnológico da indústria de produtos para telecomunicações;

XII - Facilitação da inserção do Brasil em acordos internacionais de reconhecimento mútuo; e,

XIII - Incentivo ao comportamento responsivo dos entes regulados.

Com isso, a Agência criou a resolução nº 242, de novembro de 2000 [10], onde estabelece as regras e procedimentos gerais relativos à certificação e homologação de produtos de telecomunicações, porém essa resolução foi revogada recentemente pela resolução nº 715, de 23 de outubro de 2019, que aprova o Regulamento de Avaliação da Conformidade e de Homologação de Produtos para Telecomunicações, devido a necessidade de adequação do modelo de certificação brasileiro às novas realidades de prestação dos serviços de telecomunicações, especialmente em decorrência do avanço tecnológico crescente dos produtos para telecomunicações.

Como o tema compatibilidade eletromagnética é muito importante para o setor de telecomunicações, a Anatel visando proteger os sistemas e equipamentos de telecomunicações criou também a resolução nº 442, em 21 de julho de 2006 [11], que estabelece os requisitos de compatibilidade eletromagnética a serem atendidos pelos produtos de telecomunicações.

Neste capítulo apresentou-se a normalização vigente no Brasil quanto à compatibilidade eletromagnética para os produtos de iluminação, bem como para os equipamentos multimídias, visto que os produtos de iluminação vêm se modernizando e sendo incrementados com inteligência embarcado para o controle e monitoramento remoto. Também é apresentada a atuação da Anatel para proteger os equipamentos de telecomunicações das interferências eletromagnéticas, uma vez que esse tema é bastante importante para a Agência.

Capítulo 4 - Metodologia

O capítulo 4 apresenta os métodos de ensaios para a avaliação da compatibilidade eletromagnética e de desempenho elétrico e fotométrico das lâmpadas de LED inteligentes utilizadas neste trabalho, de acordo com as normas vigentes.

As lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base para serem comercializadas no Brasil precisam passar por um processo de certificação compulsório comprovando requisitos mínimos de desempenho, segurança elétrica e compatibilidade eletromagnética conforme as Portarias do Inmetro nº 389/2014 [4] e nº 144/2015 [34].

Acontece que para as lâmpadas LED inteligentes, embora também sejam lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base, por ter múltiplas funções, diversas configurações e protocolo de comunicação para controle por aplicativo, tem se permitido a comercialização sem o processo de certificação compulsória, sendo assim não há nenhum controle da qualidade dos produtos disponíveis ao mercado consumidor.

Esse trabalho avalia o desempenho desses produtos conforme os requisitos exigidos em [4]. Embora o foco do trabalho seja a avaliação da compatibilidade eletromagnética desses produtos, aproveitou-se a oportunidade para também realizar os ensaios que avaliam o desempenho elétrico e fotométrico para verificar a conformidade com [4].

Para os ensaios de avaliação do desempenho elétrico e fotométrico foi utilizada norma ANSI IES/LM-79 [35] conforme [4].

Todos os ensaios foram realizados na frequência nominal de 60 Hz, a uma temperatura ambiente de (25 ± 1) °C e a uma umidade relativa máxima de 65 %.

Todas as amostras foram estabilizadas antes da realização dos ensaios. A estabilização das amostras é obtida quando a variação de pelo menos três medições sucessivas de fluxo luminoso e potência elétrica em um intervalo de 15 minutos, variam menos que 0,5 %. O limite máximo para estabilização de uma lâmpada LED, segundo [4] deve ser 2 horas.

Para os ensaios de avaliação da compatibilidade eletromagnética foram utilizadas as normas ABNT NBR IEC CISPR 15:2019 [27] conforme [4] e ABNT NBR IEC CISPR 32 [28] para efeitos de comparação entre as normas.

Os ensaios desses produtos conforme a ABNT NBR IEC CISPR 32 [28] também foram considerados, pois existe a tendência de se tratar esse produto como um equipamento de multimídia, embora a própria CISPR indique que os produtos que possuam normas específicas de acordo com a sua função primária devem segui-las, que para o caso de lâmpadas cuja função primária é a iluminação a CISPR apropriada é a CISPR 15.

Para a realização deste trabalho, foram avaliadas 8 amostras de lâmpadas de LED inteligentes de fabricantes variados disponíveis no mercado para qualquer tipo de consumidor, conforme mostra a Figura 16. As amostras foram adquiridas em abril de 2020.



Figura 16 – Amostras ensaiadas.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Eficiência Energética do Cepel, que é acreditado pelo Inmetro para a realização destes ensaios.

As Figuras de 17 a 19 apresentam uma visão geral desta área de ensaio.

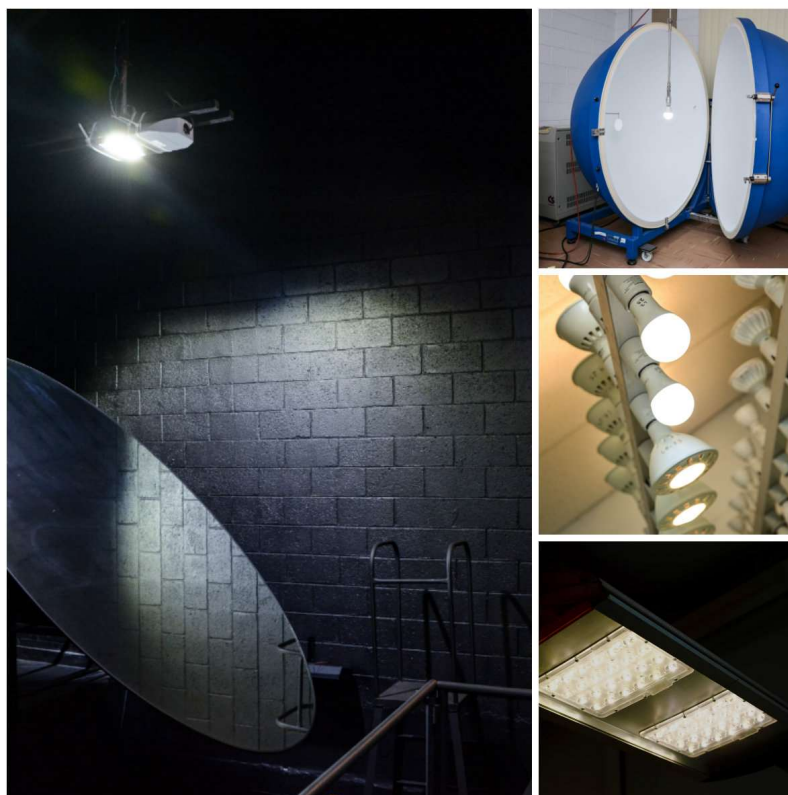


Figura 17: Área de ensaios de desempenho elétrico e fotométrico do Laboratório de Eficiência Energética do Cepel.



Figura 18: Área de ensaios de EMC (Antena *Triple Loop*) do Laboratório de Eficiência Energética do Cepel.



Figura 19: Área de ensaios de EMC (GTEM) do Laboratório de Eficiência Energética do Cepel.

Devido as inúmeras configurações possíveis nas lâmpadas LED inteligentes, os ensaios foram realizados variando as grandezas: tensão, potência e temperatura de cor.

Quanto à tensão, os ensaios foram realizados nas duas tensões oficiais do Brasil, 127 e 220 V.

Quanto à potência, os ensaios foram realizados na potência nominal (indicada na embalagem pelo fabricante), a 70%, a 50% e a 30% deste valor nominado.

Quanto à temperatura de cor, os ensaios foram realizados com as três temperaturas de cor mais comuns de lâmpadas LED, 2700 K, 4000 K e 6500 K.

A Tabela 5 apresenta as informações fornecidas nas embalagens dos produtos.

Tabela 5 – Informações das embalagens dos produtos.

Informações da embalagem do produto										
Nº	Tipo de comunicação	Pot. (W)	Tensão (V)	Corrente (mA)	FP	TCC (K)	IRC	Fluxo (lm)	Certificada pelo Inmetro	Homologado Anatel
01	Wi-Fi IEEE 802.11 2,4Ghz	10	bivolt	0,08	-	2700 a 6500	-	800	Não	Não
02	Wi-Fi IEEE 802.11 2,4Ghz	10	100 - 240	-	-	2700 a 6500	-	-	Não	Sim
03	Wi-Fi	9	bivolt	-	-	2700 a 6500	-	950	Não	Sim
04	Wi-Fi IEEE 802.11 2,4Ghz	10	100 - 240	-	-	2700 a 6500	-	806	Não	Sim
05	Wi-Fi	10	100-240	-	-	2700	-	800	Não	Sim
06	Bluetooth	9,5	100 - 240	94mA / 54mA	>0,80	6500	>80%	750	Sim	Sim
07	Bluetooth/ Wi-Fi	9,5	110-130	100	≥0,90	2700 a 6500	-	800	Não	Não
08	Wi-Fi	10	100 - 240	75mA/ 50mA	>0,7	2700 a 6500	>80 R9>0	803	Não	Não

Neste capítulo foram apresentados os métodos de ensaio para a avaliação da compatibilidade eletromagnética e de desempenho elétrico e fotométrico das lâmpadas de LED inteligentes utilizadas neste trabalho. Também foram descritas as amostras utilizadas, bem como as condições de ensaio e infraestrutura laboratorial utilizada para as medições.

Capítulo 5 - Análise dos resultados

O capítulo 5 apresenta os resultados das medições realizadas e análise destes resultados de acordo com cada regulamentação aplicável.

Os resultados dos ensaios são analisados conforme a Portaria nº 389/2014 do Inmetro [4].

O primeiro item a ser analisado é a inspeção visual do produto e da embalagem. A Portaria [4] indica 19 itens obrigatórios que devem constar na embalagem e 7 que devem constar no produto. Essas informações são fundamentais para o consumidor analisar a qualidade do produto e escolher o produto mais adequado a sua necessidade. E nesse critério, nenhuma das amostras estariam em conformidade com as exigências do Inmetro, pois faltam informações tanto na marcação do produto quanto na embalagem. Não será destacado neste texto os itens faltantes em cada produto para garantir sigilo aos fabricantes avaliados.

O segundo item analisado é o desempenho elétrico e fotométrico do produto. Para essa avaliação foram realizados os ensaios na potência nominal, nas duas tensões oficiais conforme exigência de [4] para produtos *bivolt* e com as três temperaturas de cor mais significativas no mercado nacional, 2700 K, 4000 K e 6500 K. Segundo [4] os requisitos mínimos obrigatórios de desempenho são:

- Potência da lâmpada: A potência consumida pela lâmpada LED não pode exceder a potência nominal declarada em mais do que 10 %.

- Fator de Potência: Para lâmpadas de LED com potência nominal declarada de 5 W a 25 W, o fator de potência deve ser maior ou igual a 0,70.

- Fluxo luminoso: O fluxo luminoso inicial medido de uma lâmpada LED não pode ser inferior a 90 % do fluxo luminoso nominal declarado.

- Temperatura de cor correlata (TCC): Os valores de TCC obtidos são classificados em categorias, de acordo com a norma ANSI C78.377 [8] e deve assumir um dos seguintes valores, de acordo com o valor medido e a faixa de tolerância indicado em [8]: 2700 K, 3000 K, 3500 K, 4000 K, 4500 K, 5000 K, 5700 K ou 6500 K.

- Índice de reprodução de cores (IRC): O valor mínimo de índice de reprodução de cor geral (Ra) que caracteriza o IRC de acordo com a CIE 13.3 [9], deve ser 80. Além disso, o valor do índice R9 deve ser maior do que 0.

- Eficiência Energética: O valor mínimo de eficiência energética para lâmpadas LED com potência nominal inferior a 15 W é de 55 lm/W.

O ensaio de manutenção do fluxo luminoso, embora muito importante, não foi realizado devido ao tempo de duração do ensaio que pode chegar a nove meses. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para as grandezas e condições acima mencionadas.

Tabela 6 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de desempenho.

Amostra	Tensão (V)	TCC (K)	Potência medida (W)	Fluxo luminoso (lm)	FP	IRC/Ra	IRC/R9	Eficiência energética (lm/W)
01 10W	127	2700	6,56	285,59	0,61	48	-49	43,5
	220	2700	6,55	284,90	0,52	48	-49	43,5
	127	4000	9,57	801,79	0,63	83	14	83,8
	220	4000	9,35	804,54	0,55	83	13	86,0
	127	6500	7,39	488,00	0,62	82	11	66,0
	220	6500	7,19	485,13	0,52	81	12	67,5
02 10 W	127	2700	9,46	847,48	0,96	82	6	89,6
	220	2700	9,61	849,37	0,88	82	6	88,4
	127	4000	9,49	916,15	0,96	87	26	96,6
	220	4000	9,64	920,15	0,89	87	26	95,5
	127	6500	9,48	949,39	0,96	84	12	100,1
	220	6500	9,61	955,31	0,88	84	12	99,4
03 9 W	127	2700	9,75	887,95	0,65	82	8	91,1
	220	2700	9,95	893,41	0,55	82	7	89,8
	127	4000	9,82	982,89	0,65	86	12	100,1
	220	4000	10,01	987,94	0,55	86	13	98,7
	127	6500	9,78	1028,52	0,65	83	2	105,2
	220	6500	9,97	1029,35	0,55	83	3	103,2
04 10 W	127	2700	9,47	862,88	0,96	82	7	91,1
	220	2700	9,51	865,66	0,88	82	6	91,0
	127	4000	9,52	938,86	0,96	87	28	98,6
	220	4000	9,57	937,41	0,89	87	27	98,0
	127	6500	9,51	967,30	0,97	84	12	101,7
	220	6500	9,55	961,41	0,89	84	12	100,7
05 10 W	127	2700	10,58	884,00	0,64	82	5	83,6
	220	2700	10,41	884,38	0,54	82	4	85,0
06 9,5 W	127	6500	9,02	761,09	0,86	85	20	84,3
	220	6500	9,09	759,44	0,74	85	20	83,5
07 9,5 W	127	2700	7,01	540,88	0,92	95	53	77,2
	127	4000	8,17	756,48	0,93	90	52	92,6

	127	6500	6,73	531,54	0,91	92	80	79,0
08 10 W	127	2700	9,15	809,17	0,97	81	0	88,4
	220	2700	9,35	814,16	0,89	81	0	87,1
	127	4000	9,23	872,90	0,97	88	29	94,6
	220	4000	9,35	877,27	0,89	87	29	93,8
	127	6500	9,24	898,11	0,97	86	23	97,2
	220	6500	9,37	900,99	0,89	86	23	96,2

Todos os valores destacados em vermelho na Tabela 6 indicam que a grandeza não atingiu o requisito mínimo exigido em [4] e, portanto, estariam não conformes, não conseguiriam a certificação junto ao Inmetro e não poderiam ser comercializadas no mercado nacional.

Em caso de lâmpadas *bivolt*, os requisitos mínimos de desempenho exigidos em [4] devem ser atendidos nas duas tensões oficiais brasileiras, 127 e 220 V.

Pelos resultados apresentados na Tabela 6, pode-se fazer as seguintes observações:

As amostras 01, 03, 05 e 07 não estariam aprovadas em um processo de certificação para lâmpadas LED conforme [4];

A amostra 01 apresentou resultados abaixo dos requisitos mínimos nas grandezas potência, fluxo luminoso, fator de potência, índice de reprodução de cor (IRC e R9) e eficiência energética, nas temperaturas de cor de 2700 e 6500 K, enquanto na temperatura de cor de 4000 K, o fator de potência ficou abaixo do exigido em [4].

As amostras 03 e 05 apresentaram fator de potência abaixo dos requisitos mínimos exigidos em [4], em todas as temperaturas de cor e tensões ensaiadas.

A amostra 07 apresentou resultados abaixo dos requisitos mínimos nas grandezas potência e fluxo luminoso.

- As amostras 02, 04, 06 e 08 apresentaram resultados acima dos requisitos mínimos exigidos em [4] e desempenho equivalente em todas as configurações;

- A amostra 03 também apresentou desempenho equivalente em todas as configurações, porém não apresentou o fator de potência mínimo exigido pela Portaria [4] nas duas tensões;

- O aplicativo de controle da amostra 06 estava obsoleto e por isso não foi possível variar as temperaturas de cor nem a potência da lâmpada;

- A amostra 07 não é *bivolt*, por isso só foram apresentados os resultados em 127 V.

Também foram realizados os ensaios de desempenho variando a potência em 70 %, 50 % e 30 % da potência nominal. Os resultados das medições serão apresentados no Apêndice A.

O comportamento ideal das grandezas é que o fluxo luminoso reduza proporcionalmente com a potência e que as demais características, como eficiência luminosa, fator de potência e IRC, se mantenham constantes. A Figura 20 apresenta um exemplo desse comportamento com a amostra 08.

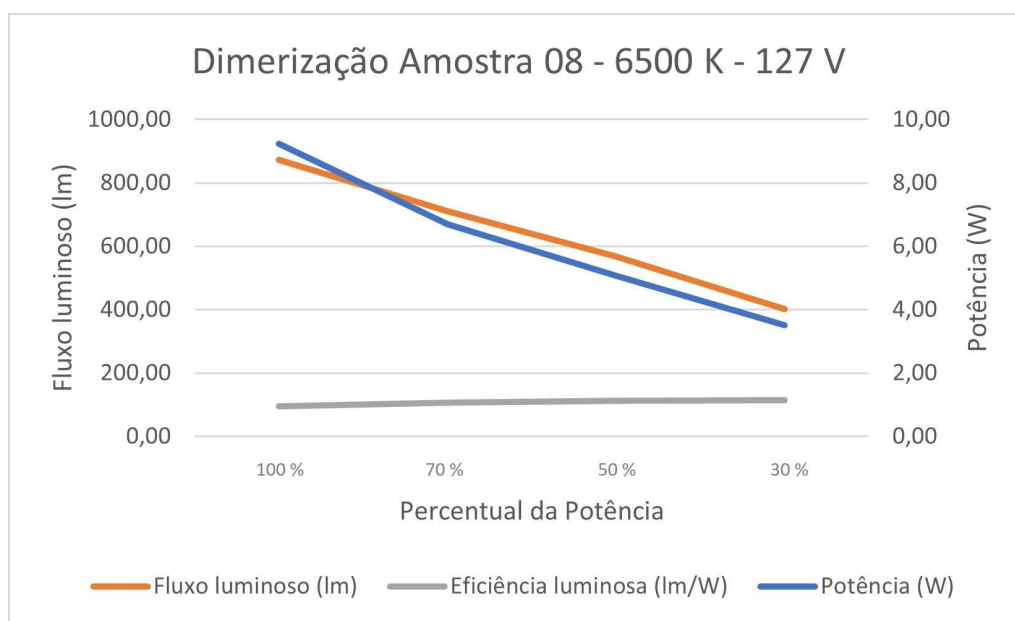


Figura 20 – Exemplo do comportamento das grandezas com a dimerização das lâmpadas inteligentes.

O fator de potência de todas as amostras não se manteve constante, apresentando decréscimo em todos os resultados.

O terceiro item analisado foi quanto à compatibilidade eletromagnética. Segundo [4] essa avaliação é feita conforme a norma [27] e as amostras devem estar conforme nos três ensaios realizados. A Tabela 7 apresenta o resumo dos resultados nos ensaios realizados na potência nominal em cada configuração.

Todos os resultados destacados em vermelho na Tabela 7 indicam que a amostra ultrapassou os limites máximos de emissão de interferência exigidos em [27] e, portanto, estariam não conformes, não conseguiriam a Certificação junto ao Inmetro e não poderiam ser comercializadas no mercado nacional.

Pelos resultados consolidados na Tabela 7, apenas as amostras 01, 05, 06 e 08 estão conforme [27]. Os gráficos das medições serão apresentados no Apêndice B.

Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de EMC conforme ABNT IEC CISPR 15:2019.

Amostra	Tensão (V)	TCC (K)	Ensaio de tensões de perturbação em terminais de alimentação	Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo magnético	Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico
01 10W	127	2700	Conforme	Conforme	Conforme
	220	2700	Conforme	Conforme	Conforme
	127	4000	Conforme	Conforme	Conforme
	220	4000	Conforme	Conforme	Conforme
	127	6500	Conforme	Conforme	Conforme
	220	6500	Conforme	Conforme	Conforme
02 10 W	127	2700	Conforme	Conforme	Não conforme
	220	2700	Conforme	Conforme	Conforme
	127	4000	Conforme	Conforme	Conforme
	220	4000	Conforme	Conforme	Conforme
	127	6500	Conforme	Conforme	Conforme
	220	6500	Conforme	Conforme	Conforme
03 9 W	127	2700	Conforme	Conforme	Conforme
	220	2700	Não conforme	Conforme	Conforme
	127	4000	Conforme	Conforme	Conforme
	220	4000	Não conforme	Conforme	Conforme
	127	6500	Conforme	Conforme	Conforme
	220	6500	Não conforme	Conforme	Conforme
04 10 W	127	2700	Conforme	Conforme	Não conforme
	220	2700	Conforme	Conforme	Não conforme
	127	4000	Conforme	Conforme	Conforme
	220	4000	Conforme	Conforme	Não conforme
	127	6500	Conforme	Conforme	Conforme
	220	6500	Conforme	Conforme	Conforme

05 10 W	127	2700	Conforme	Conforme	Conforme
	220	2700	Conforme	Conforme	Conforme
06 9,5 W	127	6500	Conforme	Conforme	Conforme
	220	6500	Conforme	Conforme	Conforme
07 9,5 W	127	2700	Conforme	Conforme	Não conforme
	127	4000	Conforme	Conforme	Não conforme
	127	6500	Conforme	Conforme	Conforme
08 10 W	127	2700	Conforme	Conforme	Conforme
	220	2700	Conforme	Conforme	Conforme
	127	4000	Conforme	Conforme	Conforme
	220	4000	Conforme	Conforme	Conforme
	127	6500	Conforme	Conforme	Conforme
	220	6500	Conforme	Conforme	Conforme

Para o atendimento integral da Portaria [4], observando as Tabelas 6 e 7, apenas as amostras 06 e 08 conseguiriam aprovação no processo de certificação compulsório.

A amostra 06 declara em sua embalagem que possui registro de certificação junto ao Inmetro e, de fato seus resultados, realizados apenas na potência nominal em ambas as tensões 127 e 220 V, atingiram os requisitos mínimos de desempenho elétrico, fotométrico e de compatibilidade eletromagnética exigidos em [4].

Adicionalmente, foram realizados os ensaios conforme a ABNT IEC CISPR 32:2019 [28], caso o equipamento seja considerado um equipamento multimídia.

A Tabela 8 apresenta o resumo dos resultados nos ensaios realizados na potência nominal em cada configuração.

Todos os resultados destacados em vermelho na Tabela 8 indicam que a amostra ultrapassou os limites máximos de emissão de interferência exigidos em [28].

Pelos resultados consolidados na Tabela 8, apenas as amostras 01, 05, 06 e 08 estão conforme [28]. Os gráficos das medições serão apresentados no Apêndice C.

