

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RENATO VALLERINI BARBOSA

LEONARDO PEREIRA DUTRA

ESTUDO SOBRE REDES DE ESTABILIZAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE LINHA

JATAÍ - GO

2024



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Renato Vallerini Barbosa

Matrícula: 20131020040356

Título do Trabalho: ESTUDO SOBRE REDES DE ESTABILIZAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE LINHA.

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jataí, 17/11/2024.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Leonardo Pereira Dutra

Matrícula: 20141020040019

Título do Trabalho: ESTUDO SOBRE REDES DE ESTABILIZAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE LINHA.

Autorização - Marque uma das opções

1. (☒) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. (☐) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. (☐) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- (☐) O documento está sujeito a registro de patente.
(☐) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
(☐) Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jatáí _____, 17 / 11 / 2024.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

RENATO VALLERINI BARBOSA

LEONARDO PEREIRA DUTRA

ESTUDO SOBRE REDES DE ESTABILIZAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE LINHA

Trabalho de Conclusão de Curso sob orientação do professor Me. Fernando Nunes Marques, submetido ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) – Câmpus Jataí como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

JATAÍ - GO

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Barbosa, Renato Vallerini.

Estudo sobre redes de estabilização de impedância de linha [manuscrito] / Renato Vallerini Barbosa; Leonardo Pereira Dutra. - Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2024.

72 f.; il.

Orientador: Prof. Me. Fernando Nunes Marques.
Bibliografias.

1. Aferições de interferências. 2. Compatibilidade eletromagnética. 3. Normas técnicas. 4. Redes de estabilização de impedância de linha. I. Dutra, Leonardo Pereira. II. Marques, Fernando Nunes. III. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

RENATO VALLERINI BARBOSA

LEONARDO PEREIRA DUTRA

ESTUDO SOBRE REDES DE ESTABILIZAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE LINHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Monografia defendida e aprovada, em 30 de outubro de 2024, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Fernando Nunes Marques
Presidente da banca / Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Jataí

Prof. Dr. José Antônio Lambert
Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Jataí

Prof. Dr. Marcelo Semensato
Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Jataí

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcelo Semensato**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 13/11/2024 18:42:52.
- **Jose Antonio Lambert**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 13/11/2024 18:25:28.
- **Fernando Nunes Marques**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 13/11/2024 17:47:23.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 22/10/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 579119

Código de Autenticação: 8e89878272



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Av. Presidente Juscelino Kubitschek,, 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3514-9579 (ramal: 9579)

AGRADECIMENTOS DE LEONARDO P. DUTRA

Primeiramente todos os meus agradecimentos são a Deus por ter me suportado em cada dificuldade que tive pelo caminho do curso, desde os momentos de felicidade até nos momentos de extremo cansaço, onde desafiei meus limites de forma extrema, onde a maioria acreditava que não aguentaria, porém no fim de tudo consegui passar por todas as dificuldades que surgiram.

Em seguida os agradecimentos são aos meus maiores apoiadores em toda a vida, meus pais, que estiveram comigo em todo o trajeto, as vezes discordando, mas ainda sim acreditando e compartilhando comigo a felicidade a cada conquista.

Gostaria em seguida de agradecer aos colegas que fizeram diferença nesta caminhada, primeiramente ao meu companheiro de trabalho de conclusão de curso Renato Vallerini Barbosa pelo companheirismo em todo este trajeto, entretanto tive outros colegas que fizeram parte desta jornada, seja estudando nas madrugadas ou iniciando a aplicação de nossos conhecimentos adquiridos na graduação no campo de execução de trabalhos elétricos.

É importante frisar também os agradecimentos aos professores que me motivaram, que acreditaram em mim, me desafiaram a buscar mais conhecimento, que me suportaram em cada vez que fui monitor ou na execução do projeto de iniciação científica que tive o prazer de participar.

Obrigado professor Fernando pelo suporte e atenção dedicados a este trabalho de conclusão de curso, por nos possibilitar a oportunidade deste desenvolvimento contigo, por nos ajudar a estar um passo a mais próximo da finalização desta etapa.

Todo o trajeto foi percorrido com afinho, momentos mais exaustivos e de mais debilidade ocorreram como com qualquer pessoa, porém as pequenas vitórias somadas com a experiência adquirida em cada perda fizeram todo o caminho valer a pena.

AGRADECIMENTOS DE RENATO V. BARBOSA

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Mestre Fernando Nunes Marques, por sua paciência inabalável e disposição para corrigir e oferecer novas ideias ao trabalho. Sua orientação foi essencial para a concretização deste estudo, e sou profundamente grato por sua dedicação e apoio.

Aos meus pais, ofereço meu mais sincero agradecimento por todo o apoio que me deram ao longo desta jornada. Graças a vocês, pude me dedicar integralmente aos meus estudos, sabendo que sempre estavam ao meu lado, apoiando-me incondicionalmente.

Em especial, agradeço à minha esposa, Silmara Silva Cardoso. Sua paciência, compreensão e amor foram fundamentais para que eu pudesse superar todas as tribulações deste período. Sei que deixar de sair, não poder dar a atenção que você merecia, e tantas outras renúncias não foram fáceis. Agradeço do fundo do meu coração por todo o carinho e apoio que você me ofereceu.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todos amigos que, direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada um de vocês desempenhou um papel importante na conclusão deste TCC, e sou eternamente grato por isso.

“O verdadeiro conhecimento não é uma exaltação do amor-próprio que busca reinar sobre o mundo a fim de subjugá-lo, mas uma abdicação do amor-próprio que se inclina diante do mundo com admiração e docilidade; o conhecimento é suficiente quando nos permite reconhecer nosso lugar no mundo e nele desempenhar nosso papel com simplicidade e discrição”

Louis Lavelle

RESUMO

Dada a importância de elevar o nível de compreensão dos testes e procedimentos que envolvem o projeto e fabricação para comercialização de equipamentos eletrônicos no mundo, sobretudo no Brasil, pesquisa-se sobre redes de estabilização de impedância de linha e os contextos aos quais esse dispositivo é utilizado, a fim de contribuir para a visibilidade e o melhor entendimento desse assunto no meio acadêmico nacional. Para tanto, é necessário compreender os conceitos de interferências e compatibilidade eletromagnéticas, examinar as principais normas relacionadas à compatibilidade eletromagnética, analisar as redes de estabilização de impedância de linha (LISN) e seus métodos de aferição de interferências eletromagnéticas de modo conduzido. Realiza-se, então, uma pesquisa teórica e prática com simulações computacionais utilizando o *software* LTspice envolvendo um projeto de fonte chaveada ao qual constata-se, com a base metodológica e científica ancorada, que a utilização de um filtro EMI torna a fonte chaveada adequada à norma CISPR 22, enquanto sem o filtro, ela não atende aos padrões.

Palavras-chaves: Aferições de Interferências. Compatibilidade Eletromagnética. Normas Técnicas. Redes de estabilização de impedância de linha.

ABSTRACT

Given the importance of enhancing the understanding of tests and procedures involved in the design and manufacturing for the commercialization of electronic equipment worldwide, especially in Brazil, research is conducted on line impedance stabilization networks (LISNs) and the contexts in which these devices are used, in order to contribute to the visibility and better understanding of this subject in the national academic environment. To this end, it is necessary to understand the concepts of electromagnetic interference and compatibility, examine the main standards related to electromagnetic compatibility, analyze line impedance stabilization networks (LISNs) and their methods of measuring conducted electromagnetic interference. A theoretical and practical research is carried out with computational simulations using the LTspice software involving a switched-mode power supply project, which finds, with the anchored methodological and scientific basis, that the use of an EMI filter makes the switched-mode power supply compliant with the CISPR 22 standard, while without the filter, it does not meet the standards.

Keywords: Electromagnetic Compatibility. Interference Control. Line Impedance Stabilization Networks. Technical Standards.

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AVG – Average (Média)

CEM – Compatibilidade Eletromagnética

CE – Conformidade Europeia

CISPR – Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (Comitê Internacional Especial de Interferências de Rádio)

FCC – Federal Communications Commission (Comissão Federal de Comunicações)

FC – Sigla utilizada para certificação dos padrões da FCC

FEM – Método dos Elementos Finitos

FFT – Transformada de Fourier

GPS – Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)

IEM – Interferência Eletromagnética

IEC – International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)

ISM – Industrial, Scientific, and Medical Equipment (Equipamento Industrial, Científico e Médico)

LISN – Line Impedance Stabilization Network (Rede de Estabilização de Impedância de Linha)

NBR – Norma Brasileira

QP – Quasi-Peak (Quase Pico)

RF – Radiofrequência

TR – Technical Report (Relatório Técnico)

TI – Tecnologia da Informação

UIT – União Internacional de Telecomunicações

VDE – Verband Deutscher Elektrotechniker (Associação dos Engenheiros Eletricistas Alemães)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes e agentes do sistema interligado de energia elétrica.	14
Figura 2 - Acoplamento por condução.	19
Figura 3 - Acoplamento capacitivo.....	19
Figura 4 - Acoplamento indutivo.....	20
Figura 5 - Acoplamento por Radiação.....	21
Figura 6 - Marcação FC e CE.	31
Figura 7 - Certificação de um dispositivo.....	32
Figura 8 - Foto de um aparelho LISN de 16A.	33
Figura 9 - Diagrama elétrico simplificado de uma LISN.	35
Figura 10 - Gráfico de aferição de linha de impedância estabilizada.....	38
Figura 11 - Circuito para definição do uso do Decibel.....	42
Figura 12 - Configuração típica do teste de emissão conduzida.....	44
Figura 13 - Disposição dos equipamentos para teste de emissão conduzida.....	44
Figura 14 – Analisador de espectro ROHDE&SCHWARZ 9kHz-3GHz.	45
Figura 15 - Cabo coaxial pontas para conexões.	46
Figura 16 - Atenuador ESH3-Z2	46
Figura 17 – Exemplar de tela de um analisador de espectro.	47
Figura 18 - Limites aplicáveis a equipamentos classe B da norma CISPR 22.	48
Figura 19 - Comparativo estrutural entre fonte chaveada e linear.....	51
Figura 20 - Exemplar de uma fonte chaveada.	52
Figura 21 - Diferença entre um sinal elétrico limpo (A) e com ruído (B).....	53
Figura 22 - Exemplar de um módulo de filtro IEM.....	54
Figura 23 - Princípio de funcionamento de filtros IEM.....	54
Figura 24 - Circuito simulado de uma rede de estabilização de impedância de linha..	55
Figura 25 - Sinal de impedância da LISN simulada sob o espectro de frequência.....	56
Figura 26 - Circuito de simulação de um conversor boost (fonte chaveada).	57
Figura 27 - Sinal de tensão da rede sem o acoplamento da fonte chaveada.....	59
Figura 28 - Sinal de tensão da rede conectada à fonte chaveada (sem filtro IEM)	59
Figura 29 - Ruídos no sinal de rede provenientes de fonte chaveada.....	59
Figura 30 - Circuito de simulação do filtro IEM	60
Figura 31 - Limite imposto pela norma CISPR 22 para equipamentos classe B.....	61
Figura 32 - Circuito de teste sob simulação sem uso de filtro IEM.....	62

Figura 33 - Sinal ruidoso da fonte chaveada sem o filtro IEM (tensão x tempo).....	63
Figura 34 - Aferição dos ruídos provenientes da fonte chaveada sem filtro IEM.	63
Figura 35 - Circuito de teste sob simulação com uso de filtro IEM.	64
Figura 36 - Sinal ruidoso da fonte chaveada com o filtro IEM (tensão x tempo).	64
Figura 37 - Aferição dos ruídos provenientes da fonte chaveada com filtro IEM.....	65

SUMÁRIO

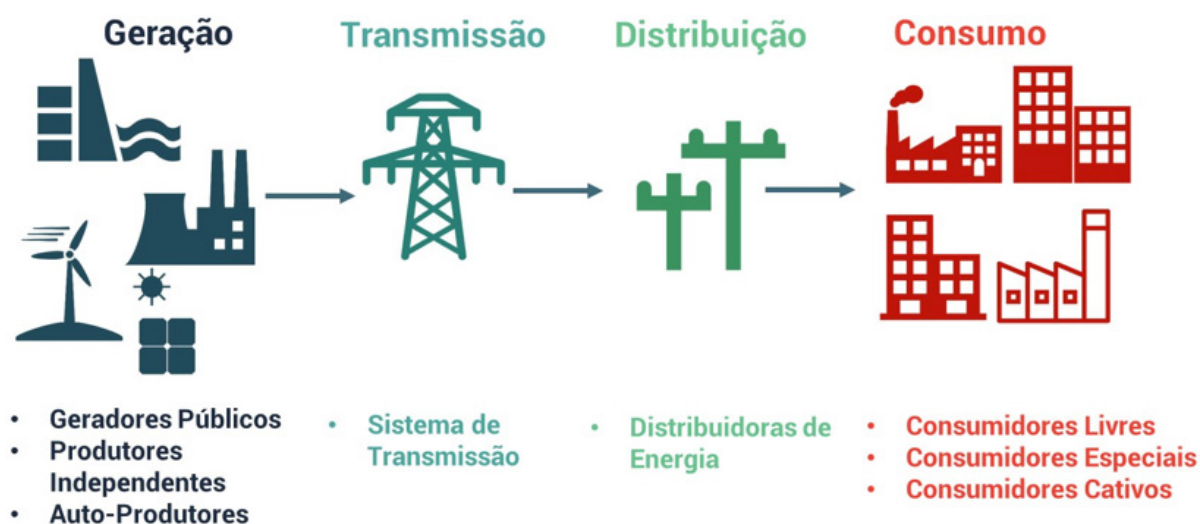
1	INTRODUÇÃO	14
2	INTERFERÊNCIA E COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA	17
2.1	INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA (IEM)	17
2.1.1	<i>Modos de acoplamentos e tipos de interferências eletromagnéticas</i>	<i>18</i>
2.2	COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (CEM)	21
2.2.1	<i>A CEM e sua relação com a economia.....</i>	<i>23</i>
3	NORMATIZAÇÕES	25
3.1	NORMAS INTERNACIONAIS DE CEM.....	26
3.2	NORMAS BRASILEIRAS DE CEM	29
3.3	CERTIFICAÇÃO	30
4	REDES DE ESTABILIZAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE LINHA (LISN)	33
4.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UMA LISN.....	34
4.2	APRESENTAÇÃO DOS DIVERSOS TIPOS DE LISN E OUTRAS CONSIDERAÇÕES	38
5	ANÁLISE DE IEM UTILIZANDO REDES DE ESTABILIZAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE LINHA	40
5.1	GRANDEZAS E UNIDADES DE MEDIDA DAS IEM	40
5.2	CONFIGURAÇÃO PARA ENSAIOS DE IEM CONDUZIDAS	43
5.3	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	46
6	EXEMPLO DE AFERIÇÕES EM SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	50
6.1	PRINCÍPIOS TEÓRICOS.....	51
6.1.1	<i>Fontes Chaveadas.....</i>	<i>51</i>
6.1.2	<i>Filtro IEM.....</i>	<i>53</i>
6.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	55
6.2.1	<i>Simulação da Linha de impedância estabilizada (LISN).....</i>	<i>55</i>
6.2.2	<i>Simulação da fonte chaveada</i>	<i>56</i>
6.2.3	<i>Simulação do filtro IEM.....</i>	<i>60</i>
6.3	SIMULAÇÃO DE AFERIÇÕES DE IEM.....	61
6.4	RESULTADOS DOS TESTES EM SIMULAÇÃO.....	62
6.4.1	<i>Aferição de ruídos sem filtro IEM acoplado</i>	<i>62</i>
6.4.2	<i>Aferição de ruídos com acoplamento de filtro IEM.....</i>	<i>64</i>
7	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	66

1 INTRODUÇÃO

Vivemos hoje em uma sociedade cada vez mais tecnológica, com uma grande dependência de energia elétrica para manter nossos níveis atuais de conforto e estabilidade social. Praticamente em todos os setores, como por exemplo na agricultura, saúde, comércio, residências, indústrias e educação utilizamos equipamentos eletroeletrônicos e este cenário, ao longo do tempo aumenta de forma exponencial não somente em quantidade de aparelhos, mas sobretudo em interconectividade entre os mesmos e os seres humanos.

Devido essencial valor que a energia elétrica tem em nossas vidas o cuidado com sua qualidade é crucial para manter os macros e micros sistemas elétricos funcionando corretamente e de maneira harmoniosa. São diversos os problemas que podem afetar a qualidade da energia elétrica de modo geral, contudo, a responsabilidade, intrínseca às suas partes, é de todos os agentes do sistema interligado de energia elétrica (vide Figura 1), desde os agentes da geração de energia até os seus consumidores. Neste sentido é de suma importância que todos os responsáveis tenham consciência de seu respectivo papel no processo de avaliação e resolução de problemas quando se trata de qualidade da energia elétrica (MARTINHO, 2016).

Figura 1 - Partes e agentes do sistema interligado de energia elétrica.



Fonte: Eletric Service (2022).

Dentre todos os problemas relacionados à qualidade da energia elétrica, este trabalho transcorrerá, especificamente, sobre o tema da compatibilidade eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility*), concentrando o estudo nas interferências eletromagnéticas emitidas por condução e não radiadas. Esta área de estudo da engenharia elétrica está presente

em todos os setores do sistema interligado e é crucial de ser considerada pelos projetistas e fabricantes de equipamentos e sistemas alimentados por energia elétrica.

Na história da engenharia elétrica, a poluição eletromagnética não foi uma preocupação primária; antes de se atentarem aos efeitos negativos que os equipamentos eletroeletrônicos podiam gerar, estes foram desenvolvidos para suprir necessidades funcionais, porém, com o avanço da tecnologia foi constatado que vários equipamentos eletroeletrônicos podiam interferir em outros e/ou receber interferência do meio ambiente, de modo que equipamentos que funcionavam corretamente em um certo ambiente não funcionavam de forma adequada em outro. Existem vários exemplos, desde aqueles que causam pequenos desconfortos, como um celular, na primeira década dos anos 2000, onde ao receber uma chamada interferia em um aparelho de som próximo provocando um barulho indesejado, problemas que podem causar consideráveis prejuízos financeiros como sistemas automatizados de indústrias que deixam de operar corretamente e até problemas que podem pôr em risco a vida de pessoas como, por exemplo, marca-passos que param de funcionar quando expostos a interferências eletromagnéticas. Neste contexto, relativamente atual, surgiu o desenvolvimento do estudo da compatibilidade eletromagnética (DE LIZ, 1999).

No intuito de conter estes tipos de problemas e assim manter as perturbações eletromagnéticas limitadas a níveis aceitáveis de modo que os ambientes, aparelhos e sistemas elétricos comportem-se de maneira apropriada foram estabelecidas normas no mundo todo. Neste sentido, foram desenvolvidos e convencionados meios, métodos e aparelhos de aferição de interferências eletromagnéticas. Dentre todos eles, cabe como objetivo principal deste trabalho elucidar sobre o contexto técnico/teórico que envolve a utilização de redes de estabilização de impedância de linha, do inglês *Line Impedance Stabilization Network (LISN)*, que são instrumentos que foram criados com o propósito de aferir, de maneira padronizada, os níveis de intensidade de interferências eletromagnéticas de tipo conduzida que são produzidas por aparelhos eletroeletrônicos.