Os ensaios foram realizados nos produtos nas configurações definidas de tensão, potência e temperatura de cor, conforme apresentado neste capítulo. Não foi possível realizar as medições no momento de interação do usuário com o produto através do aplicativo, pois os ensaios de tensões de perturbação em terminais de alimentação e de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo magnético são realizadas dentro de uma Gaiola de Faraday e o ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico é realizado

dentro da Câmara GTEM que são blindadas e não permitem a comunicação do produto com o aplicativo no momento do ensaio. Para a realização dessas medições neste momento de interação seria necessário que as portas da Gaiola de Faraday e da Câmara GTEM estivessem abertas, porém nesta condição a medição fica comprometida, pois podem sofrer interferências de outros sinais presentes no ambiente.

Para analisar este cenário, foi feita uma experiência colocando em um mesmo ambiente uma lâmpada inteligente utilizada neste trabalho, um aparelho de rádio AM/FM e um receptor de sinal de televisão digital. Para as oito amostras utilizadas neste trabalho observou-se interferência no rádio e no receptor de sinal de televisão digital, quando o usuário alterava a configuração de temperatura de cor através do aplicativo.

Tabela 8 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de EMC conforme ABNT IEC CISPR 32:2019.

Amostra	Tensão (V)	TCC (K)	Ensaio de tensões de perturbação em terminais de alimentação	Ensaio de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico
01 10W	127	2700	Conforme	Conforme
	220	2700	Conforme	Conforme
	127	4000	Conforme	Conforme
	220	4000	Conforme	Conforme
	127	6500	Conforme	Conforme
	220	6500	Conforme	Conforme
02 10 W	127	2700	Conforme	Não conforme
	220	2700	Conforme	Conforme
	127	4000	Conforme	Conforme
	220	4000	Conforme	Conforme
	127	6500	Conforme	Conforme
	220	6500	Conforme	Conforme
03 9 W	127	2700	Conforme	Conforme
	220	2700	Não conforme	Conforme
	127	4000	Conforme	Conforme
	220	4000	Não conforme	Conforme
	127	6500	Conforme	Conforme
	220	6500	Não conforme	Conforme
04 10 W	127	2700	Conforme	Não conforme
	220	2700	Conforme	Não conforme
	127	4000	Conforme	Conforme
	220	4000	Conforme	Não conforme
	127	6500	Conforme	Conforme
	220	6500	Conforme	Conforme
05	127	2700	Conforme	Conforme

10 W	220	2700	Conforme	Conforme
06	127	6500	Conforme	Conforme
9,5 W	220	6500	Conforme	Conforme
07 9,5 W	127	2700	Conforme	Não conforme
	127	4000	Conforme	Não conforme
	127	6500	Conforme	Conforme
08 10 W	127	2700	Conforme	Conforme
	220	2700	Conforme	Conforme
	127	4000	Conforme	Conforme
	220	4000	Conforme	Conforme
	127	6500	Conforme	Conforme
	220	6500	Conforme	Conforme

Neste capítulo apresentou-se a análise dos resultados obtidos nas medições realizadas para a avaliação do desempenho elétrico e fotométrico das amostras de lâmpadas LED inteligentes, comparando os resultados com os requisitos mínimos exigidos pela regulamentação vigente. Constatou-se que apenas três das oito amostras ensaiadas estão em conformidade com a regulamentação vigente para as lâmpadas LED convencionais.

Capítulo 6 - Conclusão

Este estudo traz a avaliação da compatibilidade eletromagnética das lâmpadas inteligentes de LED quanto às normas pertinentes, comparando os seus resultados com as lâmpadas de LED convencionais.

Além do objetivo central do trabalho, foi apresentado também um panorama geral dos produtos que estão disponíveis ao consumidor nacional.

Em abril de 2020, quando foram compradas as amostras para a realização desse trabalho existiam apenas 10 fabricantes com modelos disponíveis no mercado. Atualmente, o número de fabricantes disponíveis no mercado é de aproximadamente 100. Por isso, é de suma importância que os órgãos reguladores definam um regulamento específico para as lâmpadas e luminárias LED inteligentes com os requisitos mínimos de desempenho elétrico, fotométrico e de compatibilidade eletromagnética, bem como protocolos de comunicação e segurança cibernética, de forma a garantir a interoperabilidade dos produtos e privacidade dos dados dos usuários.

Os resultados demonstraram que das amostras avaliadas, apenas 50% estão em conformidade quanto aos limites de emissão de interferências eletromagnéticas, enquanto apenas 25% atendem a regulamentação específica do Inmetro para as lâmpadas LED convencionais. Caso o estudo fosse realizado no cenário atual do mercado, diante do exposto no parágrafo anterior, os resultados seriam piores.

A padronização garante que o consumidor consiga substituir os produtos em uso, em caso de falha ou por se tornar obsoleto, sem precisar se preocupar com a marca, modelo ou fabricante.

Esses produtos estão em pleno desenvolvimento tecnológico e os modelos podem se tornar obsoletos rapidamente, como foi o caso da amostra 06, onde não foi possível controlar e alterar as características do produto, pois o seu aplicativo não foi mais atualizado e a versão disponível não era compatível com os equipamentos utilizados na execução dos ensaios.

O regulamento específico para esses produtos também deverá prevê as configurações a serem ensaiadas, uma vez que uma lâmpada inteligente de LED possui inúmeras

possibilidades de configurações das grandezas. É importante que o produto seja projetado para manter o desempenho nas diversas configurações possíveis, atingindo sempre o mínimo exigido no regulamento.

É de suma importância que os produtos de iluminação atendam aos critérios das suas normas específicas de emissão e imunidade eletromagnética. Apesar da imunidade dos produtos de iluminação não ser um critério exigido atualmente no Brasil, diante dessa tendência de inteligência embarcada nos produtos, onde uma lâmpada ou luminária poderá assumir múltiplas funções, será necessário garantir a sua imunidade quanto às perturbações eletromagnéticas emitidas no ambiente eletromagnético na qual estarão inseridas. Pode-se citar a preocupação com as luminárias públicas, onde espera-se que com sua inteligência embarcada consiga-se monitorar o seu comportamento e grandezas, sendo possível implementar a iluminação adaptativa de acordo com a utilização das vias públicas em diversos horários, além da possibilidade da própria luminária ficar responsável pela sua medição de consumo, facilitando a cobrança da tarifa de iluminação pública, entre outras funções possíveis de implementar para auxiliar a gestão e segurança pública. Diante disso, caso a luminária pública não atenda aos critérios de imunidade, ela irá sofrer interferência e enviar um comando errado para a redução do fluxo luminoso de uma via em horário de pico no tráfego ou realizar a medição de consumo de energia equivocadamente e prejudicar a prefeitura ou concessionária responsável.

Atualmente, em um cenário de crescimento e incentivo da utilização residencial de energia fotovoltaica, sabendo que os inversores fotovoltaicos não possuem regulamentação específica para a avaliação da compatibilidade eletromagnética e que segundo estudos já realizados, como em Cardoso, 2020 [36], a inclusão dos critérios de imunidade das luminárias públicas se torna cada mais imprescindível diante da propensão de modernização do setor elétrico com o conceito de cidades inteligentes, de forma a não ocasionar os problemas acima expostos.

Finalizando, cabe ressaltar que o setor de iluminação brasileiro está em constante desenvolvimento e alinhado com as tendências internacionais visando a qualidade, eficiência energética e segurança dos produtos, antenados às novas tecnologias, como a *Li-Fi* mencionada neste trabalho.

6.1 Trabalhos Futuros

Como proposta de trabalhos futuros, vislumbra-se a atuação nos seguintes temas:

- Avaliação da compatibilidade eletromagnética de outros produtos e eletrodomésticos inteligentes, como televisão, geladeiras, máquinas de lavar, visto que já pode se observar uma tendência de adesão a esses produtos;
- Avaliação da compatibilidade eletromagnética quanto a imunidade dos produtos, uma vez que diante do ambiente eletromagnético diverso em um futuro próximo com a tendência de produtos e ambientes inteligentes, esse requisito também garante ao consumidor a qualidade, confiabilidade e durabilidade.
- Avaliação do desempenho das lâmpadas *Li-Fi*, quando disponíveis no mercado.

Bibliografia

- [1] SOUSA, L. O. **Análise comparativa de ganho ambiental entre as lâmpadas fluorescentes e as lâmpadas de LED**. 59 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Centro Federal De Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020).
- [2] SISTEMA FIRJAN. Cadernos SENAI de inovação - Indústria 4.0: Internet das Coisas. Abril de 2016. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-.htm>>. Acesso em: 22 mai. 2021.
- [3] SOUZA, A.C.B.P., ROSA, W.F.O. **Avaliação da compatibilidade eletromagnética em luminárias públicas de LED**. XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, 2019.
- [4] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria nº 389/2014, de 25 de agosto de 2014. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à Base. Rio de Janeiro, 2014. [Online]. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002154.pdf>>. Acesso em 18 jan. 2022.
- [5] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Portaria nº 20/2017, de 15 de fevereiro de 2017. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Luminárias para Iluminação Pública Viária, inserto no Anexo I desta Portaria, que estabelece os requisitos de cumprimento obrigatório referentes ao desempenho e segurança do produto. Rio de Janeiro, 2017. [Online]. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002452.pdf>>. Acesso em 18 jan. 2022.
- [6] SOUZA, A.C.B.P. Palestra técnica do Cepel: Compatibilidade Eletromagnética e Iluminação. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=fS0s7hi3FdM&list=PLGcwflYoV4JQWbyx-REyeQ55UXErvjzw&index=2> . Acesso em 19 jan. 2022.
- [7] ARAÚJO, J. F. **Avaliação Da Influência Das Interferências Eletromagnéticas (EMI) produzidas por lâmpadas LED: Uma Análise Multicritério**. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019).

- [8] NEMA STANDARDS PUBLICATION, ANSI C78.377-2017: Electrical Lamps – Specifications for the Chromaticity of Solid-State Lighting Products – Virginia/EUA, 2017.
- [9] PLUG DESIGN. Como escolher a temperatura de cor ideal para sua luminária? Minas Gerais, 2019. [Online]; Disponível em: <https://plugdesign.com.br/temperatura-cor/> . Acesso em 28 de fev. 2022.
- [10] COMMISSION INTERNACIONALE DE L'ECLAIRAGE, CIE 13.3-1995: Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources – Viena/Austria, 1995.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR IEC 60050-161:2021: Vocabulário eletrotécnico internacional – Capítulo 161: Compatibilidade Eletromagnética, Rio de Janeiro, 2021. 30 p.
- [12] PEDRONI, R. Técnicas de Mitigação de Interferência Eletromagnética em Equipamentos de Iluminação a LED. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- [13] ZEVZIKOVAS, M. **Efeitos da interferência eletromagnética conduzida em equipamentos eletromédicos no ambiente hospitalar.** 100 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica e de computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004).
- [14] MARIAPPAN, P.M., RAGHAVAN, D.R., ABDEL ALEEM, S.H.E., ZOBAA, A.F., **Effects of electromagnetic interference on the functional usage of medical equipment by 2G/3G/4G cellular phones: A review**, Cairo University, Journal of Advanced Research, 2016 7, 727-738.
- [15] SOLKIM, M. **Electromagnetic interference hazards in flight and the 5G mobile phone: Review of critical issues in aviation security**, Transportation Research Procedia 59 (2021) 310–318, 10th International Conference on Air Transport – INAIR 2021, TOWARDS AVIATION REVIVAL.
- [16] MORAES, F. B. de, Avaliação das Emissões Conduzidas e Radiadas Geradas por Unidade Eletrocirúrgica e Sistema de Iluminação com Lâmpadas Fluorescente em Equipamentos Médicos. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- [17] BIGGS, M. **Case Study - LED lighting interference to aviation VHF communications**, presented in “FREQUENCY SPECTRUM MANGEMENT PANEL

- (FSMP) - FOURTH MEETING OF THE WORKING GROUP – ICAO” Regional Office, Bangkok Thailand, 27 March – 7 April 2017.
- [18] RIETVELD, G.; HOOGENBOOM, D.; ACANSKI, M., Conducted EMI Causing Error Readings of Static Electricity Meters. Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018), Paris, 2018. Publicado no IEEE em 22 de outubro de 2018.
- [19] ISHIDA, K., ARIE, S., GOTOH, K., HANADA, E., HIROSE, M., MATSUMOTO, Y., Electromagnetic compatibility of wireless medical telemetry systems and light-emitting diode (LED) lamps. PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 2/2018.
- [20] NORMAN, J.M., **Alexander Graham Bell Invents the Photophone, the First Wireless Communication System.** Disponível em: <https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=2539>
- [21] SAADALLAH, N. R., FATHI, M. M., ARWAC, R., **The efficiency of Li-Fi (light – Fidelity) security and data transmission compared to Wi-Fi**, Materialstoday: Proceedings, Junho, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.238>.
- [22] DAMERDASH, A. M., ABDELHAMEED, D., ALY, M., AHMED E. M., AHMED, M. A., **Energy efficiency assessment of power electronic drivers and LED lamps in Li-Fi communication systems**, Energy Reports, Volume 7, págs. 7648-7662, Novembro, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.10.112>
- [23] ANBALAGANA, R., HUSSAIN, M. Z., JAYABALAKRISHNAN, D., MURUGA, D. B. N., PRABHAHAR, M., **Vehicle to vehicle data transfer and communication using LI-FI technology**, Materialstoday: Proceedings, volume 45, Parte 7, págs. 5925-5933, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.786>
- [24] HASS, H., **With LiFi, we see a shift from a device to a platform in lighting**, LED professional review (LpR), Lighting Technologies & Design, Issue 89, Jan-Feb/2022.
- [25] BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Agência Nacional de Telecomunicações, Resolução nº 442, de 21 de julho de 2006. Aprova Regulamento para a certificação de Equipamentos de Telecomunicações quanto aos aspectos de compatibilidade eletromagnética.
- [26] BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Agência Nacional de Telecomunicações, Resolução nº 715, de 23 de outubro de 2019. Aprova o Regulamento de avaliação da conformidade e de homologação de produtos para telecomunicações.

- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR IEC/CISPR 15:2019: Limites e métodos de medição das radioperturbações características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares, Rio de Janeiro, 2019. 74 p.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR IEC/CISPR 32:2019: Compatibilidade eletromagnética de equipamentos de multimídia — Requisitos de emissão, Rio de Janeiro, 2019. 105 p.
- [29] OTT, H. W., **Electromagnetic Compatibility Engineering**, John Wiley & Sons, Inc., 2009, pp. 238
- [30] PAUL, C. R., **Introduction to electromagnetic compatibility**, John Wiley & Sons Inc., 2nd Edition, 2008, pp. 736-741
- [31] BALANIS, C. A., **Antenna Theory Analysis and Design**, John Wiley & Sons Inc., 3rd. Edition, 2005, pp. 34-36
- [32] SILVA, L. M., CARVALHO, A.C.T., ARAÚJO, J. F., FORTES, M. Z., OLIVEIRA, B. O., SILVA, J.O., **Evaluation of the impact of EMI on Ethernet networks from lighting technologies**, Journal do Eletromagnetic Waves and Applications, Volume 33, págs. 249-259, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09205071.2018.1537135>
- [33] BITTENCOURT, R. S., CARDOSO, K. R., FRAGOSO, A. P., SILVA, J. O., FORTES, M. Z., **Electromagnetic Compatibility Analysis of CFL with Integrated Reactor in the Brazilian Market**, IEEE Latin America Transactions, Volume 17, Issue: 04, April 2019)
- [34] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Portaria nº 144/2015, de 13 de março de 2015. Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Lâmpadas LED com Dispositivo Integrado à Base. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002235.pdf>>. Acesso em 18 jan. 2022.
- [35] ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY, ANSI/IES LM-79-19: Approved method: Optical and electrical measurements of solid-state lighting products – An American National Standard, New York/EUA, 2019.
- [36] CARDOSO, K. R. **Análise da interferência eletromagnética conduzida provocada por inversor de sistema solar fotovoltaico em baixa geração**. 101 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica e de telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020).

Apêndice A – Resultado dos ensaios de desempenho variando a potência nominal

A Tabela 9 apresenta os valores medidos nos ensaios de desempenho variando a potência nominal das lâmpadas inteligentes, nas duas tensões oficiais brasileiras e nas temperaturas de cor de 2700 K, 4000 K e 6500 K.

Tabela 9 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de desempenho variando potência nominal.

Amostra	Tensão (V)	TCC (K)	% da Pot. nominal	Potência medida (W)	Fluxo luminoso (lm)	FP	IRC/Ra	IRC/R9	Eficiência energética (lm/W)
01 10W	127	2700	100	6,56	285,59	0,61	48	-49	43,5
	220	2700	100	6,55	284,90	0,52	48	-49	43,5
	127	2700	70	5,17	208,67	0,59	46	-40	40,4
	220	2700	70	4,82	202,06	0,49	43	-44	41,9
	127	2700	50	3,92	139,95	0,57	40	-54	35,7
	220	2700	50	4,01	150,52	0,47	40	-54	37,5
	127	2700	30	2,91	94,41	0,54	40	-52	32,4
	220	2700	30	3,04	94,71	0,45	40	-52	31,2
01 10 W	127	4000	100	9,57	801,79	0,63	83	14	83,8
	220	4000	100	9,35	804,54	0,55	83	13	86,0
	127	4000	70	6,86	566,95	0,61	83	13	82,6
	220	4000	70	6,80	561,86	0,52	83	13	82,6
	127	4000	50	5,24	415,06	0,59	83	14	79,2
	220	4000	50	5,24	414,45	0,49	83	13	79,1
	127	4000	30	3,69	262,94	0,56	83	13	71,3
	220	4000	30	3,78	260,00	0,47	83	13	68,8
01 10 W	127	6500	100	7,39	488,00	0,62	82	11	66,0
	220	6500	100	7,19	485,13	0,52	81	12	67,5
	127	6500	70	5,47	332,16	0,60	82	13	60,7
	220	6500	70	5,48	329,94	0,50	82	10	60,2
	127	6500	50	4,29	244,05	0,58	82	12	56,9
	220	6500	50	4,31	238,05	0,48	81	12	55,2
	127	6500	30	3,08	152,65	0,55	82	11	49,6
	220	6500	30	3,20	152,81	0,45	82	12	47,8
02 10W	127	2700	100	9,46	847,98	0,96	82	6	89,6
	220	2700	100	9,61	849,37	0,88	82	6	88,4
	127	2700	70	6,94	682,40	0,94	82	7	98,3
	220	2700	70	7,14	679,76	0,81	82	7	95,2
	127	2700	50	5,34	545,11	0,91	83	8	102,1
	220	2700	50	5,56	545,13	0,74	83	8	98,0
	127	2700	30	3,80	388,68	0,84	83	10	102,3
	220	2700	30	4,03	393,31	0,63	83	10	97,6
02 10 W	127	4000	100	9,48	949,39	0,96	84	12	100,1
	220	4000	100	9,61	955,31	0,88	84	12	99,4

	127	4000	70	6,70	757,19	0,95	84	11	113,0
	220	4000	70	7,13	759,78	0,81	84	11	106,6
	127	4000	50	5,35	607,66	0,91	84	10	113,6
	220	4000	50	5,57	606,94	0,74	84	10	109,0
	127	4000	30	3,80	431,54	0,84	84	10	113,6
	220	4000	30	4,04	434,82	0,63	84	10	107,6
02 10 W	127	6500	100	9,49	916,15	0,97	87	26	96,5
	220	6500	100	9,64	920,15	0,89	87	26	95,5
	127	6500	70	6,94	725,01	0,94	87	27	104,5
	220	6500	70	7,15	730,57	0,82	87	27	102,2
	127	6500	50	5,35	581,59	0,91	87	27	108,7
	220	6500	50	5,58	583,29	0,74	87	27	104,5
	127	6500	30	3,81	412,07	0,84	87	27	108,2
	220	6500	30	4,04	415,53	0,63	87	27	102,9
03 9 W	127	2700	100	9,75	887,95	0,65	82	8	91,1
	220	2700	100	9,95	893,41	0,55	82	7	89,8
	127	2700	70	7,07	700,91	0,61	82	9	99,1
	220	2700	70	7,39	702,40	0,52	82	9	95,0
	127	2700	50	5,40	548,04	0,58	83	10	101,5
	220	2700	50	5,77	549,19	0,49	83	10	95,2
	127	2700	30	3,76	378,30	0,55	83	10	100,6
	220	2700	30	4,20	381,22	0,47	83	11	90,8
03 9 W	127	4000	100	9,78	1028,52	0,65	83	2	105,2
	220	4000	100	9,97	1029,35	0,55	83	3	103,2
	127	4000	70	7,09	812,80	0,62	83	1	114,6
	220	4000	70	7,41	808,58	0,52	83	2	109,1
	127	4000	50	5,42	638,25	0,58	83	1	117,8
	220	4000	50	5,78	642,14	0,49	83	0	111,1
	127	4000	30	3,76	435,08	0,55	83	1	115,7
	220	4000	30	4,25	442,26	0,47	83	1	104,1
03 9 W	127	6500	100	9,82	982,89	0,65	87	25	100,1
	220	6500	100	10,01	987,94	0,55	87	26	98,7
	127	6500	70	7,09	761,15	0,61	86	25	107,4
	220	6500	70	7,41	768,45	0,52	86	25	103,7
	127	6500	50	5,43	600,94	0,58	87	25	110,7
	220	6500	50	5,79	600,67	0,50	87	26	103,7
	127	6500	30	3,79	410,53	0,55	87	25	108,3
	220	6500	30	4,25	412,97	0,47	87	26	97,2
04 10W	127	2700	100	9,47	862,88	0,96	82	7	91,1
	220	2700	100	9,51	865,66	0,89	82	6	91,0
	127	2700	70	6,95	695,04	0,94	83	8	100,0
	220	2700	70	7,11	694,21	0,82	83	8	97,6
	127	2700	50	5,26	545,25	0,91	83	9	103,7
	220	2700	50	5,47	547,50	0,74	83	9	100,1
	127	2700	30	3,72	385,79	0,84	83	11	103,7
	220	2700	30	3,94	389,48	0,63	83	11	98,9
04 10 W	127	4000	100	9,51	967,30	0,97	84	12	101,7
	220	4000	100	9,55	961,41	0,89	84	12	100,7
	127	4000	70	6,88	763,26	0,95	84	11	110,9

	220	4000	70	7,05	760,48	0,82	84	12	107,9
	127	4000	50	5,26	599,34	0,91	84	12	113,9
	220	4000	50	5,46	600,00	0,74	84	13	109,9
	127	4000	30	3,69	417,32	0,84	84	12	113,1
	220	4000	30	3,89	427,15	0,62	84	13	109,8
04 10 W	127	6500	100	9,52	938,86	0,96	87	28	98,6
	220	6500	100	9,57	937,41	0,89	87	27	98,0
	127	6500	70	6,92	731,33	0,94	87	28	105,7
	220	6500	70	7,09	729,94	0,81	87	28	103,0
	127	6500	50	5,27	574,52	0,91	87	29	109,0
	220	6500	50	5,47	576,61	0,74	87	30	105,4
	127	6500	30	3,71	405,02	0,84	87	28	109,2
	220	6500	30	3,91	409,22	0,63	87	29	104,7
05 10 W	127	2700	100	10,58	884,00	0,64	82	5	83,6
	220	2700	100	10,41	884,38	0,54	82	4	85,0
	127	2700	70	7,89	668,11	0,61	82	5	84,7
	220	2700	70	7,89	674,75	0,51	82	5	85,5
	127	2700	50	6,09	520,59	0,59	82	5	85,5
	220	2700	50	6,14	519,71	0,49	82	5	84,6
	127	2700	30	4,37	363,46	0,56	83	7	83,2
	220	2700	30	4,48	361,91	0,47	82	6	80,8
08 10W	127	2700	100	9,15	809,17	0,97	81	0	88,4
	220	2700	100	9,35	814,16	0,89	81	0	87,1
	127	2700	70	6,62	671,34	0,95	81	2	101,4
	220	2700	70	6,80	671,22	0,81	81	2	98,7
	127	2700	50	5,10	540,92	0,92	82	3	106,1
	220	2700	50	5,25	542,14	0,74	82	3	103,3
	127	2700	30	3,49	384,12	0,85	81	2	110,1
	220	2700	30	3,68	387,44	0,62	82	3	105,3
08 10 W	127	4000	100	9,24	898,11	0,97	86	23	97,2
	220	4000	100	9,37	900,99	0,89	86	23	96,2
	127	4000	70	6,68	742,36	0,95	85	21	111,1
	220	4000	70	6,83	734,96	0,81	86	22	107,6
	127	4000	50	5,15	587,08	0,92	85	21	114,0
	220	4000	50	5,25	589,75	0,74	85	22	112,3
	127	4000	30	3,50	415,97	0,85	85	22	118,8
	220	4000	30	3,75	420,78	0,62	85	22	112,2
08 10 W	127	6500	100	9,23	872,90	0,97	88	29	94,6
	220	6500	100	9,35	877,27	0,89	87	29	93,8
	127	6500	70	6,69	709,62	0,95	88	30	106,1
	220	6500	70	6,81	709,54	0,81	88	30	104,2
	127	6500	50	5,08	567,02	0,92	88	31	111,6
	220	6500	50	5,23	568,66	0,74	88	31	108,7
	127	6500	30	3,50	401,22	0,85	88	30	114,6
	220	6500	30	3,68	407,34	0,62	88	30	110,7

Apêndice B – Gráficos dos ensaios de EMC conforme CISPR 15

B.1 Medições das tensões de perturbação em terminais de alimentação

As Figuras de 21 a 40 apresentam os gráficos das medições das tensões de perturbação em terminais de alimentação das amostras, onde as linhas vermelha e rosa representam os limites da norma [25] e as linhas azuis e verdes, os pontos medidos.