Como objetivo geral, o presente trabalho visa trazer ao leitor de como se faz importante a consideração por parte dos projetistas e fabricantes de aparelhos eletroeletrônicos o controle dos efeitos eletromagnéticos negativos de seus produtos; compondo de maneira logicamente organizada um material que engloba o conhecimento necessário e todo o processo de produção com normas vigentes para que adequem seus produtos à elas quando se trata de emissões do tipo conduzidas, ou seja, por meio de cabos de alimentação, entrada de sinais e terminais de terra para proteção e que serão aferidas metodologicamente por uma rede de estabilização de impedância de linha (LISN).

Para este fim, este documento será estruturado em capítulos que condizem juntamente com os objetivos específicos deste trabalho da seguinte maneira:

Após esta introdução, o capítulo 2 abordará pormenorizadamente os conceitos de interferências e compatibilidade eletromagnéticas, conceitos estes que são a essência e formam a base teórica ao qual os engenheiros eletricitas se apoiam para a compreensão dos problemas que estão relacionados.

O capítulo 3 transcorrerá a respeito das principais normas que surgiram a respeito dos assuntos que são tratados no capítulo 2, que dependendo do setor (militar, industrial, médico, residencial etc.) são mais ou menos rigorosas justamente pela gravidade ao qual tais adversidades podem acarretar.

O capítulo 4 será exclusivamente para se fazer compreender as redes de estabilização de impedância de linha, do porquê elas existem, como são utilizadas e para se registrar uma análise fundamental de seus componentes e configurações de seu circuito elétrico.

O capítulo 5 será destinado a descrição do processo de análise que são feitas através da utilização de uma rede de estabilização de impedância de linha (LISN), contemplando a descrição das variáveis que são observadas e como são observadas, do conceito de intensidade de interferência eletromagnéticas do tipo conduzidas e de todos os instrumentos auxiliares que são utilizados neste processo.

Para condensar toda a base teórica passada nos capítulos 1 ao 5, o capítulo 6 registrará a simulação, através do *software* gratuito de simulação de circuitos eletrônicos analógicos LTspice, da análise de interferências eletromagnéticas produzidas por uma fonte chaveada utilizando uma rede de estabilização de impedância de linha. Esta análise será feita de duas maneiras: a primeira sem o acoplamento de um filtro IEM (filtro de interferência eletromagnética) e a segunda com o filtro acoplado à fonte; de modo que assim se observe a adequação do equipamento eletroeletrônico às normas vigentes descritas no capítulo 3.

Por fim, o capítulo 7 será a conclusão deste trabalho, expondo as peculiaridades, acertos e dificuldades em transmitir seus objetivos e as possíveis continuidades que podem ser dadas a fim de complementar e gerar conteúdo/valor ao segmento de estudo em relação ao tema de compatibilidade e interferências eletromagnéticas.

2 INTERFERÊNCIA E COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

Inicialmente, este capítulo apresenta uma introdução à interferência eletromagnética (IEM), de maneira a explicar e exemplificar alguns fenômenos que podem dar origem às várias formas de IEM em variados sistemas e sobre diversos tipos de acoplamentos pelos quais a IEM se conecta, definindo-as em radiadas e conduzidas. Mais adiante, ao decorrer do capítulo, são descritos os conceitos de compatibilidade eletromagnética (CEM) considerando um estudo sobre as implicações econômicas que esta vem trazendo à indústria. Ademais, conceptualizará de modo breve e introdutório os ensaios que devem ser feitos no âmbito da compatibilidade eletromagnética.

2.1 Interferência eletromagnética (IEM)

A interferência eletromagnética refere-se ao fenômeno em que os sinais eletromagnéticos se sobrepõem, resultando em distorções, ruídos ou perda de qualidade do sinal. Ela ocorre quando há uma sobreposição indesejada de ondas eletromagnéticas provenientes de diferentes fontes, como dispositivos eletrônicos, equipamentos de comunicação, sistemas de energia elétrica, motores elétricos, relâmpagos e até mesmo o próprio ambiente radioelétrico. Essas fontes emitem sinais eletromagnéticos que podem interferir no funcionamento adequado de outros dispositivos ou sistemas (PAUL, 1992)

Abaixo estão alguns exemplos de interferências eletromagnéticas e seus efeitos:

Interferência em sistemas de áudio: se um dispositivo eletrônico emite interferência eletromagnética próxima a um sistema de áudio, pode ocorrer um ruído audível nos alto-falantes. Isso pode ser percebido como um chiado, zumbido ou estática, o que resulta em uma qualidade de áudio inferior (NETTO; KERTSCHER; PIMENTEL, 2017).

Interferência em redes Wi-Fi: quando há várias redes Wi-Fi operando em uma mesma área, pode ocorrer interferência eletromagnética. Isso pode levar a uma diminuição na qualidade do sinal, conexões instáveis ou até mesmo perda de conectividade. De maneira geral tem-se a interferências que ocorrem em sistemas de comunicação sem fio: dispositivos eletrônicos próximos, como telefones celulares, rádios e equipamentos de transmissão, podem causar interferência em sistemas de comunicação sem fio. Isso pode resultar em perda de sinal, interrupção de chamadas, diminuição da qualidade de áudio ou dados transmitidos, entre outros problemas (ACOSTA MUÑOZ, 2009).

Interferência em dispositivos médicos: dispositivos médicos sensíveis, como marcapassos, monitores cardíacos ou equipamentos de ressonância magnética, podem ser

suscetíveis a interferências eletromagnéticas. Isso pode levar a leituras imprecisas, mau funcionamento ou até mesmo riscos à saúde dos pacientes (SILVA, 2018).

Interferência em sistemas de controle e automação: dispositivos eletrônicos ou equipamentos elétricos adjacentes a sistemas de controle e automação industrial podem causar interferência eletromagnética. Isso pode levar a erros de leitura de sensores, falhas em sistemas de controle ou até mesmo acionamento indevido de dispositivos, resultando em operações inseguras ou ineficientes (PINHEIRO, 2017).

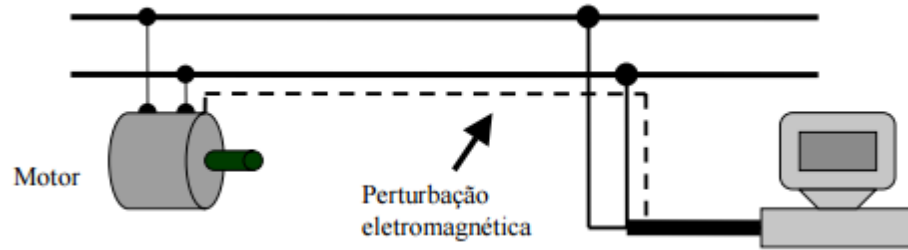
Interferência em sistemas de navegação: em ambientes onde há dispositivos eletrônicos de alta potência ou sistemas de comunicação próximos a sistemas de navegação, como GPS (*Global Positioning System*), pode ocorrer interferência eletromagnética. Isso pode afetar a precisão do posicionamento e navegação, resultando em erros de localização ou informações de rota incorretas (JACINTHO et al., 2020).

2.1.1 Modos de acoplamentos e tipos de interferências eletromagnéticas

De acordo com Silva, Albuquerque, Ferraz e Andrade (2016), existem dois tipos principais de interferências eletromagnéticas: a interferência conduzida e a interferência radiada, e os modos de acoplamento aos quais ela se faz são diversos. A seguir tem-se em concordância com estes autores a explicação e exemplificação de tais características.

As interferências eletromagnéticas (IEM) do tipo conduzida são um fenômeno preocupante em sistemas eletrônicos. Elas ocorrem quando os sinais eletromagnéticos indesejados se propagam através de fios e cabos de interconexão, como cabos de alimentação ou cabos de dados, afetando adversamente o desempenho e a integridade dos sinais nos sistemas envolvidos. Isso pode ocorrer devido ao acoplamento capacitivo ou indutivo entre os condutores, onde os sinais indesejados são induzidos ou transferidos para o condutor afetado, ou simplesmente ocorrer através de um acoplamento por condução, sendo que neste caso existe uma ligação física entre a fonte e a vítima, onde a interferência ocorre por meio de uma impedância comum ou pela própria fonte de alimentação. A Figura 2 ilustra um exemplo onde um motor pode enviar perturbações tais como harmônicas e sobretensões à rede de alimentação que serão conduzidas até outro equipamento alimentado pela mesma rede.

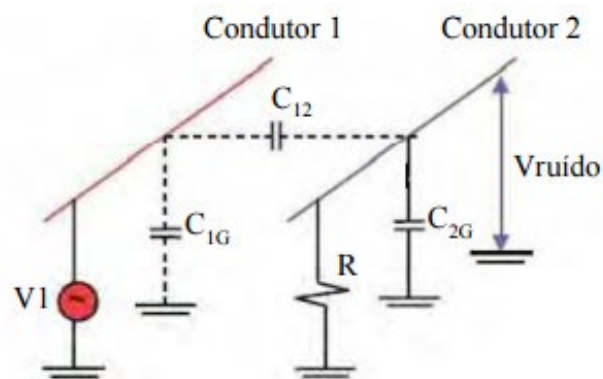
Figura 2 - Acoplamento por condução.



Fonte: GUIMARÃES (2008).

O acoplamento capacitivo é uma das principais causas de interferência conduzida. Ele ocorre quando dois condutores próximos têm uma diferença de potencial entre eles, criando um campo elétrico que podem interferir nos circuitos elétricos próximos. Como resultado desse acoplamento capacitivo, ocorre a transferência de sinais indesejados entre os condutores, resultando em interferência. O acoplamento capacitivo é mais significativo em frequências mais altas, devido à sua menor impedância capacitiva nessas faixas. O acoplamento capacitivo ocorre por meio do campo elétrico, como ilustrado na Figura 3, onde a diferença de potencial entre o condutor 1 e o condutor 2, juntamente com o dielétrico que os separa, forma um capacitor indesejado; este fenômeno é denominado como capacitância parasita (PINHEIRO, 2017).

Figura 3 - Acoplamento capacitivo.



Fonte: SARTIN (2010).

Outra forma de interferência conduzida acontece através do acoplamento indutivo. Ele ocorre quando há uma variação no fluxo magnético entre dois condutores próximos, o que resulta na indução de correntes indesejadas em um circuito adjacente, formando correntes

parasitas (DE LIZ, 2023). Esse fenômeno leva a ruídos e interferências nos sistemas eletrônicos, comprometendo seu desempenho e confiabilidade.

Para entender melhor o acoplamento indutivo, é necessário compreender o conceito de fluxo magnético. O fluxo magnético é uma medida da quantidade de campo magnético que atravessa uma superfície específica. Ele depende da intensidade do campo magnético e da área da superfície perpendicular ao campo (DORF; SVOBODA, 2011).

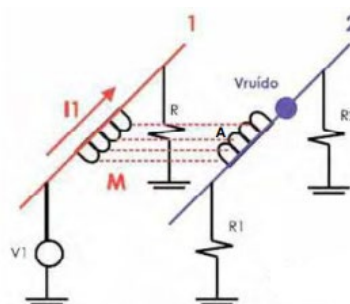
Quando ocorre uma variação no fluxo magnético, seja por mudança na intensidade do campo magnético ou na área da superfície, é gerada uma força eletromotriz (FEM) de acordo com a Lei de Faraday da indução eletromagnética. Essa FEM induzida pode resultar na circulação de correntes indesejadas em condutores próximos.

No contexto das interferências eletromagnéticas, o acoplamento indutivo ocorre quando um circuito afetado é exposto a um campo magnético variável gerado por uma fonte de interferência. Essa fonte de interferência pode ser um motor elétrico, um transformador, uma bobina, entre outros dispositivos que geram campos magnéticos em suas operações.

Quando o circuito afetado está próximo da fonte de interferência, o campo magnético variável pode atravessar as linhas de campo e interagir com os condutores, induzindo correntes indesejadas (DE LIZ, 2003). Essas correntes parasitas podem introduzir ruídos e interferências no circuito afetado, levando a problemas de desempenho, como erros de leitura, falhas de comunicação ou mau funcionamento geral, por exemplo.

A representação do acoplamento indutivo é realizada através do uso de indutores. Na Figura 4, observa-se que o campo magnético gerado pelo condutor 1 induz tensões e correntes no condutor 2, resultando na ocorrência da tensão de ruído ($V_{\text{ruído}}$).

Figura 4 - Acoplamento indutivo.



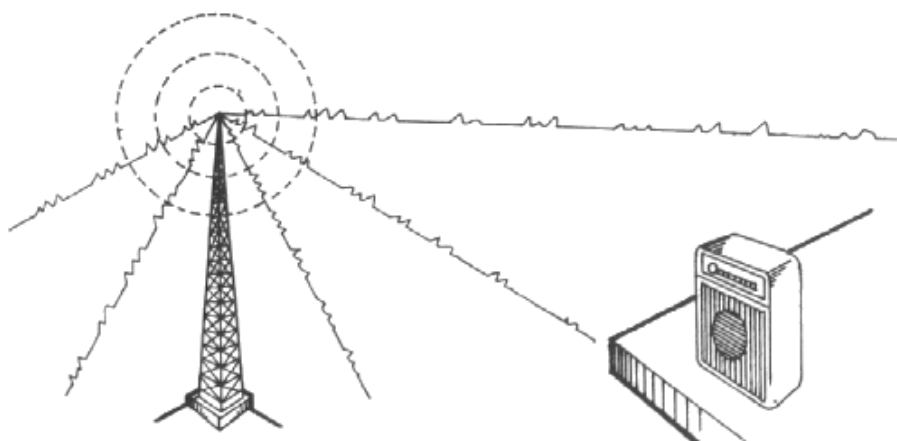
Fonte: SARTIN (2010).

As interferências eletromagnéticas de tipo radiada são um tema de extrema importância e complexidade no campo da engenharia elétrica. Essa manifestação peculiar de interferência

ocorre quando os sinais eletromagnéticos indesejados se propagam pelo espaço, afetando outros sistemas e dispositivos eletrônicos sem a necessidade de um meio físico de condução. É um fenômeno intrigante que exige uma compreensão aprofundada dos mecanismos de propagação e das estratégias de atenuação.

No cerne dessas interferências está o acoplamento radiado, um processo complexo e fascinante. Ele ocorre quando a energia eletromagnética emitida por uma fonte indutora é transmitida pelo espaço livre, alcançando outras entidades eletrônicas que funcionam como vítimas suscetíveis. Esse acoplamento pode ocorrer de diferentes formas, envolvendo a transferência de energia por meio de campos elétricos, campos magnéticos ou uma combinação desses dois. A Figura 5 ilustra esse tipo de propagação de ondas eletromagnéticas pelo ar acontece em torres de transmissão de sinais de rádio e TV.

Figura 5 - Acoplamento por Radiação.



Fonte: Adaptado de PTT-RADIO (2023).

2.2 Compatibilidade eletromagnética (CEM)

Paul (1992) aborda em seu livro *“Introduction to Electromagnetic Compatibility”* que a compatibilidade eletromagnética (CEM) é um campo de estudo que se preocupa com a capacidade de diferentes dispositivos eletrônicos e sistemas elétricos funcionarem corretamente em um ambiente eletromagnético compartilhado. Ela lida com a interação entre fontes de radiação eletromagnética e dispositivos sensíveis a essa radiação, buscando garantir que não ocorram interferências indesejadas que possam comprometer o desempenho dos sistemas.

Paul (1992) abrange a CEM em duas áreas principais: emissões e imunidade. Emissões referem-se às radiações eletromagnéticas geradas por dispositivos eletrônicos e sistemas,

enquanto a imunidade diz respeito à capacidade desses dispositivos e sistemas de resistir a interferências eletromagnéticas externas. A compatibilidade é alcançada quando os níveis de emissão estão dentro de limites aceitáveis e quando os dispositivos possuem imunidade adequada para funcionar corretamente mesmo na presença de interferências externas.

Paul (1992) escreve que a necessidade de garantir a CEM é devido à crescente quantidade de dispositivos eletrônicos presentes em nosso ambiente, tanto em residências quanto em ambientes industriais. Com a rápida evolução da tecnologia, há uma ampla variedade de dispositivos que emitem radiações eletromagnéticas, desde telefones celulares e computadores até equipamentos industriais complexos. A interação entre esses dispositivos com processamento de sinais cada vez mais complexos pode levar a problemas de interferência, que vão desde distorções em sinais de comunicação até mau funcionamento de dispositivos eletrônicos.

De acordo com Paul (1992), os sistemas são considerados eletromagneticamente compatíveis quando satisfazem os seguintes critérios:

- I. **Em relação a emissões eletromagnéticas:** os sistemas eletrônicos devem emitir radiações eletromagnéticas dentro dos limites estabelecidos pelos padrões e regulamentações aplicáveis. Isso significa que as emissões conduzidas e radiadas do sistema devem estar abaixo dos níveis máximos estabelecidos pelas normas vigentes.
- II. **Em relação a imunidade eletromagnética:** os sistemas devem ser capazes de operar adequadamente e manter seu desempenho dentro de limites aceitáveis, idealmente mesmo na presença de interferências eletromagnéticas externas. Isso significa que o sistema deve ser imune a perturbações eletromagnéticas que normalmente possam ser encontradas em seu ambiente de destino.
- III. **Compatibilidade de frequência:** os sistemas devem ser projetados de forma a não interferir uns com os outros em termos de faixas de frequência utilizadas. Isso é especialmente relevante em ambientes compartilhados, como edifícios de escritórios ou áreas urbanas densamente povoadas, onde múltiplos sistemas eletrônicos podem coexistir. A alocação adequada das faixas de frequência e a utilização de técnicas de modulação e multiplexação ajudam a garantir a compatibilidade de frequência.

Além desses critérios, outros fatores também podem ser considerados para avaliar a compatibilidade eletromagnética de um sistema específico, como a qualidade de sinal, a

integridade dos dados transmitidos, a estabilidade do sistema em diferentes condições ambientais e a capacidade de recuperação após falhas ou perturbações.

É importante ressaltar que a CEM é uma área complexa e os critérios exatos podem variar dependendo do contexto, do tipo de sistema e dos padrões/regulamentações aplicáveis em cada país ou região. Os padrões internacionais estabelecidos por organizações como a Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) e a Comissão Federal de Comunicações (FCC) fornecem orientações detalhadas sobre os requisitos de compatibilidade eletromagnética para diferentes tipos de sistemas, assunto este que será tratado no próximo capítulo.

2.2.1 A CEM e sua relação com a economia

Infere-se que a compatibilidade eletromagnética (CEM) tem impactos econômicos significativos na indústria e na sociedade em geral. Aqui estão alguns dos principais impactos:

- I. **Conformidade regulatória:** os dispositivos eletrônicos precisam atender aos requisitos de CEM estabelecidos por agências reguladoras, como a Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) e a Comissão Federal de Comunicações (FCC) (IEC, 1993). Isso implica em custos adicionais para os fabricantes, uma vez que eles precisam realizar testes de CEM para obter a certificação e garantir a conformidade. A não conformidade pode resultar em penalidades legais e na impossibilidade de comercializar o produto em determinadas regiões (IEC, 2003).
- II. **Retrabalho e *recalls*:** se um dispositivo eletrônico não atender aos padrões de CEM, pode ocorrer a necessidade de retrabalho ou até mesmo *recalls*, o que implica em custos significativos para os fabricantes. Além disso, *recalls* podem afetar a reputação da empresa e a confiança dos consumidores (OTT, 2009).
- III. **Tempo de comercialização:** garantir a CEM adequada durante o processo de desenvolvimento de um produto pode demandar mais tempo e recursos. Testes e ajustes para alcançar a conformidade podem atrasar o lançamento de um produto no mercado, o que pode resultar em perda de oportunidades de vendas e competitividade (OTT, 2009).
- IV. **Interferências eletromagnéticas:** a falta de CEM adequada pode levar a interferências em outros dispositivos eletrônicos ou sistemas, o que pode afetar a qualidade de comunicações, o desempenho de equipamentos industriais e até mesmo a segurança de sistemas críticos, como equipamentos médicos e de transporte. Isso pode resultar em

paralisações de produção, prejuízos financeiros e até mesmo riscos à vida humana (LIMA, 2013).

- V. **Custos de atenuação:** a fim de garantir a CEM adequada, podem ser necessárias medidas adicionais de atenuação, como o uso de materiais de blindagem, filtros e aterramento adequado. Essas medidas adicionais podem aumentar os custos de produção dos dispositivos eletrônicos (WILLIAN, 2007).

Por outro lado, a adoção de práticas adequadas de CEM pode trazer benefícios econômicos, tais como:

- I. **Confiança do consumidor:** dispositivos eletrônicos com boa CEM tendem a ter maior confiabilidade e desempenho consistente, o que gera confiança dos consumidores. Isso pode levar a uma maior demanda pelos produtos e à fidelidade dos clientes, o que impacta positivamente os resultados financeiros das empresas.
- II. **Qualidade e competitividade:** ao garantir a CEM adequada, os fabricantes podem produzir dispositivos eletrônicos de alta qualidade, com menos problemas de interferência e maior durabilidade. Isso contribui para a competitividade da empresa no mercado, diferenciando-a de concorrentes com produtos menos confiáveis (OTT, 2009).
- III. **Evitar litígios e danos à reputação:** dispositivos eletrônicos que causam interferências prejudiciais ou problemas de segurança devido à falta de CEM adequada podem levar a processos judiciais e danos à reputação da empresa (OTT, 2009).

3 NORMATIZAÇÕES

A crescente dependência de dispositivos eletrônicos em nosso cotidiano trouxe consigo uma preocupação essencial: a interferência e compatibilidade eletromagnética (CEM). Com o aumento do número de equipamentos eletrônicos e sistemas de comunicação, tornou-se necessário estabelecer normas e diretrizes para garantir que esses dispositivos possam operar de maneira eficiente, sem causar interferências prejudiciais a outros equipamentos e sem serem suscetíveis a perturbações eletromagnéticas indesejadas (DE LIZ, 2003).

As normas de compatibilidade eletromagnética desempenham um papel crucial nesse contexto, fornecendo orientações técnicas e estabelecendo requisitos para os dispositivos eletrônicos em relação às suas emissões e imunidade a perturbações eletromagnéticas. Essas normas são desenvolvidas por organizações nacionais e internacionais, que buscam harmonizar os requisitos e métodos de teste em nível global (LIMA, 2013).

No campo da engenharia elétrica, o conhecimento e a aplicação das normas de compatibilidade eletromagnética são essenciais para projetar e fabricar dispositivos eletrônicos confiáveis e seguros. Compreender as implicações das emissões eletromagnéticas e das interferências no desempenho de um dispositivo é fundamental para garantir seu funcionamento adequado em diferentes ambientes e cenários de uso (PAUL, 1992).

As normas de CEM abrangem uma ampla gama de aspectos, como emissão conduzida, emissão radiada, imunidade a perturbações eletromagnéticas, aterramento e blindagem. Elas estabelecem limites máximos de emissões eletromagnéticas que os dispositivos podem emitir, a fim de evitar interferências prejudiciais a outros equipamentos e sistemas. Além disso, as normas também definem os níveis mínimos de imunidade dos dispositivos, garantindo que eles possam funcionar corretamente mesmo na presença de perturbações eletromagnéticas provenientes de outras fontes (TIHANI, 1995).

A aplicação das normas de compatibilidade eletromagnética não se limita apenas aos fabricantes de dispositivos eletrônicos. Profissionais de engenharia elétrica desempenham um papel fundamental na concepção e desenvolvimento de sistemas que atendam aos requisitos de CEM. Eles devem estar cientes das normas aplicáveis, dos métodos de teste e das melhores práticas de projeto para garantir a conformidade eletromagnética de seus produtos.

Neste contexto, este capítulo tem como objetivo apresentar uma visão geral das normas de compatibilidade eletromagnética, suas aplicações e implicações na engenharia elétrica.

3.1 Normas internacionais de CEM

No contexto internacional, diversas organizações desempenham um papel crucial na definição e padronização das normas de CEM. Uma delas é o Comitê Internacional Especial de Rádio Interferência (CISPR - *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*), uma organização internacional responsável por estabelecer limites de emissão eletromagnética e métodos de medição (IEC, 1993). O CISPR possui várias subcomissões que tratam de áreas específicas, como emissão conduzida, emissão radiada e imunidade a perturbações eletromagnéticas. A IEC (*International Electrotechnical Commission*) também desempenha um papel importante na emissão de normas e diretrizes para diferentes aspectos da CEM, promovendo a harmonização das normas em nível global. A IEC emite padrões técnicos que abrangem uma ampla variedade de setores, desde dispositivos eletrônicos até equipamentos industriais e médicos. Além disso, em países como os Estados Unidos, a FCC (*Federal Communications Commission*) e a ANSI (*American National Standards Institute*) são responsáveis pela regulamentação e padronização da CEM, visando a proteção dos consumidores, a interoperabilidade de sistemas e a prevenção de interferências prejudiciais (PEREZ, 1995).

No passado, cada país possuía suas próprias regulamentações de Compatibilidade Eletromagnética (CEM), o que significava que os equipamentos destinados à venda na Alemanha, por exemplo, precisavam estar em conformidade com as normas da VDE (*Verband Deutscher Elektrotechniker*). Embora as diretrizes gerais dessas normas fossem semelhantes às da FCC (*Federal Communications Commission*), as faixas de frequência e os níveis de limites eram diferentes. No entanto, atualmente, há uma tendência de adoção de um padrão único para as normas internacionais de CEM (MULLER, 1998).

O primeiro candidato a essa norma internacional foi desenvolvido pelo Comitê Internacional Especial de Radiointerferência (CISPR), este órgão pertencente à Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), uma agência responsável por estabelecer padrões para facilitar o comércio entre países. Embora o CISPR não seja uma agência de normalização em si, suas normas são frequentemente adotadas por países e ganham força de lei (IEC, 1993).

De acordo com o documento lançado em 1993 pela comissão eletrotécnica internacional, a CISPR é composta por vários subcomitês que se dedicam a diferentes áreas da compatibilidade eletromagnética. Através desses seis comitês estabeleceram-se padrões que incluem os seguintes:

CISPR 11 - Equipamento industrial, científico e médico - Características de perturbação por radiofrequência - Limites e métodos de medição

CISPR 12 - Veículos, barcos e motores de combustão interna - Características de perturbação por rádio - Limites e métodos de medição para a proteção de receptores externos

CISPR 14-1 e 14-2 - Compatibilidade eletromagnética - Requisitos para eletrodomésticos, ferramentas elétricas e aparelhos similares

CISPR 15 - Limites e métodos de medição das características de perturbação de rádio da iluminação elétrica e equipamentos similares

CISPR 16 - Especificação para aparelhos e métodos de medição de distúrbios por rádio e imunidade (em várias partes e subpartes)

CISPR 17 - Métodos de medição das características de supressão dos filtros de interferência de rádio passiva e componentes de supressão

CISPR 18-1 - Características de interferência de rádio de linhas aéreas e equipamentos de alta tensão. Parte 1: descrição dos fenômenos

CISPR 18-2 - Características de interferência de rádio de linhas aéreas e equipamentos de alta tensão. Parte 2: métodos de medição e procedimentos para determinar limites

CISPR 18-3 - Características de interferência de rádio de linhas aéreas e equipamentos de alta tensão - Parte 3: código de prática para minimizar a geração de ruído de rádio

CISPR 25 - Veículos, barcos e motores de combustão interna - Características de perturbação por rádio - Limites e métodos de medição para a proteção de receptores de bordo

CISPR / TR 28 - Equipamento industrial, científico e médico (ISM) - Diretrizes para níveis de emissão nas faixas designadas pela UIT

CISPR / TR 29 - Receptores de transmissão de televisão e equipamento associado - Características da imunidade - Métodos de avaliação objetiva da imagem

CISPR / TR 30-1 - Método de ensaio sobre emissões eletromagnéticas - Parte 1: equipamento de controle eletrônico para lâmpadas fluorescentes de tampa única e dupla

CISPR / TR 30-2 - Método de ensaio sobre emissões eletromagnéticas - Parte 2: equipamento de controle eletrônico para lâmpadas de descarga, excluindo lâmpadas fluorescentes

CISPR 31 - Banco de dados sobre as características dos serviços de rádio

CISPR 32 - Compatibilidade eletromagnética de equipamentos multimídia - Requisitos de emissão.

CISPR 35 - Compatibilidade eletromagnética de equipamentos multimídia - Requisitos de imunidade isso substituirá o CISPR 20 e o CISPR 24

CISPR 36 - Veículos rodoviários elétricos e híbridos - Características de perturbação por rádio - Limites e métodos de medição para a proteção de receptores externos abaixo de 30 MHz

IEC 61000-6-3 - Compatibilidade eletromagnética (CEM) - Parte 6-3: padrões genéricos
- Padrão de emissão para ambientes residenciais, comerciais e industriais leves

IEC 61000-6-4 - Compatibilidade eletromagnética (CEM) - Parte 6-4: padrões genéricos
- Padrão de emissão para ambientes industriais

Em especial, no ano de 1985, o CISPR publicou um conjunto de padrões referentes a emissões eletromagnéticas, conhecido como Publicação Número 22. Esses padrões abrangem equipamentos de tecnologia da informação (TI), incluindo dispositivos digitais. Muitos países na Europa e no resto do mundo adotaram os padrões da CISPR 22 (ou variações deles) como suas normas nacionais, antecipando sua eventual aceitação como norma internacional (SCHLICHTING, 2003).

Como observado em De Liz (2003), essa norma classifica os equipamentos eletrônicos em classes A e B, cada uma com seus próprios limites de emissão e critérios de teste.

A Classe A da norma CISPR é aplicada a equipamentos destinados a ambientes industriais, comerciais e de negócios. Esses equipamentos são geralmente utilizados em locais onde há um nível mais elevado de imunidade às perturbações eletromagnéticas. Os limites de emissão estabelecidos para a Classe A são mais rigorosos em comparação com a Classe B, visando garantir que esses equipamentos não causem interferências prejudiciais a outros dispositivos nas proximidades (DE LIZ, 2003).

Os limites para a Classe A são definidos em uma ampla faixa de frequências, geralmente de 150 kHz a 30 MHz. Os valores dos limites de emissão são especificados em termos de níveis de tensão e de corrente conduzida, bem como em termos de níveis de campo radiado. Esses limites são estabelecidos de acordo com os requisitos específicos de cada faixa de frequência, levando em consideração a natureza dos equipamentos da Classe A e suas aplicações típicas (DE LIZ, 2003).

A Classe B da norma CISPR é aplicada a equipamentos destinados a ambientes residenciais, comerciais e de negócios menores. Esses equipamentos estão mais sujeitos a perturbações eletromagnéticas e, portanto, são submetidos a limites de emissão menos rigorosos em comparação com a Classe A. No entanto, esses limites ainda são projetados para garantir que os equipamentos da Classe B não causem interferências prejudiciais a outros dispositivos eletrônicos nas proximidades (DE LIZ, 2003).

Os limites para a Classe B também são definidos em uma ampla faixa de frequências, geralmente de 9 kHz a 1 GHz. Assim como na Classe A, os limites são estabelecidos em termos de níveis de tensão e de corrente conduzida, bem como em termos de níveis de campo radiado. Os valores dos limites são adaptados às características dos equipamentos da Classe B e suas aplicações típicas (DE LIZ, 2003).

Além dos limites de emissão, a norma CISPR também estabelece os critérios de teste para determinar a conformidade dos equipamentos com os requisitos de CEM. Esses critérios incluem os métodos de medição, os procedimentos de teste e as condições ambientais específicas em que os testes devem ser realizados. Essas diretrizes garantem a consistência e a comparabilidade dos resultados dos testes, permitindo que os fabricantes avaliem a conformidade de seus equipamentos de forma precisa e confiável (DE LIZ, 2003).

É importante ressaltar que as normas relacionadas à Compatibilidade Eletromagnética (CEM) estão sujeitas a mudanças regulares. Portanto, é essencial manter-se atualizado sobre as atualizações e revisões dessas normas. Vale destacar que as normas em si contêm diversos aspectos técnicos detalhados, os quais não serão abordados em profundidade neste trabalho.

3.2 Normas brasileiras de CEM

No Brasil, as normas relacionadas à Compatibilidade Eletromagnética (CEM) são estabelecidas e regulamentadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essas normas são importantes para garantir que os equipamentos eletrônicos comercializados no país estejam em conformidade com os requisitos de CEM.

A norma brasileira mais relevante no contexto da CEM é a ABNT NBR IEC 61000-6-2, intitulada "Compatibilidade Eletromagnética - Parte 6-2: padrões Genéricos - Imunidade para Ambientes Industriais". Essa norma estabelece os requisitos de imunidade para equipamentos eletrônicos que serão utilizados em ambientes industriais, nos quais estão presentes condições eletromagnéticas adversas (ABNT, 1990).

De acordo com a ABNT, a NBR IEC 61000-6-2 especifica os níveis de imunidade que os equipamentos devem ser capazes de suportar, como campos magnéticos, campos elétricos, transientes rápidos, surtos de tensão, entre outros. Além disso, a norma define os métodos de ensaio para avaliar a conformidade dos equipamentos com esses requisitos de imunidade.

Outra norma relevante é a ABNT NBR IEC 61000-6-3, denominada "Compatibilidade Eletromagnética - Parte 6-3: padrões Genéricos - Emissão de Ambientes Residenciais, Comerciais e Industriais Leves". Essa norma estabelece os limites de emissão eletromagnética

para equipamentos eletrônicos utilizados em ambientes residenciais, comerciais e industriais leves, a fim de evitar interferências prejudiciais em outros dispositivos (ABNT, 1990).

A ABNT NBR IEC 61000-6-3 define os níveis de emissão permitidos para diferentes faixas de frequência, como a faixa de radiofrequência e a faixa de frequência de linhas de energia. A norma também descreve os métodos de medição e os procedimentos para avaliar a conformidade dos equipamentos com esses limites de emissão (ABNT, 1990).

Além dessas normas específicas de CEM, existem outras normas brasileiras relacionadas a aspectos específicos da compatibilidade eletromagnética, como a ABNT NBR IEC 61000-4-2, que trata da imunidade a descargas eletrostáticas, e a ABNT NBR IEC 61000-4-4, que aborda a imunidade a surtos de tensão (ABNT, 1990).

Essas normas brasileiras têm o objetivo de harmonizar as práticas de CEM no país, alinhando-se aos padrões internacionais estabelecidos pelo Comitê Internacional Especial de Radiointerferência (CISPR) e pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC). A conformidade com as normas brasileiras de CEM é um requisito importante para a comercialização e o uso adequado de equipamentos eletrônicos no mercado brasileiro.

3.3 Certificação

A certificação de equipamentos eletrônicos no âmbito da Compatibilidade Eletromagnética (CEM) é um processo fundamental para garantir a conformidade desses dispositivos com as normas e regulamentos estabelecidos. A certificação é uma etapa crucial para assegurar que os equipamentos não causem interferência prejudicial em outros dispositivos e que sejam imunes a interferências externas (PEREZ, 1995).

A certificação de CEM é geralmente realizada por órgãos e laboratórios especializados, que possuem a competência técnica e acreditação necessárias para conduzir os testes e avaliações exigidos. Esses órgãos seguem padrões internacionais reconhecidos, como os estabelecidos pelo CISPR, para realizar as medições de emissões e imunidade e verificar se os equipamentos estão em conformidade.

Segundo Perez, em seu livro intitulado como “*Handbook of Electromagnetic Compatibility*” de 1993, o processo de certificação de CEM normalmente envolve as seguintes etapas:

Avaliação de documentação: nessa fase inicial, os laboratórios revisam a documentação técnica do equipamento, incluindo manuais, diagramas, especificações e relatórios de testes realizados pelo fabricante. Essa análise permite entender a funcionalidade e as características

do dispositivo, além de identificar possíveis áreas de preocupação em relação à compatibilidade eletromagnética (PEREZ, 1993).

Testes de emissões: os equipamentos são submetidos a testes para verificar as emissões eletromagnéticas que podem ser geradas durante seu funcionamento normal. Os testes podem ser conduzidos tanto para as emissões conduzidas (através de cabos e fios) quanto para as emissões irradiadas (por meio de antenas). Os resultados são comparados com os limites estabelecidos pelos padrões aplicáveis, como os definidos pelo CISPR (PEREZ, 1993).

Testes de imunidade: nessa etapa, os equipamentos são expostos a campos eletromagnéticos simulados, a fim de verificar sua capacidade de funcionar corretamente mesmo em presença de interferências externas. Esses testes avaliam a robustez e a resistência do dispositivo a perturbações eletromagnéticas provenientes de outras fontes (PEREZ, 1993).

Relatório de conformidade: com base nos resultados dos testes, é elaborado um relatório de conformidade que indica se o equipamento atende ou não aos requisitos das normas de CEM aplicáveis. O relatório descreve os testes realizados, os valores medidos e a conclusão sobre a conformidade. Em caso de não conformidade, são fornecidas recomendações para a atenuação das interferências (PEREZ, 1993).

Certificação e marcação: após a conclusão bem-sucedida do processo de certificação, o equipamento pode receber uma certificação formal, que comprova sua conformidade com as normas de CEM (PEREZ, 1993). Dependendo do país e da região, pode ser exigida a marcação específica, como a marca CE (Conformidade Europeia) para equipamentos comercializados na União Europeia, ou também a FC (conformidade com os padrões da FCC). Veja alguns exemplos de aparelhos na Figura 6 com as siglas FC e CE na e Figura 7 com a sigla CE:

Figura 6 - Marcação FC e CE.



Fonte: SICOM (2021).

Figura 7 - Certificação de um dispositivo.



Fonte: MAGNUS (2001).

A certificação de CEM é obrigatória para os fabricantes, pois através delas demonstram o compromisso com a qualidade e a conformidade de seus produtos, além de garantir a segurança e a confiabilidade deles. Para os usuários finais, a certificação oferece a tranquilidade de adquirir equipamentos que foram devidamente testados e aprovados quanto à sua compatibilidade eletromagnética.

4 REDES DE ESTABILIZAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE LINHA (LISN)

Do inglês *Line Impedance Stabilization Network* (LISN), ou redes de estabilização de impedância de linha, é um dispositivo fundamental no campo dos testes de compatibilidade eletromagnética (CEM). Com a crescente complexidade dos equipamentos elétricos e eletrônicos e a necessidade de garantir sua coexistência harmoniosa no ambiente eletromagnético, a LISN desempenha um papel crucial na medição e avaliação das emissões de radiofrequência (RF) de tipo conduzida (vide capítulo 2), essas frequências podem variar dependendo do tipo específico de LISN e das normas aplicáveis; comumente medem ruídos que operam sobre uma faixa que vai de 9 kHz (nove quilohertz) até a faixa de alguns MHz, por exemplo 30 MHz (trinta mega-hertz) (PAUL, 1992).