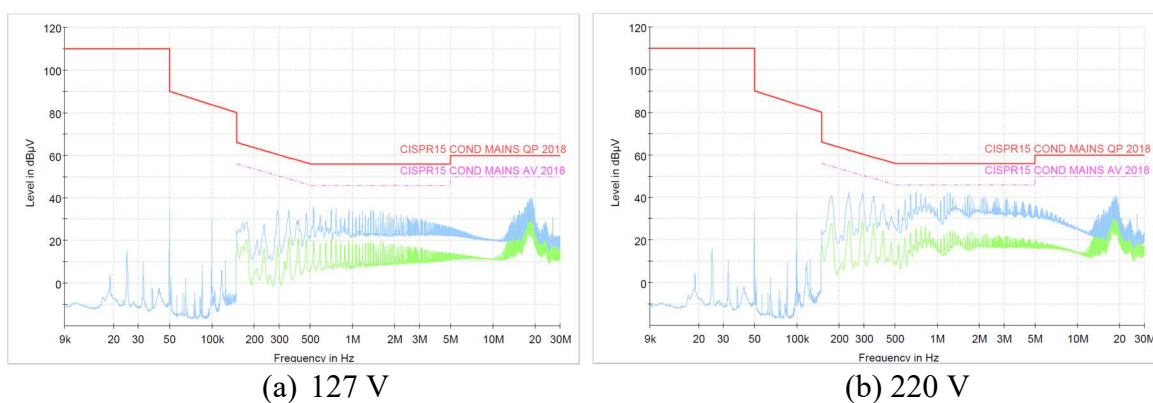


Figura 21 – Amostra 01 – 2700 K.

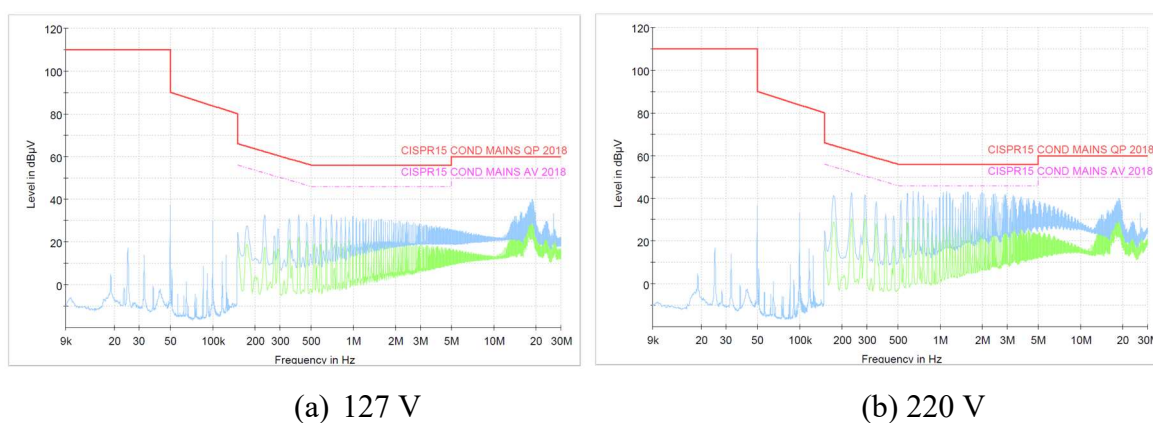
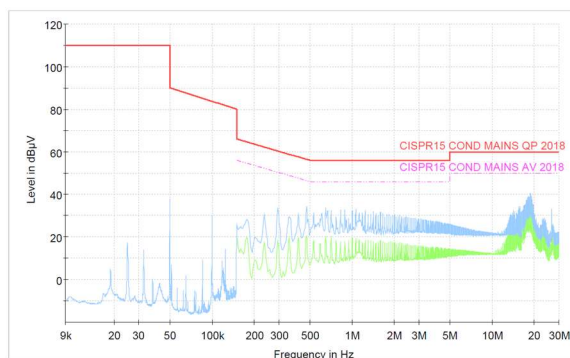
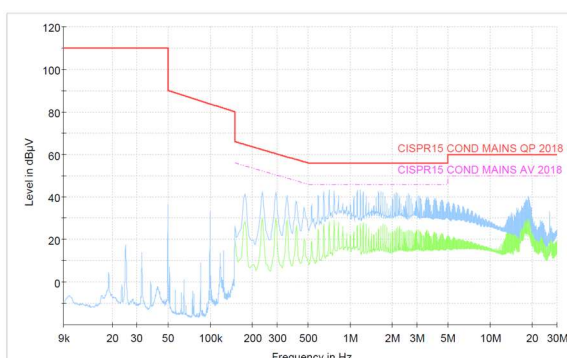


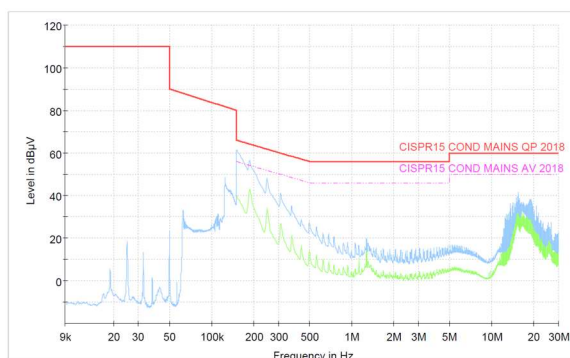
Figura 22 – Amostra 01 – 4000 K.



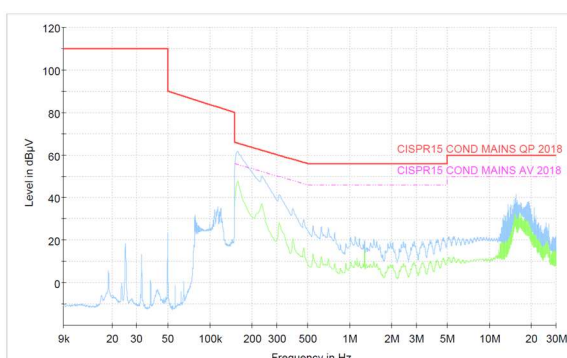
(a) 127 V



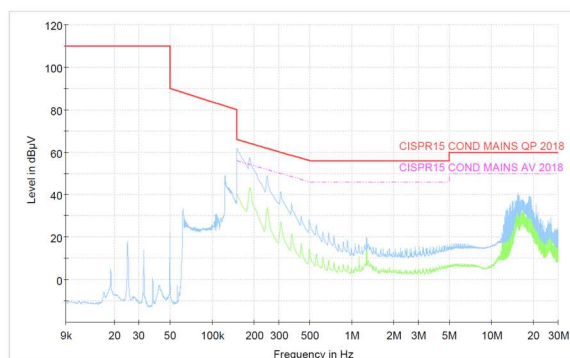
(b) 220 V

Figura 23 – Amostra 01 – 6500 K.

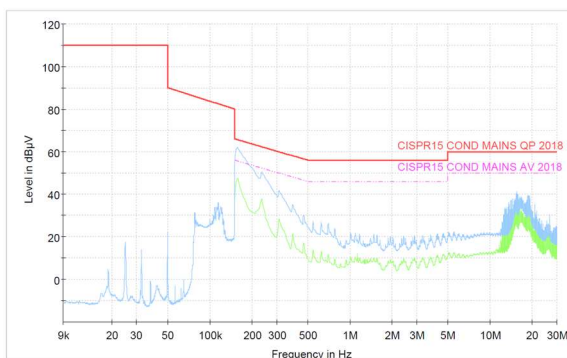
(a) 127 V



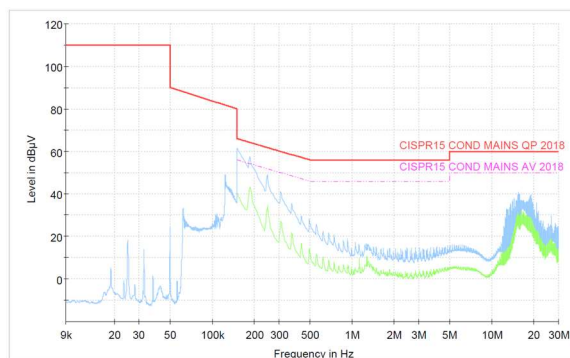
(b) 220 V

Figura 24 – Amostra 02 – 2700 K.

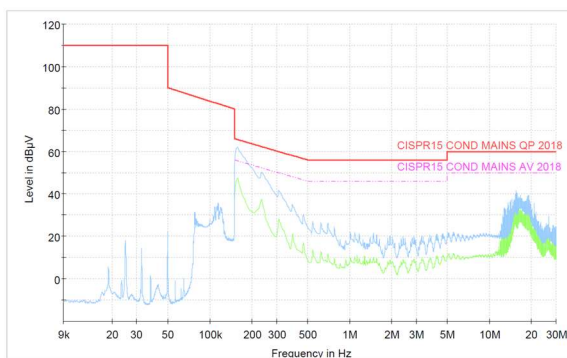
(a) 127 V



(b) 220 V

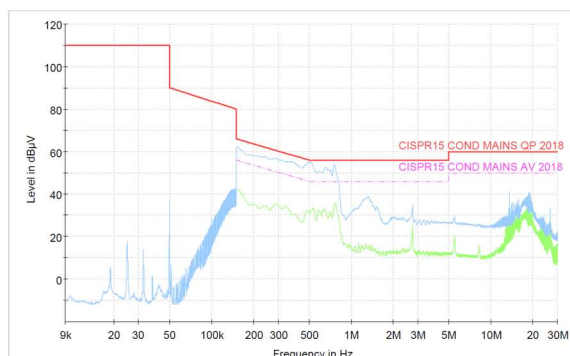
Figura 25 – Amostra 02 – 4000 K.

(a) 127 V

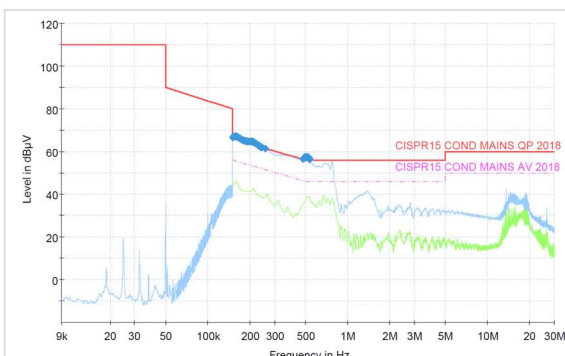


(b) 220 V

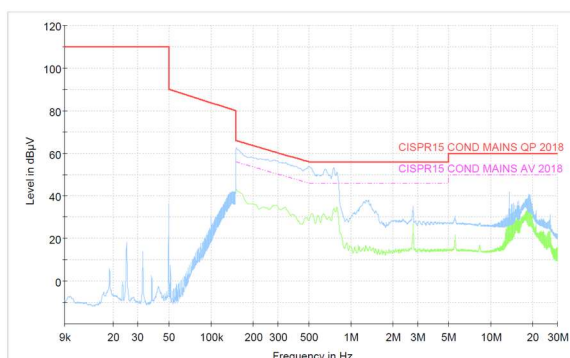
Figura 26 – Amostra 02 – 6500 K.



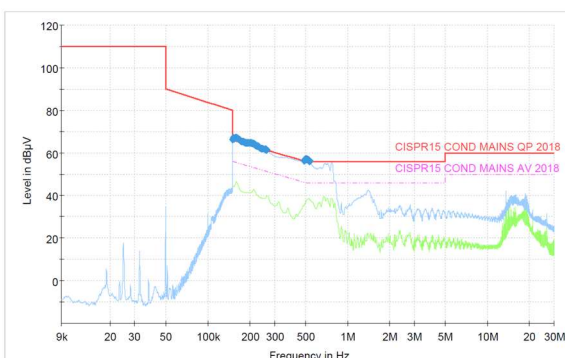
(a) 127 V



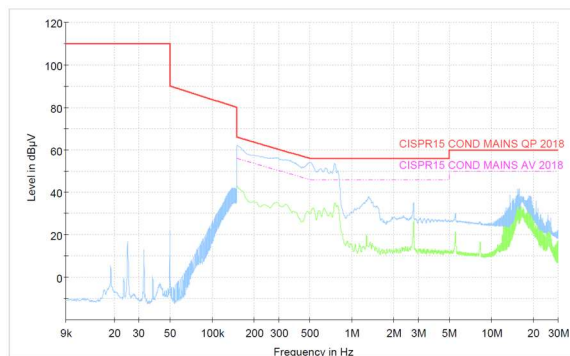
(b) 220 V

Figura 27 – Amostra 03 – 2700 K.

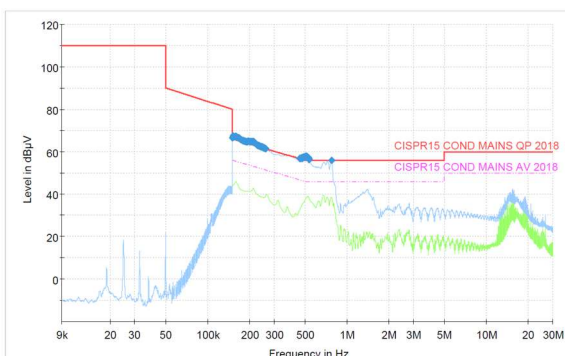
(a) 127 V



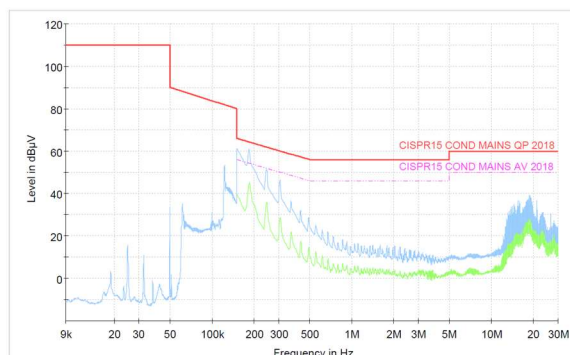
(b) 220 V

Figura 28 – Amostra 03 – 4000 K.

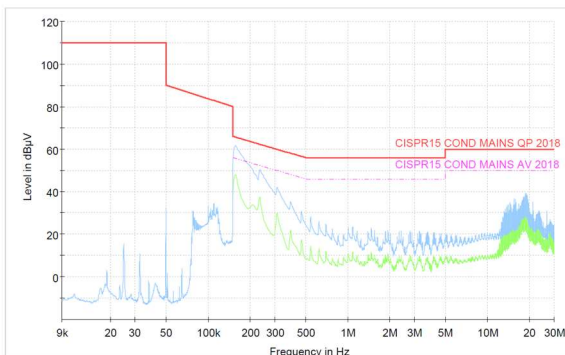
(a) 127 V



(b) 220 V

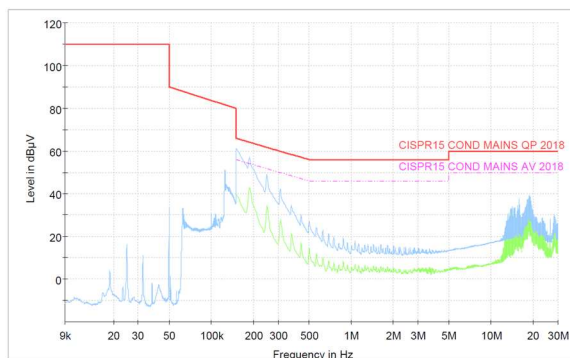
Figura 29 – Amostra 03 – 6500 K.

(a) 127 V

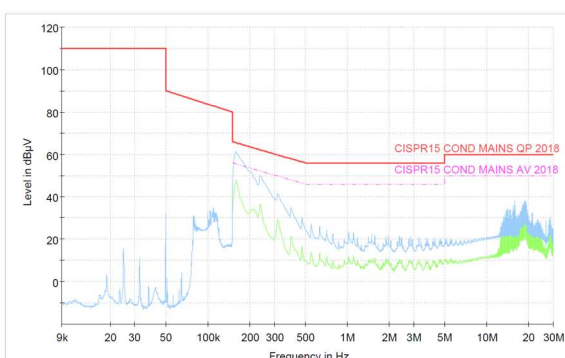


(b) 220 V

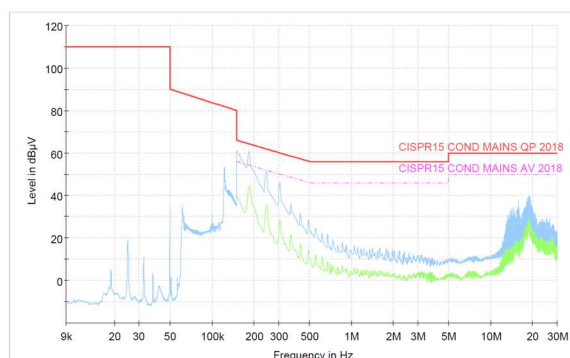
Figura 30 – Amostra 04 – 2700 K.



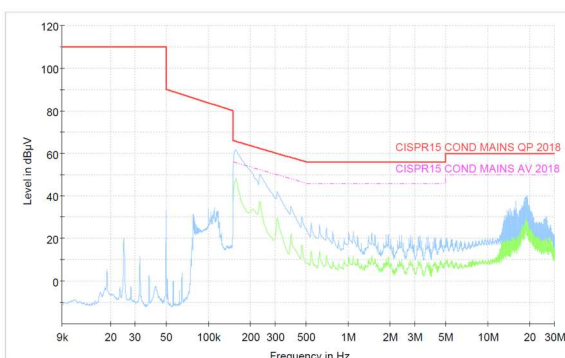
(a) 127 V



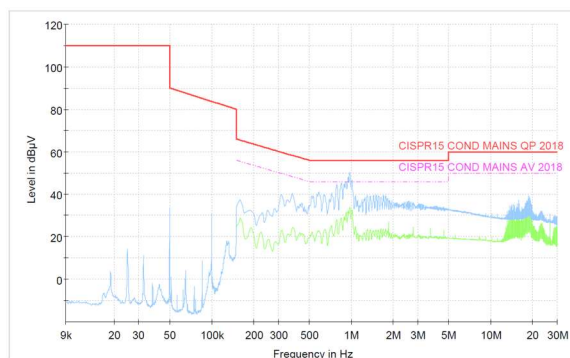
(b) 220 V

Figura 31 – Amostra 04 – 4000 K.

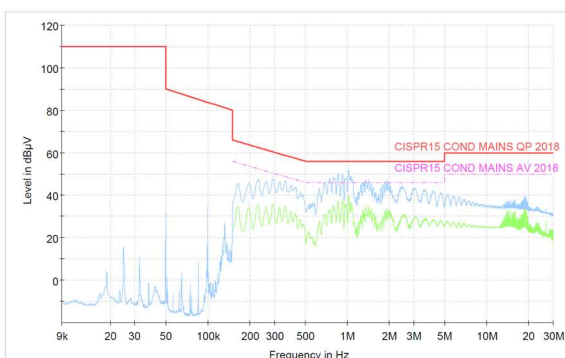
(a) 127 V



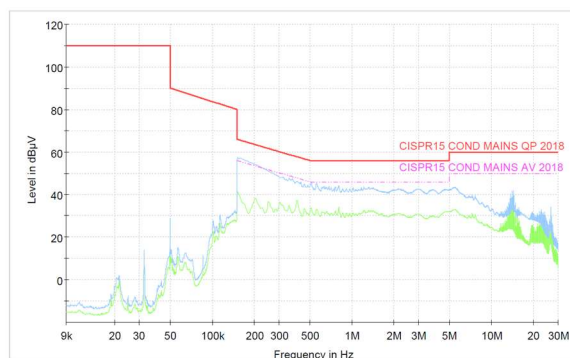
(b) 220 V

Figura 32 – Amostra 04 – 6500 K.

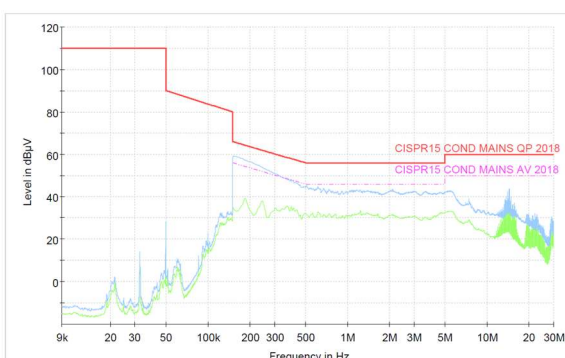
(a) 127 V



(b) 220 V

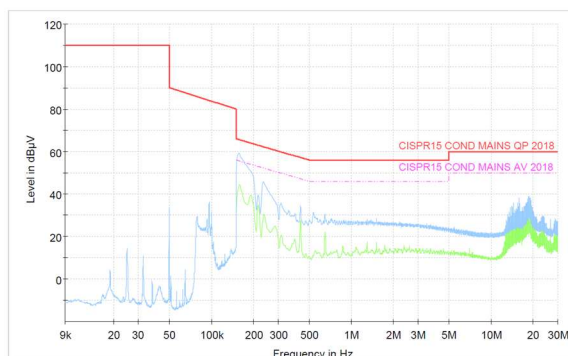
Figura 33 – Amostra 05 – 2700 K.