A LISN, é projetada para estabilizar a impedância da linha de alimentação de um equipamento durante os testes de CEM, fornecendo uma carga de impedância padronizada. Essa carga estabilizada permite que as medições das emissões de RF geradas pelos equipamentos sejam precisas e repetíveis, facilitando a identificação de possíveis interferências eletromagnéticas que podem prejudicar outros dispositivos ou afetar a operação adequada do equipamento em teste (MALACK, 1978). A Figura 8 mostra um exemplar real desse dispositivo.

Figura 8 - Foto de um aparelho LISN de 16A.



Fonte: EEMC (2023).

A importância da LISN vai além da simples medição de emissões de RF. Ela fornece uma referência confiável de impedância, replicando as condições de operação realistas do equipamento no ambiente de uso (MITALKUMAR et al., 2018). Dessa forma, a LISN garante que os resultados dos testes de CEM sejam consistentes e comparáveis, permitindo que os fabricantes verifiquem se seus produtos estão em conformidade com as normas e regulamentos de CEM estabelecidos por órgãos reguladores.

Ao utilizar a LISN nos testes de CEM, é possível identificar e mitigar possíveis problemas de compatibilidade eletromagnética antes que o equipamento seja lançado no mercado. Isso contribui para a qualidade e confiabilidade dos produtos, reduzindo o risco de interferências prejudiciais e garantindo a satisfação dos usuários finais (PAUL, 1992).

Neste capítulo, será explorado o conceito, os princípios de funcionamento, as aplicações e a importância da LISN em testes de compatibilidade eletromagnética. Através de uma análise aprofundada dessas características, buscar-se-á compreender como a LISN desempenha um papel fundamental na garantia da conformidade e na certificação de equipamentos elétricos e eletrônico.

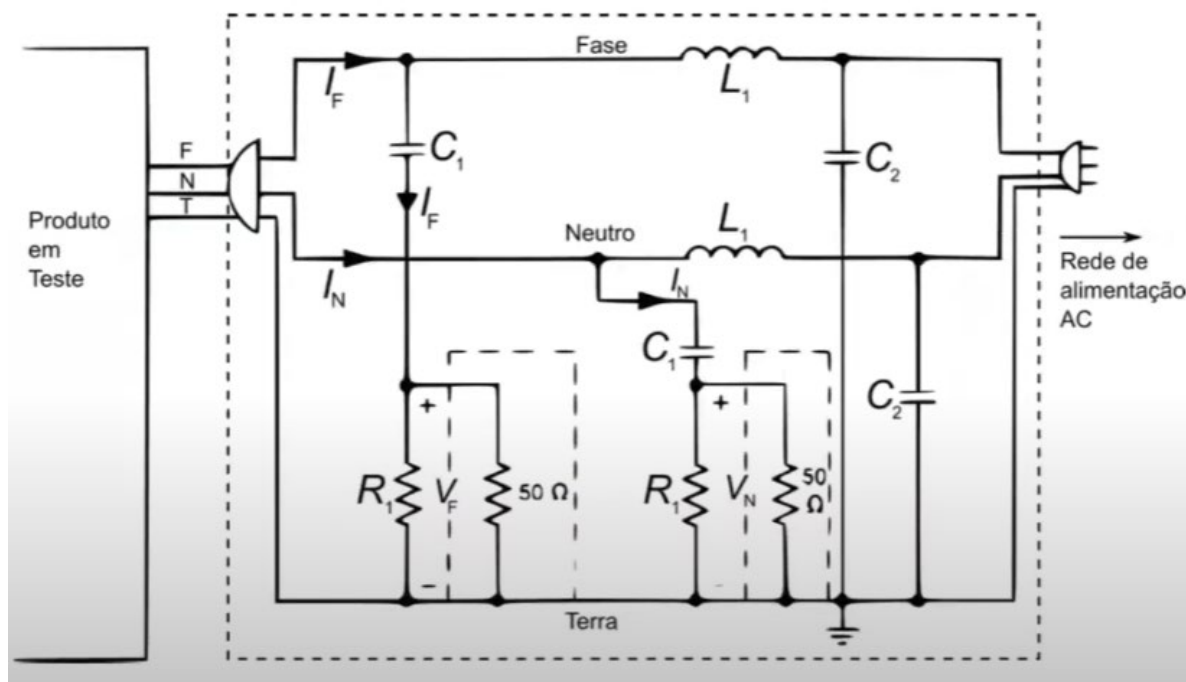
4.1 Princípios de funcionamento de uma LISN

Uma rede de estabilização de impedância de linha (LISN) é composta por uma estrutura cuidadosamente projetada, que inclui diversos componentes essenciais para o seu funcionamento adequado. Neste subcapítulo será analisado detalhadamente a estrutura e os componentes fundamentais de uma LISN, bem como discutir como ela estabiliza a impedância da linha de alimentação do equipamento.

Assim como mostra a Figura 8, a estrutura de uma LISN geralmente consiste em uma caixa metálica, que tem como objetivo fornecer proteção e blindagem contra interferências eletromagnéticas externas (SAKULHIRIRAK et al., 2007). Essa blindagem é fundamental para garantir que as medições realizadas com a LISN sejam precisas e não sejam afetadas por interferências externas indesejadas.

Dentro da caixa metálica, tem-se fundamentalmente um circuito eletrônico composto por uma combinação de indutores, capacitores, resistores, filtros e conectores dispostos como mostra a Figura 9:

Figura 9 - Diagrama elétrico simplificado de uma LISN.



Fonte: Adaptado de PAUL (1992).

Na representação do circuito eletrônico da Figura 9, tem-se ao lado direito a fonte de alimentação convencional da concessionária e do lado esquerdo o produto que está sob teste, entre estes está conectado ao aparelho de estabilização de impedância de linha (LISN).

Dessa maneira, o que está sendo aferido através da LISN é o quanto este produto está injetando interferência eletromagnética por meio de condução na rede da concessionária através dos cabos de fase (F), Neutro (N) e Terra (T).

A primeira etapa circuito se faz através das bobinas ou indutores ($L1$'s) conectados em série nos condutores de fase (F) e neutro (N) entre o aparelho sob teste e a rede de alimentação, dessa maneira têm-se como objetivo principal bloquear ou atenuar as interferências provenientes da rede elétrica, evitando que essas interferências afetem a medição das interferências geradas pelo equipamento sob teste (EST).

O princípio de funcionamento desses indutores baseia-se nas propriedades dos campos magnéticos e da indutância. Segundo Dorf e Svoboda (2011) indutor consiste em uma bobina de fio condutor enrolada em torno de um núcleo magnético, geralmente feito de material ferromagnético. Ao passar a corrente elétrica através da bobina do indutor, o campo magnético é gerado. Esse campo magnético possui a propriedade de se opor a qualquer variação na corrente elétrica. Essa oposição é conhecida como reatância indutiva. A reatância indutiva, para

este caso, é diretamente proporcional à frequência da corrente elétrica, ou seja, quanto maior a frequência, maior será a oposição do indutor à variação da corrente.

No contexto das LISN e dos testes de interferência eletromagnética, os indutores em série são dimensionados para ter uma alta reatância indutiva nas frequências de interesse, que geralmente são as frequências a nível de ruído que podem surgir da rede elétrica (SAKULHIRIRAK et al., 2007). Essa alta reatância indutiva faz com que os indutores ofereçam uma resistência significativa ao fluxo das interferências de alta frequência provenientes da rede elétrica. (DORF; SVOBODA, 2011).

Dessa forma, os indutores em série atuam como um filtro passivo, permitindo que a corrente elétrica da rede passe para o equipamento sob teste, mas atenuando as interferências de alta frequência provenientes da rede. Isso evita que essas interferências afetem a medição das interferências geradas pelo próprio equipamento sob teste, garantindo uma medição mais precisa e isolada.

A segunda etapa do circuito para serem feitas as aferições se faz em produzir um caminho para que somente as correntes ruidosas provenientes do equipamento sob teste sigam integralmente para uma linha de impedância estabilizada (padronizada) para enfim serem analisadas.

Neste sentido, os capacitores (C1) são colocados em paralelo com os indutores nas linhas de fase e neutro. Eles atuam como elementos de acoplamento capacitivo, fornecendo um caminho de baixa impedância para as perturbações eletromagnéticas geradas pelo aparelho sob teste, enquanto bloqueiam as frequências mais baixas, como a frequência da rede elétrica (50 Hz ou 60 Hz).

No âmbito da física, a resposta do capacitor em relação à frequência dos sinais está relacionada à sua capacitância, que é medida da capacidade do capacitor de armazenar carga elétrica em relação à tensão aplicada (medida em Faraday) e à reatância capacitiva, que por sua vez, é a permissividade do capacitor à variação da corrente elétrica em função da frequência do sinal (DORF; SVOBODA, 2011). A reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência do sinal, assim em frequências baixas, a reatância capacitiva é alta, o que significa que o capacitor oferece uma alta impedância para os sinais de baixa frequência. Isso faz com que o capacitor bloqueie ou atenuar esses sinais de baixa frequência, por outro lado, em frequências altas, a reatância capacitiva é baixa, permitindo que o capacitor conduza os sinais de alta frequência com menor reatância. Assim, o capacitor deixa passar os sinais de alta frequência com menor atenuação.

É importante salientar que a seleção adequada dos capacitores leva em consideração as frequências de interferência de interesse, a impedância da LISN e as características do aparelho sob teste (MITALKUMAR et al., 2018). Os capacitores devem ser dimensionados de forma a permitir a condução eficaz das perturbações, mantendo uma alta impedância para a rede elétrica e garantindo um bom acoplamento entre o produto e a LISN.

Sob os mesmos princípios físicos, os capacitores C2 deste circuito atuam como um curto-circuito à terra para as interferências residuais provenientes da rede de alimentação, garantindo que nenhum ruído de alta frequência que não seja causado pelo produto em teste interfira nas medições.

A terceira e última etapa do circuito é justamente o processo que dá a característica fundamental do dispositivo, que é a estabilização da impedância da linha ao qual percorrerá o sinal filtrado e exclusivamente ruidoso do equipamento sob teste, para então ser acoplado nela o equipamento de aferição de ruídos, este processo é alcançado através do uso cuidadoso e apropriadamente dimensionado dos resistores na rede de impedância.

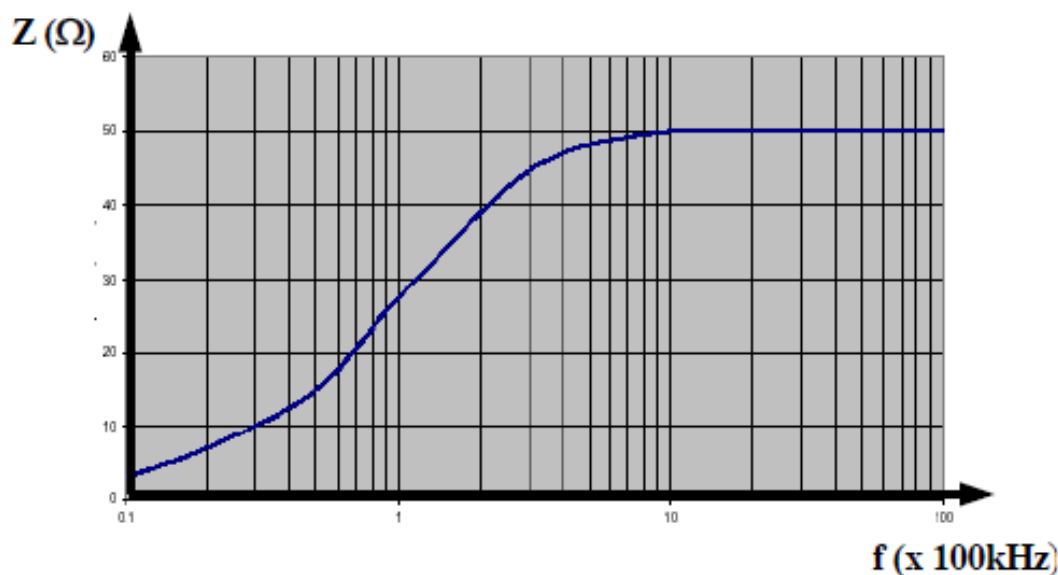
De antemão, é importante destacar que o objetivo é criar uma impedância estável e controlada que permaneça constante independentemente das variações nas características da rede elétrica, ou das variações de carga do dispositivo sob teste.

Os resistores na LISN são selecionados com valores específicos de resistência que contribuem para a criação dessa impedância estável independente da intensidade e frequência do sinal elétrico que por ele passará (SAKULHIRIRAK et al., 2007). A escolha dos valores dos resistores é feita de acordo com os requisitos de teste e as frequências de interferência de interesse.

A configuração dos resistores em série, paralelo ou uma combinação dessas conexões é planejada de forma a obter a impedância desejada. Além disso, podem ser utilizados componentes adicionais, como indutores e capacitores, para ajustar e otimizar a impedância em determinadas faixas de frequência (MITALKUMAR et al., 2018).

No circuito simplificado de uma LISN representado na Figura 9, os resistores R1 apresentam uma resistência relativamente grande que tem o intuito de formar uma proteção de curto-circuito entre fase e terra e entre neutro e terra, e de formar um caminho exclusivo e praticamente integral das interferências de interesse através das resistências de 50 Ohms (caminho de menor impedância), sob as quais serão feitas as medições de intensidade de ruído. Se forem feitas medições da impedância destas linhas sob o domínio da frequência, o resultado será algo semelhante Figura 10 que se segue:

Figura 10 - Gráfico de aferição de linha de impedância estabilizada.



Fonte: FLEXAUTOMOTIVE (2015).

O gráfico da Figura 10 representa o comportamento esperado da impedância de uma rede de estabilização de impedância de 50 Ohms, assim, para as frequências de sinais de interferência de interesse que podem variar de 9 kHz a dezenas de MHz a linha apresenta uma impedância estabilizada de aproximadamente 50 Ohms. Desse modo, em qualquer lugar do mundo e sob qualquer rede de alimentação que a LISN suporte, as aferições das intensidades de interferência eletromagnéticas conduzidas por um mesmo aparelho sob teste terão os mesmos valores, pois serão feitas medições através de uma impedância padronizada, em consenso no valor padronizado de 50 Ohms.

Em resumo, o processo de estabilização de impedância em uma LISN envolve a seleção e o dimensionamento criterioso dos resistores e outros componentes elétricos para criar uma rede de impedância estável e controlada. Essa rede de impedância simula as condições de operação do aparelho sob teste e garante medições consistentes, confiáveis e padronizadas das interferências eletromagnéticas.

4.2 Apresentação dos diversos tipos de LISN e outras considerações

Dentre as diversas opções de redes de estabilização de impedância de linha (LISN) encontradas no mercado, destacam-se diferentes variantes para atender às necessidades específicas dos testes de emissão eletromagnética. Essa variedade de LISN disponíveis no mercado possibilita a escolha da ferramenta mais adequada para atender às demandas

específicas de cada cenário de teste, proporcionando medições confiáveis e representativas para a certificação de variados equipamentos elétricos e eletrônicos. Neste sentido, pode-se classificar a LISN nos seguintes tipos:

Convencional: é o modelo clássico, projetado para operar na faixa de frequências de interesse comum, geralmente 9 kHz a 30 MHz. Possui um conjunto de resistores, capacitores e indutores estrategicamente configurados para fornecer a impedância estabilizada necessária durante os testes (MITALKUMA et al., 2018).

Wideband: essa variante da LISN possui uma ampla faixa de frequência de operação, tipicamente de 150 kHz a 1000 MHz. Seu *design* é mais complexo, envolvendo componentes com características específicas para lidar com frequências mais altas (TANG et al., 2014).

Modular: uma abordagem versátil, onde diferentes módulos podem ser combinados e adaptados conforme as necessidades dos testes, permitindo maior flexibilidade e ajustes nas configurações (TANG et al., 2014).

Automatizada: equipada com recursos de automação e controle remoto, a LISN automatizada facilita a execução de testes em larga escala, melhorando a eficiência dos processos de certificação (SLIM, 2009).

A LISN convencional é uma opção econômica e amplamente utilizada em laboratórios, cobrindo as frequências comuns de interferência. Já a *Wideband* LISN é a escolha ideal quando se busca analisar dispositivos com interferências em frequências mais elevadas, como tecnologias sem fio e comunicações de alta velocidade. A modularidade da LISN modular permite personalização e adaptação às necessidades específicas de cada teste, aumentando a flexibilidade em diferentes configurações. A automação trazida pela LISN automatizada é vantajosa para o gerenciamento de grandes volumes de testes, acelerando o processo de certificação.

De modo geral, as LISNs desempenham um papel fundamental no avanço da tecnologia e na garantia da qualidade dos produtos no setor elétrico e eletrônico. Elas oferecem a confiança necessária para que a indústria possa desenvolver dispositivos inovadores, assegurando que estejam em conformidade com os mais rigorosos padrões e regulamentações de emissão eletromagnética estabelecidos por organizações como a IEC e a FCC.

5 ANÁLISE DE IEM UTILIZANDO REDES DE ESTABILIZAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE LINHA

Este capítulo abordará sobre como as análises de IEM são feitas através da utilização de redes de estabilização de impedância de linha, com propósito é fornecer informação concisa de como essas análises são realizadas para poder comparar os resultados com os padrões de Compatibilidade eletromagnética. Além disso, será apresentada a metodologia para medir e interpretar as variáveis elétricas envolvidas de maneira correta.

O capítulo detalha como essas variáveis são capturadas, analisadas e interpretadas durante os ensaios, enfocando também nos equipamentos complementares utilizados em conjunto, que são indispensáveis para a execução do processo de análise.

O processo padrão de medição com o uso de LISN é descrito, abordando-se aspectos cruciais como a configuração dos componentes, a conexão do Dispositivo Sob Teste (DUT) e a calibração. Enfatiza-se a importância da correta configuração e disposição dos equipamentos para a fidelidade dos dados coletados.

Os resultados das análises de IEM são apresentados por meio de gráficos e dados obtidos durante os testes, demonstrando-se como essas informações são interpretadas para avaliar a conformidade dos equipamentos com os requisitos de certificações e normas aplicáveis. Este capítulo visa elucidar o procedimento analítico da IEM e promover uma melhor compreensão técnica de como são realizadas essas análises.

5.1 Grandezas e unidades de medida das IEM

Na análise de Compatibilidade Eletromagnética (CEM), é necessário quantificar as emissões tanto conduzidas quanto irradiadas, a fim de avaliar adequadamente a capacidade de um sistema de provocar interferência eletromagnética. As grandezas fundamentais envolvidas nessa avaliação incluem a tensão, medida em volts (V), e a corrente, medida em ampères (A), para as emissões conduzidas. Para as emissões irradiadas, as grandezas de interesse são o campo elétrico, expresso em volts por metro (V/m), e o campo magnético, expresso em amperes por metro (A/m). Associadas a essas grandezas primárias, encontramos também a potência, medida em watts (W), e a densidade de potência, medida em watts por metro quadrado (W/m²) (OTT, 2009).

A gama numérica dessas medidas são faixas notavelmente amplas, abarcando, por exemplo, campos elétricos que variam de 1 $\mu\text{V/m}$ a 200 V/m. Esta diversidade representa um alcance dinâmico significativo, estendendo-se por várias ordens de magnitude. Devido a esta

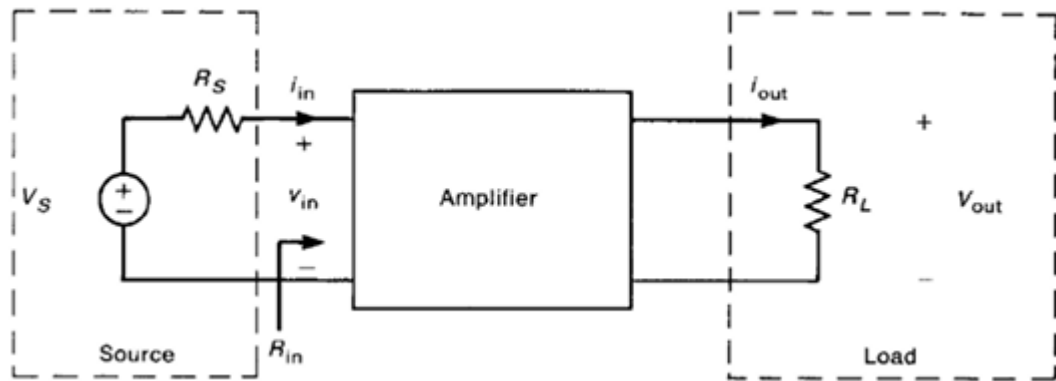
vasta faixa de valores, especialmente quando se considera a amplitude do espectro harmônico dos ruídos, que necessita de análise que abarca desde alguns poucos kHz até GHz, as unidades de medida em CEM são expressas em decibéis (dB). Esta prática se justifica pela capacidade dos decibéis de comprimir eficientemente os dados, facilitando assim a representação de grandes variações de magnitude de uma maneira mais gerenciável (PEREZ, 1995).

Os ruídos de tensão e corrente produzidos por um sistema são de particular interesse, tanto nas emissões conduzidas, onde se busca determinar as tensões e correntes conduzidas para a linha de alimentação e para a carga, quanto nas emissões irradiadas, que se concentram nos campos eletromagnéticos gerados a partir do sistema devido às tensões e correntes internas que podem acarretar. O reconhecimento de um sistema como fonte de interferência prejudicial ocorre quando o ruído por ele gerado possui potência ou energia suficiente para induzir um mau funcionamento em outro sistema (PAUL, 1992).

A escala de frequência utilizada nas medições de CEM é logarítmica, refletindo a necessidade de abarcar uma larga faixa de variação de amplitude dos ruídos, que pode ir de nano-volts (nV) até volts (V). Esta característica sublinha a importância de compreender e aplicar corretamente as unidades expressas em decibéis (dB), pois elas não apenas proporcionam um meio eficaz de compressão de dados, mas também facilitam a interpretação dos fenômenos eletromagnéticos envolvidos (PEREZ, 1995).

Para elucidar a aplicabilidade do Decibel na análise de circuitos, examina-se um circuito amplificador, ilustrado na Figura 11. Esse circuito inclui uma fonte com uma tensão de circuito aberto V_s e uma resistência R_s , que fornece um sinal a um amplificador. A carga do amplificador é representada por R_L . A resistência na entrada do amplificador é R_{in} , e a potência entregue ao amplificador é $[P_{in} = V_{in}^2/R_{in}]$, com a tensão de entrada sendo avaliada em seu valor RMS (do inglês *Root Mean Square*, ou Raiz Média Quadrada - valor eficaz). Esta demonstração objetiva realçar a utilidade do Decibel para quantificar e comparar as intensidades dos sinais ruidosos em sistemas eletrônicos, facilitando a análise técnica em circuitos elétricos.

Figura 11 - Circuito para definição do uso do Decibel.



Fonte: PAUL, C. R. (1992).

Assim podemos definir em (5.1):

$$\text{Ganho de Potência} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (5.1)$$

O Ganho de Potência expresso em decibéis, como demonstrado em (5.2):

$$\text{Ganho de Potência}_{db} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (5.2)$$

O ganho de tensão e o ganho de corrente do amplificador são definidas em (5.3) e (5.4), respectivamente:

$$\text{Ganho de tensão} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (5.3)$$

$$\text{Ganho de corrente} = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (5.4)$$

Em dB, tem-se demonstrado em (5.5) e (5.6):

$$\text{Ganho de Tensão}_{db} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \quad (5.5)$$

$$\text{Ganho de Corrente}_{db} = 20 \log_{10} \left(\frac{I_{out}}{I_{in}} \right) \quad (5.6)$$

Percebe-se que os decibéis são estabelecidos na razão entre duas quantidades. Os níveis de potência, tensão ou corrente absolutas são expressos em dB com o seu valor referenciado a alguma quantidade de base. No âmbito das análises de IEM, geralmente as tensões são expressas com base em $1\mu V$ como $dB\mu V$, como demonstra a equação em (5.7):

$$dB\mu V = 20\log_{10}\left(\frac{volts}{1\mu V}\right) \quad (5.7)$$

Nesse sentido, uma tensão de 1V é igual a 120dB μV , como segue-se em (5.8):

$$20\log_{10}\left(\frac{1V}{1\mu V}\right) = 20\log_{10}10^6 = 120dB\mu V \quad (5.8)$$

Compreende-se então que o valor de 1V é 120dB acima de um microvolt.

Outras unidades também podem ser utilizadas, como dBmV (dB acima de um milivolt) em (5.9), dB μA (dB acima de um microampère) em (5.10) e dBmA (acima de um miliampere) em (5.11):

$$dBmV = 20\log_{10}\left(\frac{volts}{1mV}\right) \quad (5.9)$$

$$dB\mu A = 20\log_{10}\left(\frac{volts}{1\mu A}\right) \quad (5.10)$$

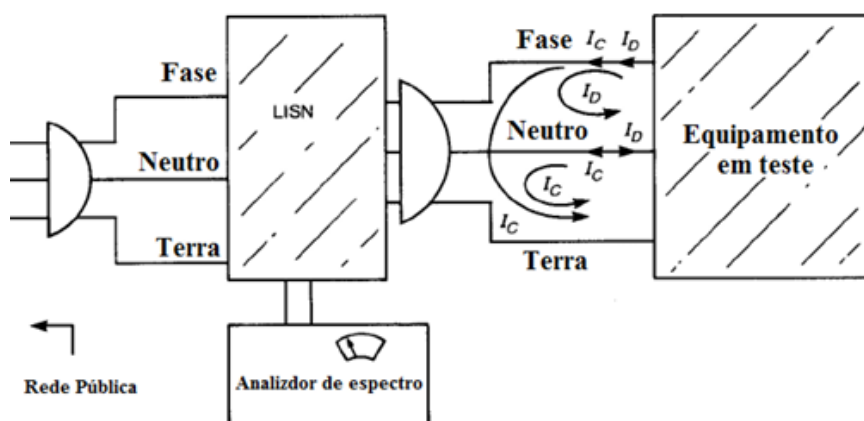
$$dBmA = 20\log_{10}\left(\frac{volts}{1mA}\right) \quad (5.11)$$

5.2 Configuração para ensaios de IEM conduzidas

É necessário, de antemão, fazer a preparação para o ensaio, que começa com a seleção cuidadosa do ambiente de teste, minimizando interferências que possam comprometer a precisão dos resultados. Essa etapa envolve a escolha de um local que atenda aos requisitos de isolamento e distância de fontes potenciais de ruído eletromagnético. Antes do início dos testes, é essencial verificar a integridade e a calibração dos equipamentos de medição, incluindo o LISN, para garantir sua conformidade com os padrões atuais de teste. Além disso, é importante fazer a seleção do LISN apropriado conforme a faixa de frequência e a potência do equipamento sob teste (EST), observando as instruções que a norma regional vigente propõe (IEC, 1993).

Compreender o método de medição para assegurar a aderência aos padrões regulatórios de emissão conduzida é fundamental. Para ilustrar de forma abrangente, é mencionado que os parâmetros estabelecidos pela FCC variam entre 450kHz e 30MHz, enquanto os definidos pela CISPR22 oscilam entre 150kHz e 30MHz. A avaliação da conformidade requer a utilização de uma rede de estabilização de impedância de linha (LISN), que é integrada no circuito entre a fonte de alimentação e o equipamento sob teste. As configurações dos LISN utilizados nos ensaios da FCC e da CISPR 22 são similares, e será tratada a seguir. Uma configuração típica de teste é ilustrada na Figura 12.

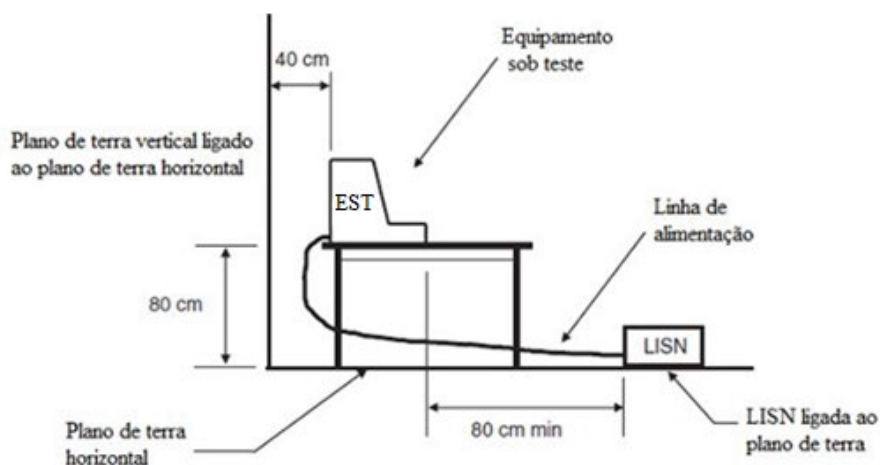
Figura 12 - Configuração típica do teste de emissão conduzida.



Fonte: PAUL, C. R. (1992).

A disposição dos equipamentos utilizados no ensaio deve respeitar determinadas distâncias entre eles, conforme é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Disposição dos equipamentos para teste de emissão conduzida.



Fonte: H. OTT (2009).

A configuração é formada por um plano de referência aterrado vertical. Nele deve estar disposta em sua frente uma mesa de madeira de 80 cm de altura, onde o equipamento sob ensaio deve ficar sobre a mesa e a 40 cm de distância do plano vertical. A LISN deve ficar a uma distância de no mínimo 80 cm do equipamento sob teste (OTT, 2009).

Pela Figura 12, observa-se que a energia que alimenta o equipamento circula através da LISN. A ela está acoplado um analisador de espectro por meio do qual se analisam as emissões por condução.

Um analisador de espectro, exemplificado pela Figura 14 também chamado de (*receiver*, receptor) é um instrumento utilizado para avaliar a distribuição espectral de sinais elétricos (TIHANYI, 1995). Especificamente, ele gera gráficos de frequência *versus* amplitude, fornecendo uma representação visual das intensidades das várias frequências presentes em um sinal. Esses gráficos são indispensáveis para identificar e quantificar emissões de ruído e interferências eletromagnéticas, permitindo a análise detalhada de como um dispositivo se comporta em diferentes bandas de frequência. Através desses dados, os engenheiros podem verificar a conformidade com normas de IEM/ CEM.

Figura 14 – Analisador de espectro ROHDE&SCHWARZ 9kHz-3GHz.



Fonte: Adaptado de ROHDE-SCHWARZ (2024).

A ligação do receptor ao LISN é realizada com um cabo coaxial, como ilustrado na Figura 15. Na extremidade que se conecta à LISN, a conexão é direta, enquanto na outra extremidade, que se conecta ao receptor, insere-se um atenuador de sinais para prevenir

possíveis danos ao *receiver* por ruídos elevados provenientes do equipamento em teste, vide Figura 16.

Figura 15 - Cabo coaxial pontas para conexões.



Fonte: Adaptado de CONECTWI (2024).

Figura 16 - Atenuador ESH3-Z2.



Fonte: Adaptado de ROHDE-SCHWARZ (2024).

5.3 Interpretação dos resultados

No contexto de ensaios de IEM conduzidas, o gráfico gerado pelo analisador de espectro é o meio para a análise detalhada das emissões de um dispositivo. Vide Figura 17, no eixo Y, a intensidade do sinal é apresentada em decibéis microvolts (dBuV), fornecendo uma medida quantitativa da magnitude das emissões capturadas. No eixo X, temos a frequência de varredura, que varia tipicamente de algumas dezenas de quilohertz a gigahertz, abrangendo assim o espectro relevante para a maioria das aplicações comerciais e industriais. A escala logarítmica utilizada no eixo das frequências em gráficos de análise de IEM permite uma melhor visualização e interpretação dos dados ao longo de uma ampla faixa de frequências. Essa escala é particularmente útil para representar o espectro de frequência porque as emissões

eletromagnéticas podem variar de valores muito baixos a extremamente altos. Na Figura 17 percebe-se que a escala varia de 150kHz até 30MHz (uma proporção de 200 vezes). O uso dessa escala facilita a identificação de picos de emissão em qualquer parte do espectro, permitindo aos engenheiros e pesquisadores analisarem efetivamente tanto as frequências baixas quanto as altas dentro do mesmo gráfico, sem perder detalhes significativos devido à compressão ou expansão excessiva dos dados.

Figura 17 – Exemplar de tela de um analisador de espectro.



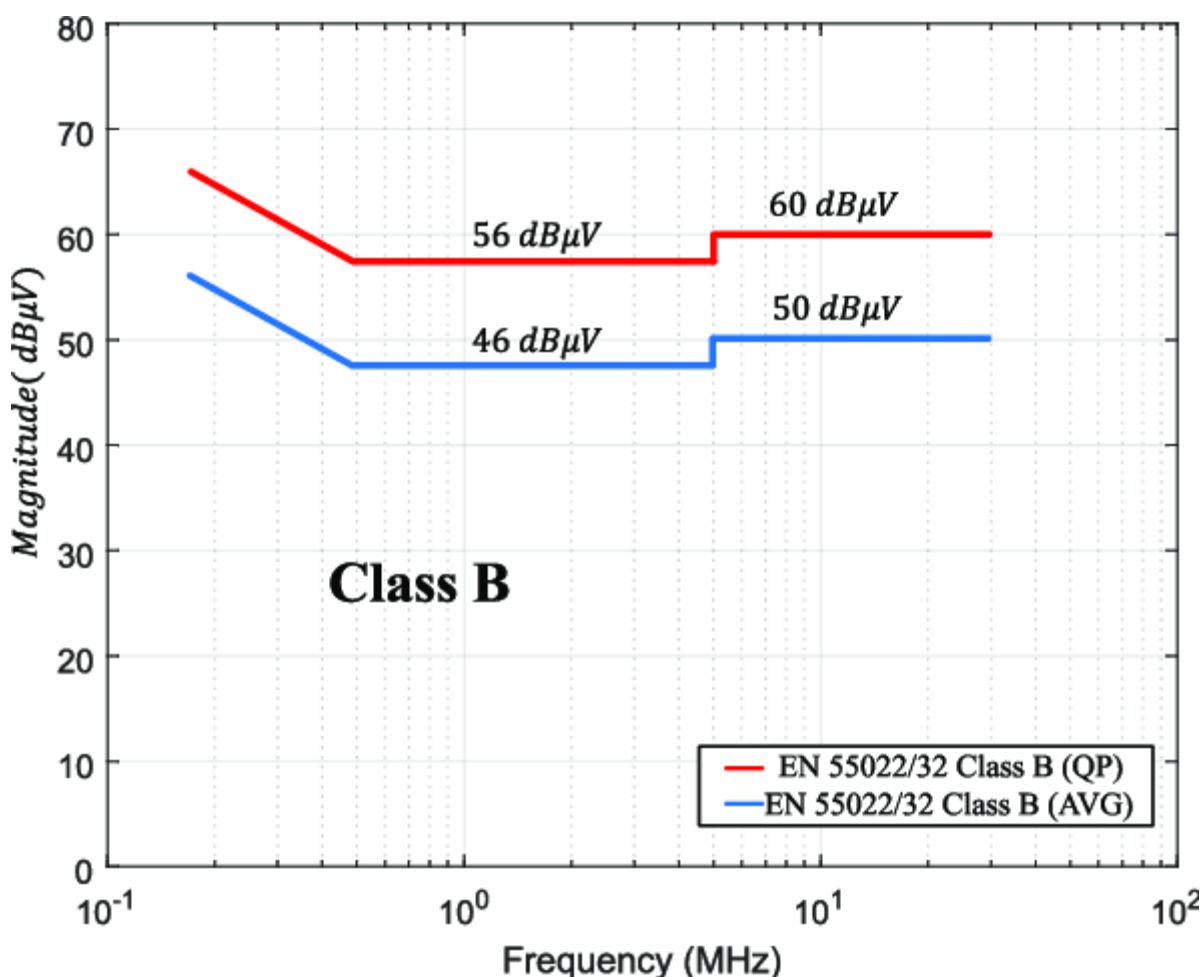
Fonte: Adaptado de WURTH ELEKTRONIK (2024).

Cada curva representada na Figura 17 em amarelo e azul no gráfico representa a intensidade de emissão para uma frequência específica, permitindo aos especialistas identificarem as faixas de frequência onde o dispositivo excede os limites de emissão estabelecidos pelas normas de compatibilidade eletromagnética.

Em ensaios profissionais onde se utilizam de instrumentação avançada destinada à avaliação de compatibilidade eletromagnética, é comum que os analisadores de espectro (*receivers*) estejam equipados com funcionalidades que permitem a pré-seleção automática dos limites de emissões de ruído eletromagnético (na Figura 17 está representada pela linha em vermelho) conforme estabelecido por normas internacionais. Esta capacidade de pré-configuração simplifica significativamente o processo de ensaios, facilitando a identificação de quaisquer desvios ou não conformidades em relação aos padrões aceitos (OTT, 2009).

A inserção dessas faixas limites, pré-selecionadas ou inseridas manualmente são de suma importância, pois elas permitem uma representação visual imediata da conformidade do dispositivo, onde as emissões acima dos limites estabelecidos são claramente destacadas. Essa visualização facilita a identificação de frequências problemáticas que requerem atenção, permitindo a identificação se o dispositivo sob teste está dentro dos padrões estabelecidos. A Figura 18 exemplifica essas faixas limites, demonstrando graficamente as posições limites, tanto de valores de quase pico (QP), quanto dos valores médios (AVG) dos ruídos eletromagnéticos estabelecidos pela norma CISPR 22 para equipamentos de classe B.

Figura 18 - Limites aplicáveis a equipamentos classe B da norma CISPR 22.



Fonte: TIMOTHY (2018).

A análise das emissões de ruído eletromagnético é realizada considerando diferentes tipos de medições: valores de pico, quase pico e média. Cada um desses métodos de medição fornece uma perspectiva única sobre as emissões do equipamento sob teste (EST) e é crucial para comparar a conformidade com os padrões de CEM.

Valores de pico: refletem a máxima amplitude que o sinal de ruído alcança em qualquer ponto dentro da faixa de frequência analisada. Essa medição é essencial para identificar o nível máximo de interferência que um dispositivo pode emitir. Os valores de pico são particularmente úteis para avaliar a capacidade de um sistema em suportar condições extremas sem causar ou sofrer interferências.

Valores de quase pico: são uma forma filtrada de medir as emissões, onde os picos são medidos com um tempo de integração específico, permitindo a detecção de variações rápidas no sinal de ruído. Esse método é útil para capturar emissões transientes que podem não ser constantes, mas ainda assim representam uma fonte potencial de interferência para outros dispositivos eletrônicos.

Valores médios: representam a média das emissões ao longo do tempo e fornecem uma visão geral do nível de ruído eletromagnético gerado pelo dispositivo durante um período estendido. Essa abordagem é valiosa para avaliar o comportamento geral do dispositivo em condições normais de operação e é frequentemente utilizada para comparação com os limites regulatórios de longo prazo.