(a) 127 V

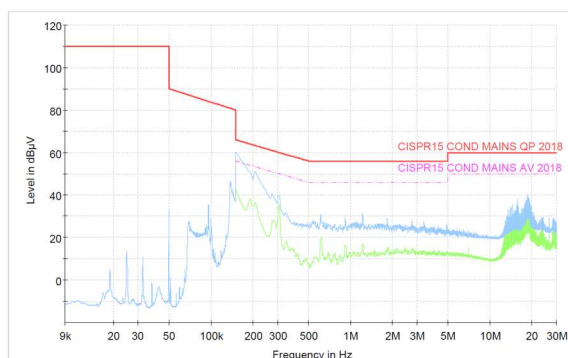


(b) 220 V

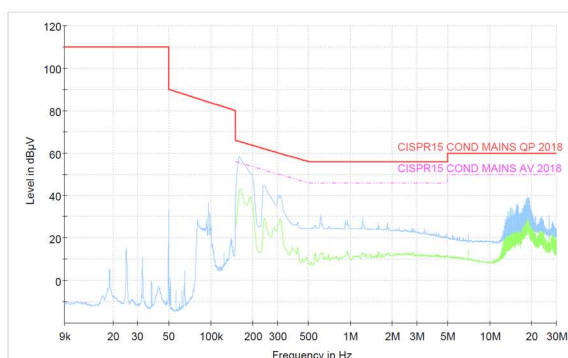
Figura 34 – Amostra 06 – 6500 K.



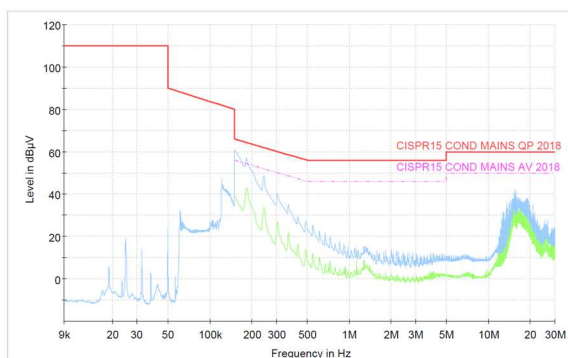
(a) 127 V

Figura 35 – Amostra 07 – 2700 K.

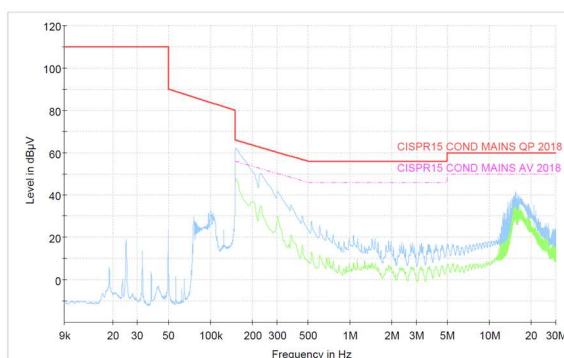
(a) 127 V

Figura 36 – Amostra 07 – 4000 K.

(a) 127 V

Figura 37 – Amostra 07 – 6500 K.

(a) 127 V



(b) 220 V

Figura 38 – Amostra 08 – 2700 K.

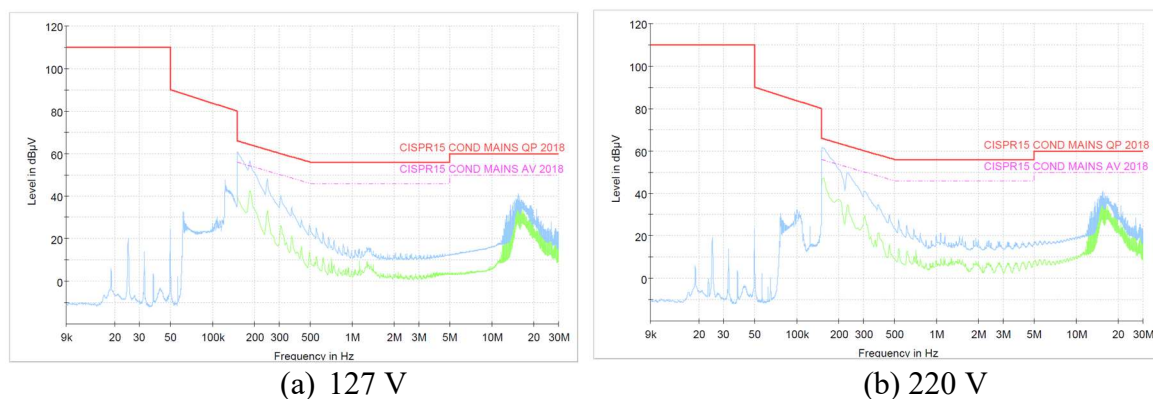


Figura 39 – Amostra 08 – 4000 K.

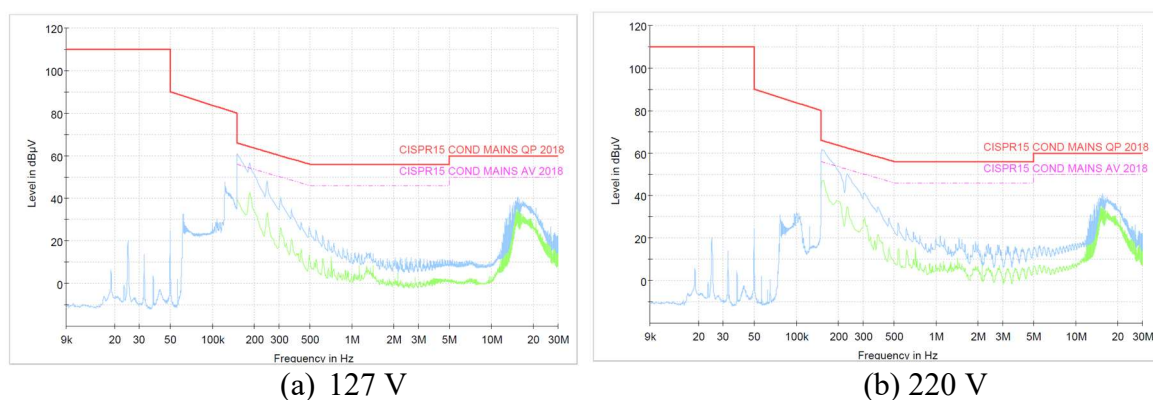


Figura 40 – Amostra 08 – 6500 K.

B.2 Medições de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo magnético

As Figuras de 41 a 60 apresentam os gráficos das medições de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo magnético das amostras, onde a linha vermelha representa os limites da norma [25] e a linha azul, os pontos medidos.

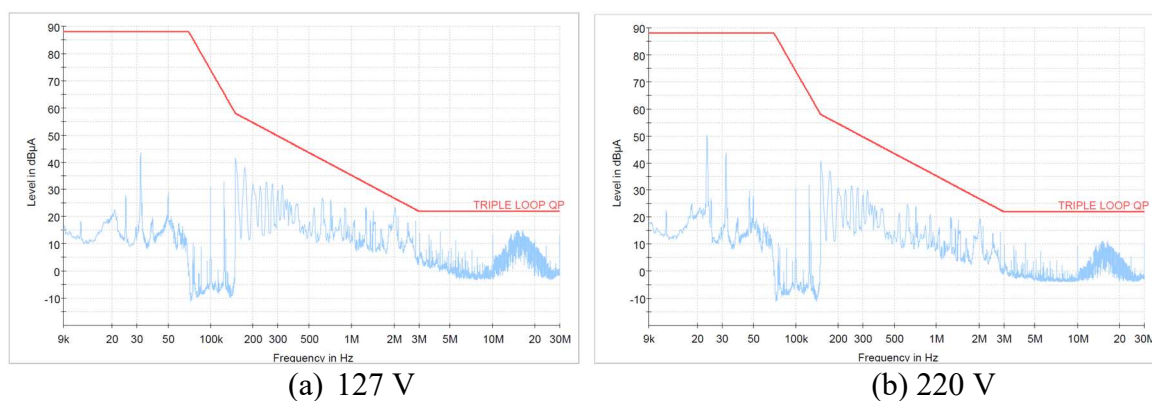
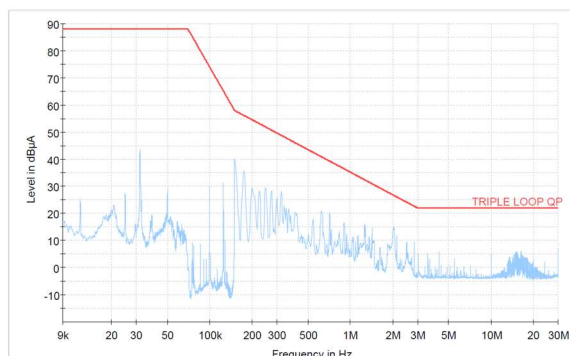
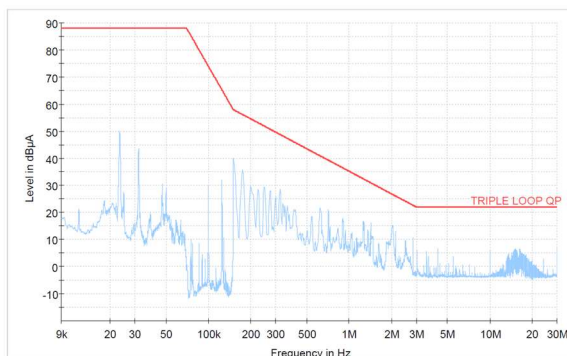


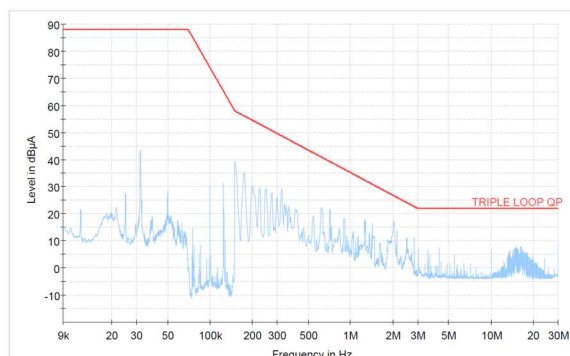
Figura 41 – Amostra 01 – 2700 K.



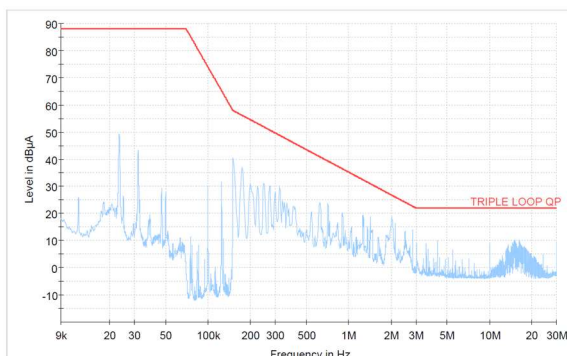
(a) 127 V



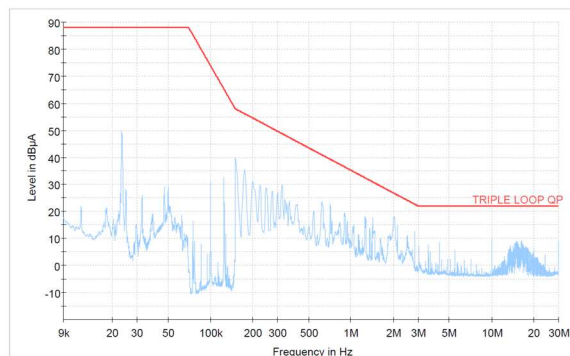
(b) 220 V

Figura 42 – Amostra 01 – 4000 K.

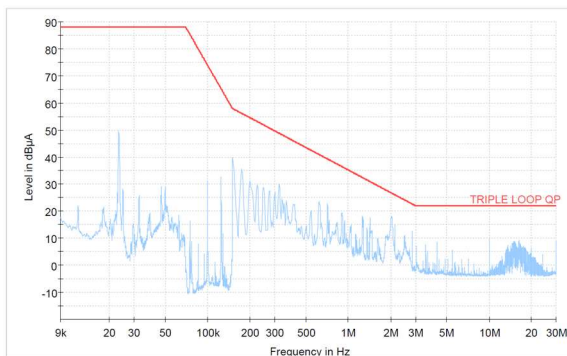
(a) 127 V



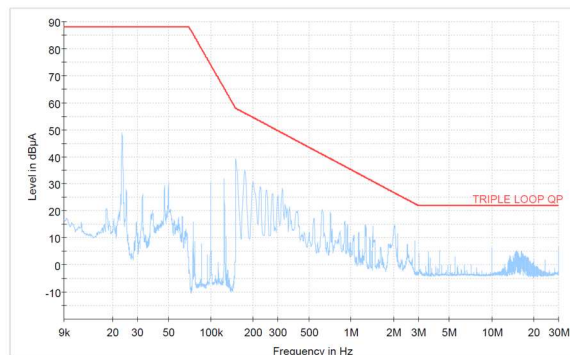
(b) 220 V

Figura 43 – Amostra 01 – 6500 K.

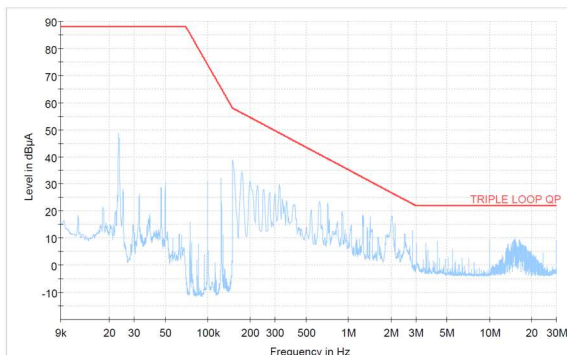
(a) 127 V



(b) 220 V

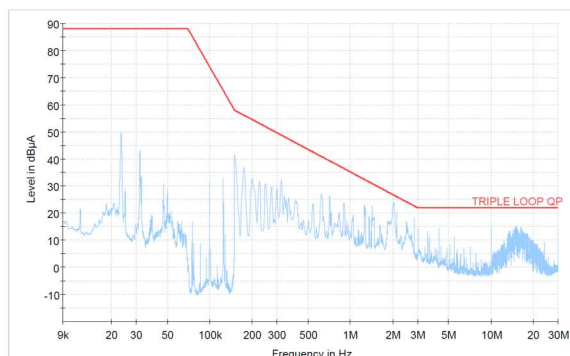
Figura 44 – Amostra 02 – 2700 K.

(a) 127 V

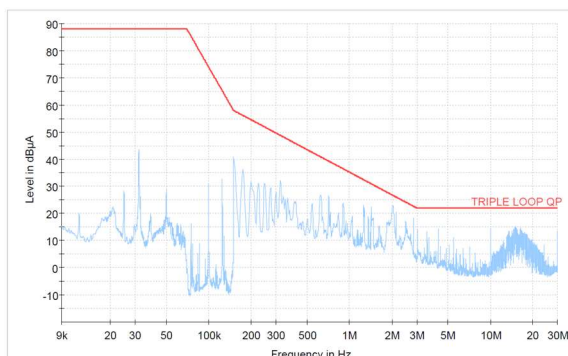


(b) 220 V

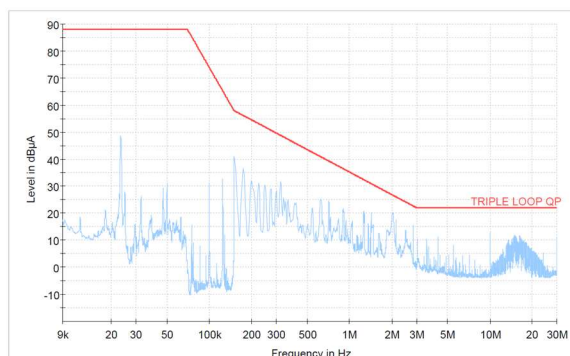
Figura 45 – Amostra 02 – 4000 K.



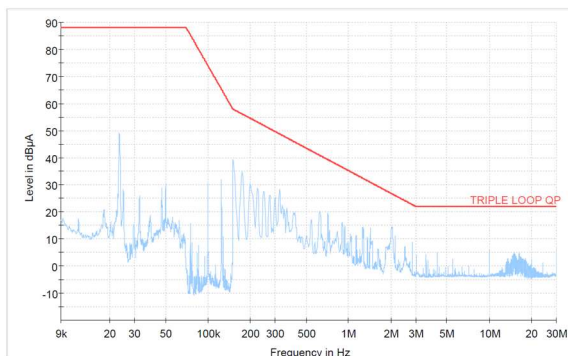
(a) 127 V



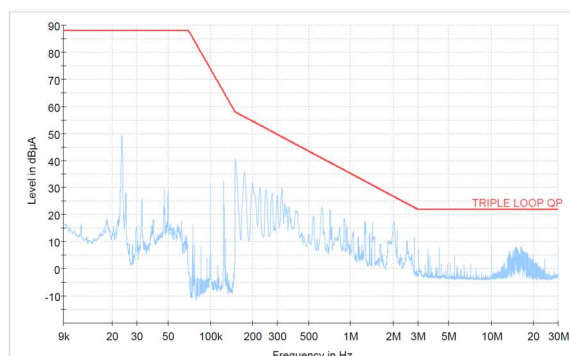
(b) 220 V

Figura 46 – Amostra 02 – 6500 K.

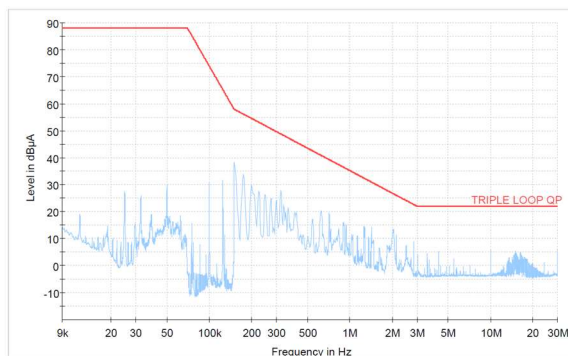
(a) 127 V



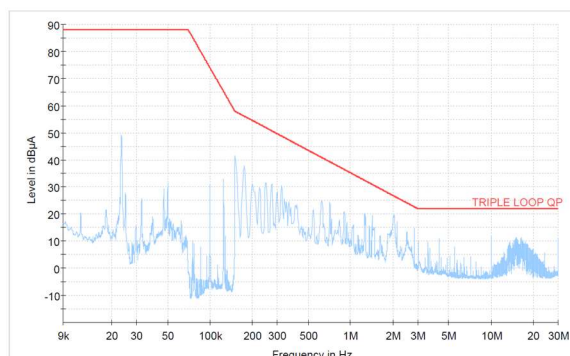
(b) 220 V

Figura 47 – Amostra 03 – 2700 K.

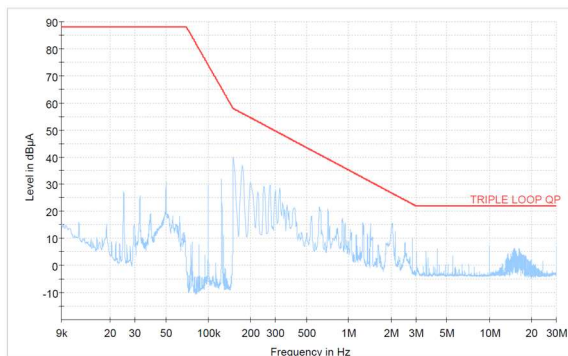
(a) 127 V



(b) 220 V

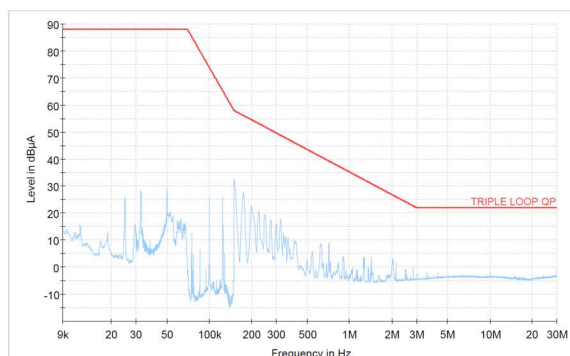
Figura 48 – Amostra 03 – 4000 K.

(a) 127 V

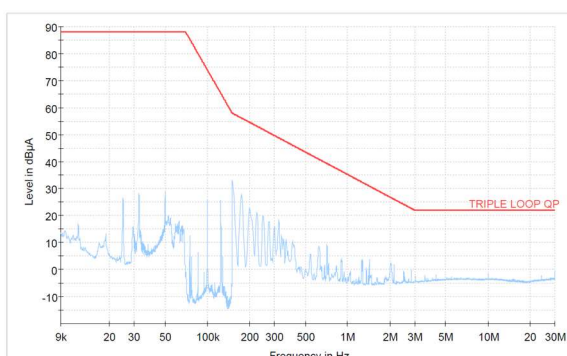


(b) 220 V

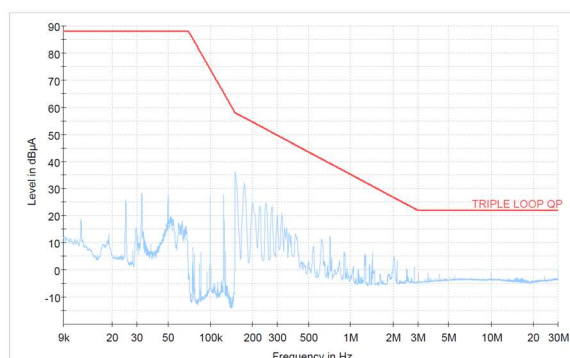
Figura 49 – Amostra 03 – 6500 K.



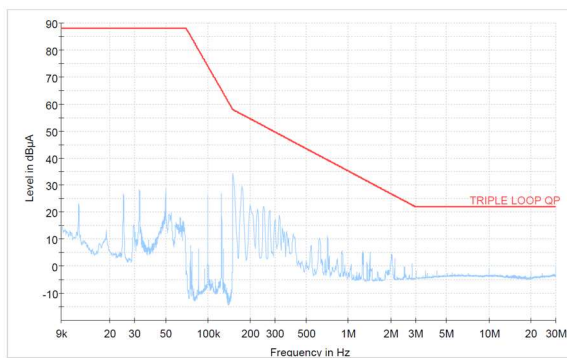
(a) 127 V



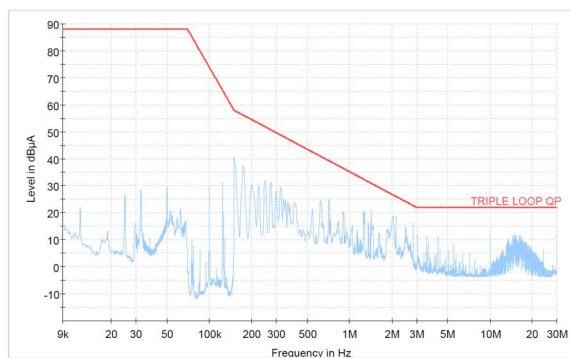
(b) 220 V

Figura 50 – Amostra 04 – 2700 K.