Nos gráficos gerados durante os ensaios de CEM, esses diferentes valores são inseridos para fornecer uma representação visual compreensiva do comportamento das emissões em relação aos limites estabelecidos pelas normas aplicáveis. A comparação direta desses valores com os limites permite aos engenheiros identificarem prontamente áreas onde o dispositivo pode não estar em conformidade, facilitando a implementação de modificações necessárias para atender aos requisitos regulatórios e assegurar a compatibilidade eletromagnética efetiva.

6 EXEMPLO DE AFERIÇÕES EM SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo, é apresentada uma análise detalhada sobre a aferição de interferências eletromagnéticas (IEM) produzidas por uma fonte chaveada, utilizando o *software* LTspice como ferramenta de simulação. LTspice é reconhecido por suas amplas funcionalidades e eficiência na simulação de circuitos eletrônicos. A escolha desse *software* se deve à sua precisão, flexibilidade e disponibilidade gratuita, o que o torna uma opção valiosa para pesquisadores e engenheiros na área de engenharia elétrica/eletrônica.

O estudo inicia com uma fundamentação teórica sobre os princípios de operação das fontes chaveadas, enfatizando como esses dispositivos podem se tornar fontes significativas de IEM devido às suas rápidas transições de comutação. Essas emissões podem afetar adversamente o desempenho de outros equipamentos eletrônicos, tornando imperativa a compreensão de suas características e mecanismos de geração.

Além disso, será discutida a importância dos filtros IEM na atenuação dessas interferências. Os filtros IEM são essenciais para assegurar que os dispositivos cumpram com as normas regulamentares de compatibilidade eletromagnética, melhorando a coexistência de diversos equipamentos no mesmo ambiente operacional.

Para ilustrar de forma prática esses conceitos, será realizada uma simulação computacional no LTspice, comparando os resultados de uma fonte chaveada operando com e sem a aplicação de um filtro IEM. Esta simulação permitirá visualizar o impacto direto dos filtros na atenuação das emissões de IEM, fornecendo uma análise comparativa que destaca a efetividade dessas soluções na promoção da conformidade regulatória e na melhoria da integridade das redes de energia.

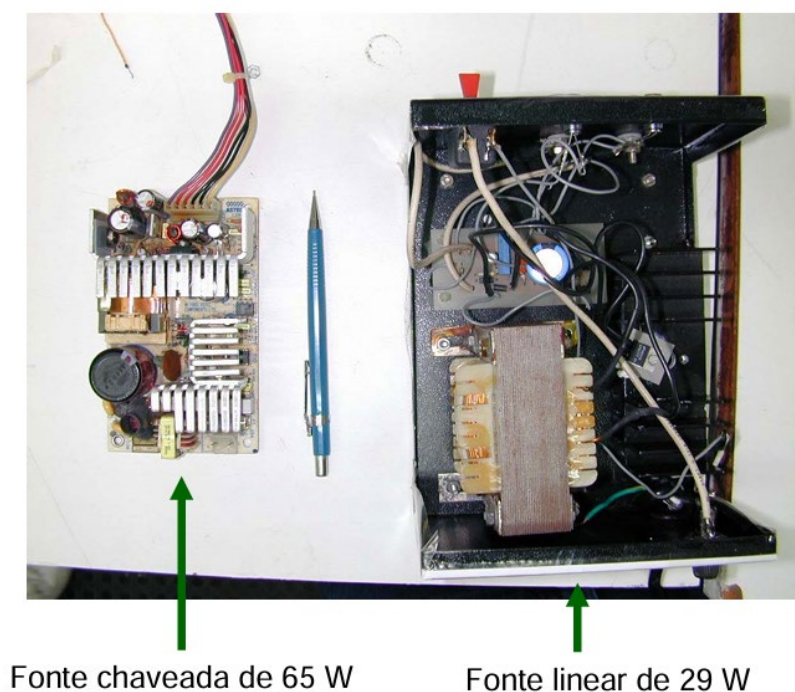
Este último capítulo, antes da conclusão do trabalho, portanto, visa contribuir para o campo da engenharia elétrica com *insights* práticos e teóricos sobre a gestão de IEM em fontes chaveadas, demonstrando a utilidade de ferramentas de simulação avançadas como o LTspice na avaliação e desenvolvimento de soluções eficazes para desafios contemporâneos de compatibilidade eletromagnética e também como uma ferramenta capaz de antecipar as IEM geradas por dispositivos antes mesmo dos projetos dos equipamentos serem executados e então passados para as etapas de testes reais, como mencionadas anteriormente neste trabalho.

6.1 Princípios teóricos

6.1.1 Fontes Chaveadas

Fontes chaveadas são dispositivos eletrônicos projetados para converter energia elétrica de uma forma eficiente, oferecendo vantagens significativas sobre os transformadores lineares tradicionais. A principal característica das fontes chaveadas é a capacidade de ajustar a transferência de energia eletricamente de uma forma controlada, mediante a comutação rápida de componentes eletrônicos, como transistores. Esse processo permite que as fontes chaveadas ofereçam uma eficiência energética superior, reduzindo perdas de energia e calor, o que as torna mais compactas, leves e eficientes em comparação com as soluções tradicionais (SCHLICHTING, 2003). Na Figura 19 estão dispostas lado a lado duas fontes, sendo que a menor é chaveada e tem uma potência de 65W e a maior é linear, oferecendo uma potência de apenas 29W, mais pesada e visivelmente maior que a chaveada. A figura 20 demonstra outro exemplar de fonte chaveada.

Figura 19 - Comparativo estrutural entre fonte chaveada e linear



Fonte: Adaptado de HAYAMA (2024).

Figura 20 - Exemplar de uma fonte chaveada.



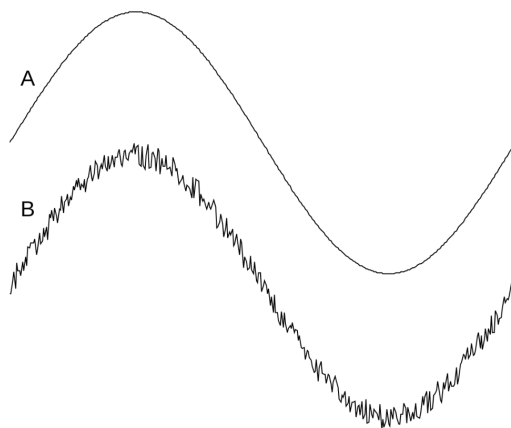
Fonte: Adaptado de SEEK (2024).

As vantagens das fontes chaveadas são particularmente relevantes no contexto atual, onde a demanda por dispositivos eletrônicos é cada vez maior e mais diversificada. A eficiência energética, a redução de tamanho e a capacidade de fornecer saídas de tensão ajustáveis tornam as fontes chaveadas uma escolha preferencial para uma ampla gama de aplicações, desde dispositivos portáteis até sistemas industriais complexos (DE LIZ, 2003).

O princípio de operação das fontes chaveadas baseia-se na regulação da energia transferida para a carga por meio da comutação rápida de componentes ativos, controlando assim a tensão e a corrente de saída. Este processo é realizado em alta frequência, o que permite o uso de transformadores e filtros menores, contribuindo para a compactação dos dispositivos (SCHLICHTING, 2003).

No entanto, a comutação em alta frequência das fontes chaveadas também pode gerar interferências eletromagnéticas (IEM). As rápidas transições de tensão e corrente podem produzir componentes de alta frequência que, se não forem devidamente filtrados ou contidos, podem irradiar ou ser conduzidos através das linhas de alimentação, interferindo no funcionamento de outros equipamentos eletrônicos próximos (DE LIZ, 2003). A Figura 20 ilustra um comparativo da forma do sinal senoidal de uma rede de energia sem ruído e outro com ruído característico de fontes chaveadas de alta frequência embutido.

Figura 21 - Diferença entre um sinal elétrico limpo (A) e com ruído (B).



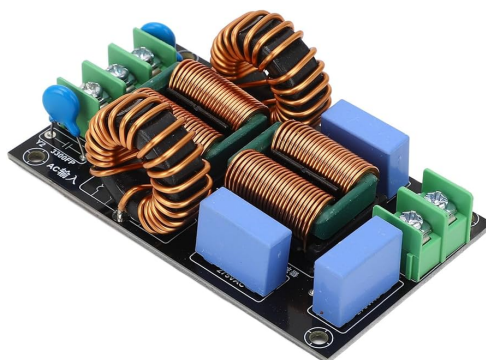
Fonte: Adaptado de WIKIPÉDIA (2024)..

Assim, enquanto as fontes chaveadas representam uma tecnologia avançada para a conversão de energia elétrica, a compreensão e o gerenciamento das emissões de IEM são essenciais para maximizar seu desempenho e viabilidade em aplicações modernas. A geração de IEM é uma questão importante associada ao *design* e operação das fontes chaveadas, exigindo atenção especial para a seleção de componentes, *design* de circuito e implementação de medidas de atenuação, como filtros IEM, para assegurar a conformidade com as normas de compatibilidade eletromagnética.

6.1.2 Filtro IEM

Filtros de Interferência Eletromagnética (IEM), assim como o exemplo ilustrado na Figura 22, são muito utilizados para reduzir ruídos gerados por fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos, de modo a assegurar a conformidade com padrões de compatibilidade eletromagnética (DE LIZ, 2003). Esses filtros atenuam emissões de ruído ao longo de um amplo espectro de frequências, minimizando interferências em outros equipamentos.

Figura 22 - Exemplar de um módulo de filtro IEM.



Fonte: Adaptado de AMAZON (2024).

A atenuação dos ruídos ocorre por interferência destrutiva ao combinar a Lei de Faraday aplicada a dois enrolamentos opostos conectados magneticamente no mesmo núcleo. A corrente de perturbação que passa por um enrolamento gera um campo magnético que é atenuado por ela mesma ao retornar pelo outro enrolamento (DORF; SVOBODA, 2011). Esta interação coordenada estabelece uma barreira efetiva contra a propagação de IEM, assegurando a estabilidade operacional dos sistemas eletrônicos e a minimização de interferências disruptivas. A Figura 23 ilustra o processamento dos sinais ruidosos provenientes de fontes chaveadas.

Figura 23 - Princípio de funcionamento de filtros IEM.



Fonte: do autor (2024).

Sua utilização é crucial não apenas para cumprir normas regulatórias, mas tem como função principal garantir a harmonia entre dispositivos em ambientes compartilhados. Particularmente em sistemas com fontes chaveadas, que geram emissões de IEM devido as comutações em alta frequência, filtros IEM são fundamentais para manter níveis de ruído aceitáveis, manter a qualidade da energia elétrica da rede ao qual está conectada e proteger

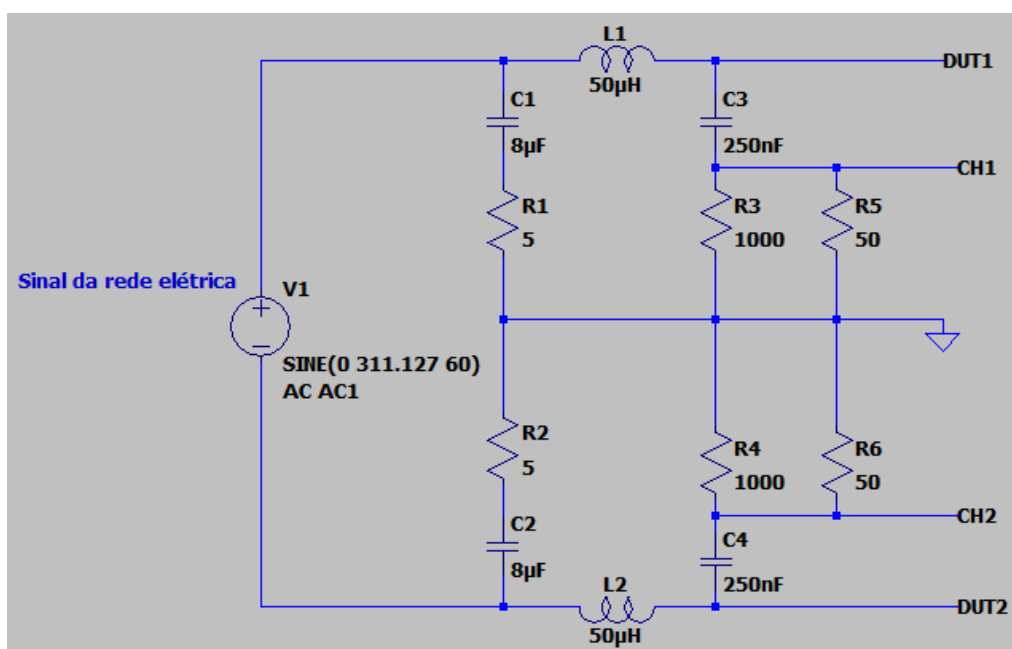
equipamentos adjacentes (DE LIZ, 2003). O entendimento e a aplicação apropriada desses filtros são críticos para engenheiros e projetistas na criação de produtos eletrônicos e conformes às normas de IEM.

6.2 Simulação computacional

6.2.1 Simulação da Linha de impedância estabilizada (LISN)

Para as simulações de aferição de interferências eletromagnéticas (IEM) conduzidas provocadas por uma fonte chaveada conforme os testes convencionais já apresentados no capítulo 5, optou-se pela inclusão da rede de estabilização de impedância de linha (LISN) no circuito de simulação. Na Figura 24, tem-se a representação do circuito da LISN que foi montado no *software* Ltspice para simular as aferições, ao qual está conectada a um sinal senoidal de alimentação de 220V e 60Hz, representando um dos padrões característicos de alimentação de energia elétrica brasileira.

Figura 24 - Circuito simulado de uma rede de estabilização de impedância de linha.

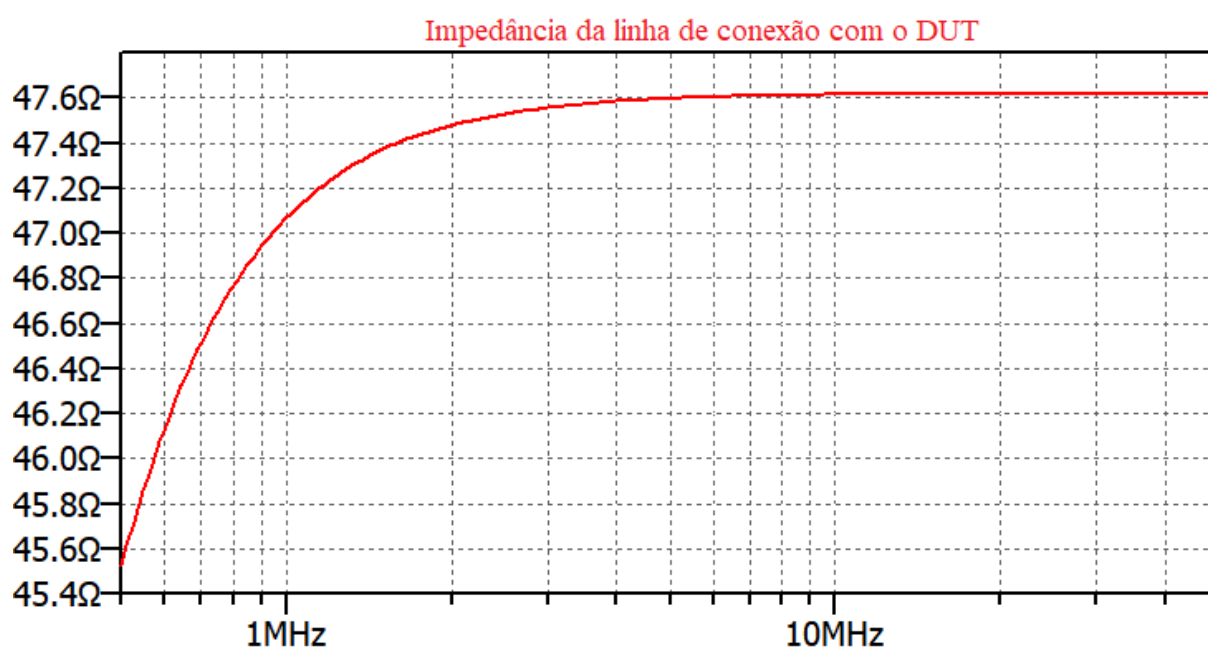


Fonte: do autor (2024).

O gráfico apresentado na Figura 25 demonstra a estabilização da linha de impedância da rede em 47.8 Ohms ao longo do espectro de frequências, o que está dentro dos limites estabelecidos nos ensaios pelas normas. Como apresentado no capítulo 4, a estabilidade da linha

de impedância em torno de 50 Ohms ao longo de todo o espectro de frequências de interesse é especialmente importante na utilização de uma rede e estabilização de impedância de linha (LISN), que atua como ponto de interface entre o dispositivo em teste (DUT) e o sistema de medição. Ao manter a impedância da linha em 50 Ohms, a LISN garante que as medições sejam realizadas sob condições padronizadas e consistentes, facilitando a comparação dos resultados e a avaliação da conformidade com os padrões regulatórios de compatibilidade eletromagnética.

Figura 25 - Sinal de impedância da LISN simulada sob o espectro de frequência.

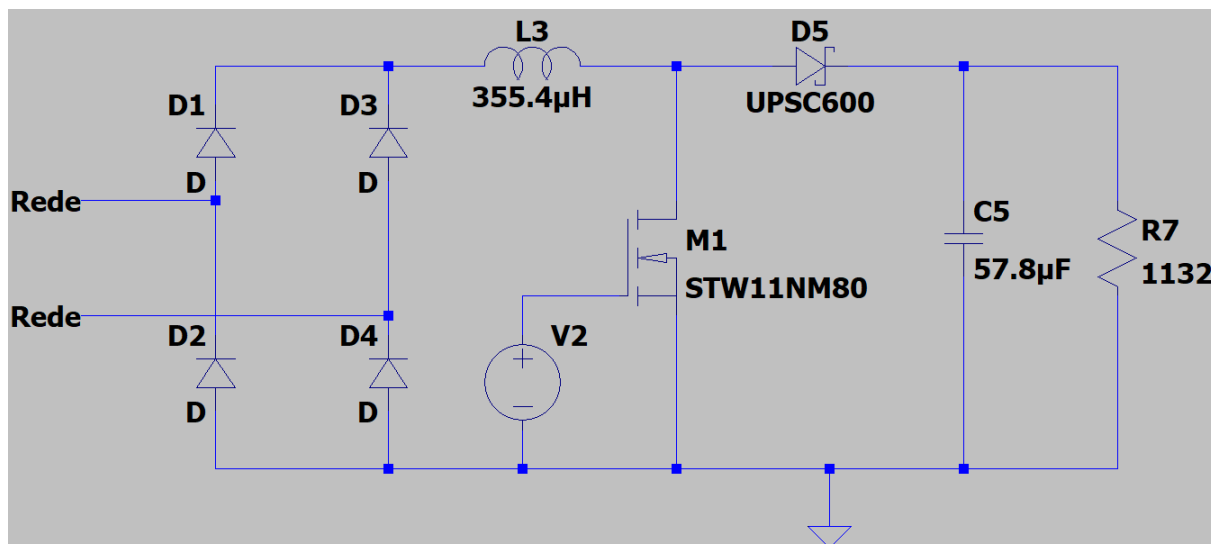


Fonte: do autor (2024).

6.2.2 Simulação da fonte chaveada

O circuito da fonte chaveada que será utilizado para teste neste capítulo é projetado para trabalhar como um conversor *boost*, uma configuração de fonte chaveada bastante comum em sistemas eletrônicos onde é necessário alterar a tensão de entrada, retificando-a elevando-a para uma tensão de saída maior. Na Figura 26 tem-se o circuito dessa fonte utilizado no *software* Ltspice para serem feitos os testes de IEM.

Figura 26 - Circuito de simulação de um conversor *boost* (fonte chaveada).



Fonte: do autor (2024).

A configuração dos dispositivos do conversor da Figura 26 foi retirada de um projeto pessoal dos autores cujo intuito foi de alimentar adequadamente uma placa de LEDs de alta potência. Os parâmetros de projeto dessa fonte foram os seguintes:

- **Tensão de entrada:** rede de alimentação brasileira convencional de 220 Volts e 60 Hz;
- **Tensão de saída:** 400 Volts em modo contínuo;
- **Variação de tensão de saída:** 24,5 Volts.
- **Potência de saída:** 130 Watts.
- **Frequência de chaveamento:** 50kHz.
- **Razão cíclica de operação:** 0,18
- **Fator de potência:** 0,92.

Este conversor foi projetado para operar em modo de condução contínua, o que significa que a corrente de carga flui continuamente através do indutor durante todo o ciclo de operação (IVO BARBI, 2007). Isso significa que a corrente na carga jamais chegará a zero durante o ciclo de operação, o que no caso prático buscou-se refletir na não cintilação do painel de LEDs e em uma operação estável e contínua do sinal de energia.

O circuito em simulação da Figura 26 é composto pelos seguintes elementos principais:

1. **Fonte de Entrada (Rede de alimentação):** representa a tensão de entrada ao qual a fonte será alimentada.

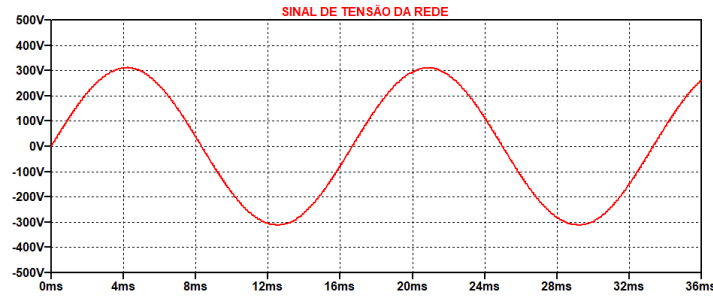
2. **Indutor (L3):** o indutor é responsável por armazenar energia durante o tempo em que a chave (transistor) está ligada e liberá-la para o circuito de saída quando a chave está desligada.
3. **Transistor de Potência (M1):** funciona como a chave controladora no circuito, alternando entre os estados ligado e desligado para controlar o fluxo de corrente através do indutor.
4. **Diodo de Retificação (D5):** permite que a corrente flua em apenas uma direção no circuito, convertendo a energia armazenada no indutor em energia utilizável pela carga.
5. **Capacitor de Saída (C5):** responsável por suavizar a tensão de saída e filtrar quaisquer flutuações indesejadas.
6. **Carga (R7):** representa o dispositivo ou sistema eletrônico que será alimentado pela fonte chaveada.

Durante o ciclo de operação, o transistor de potência (M1) é alternado entre os estados ligado e desligado por um circuito de controle, representado na Figura 26 pela fonte pulsante (V2), praticado comumente através de um circuito de modulação de largura de pulso (MLP). Quando M1 está ligado, a corrente da fonte de entrada (rede de alimentação) é direcionada para o indutor (L3), armazenando energia magnética. Quando M1 é desligado, a energia armazenada no indutor é transferida para o capacitor de saída (C5) e para a carga (R7) através do diodo de retificação (D5) de modo a aumentar o nível de tensão de saída.

Este tipo de conversor é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações eletrônicas devido à sua eficiência e capacidade de fornecer uma tensão de saída maior que a de entrada. No entanto, sua operação de comutação rápida pode gerar interferências eletromagnéticas indesejadas. Para efeito de comparação do impacto que uma fonte chaveada (sem filtro IEM) pode gerar à rede de energia serão feitas as aferições do sinal de entrada com e sem acoplamento da fonte.

Fazendo, em simulação, a medição do sinal de tensão da rede de alimentação ao qual será conectada a fonte em questão temos como resultado o gráfico disposto na Figura 27. Percebe-se um sinal suave e contínuo no tempo, congruente aos padrões estabelecidos pela concessionária de energia elétrica.

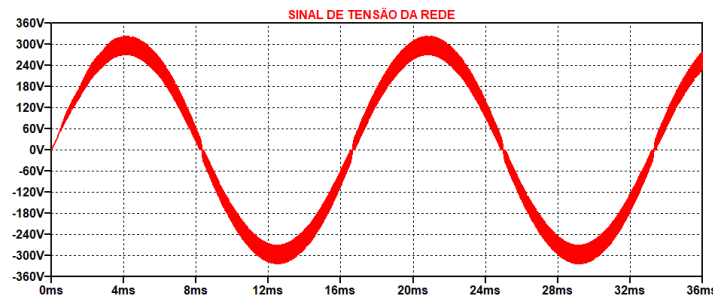
Figura 27 - Sinal de tensão da rede sem o acoplamento da fonte chaveada.



Fonte: do autor (2024).

Tem-se agora, na Figura 28, o sinal de tensão aferido no mesmo ponto do circuito de simulação com a diferença que agora está conectada a fonte chaveada em questão. É perceptível um sinal denso, característico de que está tendo correntes transitórias de alto valor e consequentemente perturbação magnética.

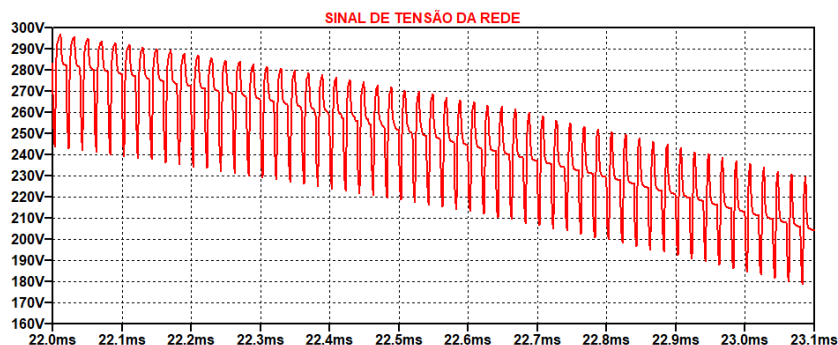
Figura 28 - Sinal de tensão da rede conectada à fonte chaveada (sem filtro IEM).



Fonte: do autor (2024).

Com uma aproximação nos parâmetros do tempo no *software* de simulação é possível visualizar melhor na Figura 29 o efeito no sinal de tensão da rede produzido pelos ruídos eletromagnéticos provenientes do chaveamento de alta frequência da fonte analisada.

Figura 29 - Ruídos no sinal de rede provenientes de fonte chaveada.

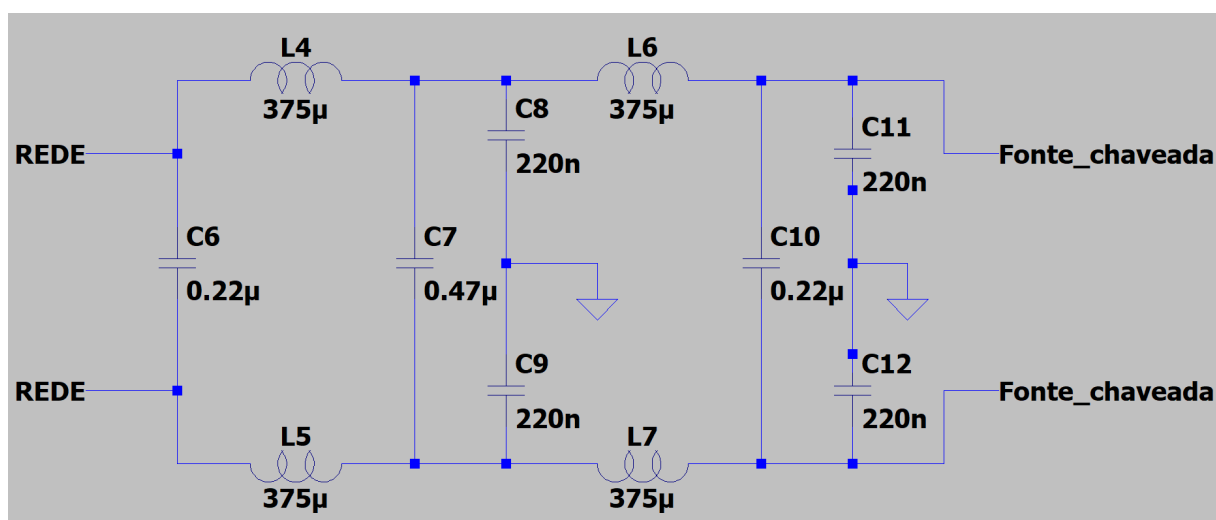


Fonte: do autor (2024).

6.2.3 Simulação do filtro IEM

Com o intuito de suprimir as emissões de ruído eletromagnético discutido no tópico anterior de modo que a fonte em questão atenda aos padrões regulatórios de compatibilidade eletromagnética foi projetado um filtro IEM, cujo circuito utilizado na simulação está disposto na Figura 30.

Figura 30 - Circuito de simulação do filtro IEM.



Fonte: do autor (2024).

O filtro IEM utilizado neste estudo é composto pelos seguintes elementos principais:

1. **Indutores (L4, L5, L6 E L7):** os indutores são usados para bloquear ou atenuar o ruído de alta frequência, permitindo a passagem das frequências de sinal desejadas. Eles fornecem uma alta impedância para o ruído de alta frequência.
2. **Capacitores (C6, C7, C10):** os capacitores são empregados para filtrar o ruído de alta frequência e suavizar a tensão de alimentação. Eles fornecem uma baixa impedância para o ruído de alta frequência.
3. **Capacitores (C9, C11, C12):** os capacitores são utilizados para desviar a correntes elétricas de alta frequência.

6.3 Simulação de aferições de IEM.

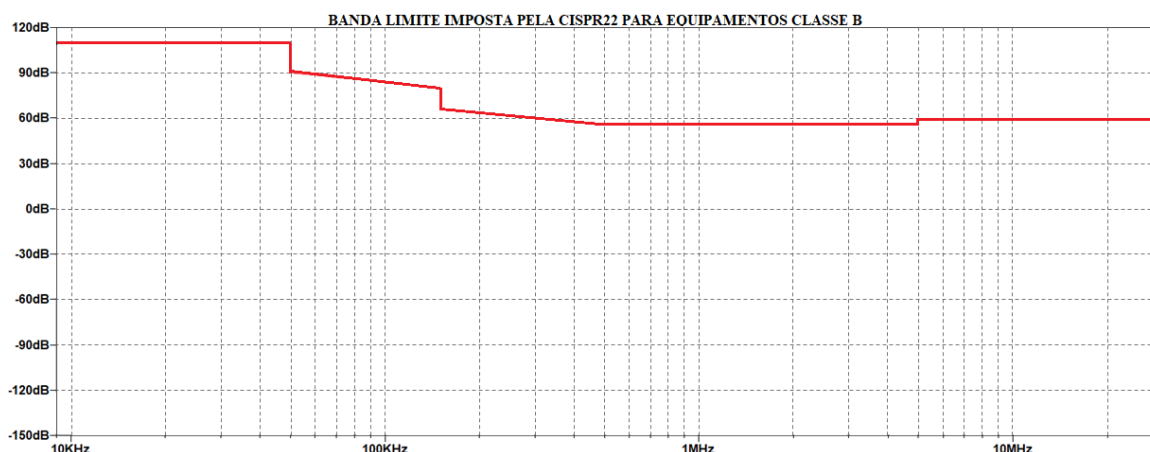
Ao conduzir a simulação das aferições de IEM para uma fonte chaveada, é fundamental saber de antemão as normas que regem os limites de ruídos eletromagnéticos aplicáveis ao tipo específico de equipamento em teste. Para este estudo, focado em uma fonte chaveada destinada a alimentar um sistema de iluminação LED de alta potência, optou-se pela norma CISPR 22 devido à sua abrangência e reconhecimento na certificação de equipamentos eletroeletrônicos similares.

Conforme a CISPR 22, o equipamento em estudo é classificado como Classe B. Essa escolha se fundamenta em considerações técnicas e normativas, uma vez que os limites da Classe B são mais adequados para dispositivos eletrônicos destinados a ambientes residenciais e comerciais, como é o caso do painel de LEDs em questão. A seleção desses limites visa garantir a conformidade com os requisitos de emissão de ruído eletromagnético em condições típicas de uso, além de refletir a preocupação com a adequação do produto ao ambiente real de operação.

Na Figura 31, é apresentada a imposição da banda limitante de ruídos eletromagnéticos conforme definida pela norma selecionada. O espectro de frequência varia de 9kHz a 30MHz, como indicado pelo documento normativo. Nota-se que esses limites não são constantes em todo o espectro, mas variam em magnitude de acordo com a frequência do sinal ruidoso.

Esta banda não existe nas configurações padrões do software LTspice, foi inserida textualmente no arquivo de plotagem que é gerado após a simulação das aferições e então retirado em edição de imagem o ruído proveniente do equipamento sob teste na simulação.

Figura 31 - Limite imposto pela norma CISPR 22 para equipamentos classe B.



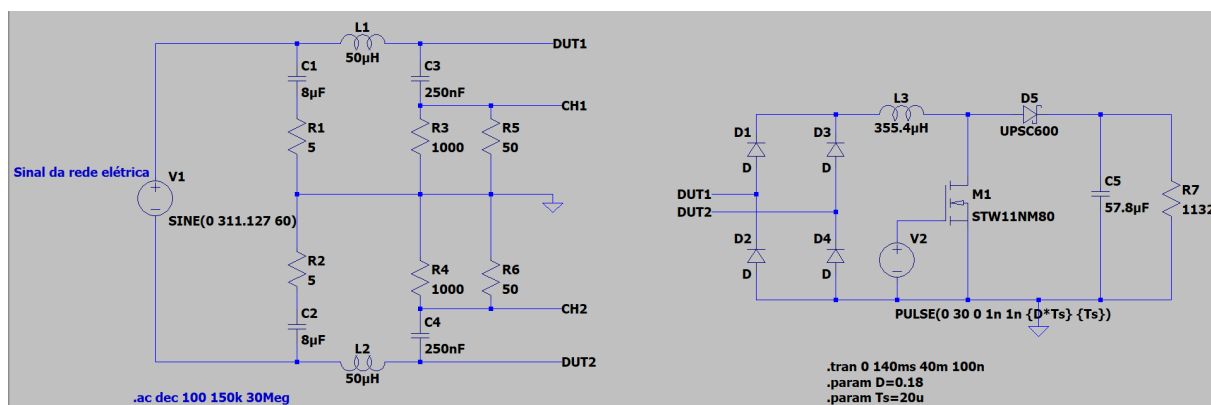
Fonte: do autor (2024).

6.4 Resultados dos testes em simulação

6.4.1 Aferição de ruídos sem filtro IEM acoplado

Na Figura 31, apresenta-se o esquemático dos circuitos utilizados na simulação para os testes de IEM, seguindo os padrões de conexão dos equipamentos descritos no Capítulo 5, conforme mostrado na Figura 12. Embora a disposição dos equipamentos na simulação computacional não possa corresponder à ilustrada na Figura 13, isso não afeta os resultados de interesse, uma vez que sob estas condições virtuais tem-se a vantagem de os testes por simulação não serem interferidos por nada além do que o equipamento sob teste mais aquilo que se deseja considerar na simulação. Através da medição, realizada pelos canais CH1 e CH2 da LISN, será avaliado o sinal ruidoso gerado pelo conversor *boost*, representando a interferência potencial que provocaria na rede elétrica.

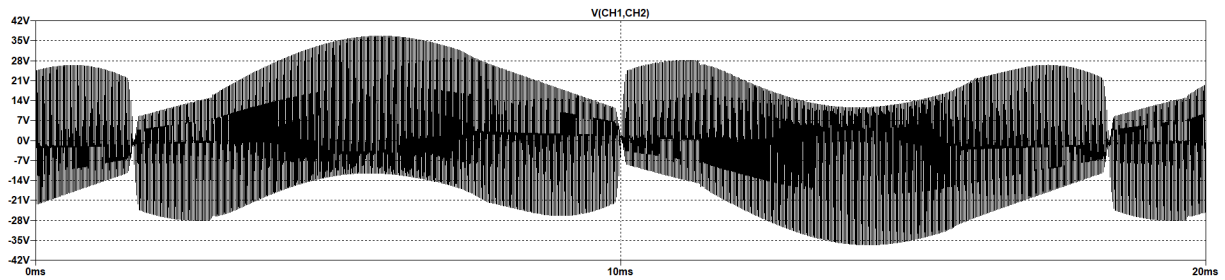
Figura 32 - Circuito de teste sob simulação sem uso de filtro IEM.



Fonte: do autor (2024).

No gráfico mostrado na Figura 33 tem-se o sinal ruidoso proveniente do circuito da fonte chaveada sob teste, este sinal está sob o domínio do tempo e mostra a intensidade (em Volts) a qual tem uma variação em alta frequência que vai de -28 Volts até um pico de 34Volts; é este o sinal que a fonte chaveada estaria interferindo eletromagneticamente na rede ao qual estaria conectada. Apesar de este sinal estar sendo aferido sob uma impedância padronizada de cerca 50 Ohms, mediante a utilização da LISN, desta maneira em que está sendo visualizado não é possível fazer a comparação com os limites normativos, entretanto deve-se analisá-lo no domínio da frequência com a ferramenta de transformada de Fourier (FFT) que é disponibilizada pelo próprio *software* Ltspice, desempenhando o papel do analisador de espectro de frequências.

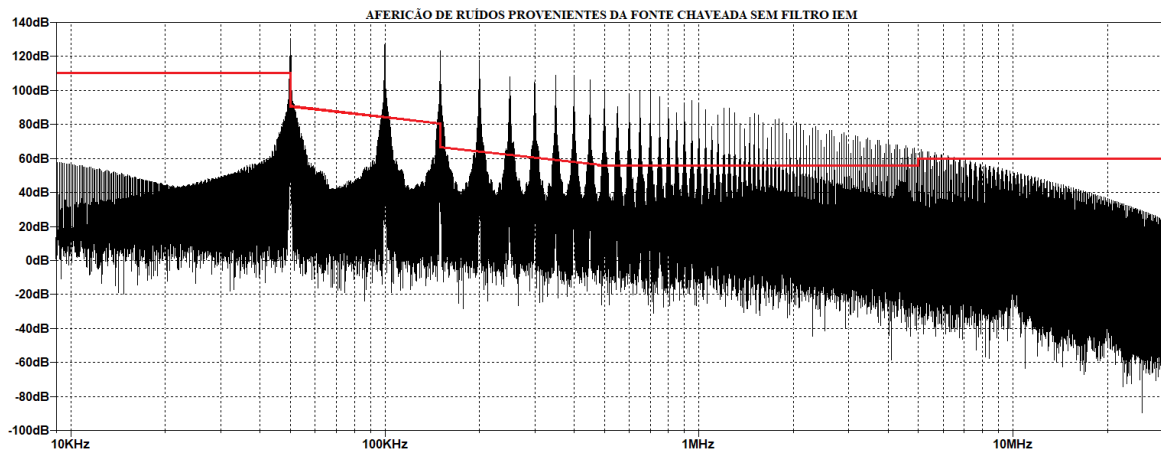
Figura 33 - Sinal ruidoso da fonte chaveada sem o filtro IEM (tensão x tempo).