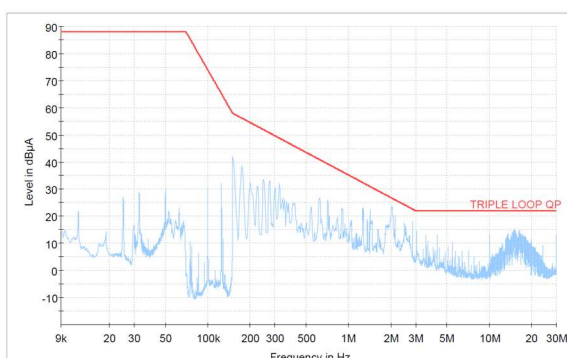
(a) 127 V



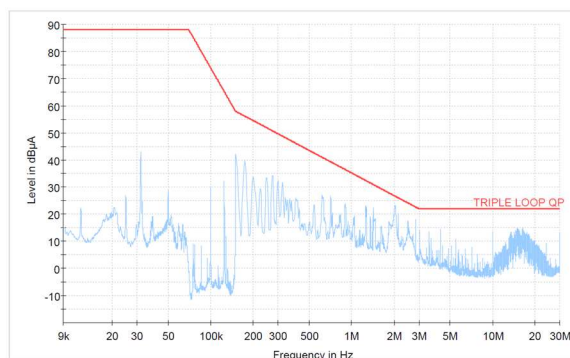
(b) 220 V

Figura 51 – Amostra 04 – 4000 K.

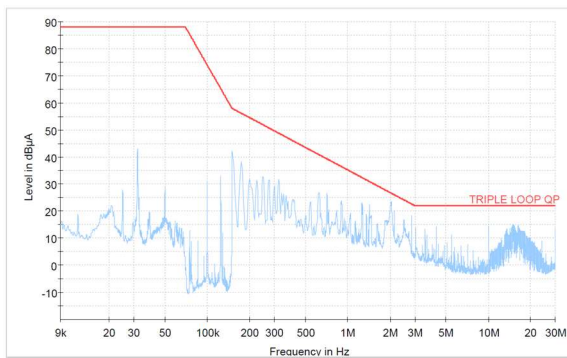
(a) 127 V



(b) 220 V

Figura 52 – Amostra 04 – 6500 K.

(a) 127 V



(b) 220 V

Figura 53 – Amostra 05 – 2700 K.

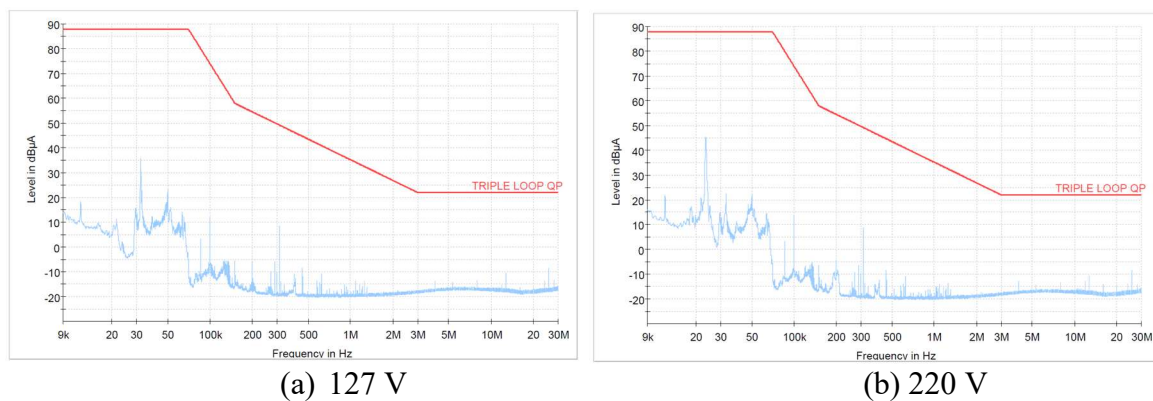


Figura 54 – Amostra 06 – 6500 K.

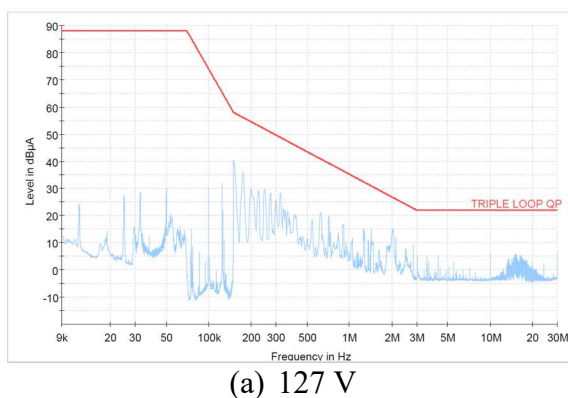


Figura 55 – Amostra 07 – 2700 K.

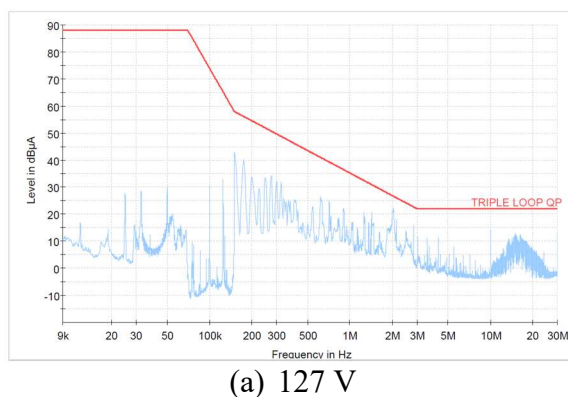


Figura 56 – Amostra 07 – 4000 K.

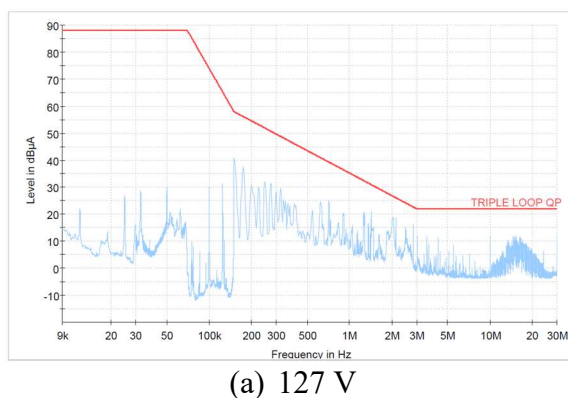


Figura 57 – Amostra 07 – 6500 K.

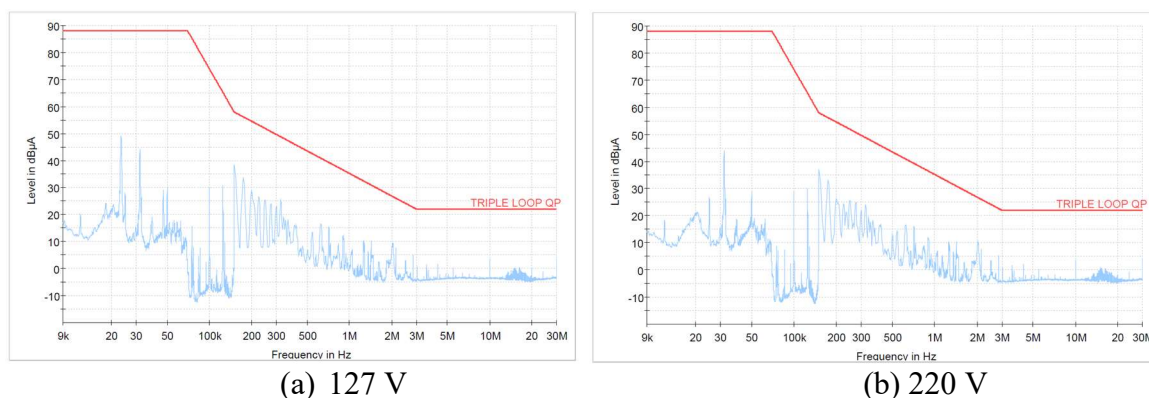


Figura 58 – Amostra 08 – 2700 K.

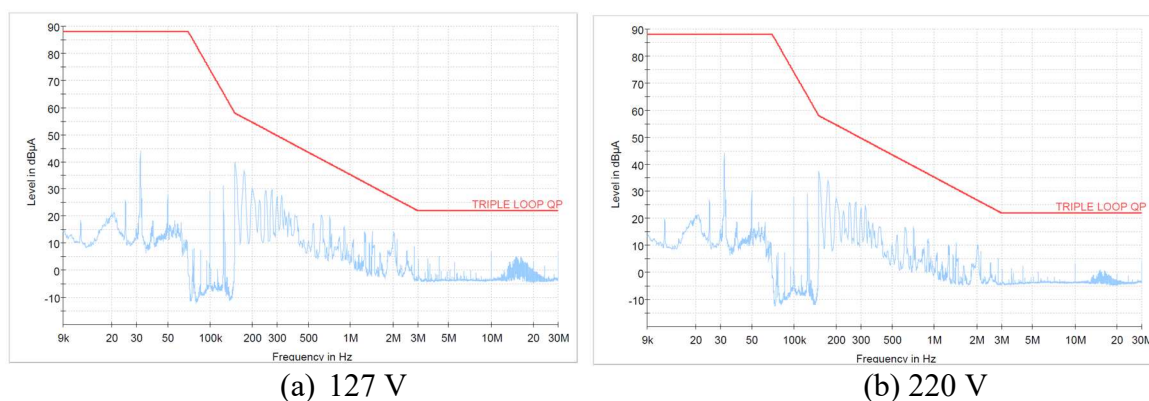


Figura 59 – Amostra 08 – 4000 K.

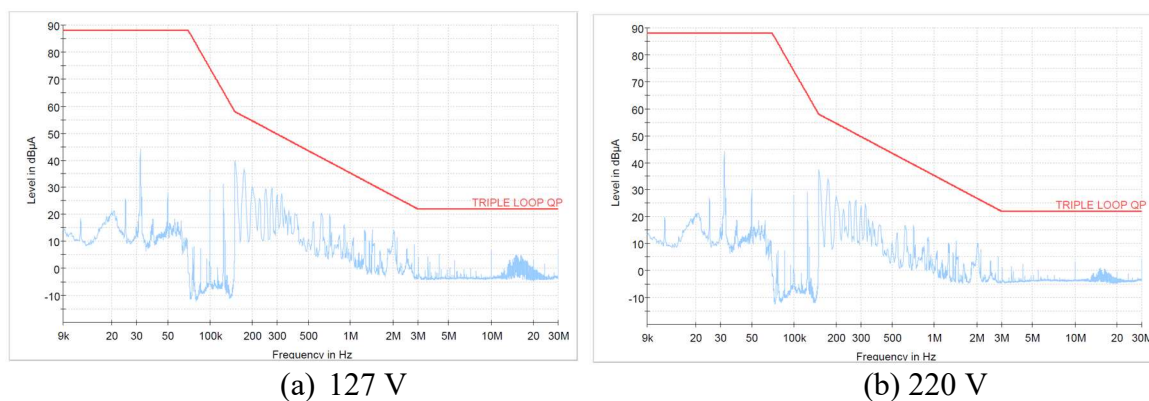
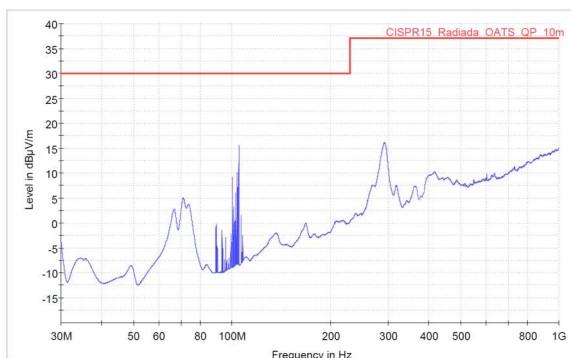


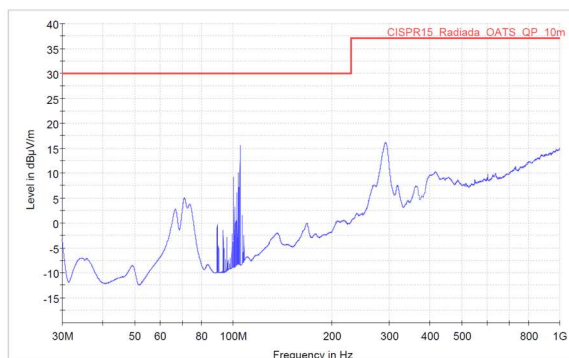
Figura 60 – Amostra 08 – 6500 K.

B.3 Medições de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico

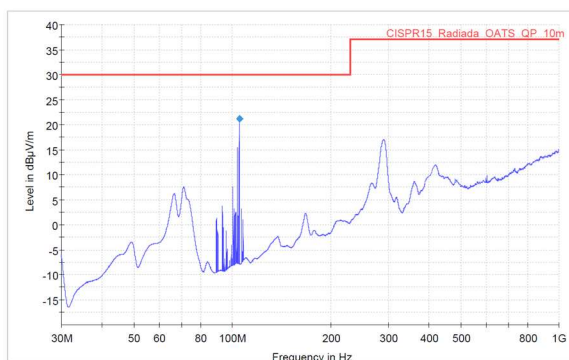
As Figuras de 61 a 80 apresentam os gráficos das medições de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico, onde a linha vermelha representa os limites da norma [25] e a linha azul, os pontos medidos.



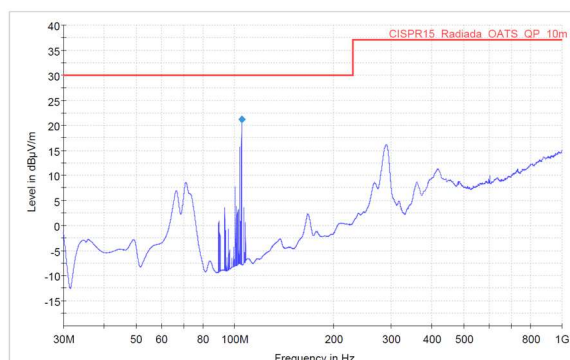
(a) 127 V



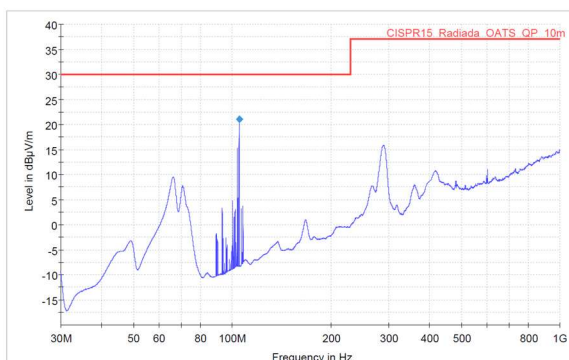
(b) 220 V

Figura 61 – Amostra 01 – 2700 K.

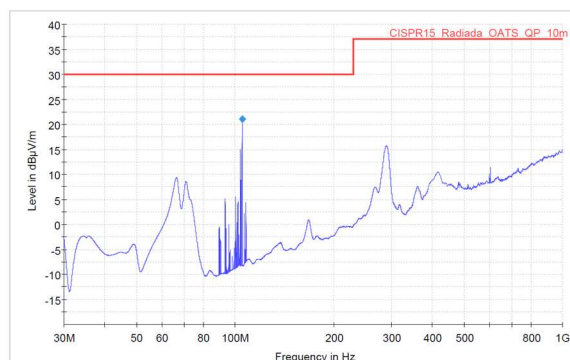
(a) 127 V



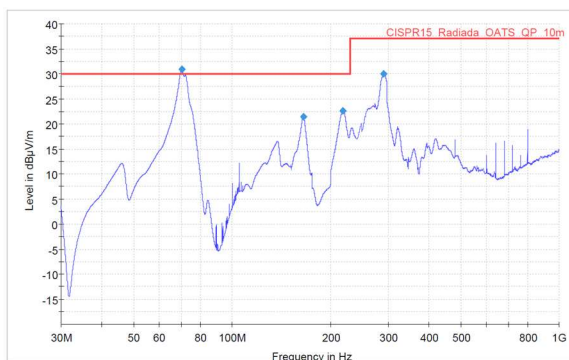
(b) 220 V

Figura 62 – Amostra 01 – 4000 K.

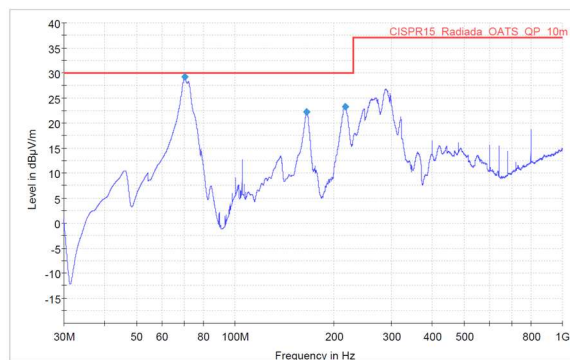
(a) 127 V



(b) 220 V

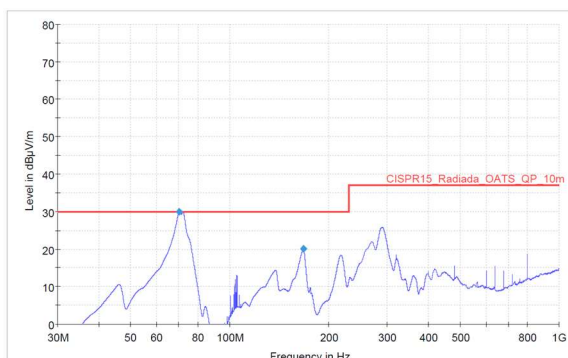
Figura 63 – Amostra 01 – 6500 K.

(a) 127 V

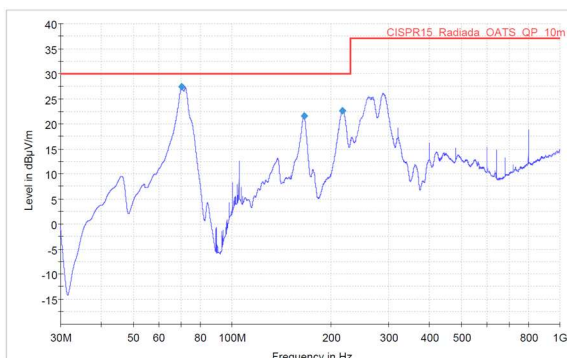


(b) 220 V

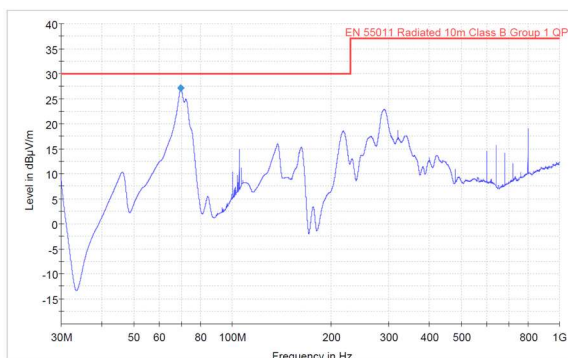
Figura 64 – Amostra 02 – 2700 K.



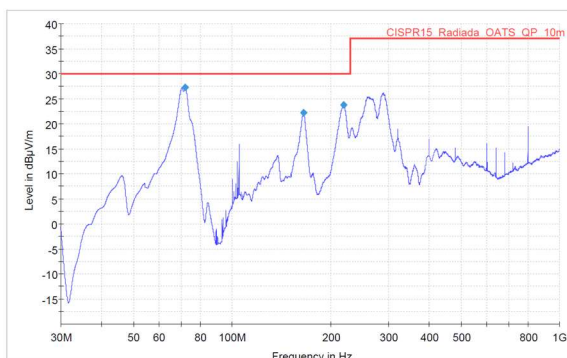
(a) 127 V



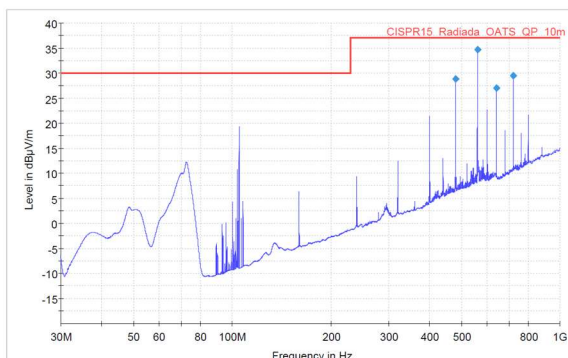
(b) 220 V

Figura 65 – Amostra 02 – 4000 K.

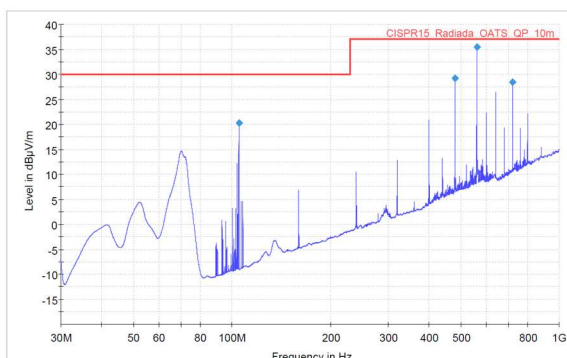
(a) 127 V



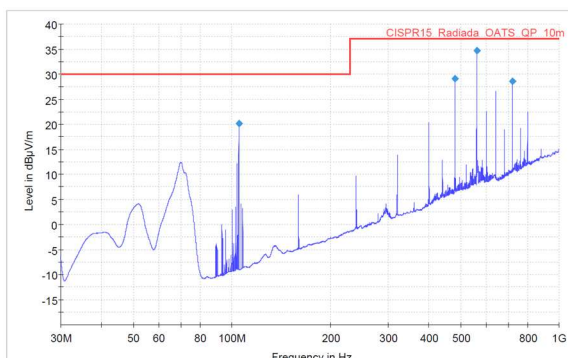
(b) 220 V

Figura 66 – Amostra 02 – 6500 K.

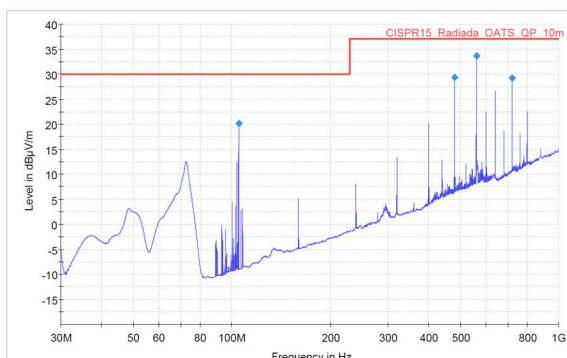
(a) 127 V



(b) 220 V

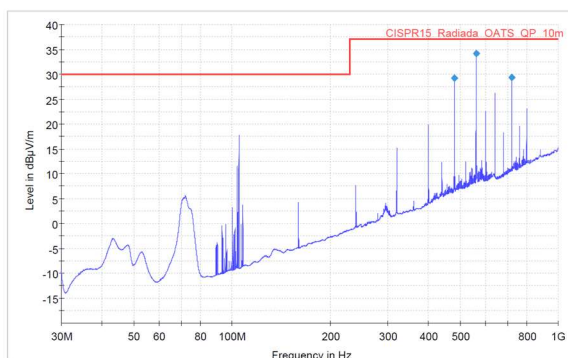
Figura 67 – Amostra 03 – 2700 K.

(a) 127 V

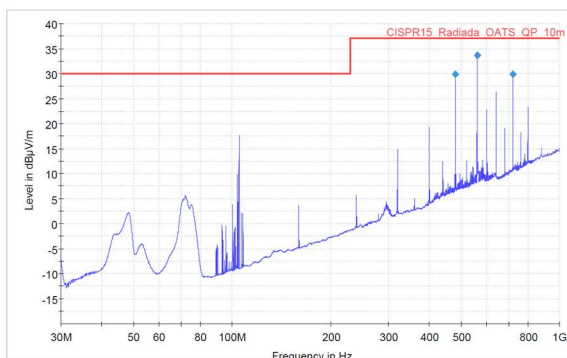


(b) 220 V

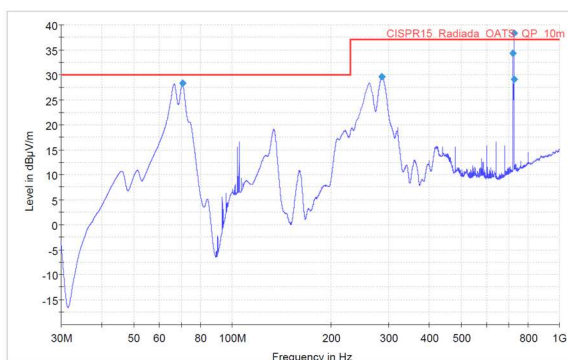
Figura 68 – Amostra 03 – 4000 K.



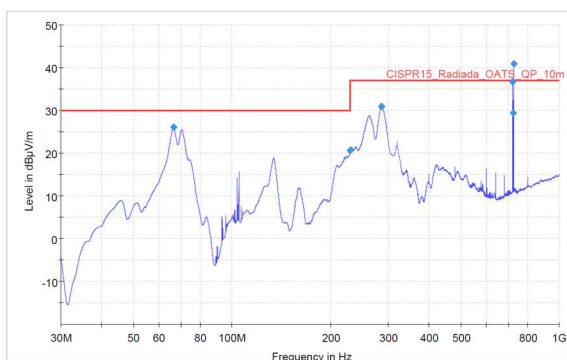
(a) 127 V



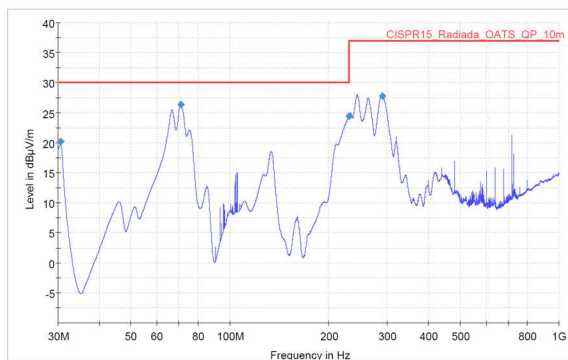
(b) 220 V

Figura 69 – Amostra 03 – 6500 K.

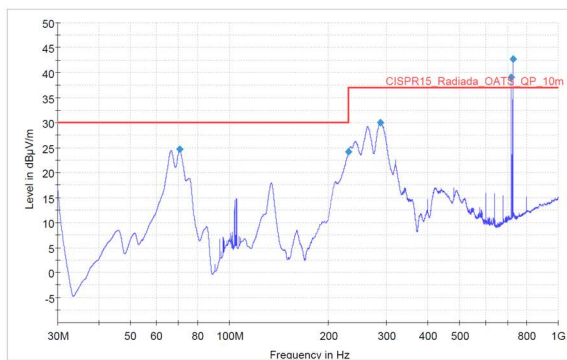
(a) 127 V



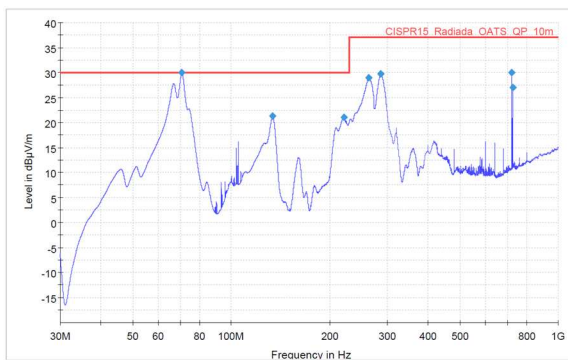
(b) 220 V

Figura 70 – Amostra 04 – 2700 K.

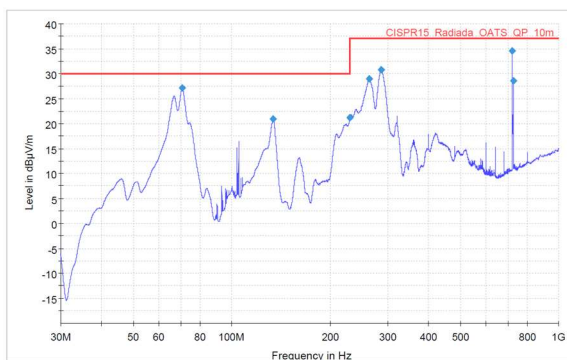
(a) 127 V



(b) 220 V

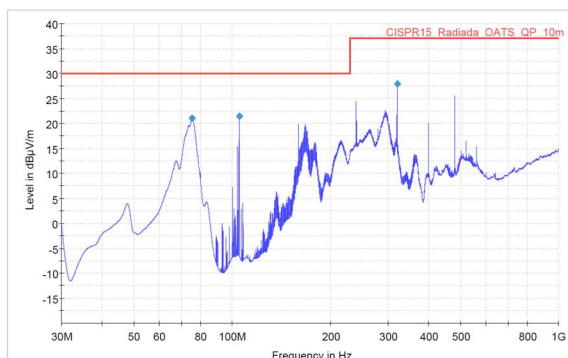
Figura 71 – Amostra 04 – 4000 K.

(a) 127 V

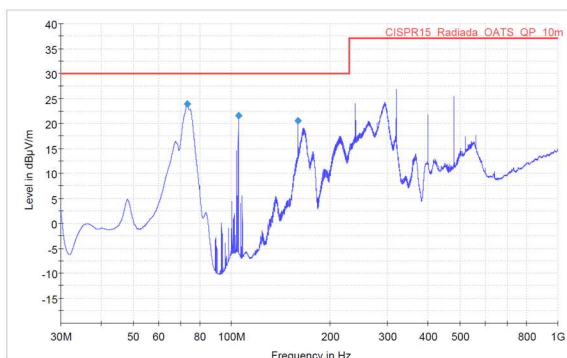


(b) 220 V

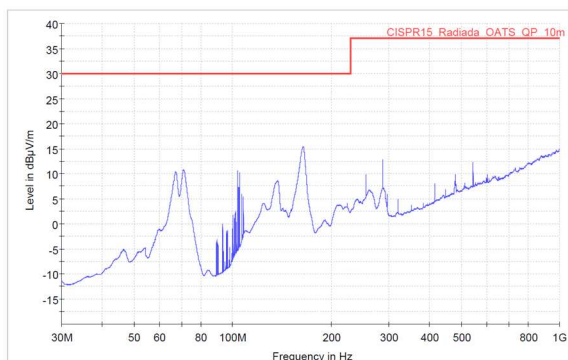
Figura 72 – Amostra 04 – 6500 K.



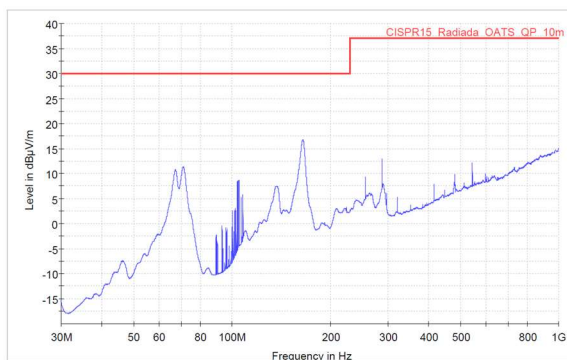
(a) 127 V



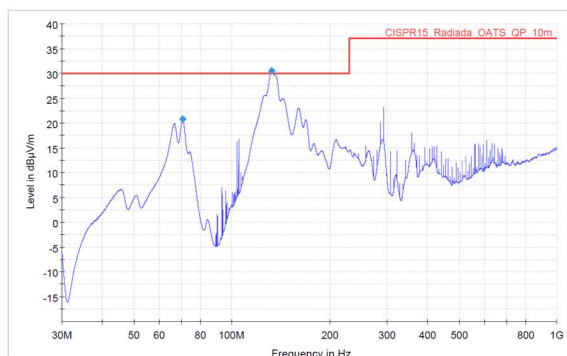
(b) 220 V

Figura 73 – Amostra 05 – 2700 K.

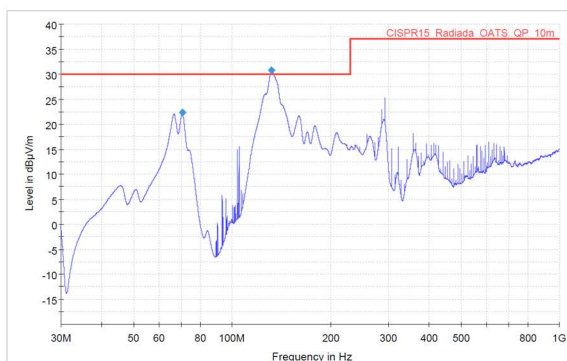
(a) 127 V



(b) 220 V

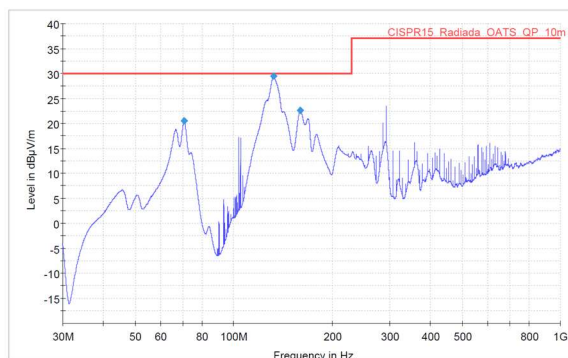
Figura 74 – Amostra 06 – 6500 K.

(a) 127 V

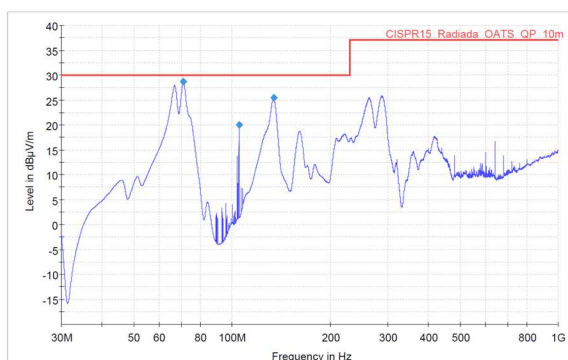
Figura 75 – Amostra 07 – 2700 K.

(a) 127 V

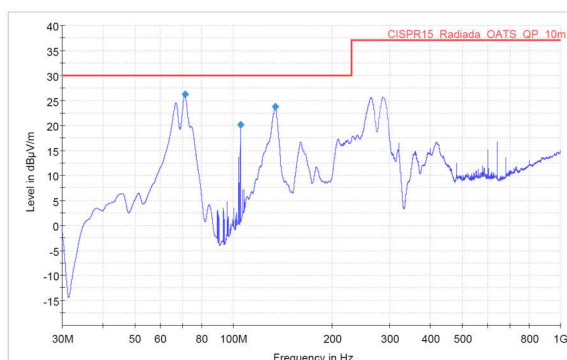
Figura 76 – Amostra 07 – 4000 K.



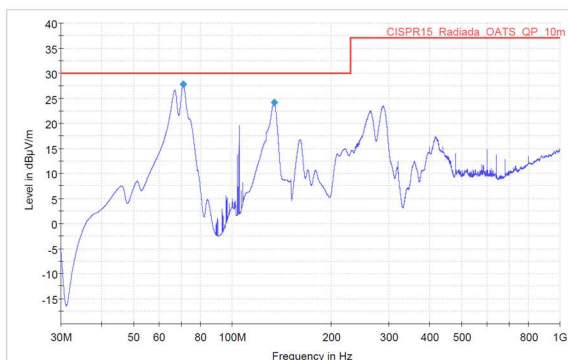
(a) 127 V

Figura 77 – Amostra 07 – 6500 K.

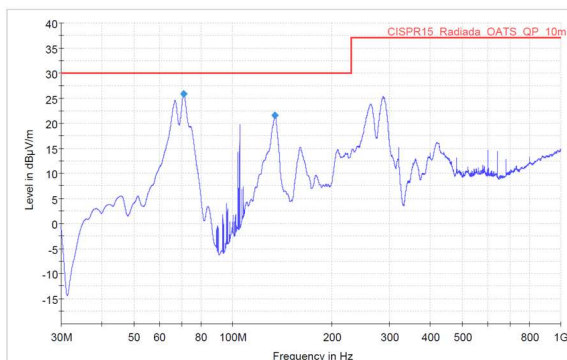
(a) 127 V



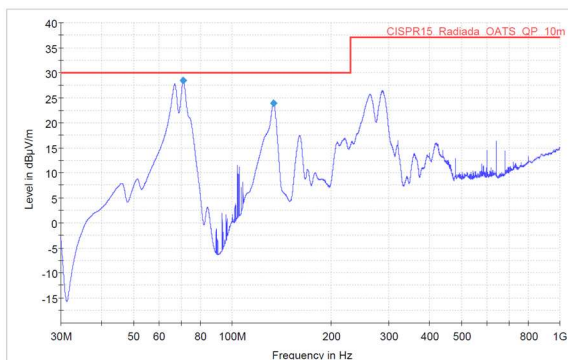
(b) 220 V

Figura 78 – Amostra 08 – 2700 K.

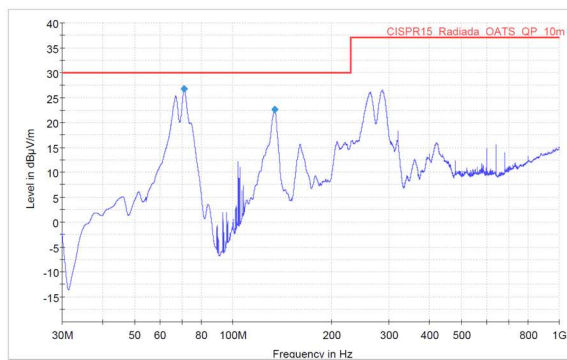
(a) 127 V



(b) 220 V

Figura 79 – Amostra 08 – 4000 K.

(a) 127 V



(b) 220 V

Figura 80 – Amostra 08 – 6500 K.

Apêndice C – Gráficos dos ensaios de EMC conforme CISPR 32

C.1 Medições das tensões de perturbação em terminais de alimentação

As Figuras de 81 a 100 apresentam os gráficos das medições das tensões de perturbação em terminais de alimentação das amostras, onde as linhas vermelha e rosa representam os limites da norma [26] e as linhas azuis e verdes, os pontos medidos.

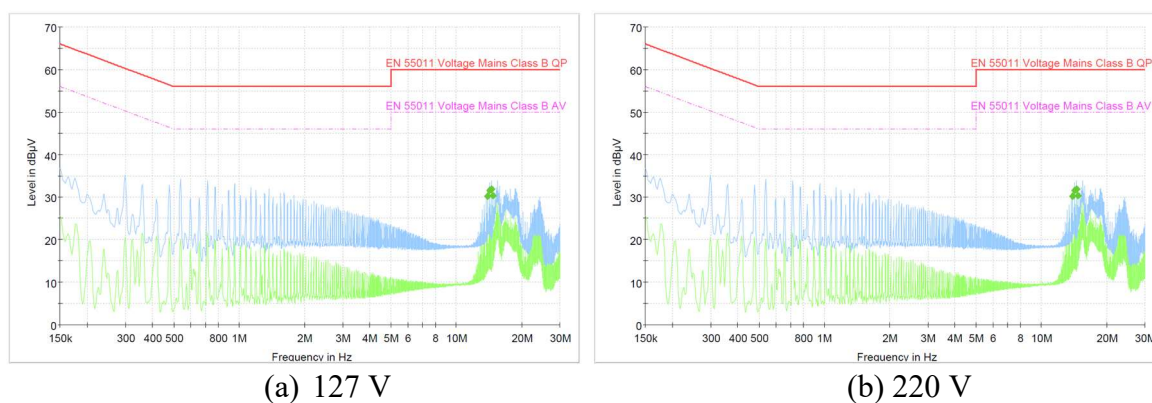


Figura 81 – Amostra 01 – 2700 K.

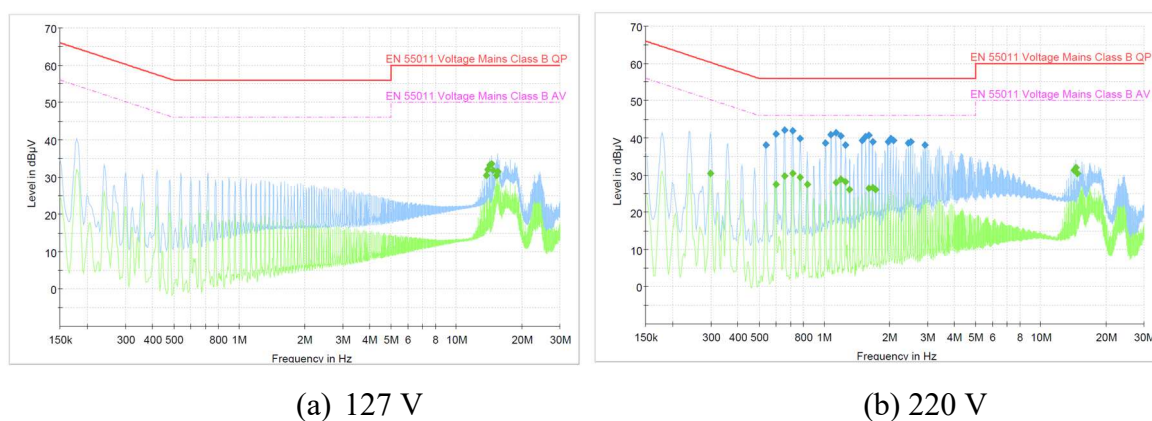
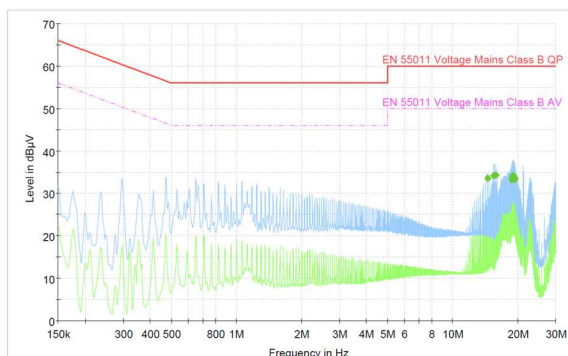
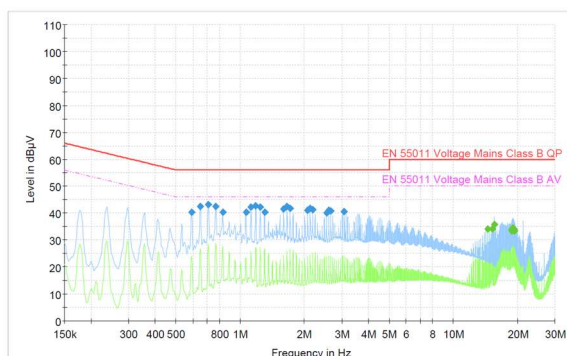


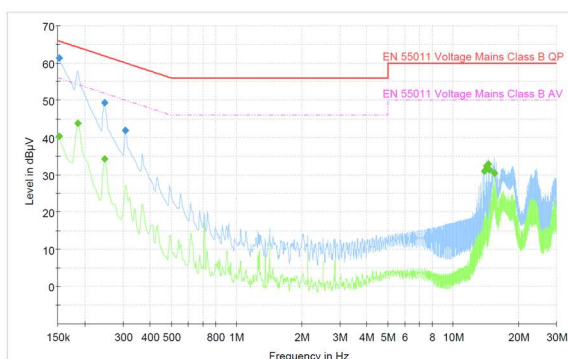
Figura 82 – Amostra 01 – 4000 K.



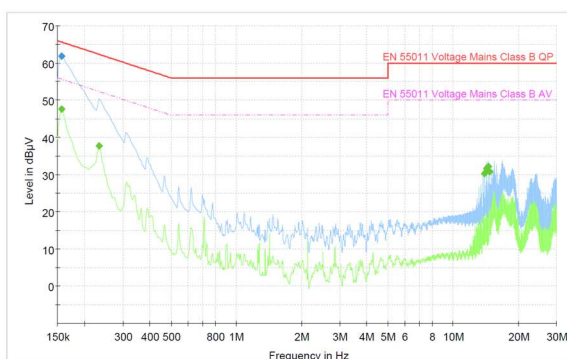
(a) 127 V



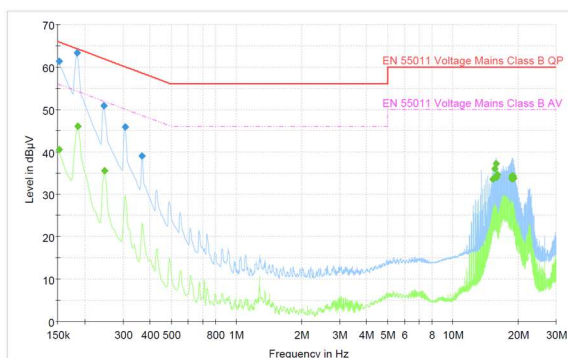
(b) 220 V

Figura 83 – Amostra 01 – 6500 K.

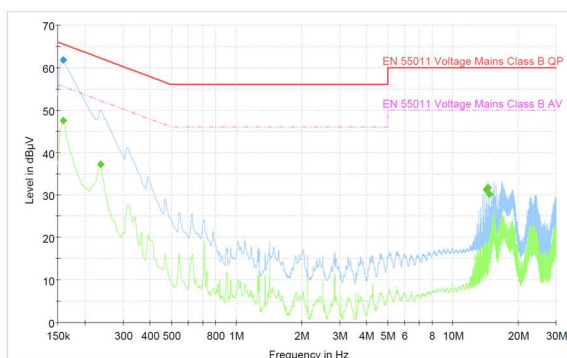
(a) 127 V



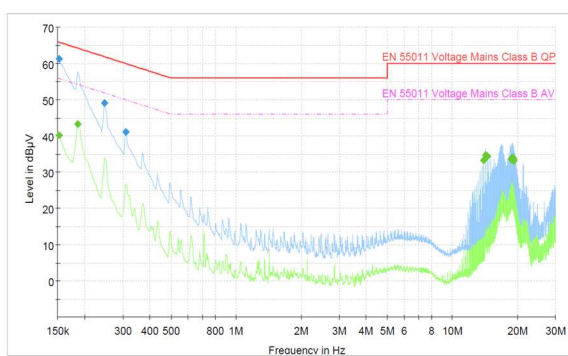
(b) 220 V

Figura 84 – Amostra 02 – 2700 K.