Fonte: do autor (2024).

No gráfico apresentado na Figura 34, observa-se o comportamento do sinal de ruído emitido pelo equipamento sob teste em relação aos limites estabelecidos pela norma CISPR 22.

Figura 34 - Aferição dos ruídos provenientes da fonte chaveada sem filtro IEM.



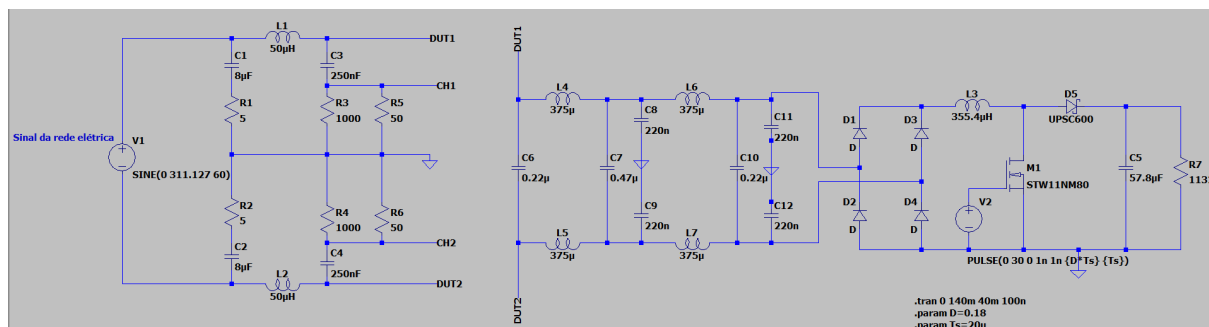
Fonte: do autor (2024).

Destaca-se que o sinal de ruído ultrapassa os limites permitidos em uma ampla faixa de frequências, especificamente entre 50 kHz e 7 MHz. Esta transgressão é significativa e indica que o equipamento não está em conformidade com os requisitos normativos e demonstra um comportamento inadequado e preocupante, pois pode resultar em interferências prejudiciais em outros dispositivos eletrônicos operando na mesma faixa de frequência, comprometendo a integridade e o desempenho de sistemas eletrônicos próximos, sugerindo a necessidade de intervenções no *design* do equipamento ou na implementação de medidas de atenuação de IEM, como filtros específicos ou modificações no próprio circuito.

6.4.2 Aferição de ruídos com acoplamento de filtro IEM

Seguindo o mesmo modo de aferição, mas agora com o acoplamento de um filtro IEM à fonte chaveada será realizada a análise de emissões eletromagnéticas conduzidas e providas por este novo sistema. Na Figura 35 tem-se a representação do circuito simulado.

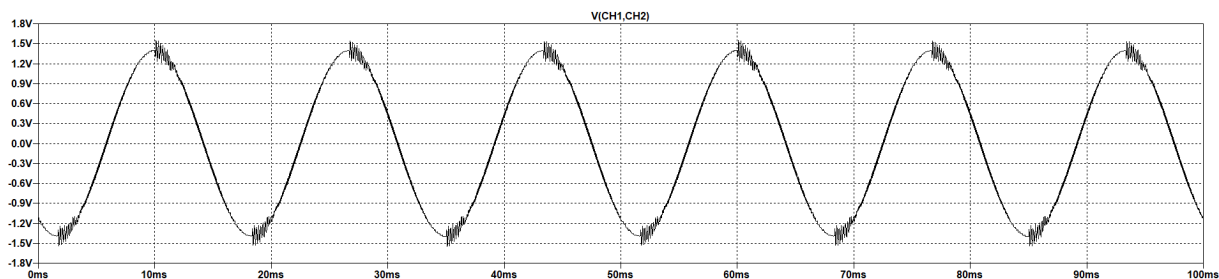
Figura 35 - Circuito de teste sob simulação com uso de filtro IEM.



Fonte: do autor (2024).

No gráfico mostrado na Figura 36, observa-se o sinal ruidoso proveniente do circuito da fonte chaveada com o filtro IEM acoplado, o qual seria transmitido à rede de energia elétrica. Este sinal, representado no domínio do tempo, exibe uma senoide quase perfeita, com uma amplitude total de cerca de 3 Volts na frequência da rede (60Hz). Nota-se uma variação mínima em alta frequência nos picos da senoide. Em comparação com o sinal apresentado na Figura 33, este é significativamente menos intenso e mais suave, evidenciando a eficácia do filtro IEM em atenuar os ruídos indesejados, porém ainda não comprovando a adequação às normas de compatibilidade eletromagnéticas.

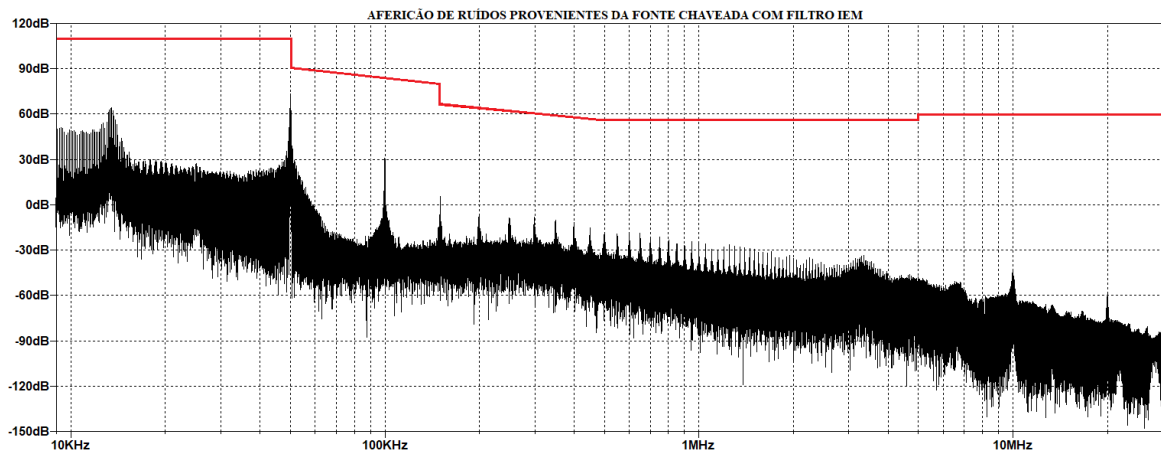
Figura 36 - Sinal ruidoso da fonte chaveada com o filtro IEM (tensão x tempo).



Fonte: do autor (2024).

O gráfico da Figura 37 prova que os ruídos residuais de modo conduzido provenientes da fonte chaveada após a filtragem pelo filtro IEM estão abaixo dos limites máximos de interferência eletromagnéticas estabelecidos pela norma CISPR 22 e então garantido por esta que o circuito simulado estaria acoplado de modo harmonioso com as redes de energia elétrica, seja a de domínio nacional/internacional ao qual a normativa rege.

Figura 37 - Aferição dos ruídos provenientes da fonte chaveada com filtro IEM.



Fonte: do autor (2024).

7 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil, o projeto e a fabricação de equipamentos eletrônicos em grande escala ainda está muito longe de alcançar o mesmo nível observado em países de primeiro mundo. Essa realidade contribui para uma menor preocupação com questões de compatibilidade e interferência eletromagnética, o que nos leva a depender amplamente de produtos eletrônicos internacionais e consequentemente das normas internacionais que regem a certificação de tais equipamentos, por este motivo o Brasil não dá a devida importância ao estudo e compreensão desse setor da engenharia elétrica. Nesse sentido, justifica-se o desenvolvimento deste trabalho acadêmico.

Diante disso a pesquisa teve como objetivo geral contribuir em prol da visibilidade da importância e do melhor entendimento desse assunto no meio acadêmico nacional, tratando especificamente do rigor científico de como se faz o controle e as análises das emissões de ruídos eletromagnéticos de modo conduzido proveniente de equipamentos eletroeletrônicos de maneira geral, sobretudo dos testes padronizados que estes devem passar antes de poderem ser comercializados. Constatou-se que este objetivo foi devidamente atendido por meio da realização de uma revisão abrangente da literatura existente, do desenvolvimento de modelos de simulação detalhados e da análise crítica dos resultados obtidos.

Um dos objetivos específicos deste trabalho foi compreender os conceitos de interferências e compatibilidade eletromagnéticas, que são fundamentais para a base teórica do estudo. Esse objetivo foi abordado detalhadamente no capítulo 2, onde foram discutidos os princípios que regem as interferências eletromagnéticas e a importância da compatibilidade eletromagnética em sistemas eletroeletrônicos. Através de uma revisão extensa da literatura e da apresentação de conceitos teóricos essenciais, constatou-se que esse objetivo foi atendido ao fornecer uma compreensão introdutória, que, embora não aprofundada matematicamente, é suficiente para dar suporte aos capítulos subsequentes e oferecer uma visão clara e didática do tema.

O segundo objetivo específico foi examinar as principais normas relacionadas à compatibilidade eletromagnética, especialmente no contexto de equipamentos eletroeletrônicos. Este objetivo foi abordado no capítulo 3, onde foram descritas as normas mais relevantes, como a CISPR 22, suas aplicações e a importância de cada uma no controle das emissões de ruídos eletromagnéticos. A análise das normas permitiu entender os critérios de aceitação e embora não tenha sido detalhado especificamente quais são os limites para cada setor, foi oferecido um compêndio abrangente de diversas normas que dizem respeito a cada

setor específico, proporcionando uma visão geral e informativa sobre os padrões regulatórios e suas aplicações, confirmando que esse objetivo foi atendido com sucesso.

O terceiro objetivo específico focou-se na análise das redes de estabilização de impedância de linha (LISN), utilizadas para medir interferências conduzidas. No capítulo 4, foi feita uma descrição detalhada do funcionamento das LISN, sua importância e a configuração de seus componentes. Através de uma explicação clara e técnica, este objetivo foi atingido, proporcionando uma base técnica robusta para as análises subsequentes.

O quarto objetivo específico foi descrever o processo de análise de interferências eletromagnéticas utilizando uma LISN. No capítulo 5, foram apresentados os métodos e procedimentos adotados para realizar medições de ruídos conduzidos, bem como os instrumentos auxiliares envolvidos no processo. Este objetivo foi cumprido ao detalhar cada etapa do processo de medição, garantindo a compreensão clara dos métodos empregados.

Por fim, o quinto objetivo específico foi realizar simulações computacionais de análise de interferências eletromagnéticas conduzidas, este objetivo foi tratado no capítulo 6, onde as simulações foram conduzidas utilizando o *software* LTspice. Os resultados das simulações possibilitaram uma análise dos ruídos, com base em tudo que foi estudado e escrito nos capítulos anteriores do TCC, confirmando que o objetivo foi plenamente atendido.

Na última parte deste trabalho, formulou-se a hipótese de que a utilização de um filtro IEM (Filtro de Interferência Eletromagnética) reduz significativamente os ruídos conduzidos gerados por uma fonte chaveada, mantendo-os dentro dos limites estabelecidos pela norma CISPR 22 para dispositivos de Classe B. Para verificar essa hipótese, simulações computacionais foram realizadas, comparando os níveis de ruído em dois cenários: sem e com um filtro IEM acoplado. As análises demonstraram que o filtro IEM atenua efetivamente os ruídos conduzidos, validando em simulação a hipótese e ressaltando a importância do uso de filtros IEM em fontes chaveadas, particularmente em dispositivos para ambientes residenciais e comerciais. Os resultados contribuem para o campo da compatibilidade eletromagnética, oferecendo uma base teórica e prática para futuras pesquisas e desenvolvimentos.

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em uma linha crescente de aprendizado, visando proporcionar uma compreensão gradual e que ao longo dos capítulos aprofunde os conceitos e técnicas relacionadas às aferições de interferências eletromagnéticas conduzidas. Esta abordagem progressiva e incremental, permitiu uma transição suave do conhecimento teórico para a prática, garantindo uma compreensão completa e integrada do tema abordado.

Ao finalizar este estudo, conclui-se que o trabalho realizado auxilia no tratamento do problema justificado. Apesar de introdutório, ofereceu uma base teórica e prática em simulação sobre aferições de interferências eletromagnéticas conduzidas. A pesquisa alcançou seus objetivos específicos ao detalhar os conceitos de compatibilidade eletromagnética, explicar e expor em compêndio as normativas relevantes, descrever as redes de estabilização de impedância de linha e realizar um exemplo de aferições em ambiente de simulação computacional seguindo as diretrizes instruídas no próprio trabalho. No entanto, algumas lacunas ainda permanecem. Primeiramente, as simulações realizadas são baseadas em modelos computacionais que, apesar de fornecerem uma boa aproximação, podem não captar todas as nuances dos fenômenos eletromagnéticos em ambientes reais. Além disso, a pesquisa limitou-se ao estudo de uma única configuração de fonte chaveada, o que pode não representar a diversidade de equipamentos e cenários encontrados na prática de aferição.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, várias limitações e dificuldades foram encontradas. A realização de simulações computacionais no *software* LTspice, embora eficiente, apresentou limitações em replicar com precisão todas as variáveis e condições reais encontradas em testes laboratoriais. Além disso, a pesquisa foi restrita pela disponibilidade de recursos e equipamentos específicos para a realização de testes práticos, limitando a validação empírica dos resultados obtidos. A complexidade dos fenômenos de interferência eletromagnética, que dependem de múltiplos fatores, também representou um desafio significativo, exigindo uma abordagem mais simplista para assegurar a relevância e a compreensão dos dados. Adicionalmente, a dificuldade de consultar e interpretar diversas normas internacionais de compatibilidade eletromagnética demandou um esforço considerável para garantir que todas as exigências regulatórias fossem adequadamente compreendidas e aplicadas. Essas limitações destacam a importância de continuar a pesquisa com recursos e abordagens mais abrangentes para validar e expandir os resultados apresentados.

Para futuras pesquisas na área de compatibilidade eletromagnética, recomenda-se o desenvolvimento de um projeto dedicado à criação de uma rede de estabilização de impedância de linha (LISN) personalizada. Com essa infraestrutura, seria possível realizar aferições reais em uma ampla variedade de dispositivos eletroeletrônicos, proporcionando dados empíricos que complementam, por exemplo, as simulações computacionais apresentadas neste trabalho. Além disso, é sugestivo explorar diversas estratégias de atenuação de ruídos, não apenas através de filtros IEM, mas também mediante o *design* inovador de circuitos elétricos de uma maneira geral. Testes práticos em condições controladas permitirão identificar soluções eficazes e aplicáveis em diferentes contextos industriais e residenciais. Essas investigações contribuirão

significativamente para a evolução das práticas de engenharia elétrica, promovendo uma plena compreensão do tema de compatibilidade eletromagnética em conformidade com as normas vigentes, e melhorando o registro de conhecimento sobre a robustez e a eficiência dos projetos de dispositivos eletroeletrônicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA MUÑOZ, HELGER AUGUSTO. **Avaliação da interferência de redes sem fio Wi-Fi e Bluetooth sobre uma rede BACNET/IEEE 802.15.4**. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) —Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Referências bibliográficas, NBR 12304**. Rio de Janeiro, 1990.

BARBI, IVO. **Projetos de fontes chaveadas**. Edição do autor, 2007.

DE LIZ, M. B. **Contribuição para a Redução da Interferência Eletromagnética em Fontes Chaveadas**. 2003. (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DORF, RICHARD C.; SVOBODA, JAMES A. **Introdução aos Circuitos Elétricos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. **Limits and methods of radio disturbance characteristics of information technology equipment**. CISPR 22, Genebra, 1993.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC **Electromagnetic compatibility (EMC)**. Geneve, Jan. 2003.

JACINTHO, J. L.; SILVA, FERRAZ G. A.; SANTANA, L. S.; PONCIANO FERRAZ, P. F. **Receptores de Sinais do Sistema Global de Navegação Por Satélite Submetidos a Interferências Físicas**. ENERGIA NA AGRICULTURA, 115–125. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n1p115-125>. Acesso em: 17 Jul. 2023.

LIU, Q.; WANG, F.; BOROYEVICH, D. **Modular-Terminal-Behavioral (MTB) Model for Characterizing Switching Module Conducted EMI Generation in Converter Systems**. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006.

LIMA, THIAGO. **EMC: compatibilidade eletromagnética**. 2013. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/emc-compatibilidade-eletromagnetica/>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

MARTINHO, EDSON. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2016.

MALACK, J. **Statistical Correlation Between Conducted Voltages on the Powerline and Those Measured with a Line-Impedance Stabilization Network**, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. EMC-20, no 2, p. 346–349, maio 1978.

MITALKUMAR, L; NISHA P. V.; SINDHU T. K. **Design of a Modified Three Phase Line Impedance Stabilization Network for Conducted Emission Test**, dez. 2018.

NETTO, PAULO GABRIEL TREVISOL ESTRELLA DE SOUZA; KERTSCHER FELIPE; PIMENTEL, GUSTAVO REIKDAL DE OLIVEIRA. **Interferência eletromagnética em sistemas de áudio**. 2017. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica ênfase Eletrotécnica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

OTT, HENRY W. **Electromagnetic Compatibility Engineering**. New Jersey: Wiley, 2009.

PAUL, CLAYTON R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. 2ª ed. New York: Wiley-Interscience, 1992.

PEREZ, R. **Handbook of Electromagnetic Compatibility**. Academic Press, Inc., 1995.

PINHEIRO, J. M. dos S. **Qualidade da Energia Elétrica em Sistemas de Automação**. Cadernos UniFOA, Volta Redonda, p. 23–32, 2017. DOI: 10.47385/cadunifoa.v5.n13.1015. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/1015>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SAKULHIRIRAK, D.; TARATEERASETH, V.; KHANNGERN, W.; YOOTHANOM N. **Design of High Performance and Low-Cost Line Impedance Stabilization Network for University Power Electronics and EMC Laboratories**, nov. 2007.

SCHLICHTING, L. C. M. **Contribuição ao Estudo da Compatibilidade Eletromagnética Aplicada aos Conversores Estáticos**. 2003. 126 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, VANCLÉIA SOARES DA. **Interferência eletromagnética em equipamentos médico-hospitalares**. Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Biomédicos) - Faculdade de Tecnologia FATEC Bauru, Bauru, 2018.

SILVA, J. E. H.; ALBUQUERQUE, C. J. M.; FERRAZ, R. S. C.; ANDRADE, J. A. B. **EMI/EMC: princípios gerais, considerações para sistemas de potência e aplicações com foco em subestações**. Revista Eletrônica Teccen. 2016 jan. /jun.; 57-65.

SLIM, HASSAN HADI; BRAUN, STEFAN; GULTEN, EMRE; FRECH, ANDREAS; RUSSER, PETER. **Automated measurement of intermittent signals using a time-domain EMI measurement system**. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Austin, TX, USA, 2009. p. 232-235.

TANG, YAO CHENG; CHEN, JIAN SHENG; LEE, CHIH HUNG; CHIU, CHUN NING. **A case study on the consistency improvement in radiated-emission testing by using LISN**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Tokyo, Japan, 2014. p. 259-262.

TIHANYI, L. **Electromagnetic Compatibility in power electronics: IEEE Press**, 1995.

WILLIAMS, TIM. **EMC for product designers**. 4. ed. Wareham: Newnes, 2007. 512 p.