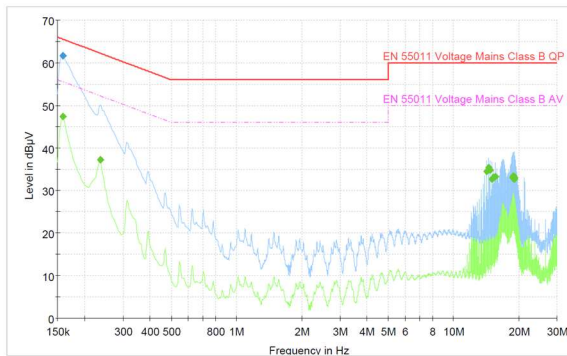
(a) 127 V



(b) 220 V

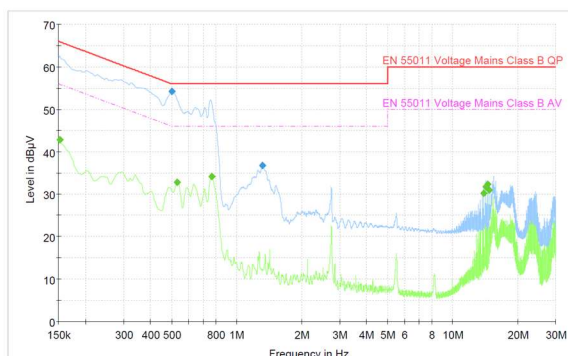
Figura 85 – Amostra 02 – 4000 K.

(a) 127 V

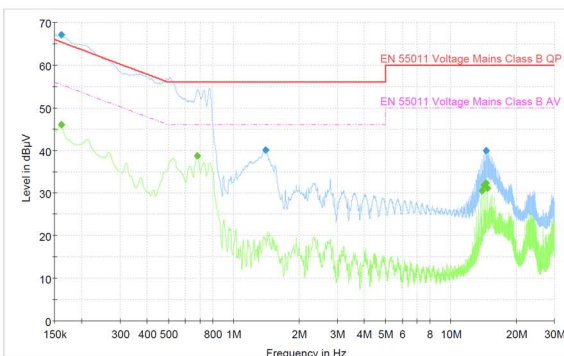


(b) 220 V

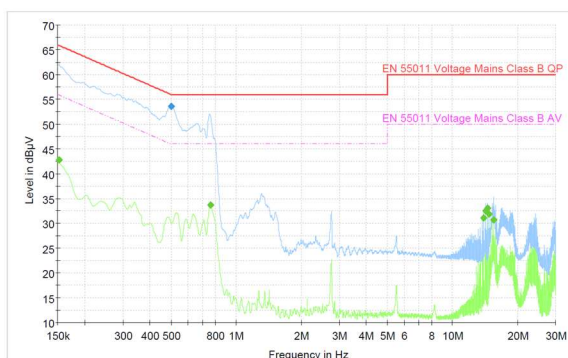
Figura 86 – Amostra 02 – 6500 K.



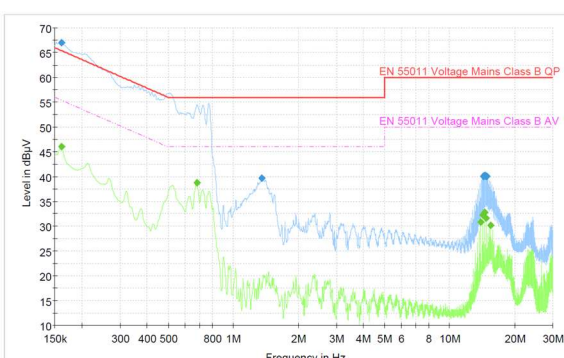
(a) 127 V



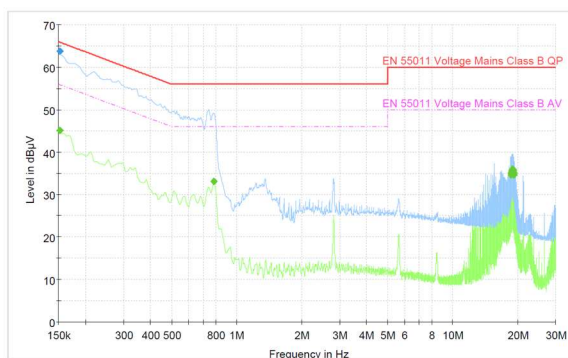
(b) 220 V

Figura 87 – Amostra 03 – 2700 K.

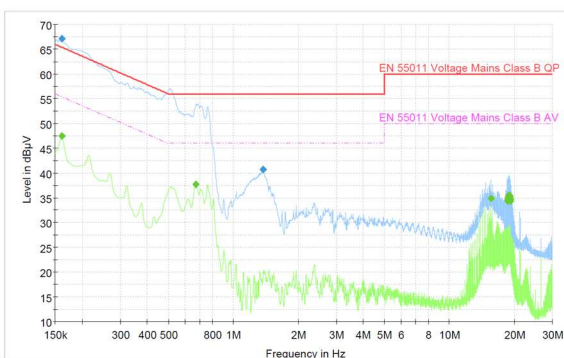
(a) 127 V



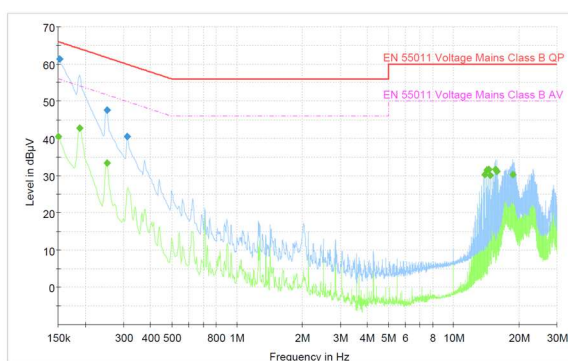
(b) 220 V

Figura 88 – Amostra 03 – 4000 K.

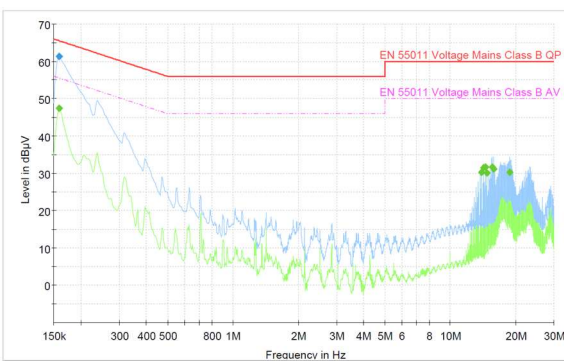
(a) 127 V



(b) 220 V

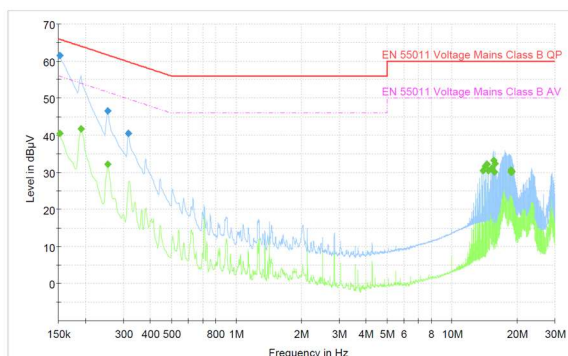
Figura 89 – Amostra 03 – 6500 K.

(a) 127 V

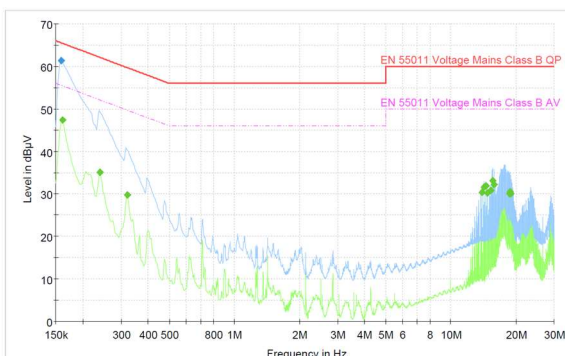


(b) 220 V

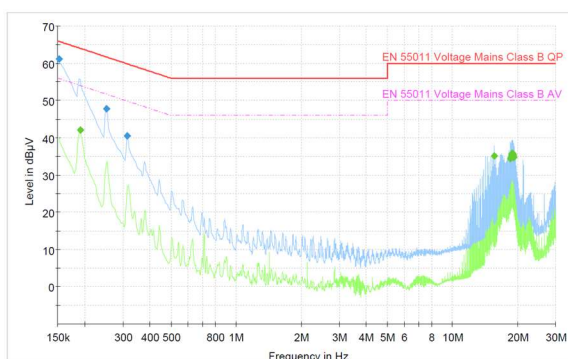
Figura 90 – Amostra 04 – 2700 K.



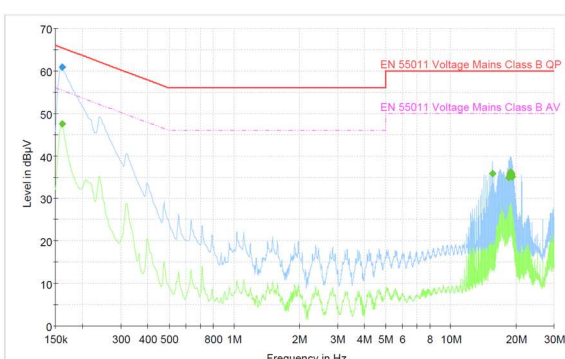
(a) 127 V



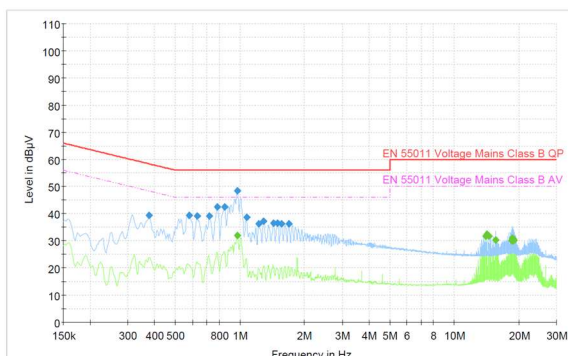
(b) 220 V

Figura 91 – Amostra 04 – 4000 K.

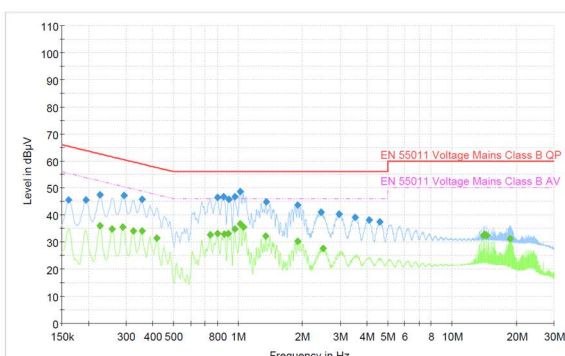
(a) 127 V



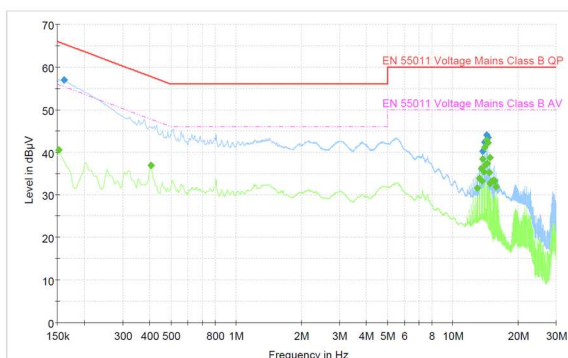
(b) 220 V

Figura 92 – Amostra 04 – 6500 K.

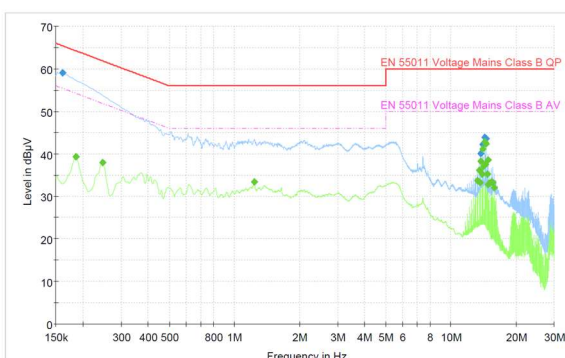
(a) 127 V



(b) 220 V

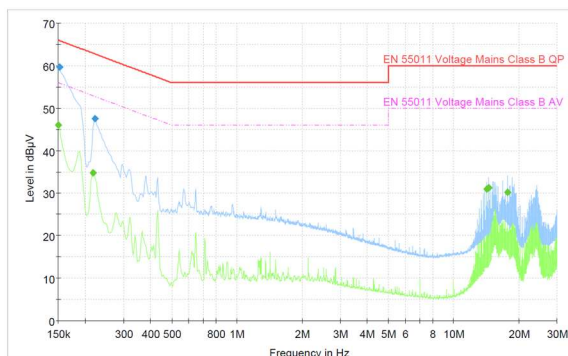
Figura 93 – Amostra 05 – 2700 K.

(a) 127 V

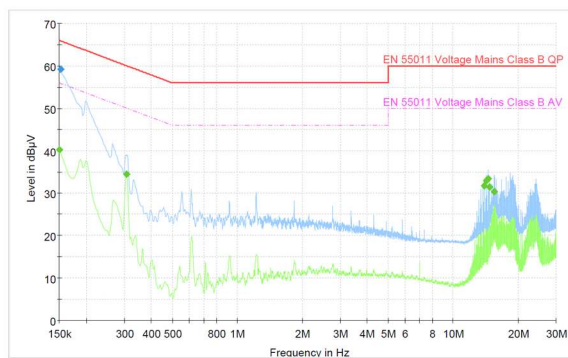


(b) 220 V

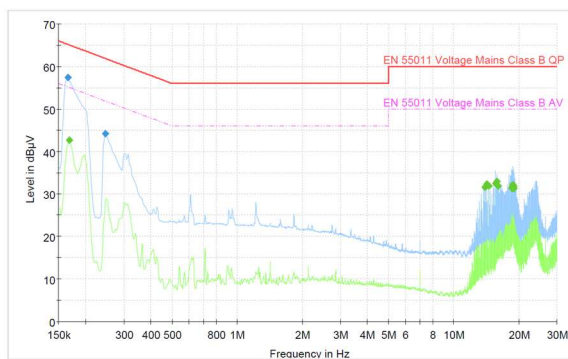
Figura 94 – Amostra 06 – 6500 K.



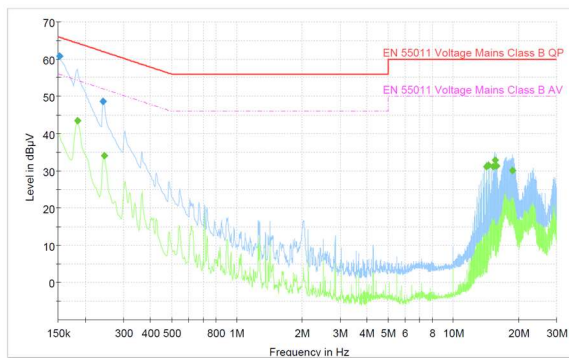
(a) 127 V

Figura 95 – Amostra 07 – 2700 K.

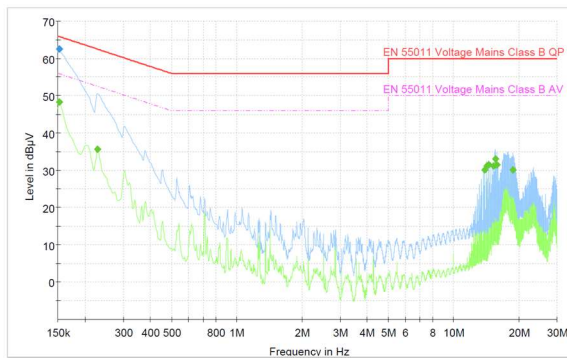
(a) 127 V

Figura 96 – Amostra 07 – 4000 K.

(a) 127 V

Figura 97 – Amostra 07 – 6500 K.

(a) 127 V



(b) 220 V

Figura 98 – Amostra 08 – 2700 K.

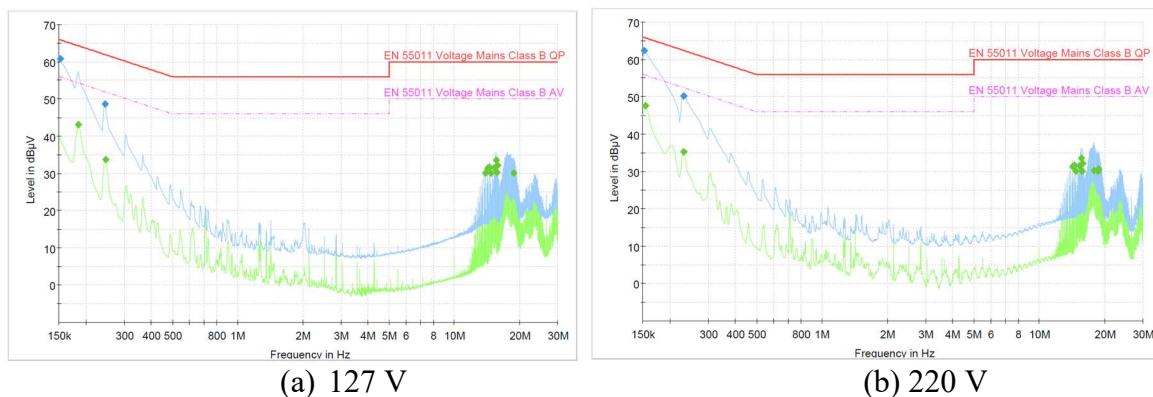


Figura 99 – Amostra 08 – 4000 K.

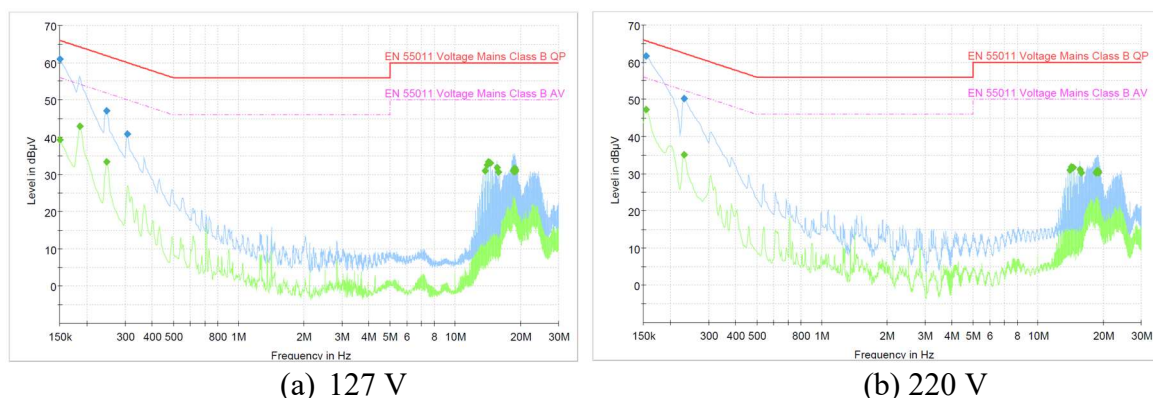


Figura 100 – Amostra 08 – 6500 K.

C.2 Medições de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico

As Figuras de 101 a 120 apresentam os gráficos das medições de perturbações eletromagnéticas radiadas – Campo elétrico, onde a linha vermelha representa os limites da norma [26] e a linha azul, os pontos medidos.

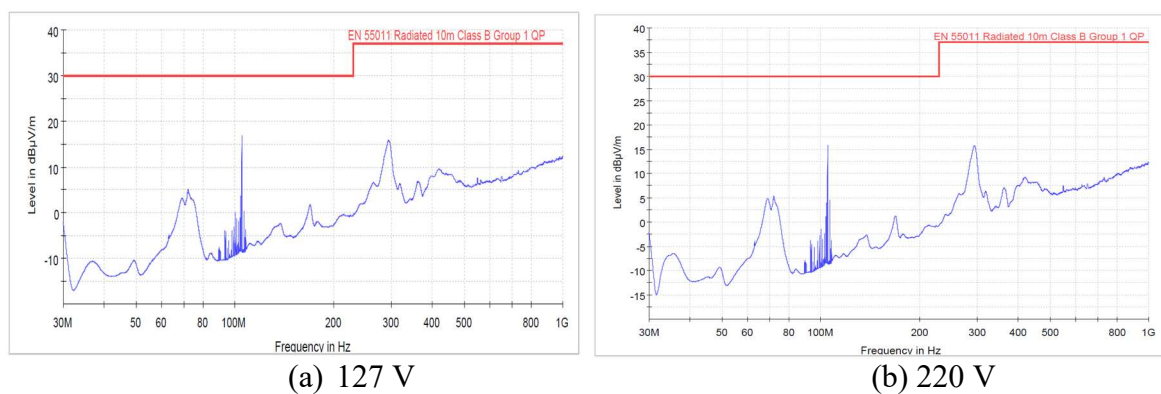
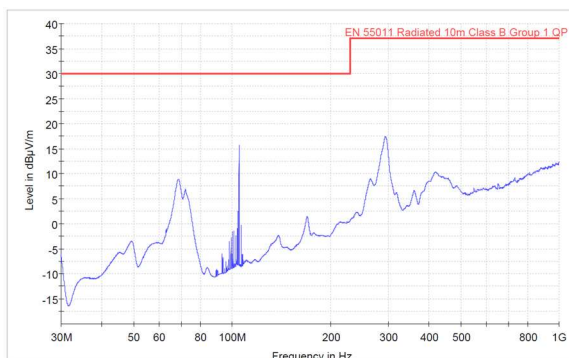
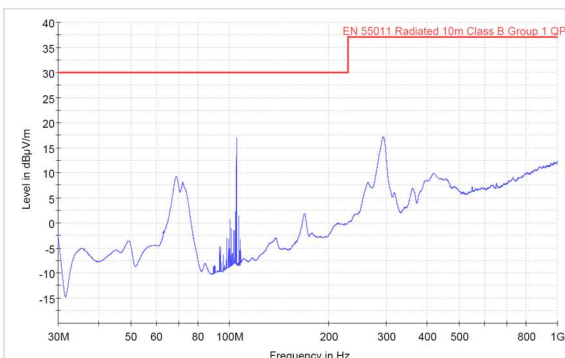


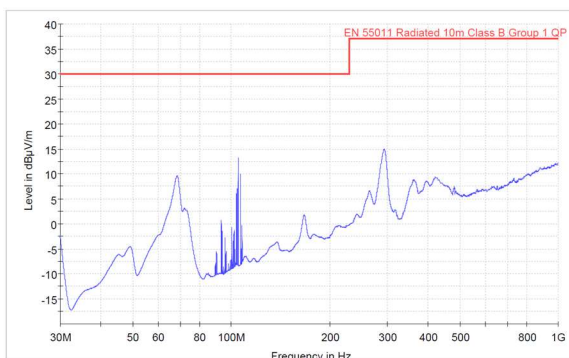
Figura 101 – Amostra 01 – 2700 K.



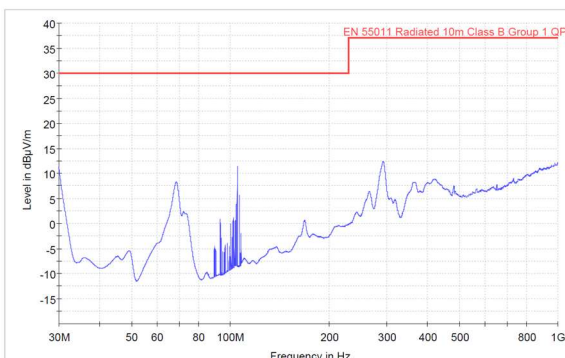
(a) 127 V



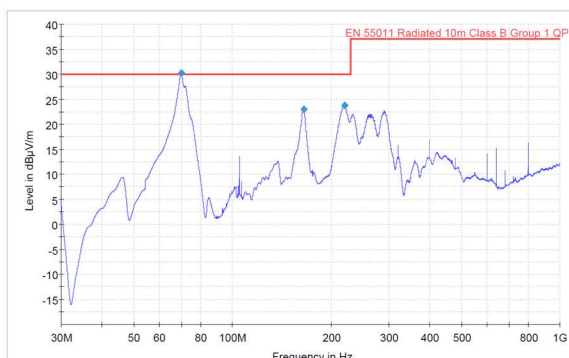
(b) 220 V

Figura 102 – Amostra 01 – 4000 K.

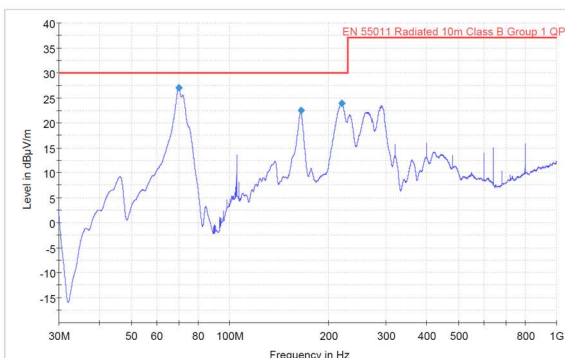
(a) 127 V



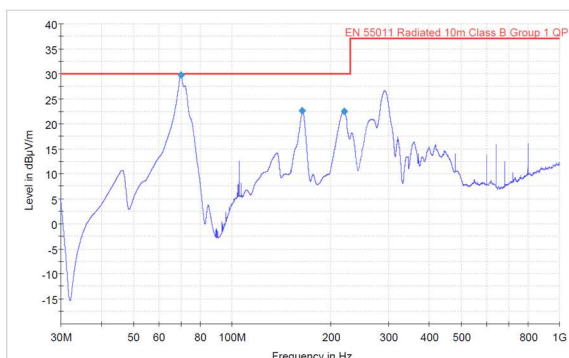
(b) 220 V

Figura 103 – Amostra 01 – 6500 K.

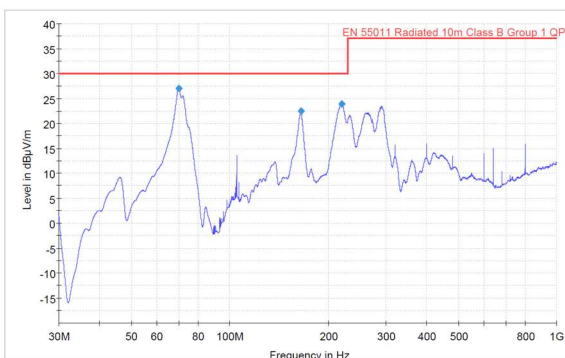
(a) 127 V



(b) 220 V

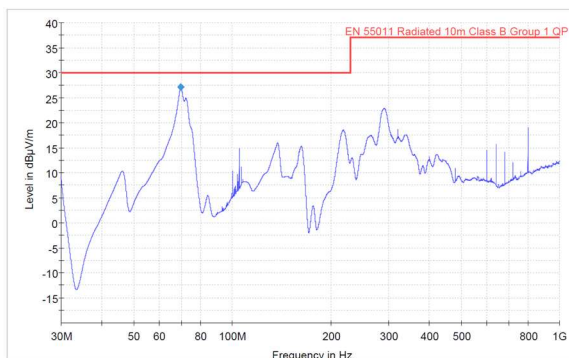
Figura 104 – Amostra 02 – 2700 K.

(a) 127 V

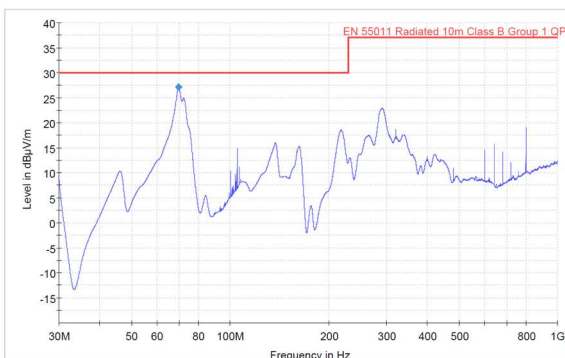


(b) 220 V

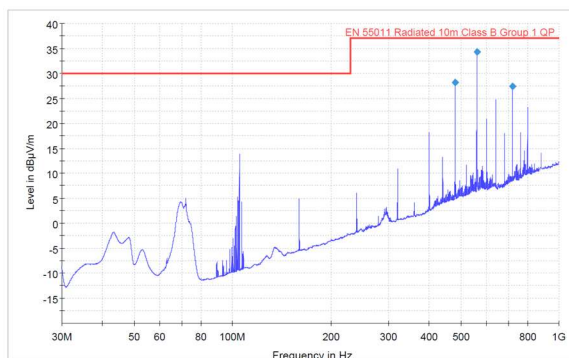
Figura 105 – Amostra 02 – 4000 K.



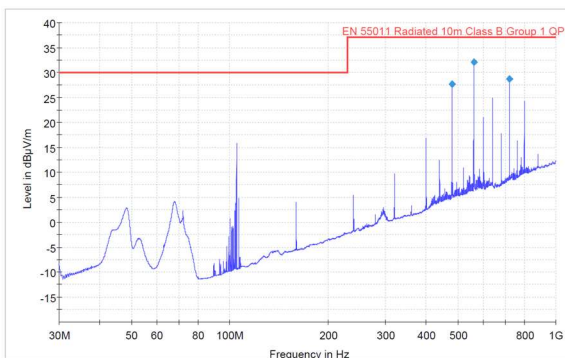
(a) 127 V



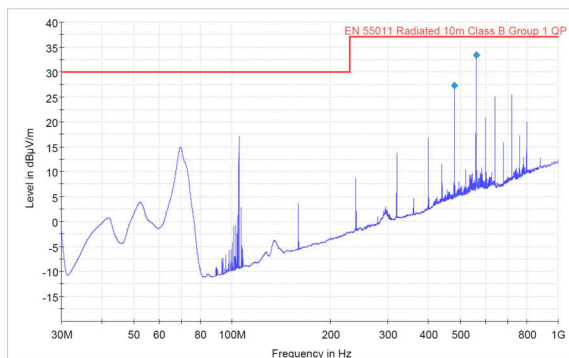
(b) 220 V

Figura 106 – Amostra 02 – 6500 K.

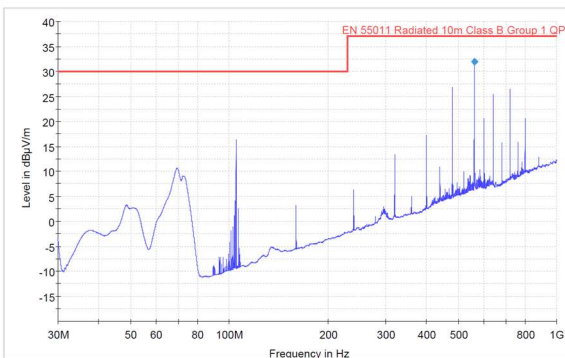
(a) 127 V



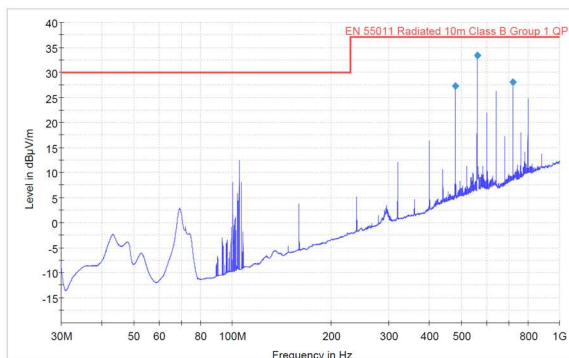
(b) 220 V

Figura 107 – Amostra 03 – 2700 K.

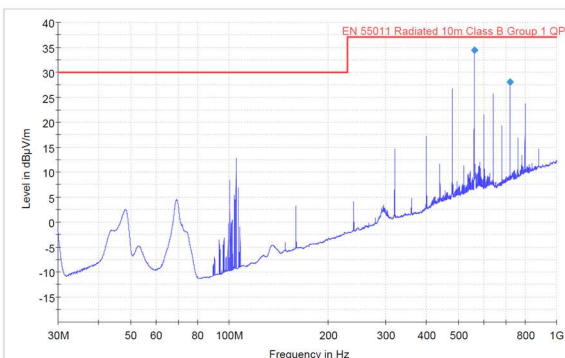
(a) 127 V



(b) 220 V

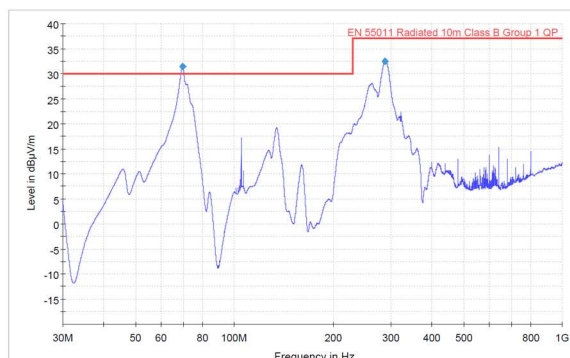
Figura 108 – Amostra 03 – 4000 K.

(a) 127 V

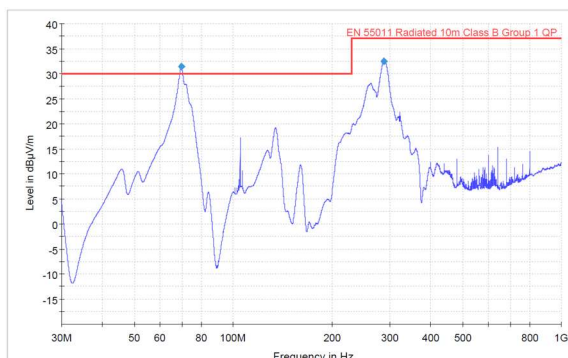


(b) 220 V

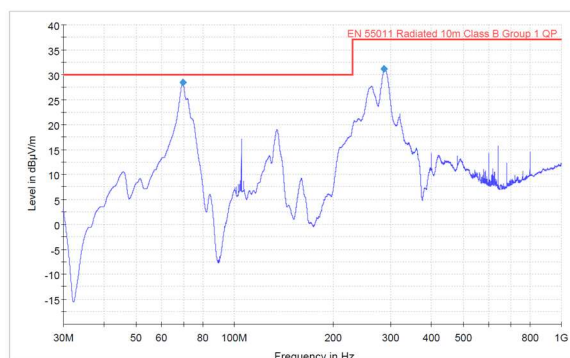
Figura 109 – Amostra 03 – 6500 K.



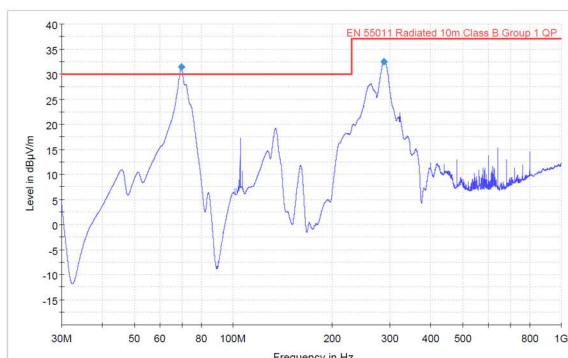
(a) 127 V



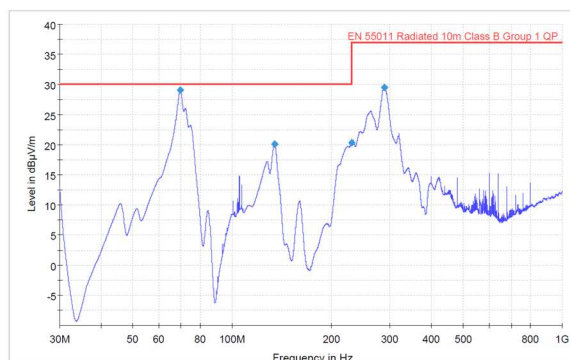
(b) 220 V

Figura 110 – Amostra 04 – 2700 K.

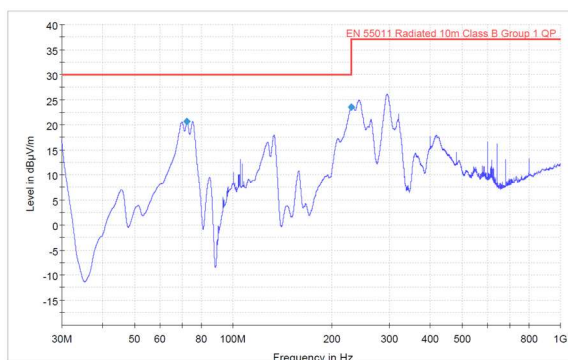
(a) 127 V



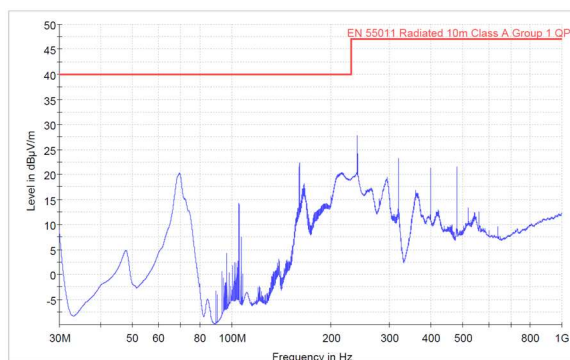
(b) 220 V

Figura 111 – Amostra 04 – 4000 K.

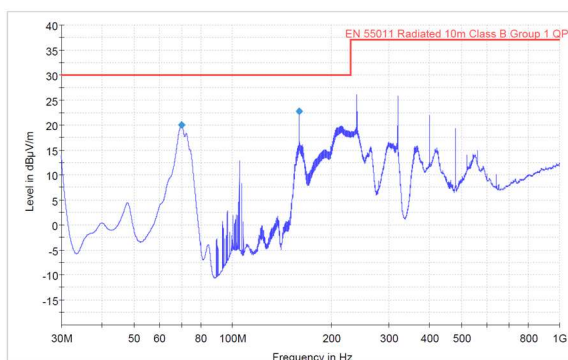
(a) 127 V



(b) 220 V

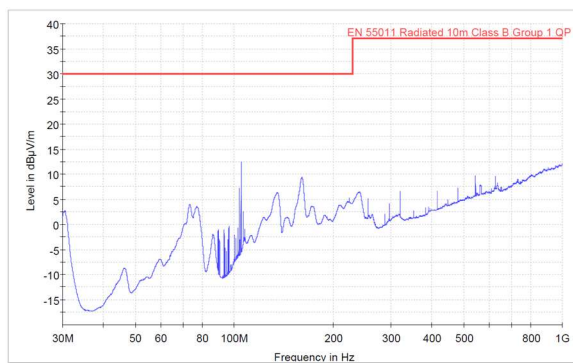
Figura 112 – Amostra 04 – 6500 K.

(a) 127 V

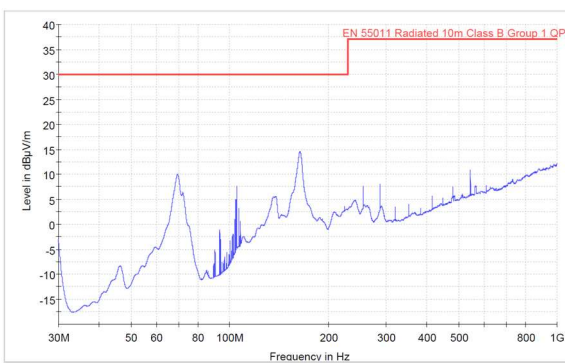


(b) 220 V

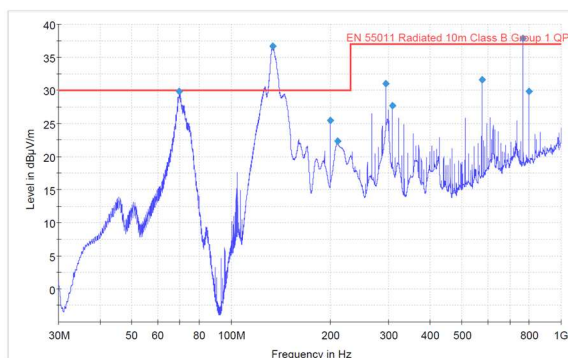
Figura 113 – Amostra 05 – 2700 K.



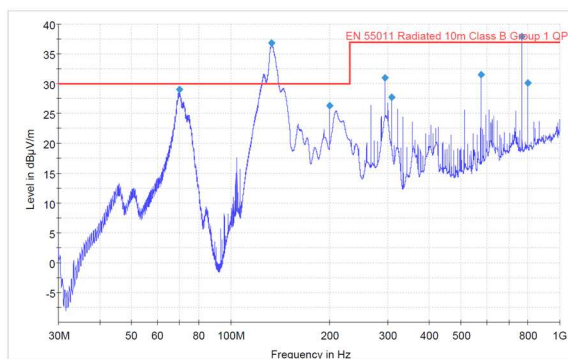
(a) 127 V



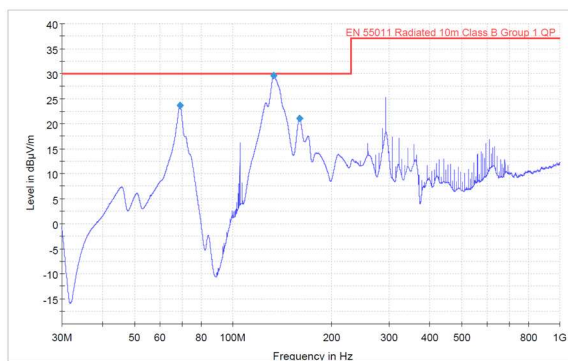
(b) 220 V

Figura 114 – Amostra 06 – 6500 K.

(a) 127 V

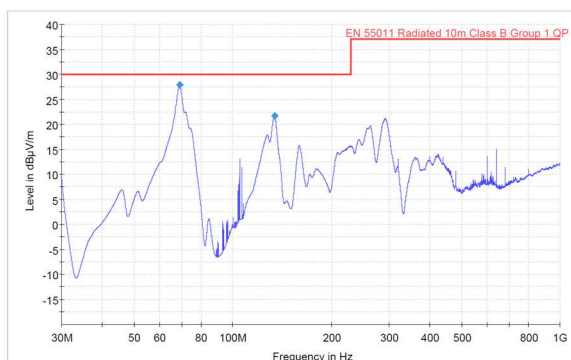
Figura 115 – Amostra 07 – 2700 K.

(b) 127 V

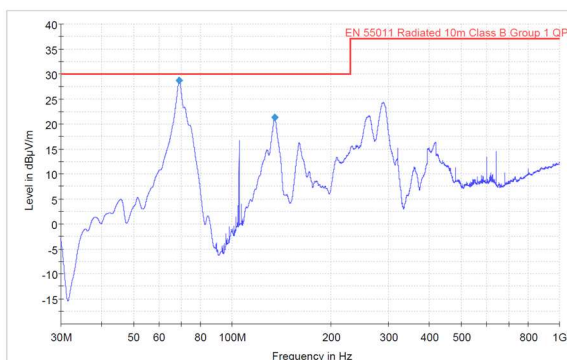
Figura 116 – Amostra 07 – 4000 K.

(a) 127 V

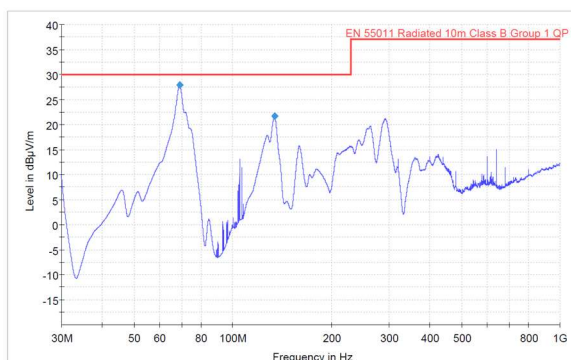
Figura 117 – Amostra 07 – 6500 K.



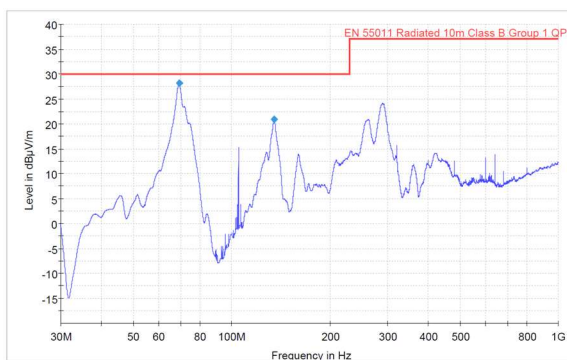
(a) 127 V



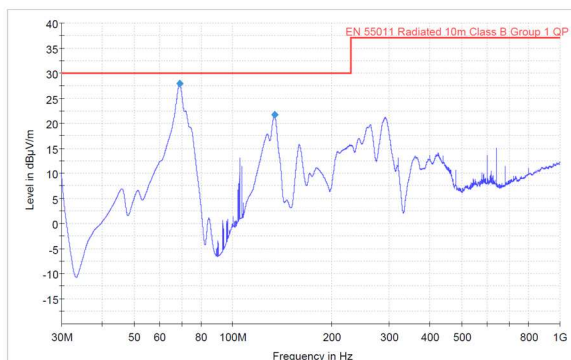
(b) 220 V

Figura 118 – Amostra 08 – 2700 K.

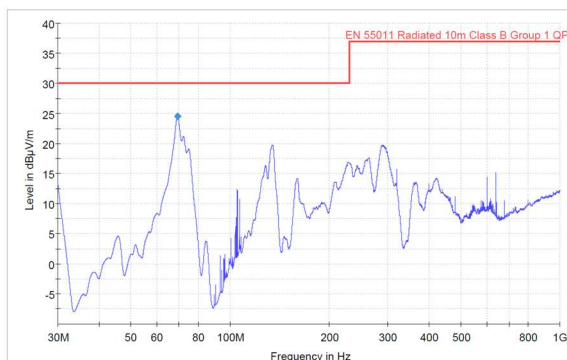
(a) 127 V



(b) 220 V

Figura 119 – Amostra 08 – 4000 K.

(a) 127 V



(b) 220 V

Figura 120 – Amostra 08 – 6500 K.