

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

NATHÁLIA GRAZZIOTIN

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA CUMPRIMENTO AOS
REQUISITOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA APLICADA A
DRIVERS PARA LED**

CAXIAS DO SUL

2017

NATHÁLIA GRAZZIOTIN

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA CUMPRIMENTO AOS
REQUISITOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA APLICADA A
DRIVERS PARA LED**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador Prof. Me. Anderson Soares dos Santos.

CAXIAS DO SUL

2017

NATHÁLIA GRAZZIOTIN

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA CUMPRIMENTO AOS
REQUISITOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA APLICADA A
DRIVERS PARA LED**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 12/12/2017

Banca Examinadora

Prof. Me. Anderson Soares dos Santos
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Diorge Alex Bão Zambra
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Ma. Andréa Cantarelli Morales
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho aos meus pais, Celso e Liane, que com muito amor, carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre iluminou meu caminho durante esta jornada, me dando forças e sabedoria para que eu pudesse conquistar meus objetivos.

Aos meus pais Celso Antônio Grazziotin e Liane Ruffato Grazziotin, por sempre me incentivarem a estudar e por acreditarem em mim. Suas presenças, carinhos e dedicação me deram esperança para seguir em frente, além de me proporcionarem a certeza de que eu não estive sozinha durante esta caminhada.

Aos meus irmãos Fernando Grazziotin e Luiza Grazziotin, por sempre estarem ao meu lado me apoiando e motivando.

Ao meu namorado Roan Roberto Brolese, que de forma especial e carinhosa sempre apoiou minhas escolhas, estando ao meu lado tanto nos momentos de dificuldades, quanto nos momentos de alegrias. Obrigada pela paciência, pelo incentivo, pelos conhecimentos de engenharia compartilhados e principalmente pelo seu amor.

Ao meu orientador, Professor Me. Anderson Soares dos Santos, pela sua paciência, conhecimento, amizade e auxílio para realização deste trabalho. Obrigada por acreditar no meu potencial e a sempre me incentivar na obtenção dos melhores resultados.

A empresa Intral SA Indústria de Materiais Elétricos, pela oportunidade de desenvolver este trabalho em suas dependências, utilizando seus produtos e recursos.

Aos meus amigos pelo apoio constante e por compreenderem a minha ausência, em especial aos que contribuíam ao longo de minha caminhada: Leonardo Alan Martins, Gustavo Henrique Soares, Jéssica Carissimi, Ederson Boff, Willian Biandaro e João Paulo Mazzotti, obrigada pelo auxílio e pelos momentos que compartilhamos juntos.

“Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E para se chegar, onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso, antes de mais nada, querer.”
Amyr Klink)

RESUMO

A preocupação em minimizar problemas de degradação no desempenho de equipamentos eletrônicos devido a Compatibilidade Eletromagnética (EMC) vem ganhando destaque no ramo de iluminação. Perturbações eletromagnéticas são uma consequência do acoplamento de energia entre dois ou mais sistemas, podendo ocorrer por condução ou radiação. Este trabalho tem como propósito compreender os aspectos que envolvem a compatibilidade associada a *drivers* para LED, apresentando a necessidade do estudo destes equipamentos do ponto de vista da Compatibilidade Eletromagnética. A primeira parte deste trabalho apresenta a ascensão do LED como fonte de iluminação, bem como as características do *driver* utilizado para seu acionamento. Em seguida é realizada uma revisão bibliográfica sobre os circuitos eletrônicos e conceitos necessários para compreensão do funcionamento do *driver* para LED. Na sequência são abordados os princípios fundamentais da EMC com base nas normas vigentes, além da proposição de circuitos de proteção que tornem os *drivers* mais robustos e confiáveis, adequando os mesmos às exigências dos órgãos normativos na área de iluminação. Posteriormente utiliza-se uma ferramenta de simulação para analisar os métodos propostos, comprovando a eficácia do uso da simulação como instrumento de estudo da Interferência Eletromagnética (EMI) aplicada a *drivers* para LED. Após realiza-se a implementação prática dos métodos propostos, seguida pela avaliação dos resultados obtidos ao término dos ensaios de imunidade realizados. Por fim, propõe-se uma metodologia para o cumprimento aos requisitos de imunidade eletromagnética de acordo com a norma para equipamentos utilizados para fins de iluminação geral, no que diz respeito a susceptibilidade à condução.

Palavras – chave: *Driver*, LED, Compatibilidade Eletromagnética, Imunidade, Sobretensão, Surto, Varistor, Proteção.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Eficácia das Fontes Luminosas - Previsão para 2020.....	15
Figura 2 - <i>Driver</i> Objeto de Estudo.....	19
Figura 3 - Diagrama de Blocos Simplificado de <i>Driver</i> para LED.....	19
Figura 4 - Circulação do Ruído em Modo Comum e Diferencial.....	22
Figura 5 - Diagrama Elétrico do Conversor <i>Boost</i>	23
Figura 6 - Corrente no Indutor para Modo de Condução Crítico.....	24
Figura 7 - Corrente de Pico no Indutor.....	24
Figura 8 - Diagrama Elétrico do Conversor <i>Flyback</i>	25
Figura 9 - Formas de Onda do <i>Flyback</i> em Operação Descontínua.....	26
Figura 10 - Subgrupos da Compatibilidade Eletromagnética.....	28
Figura 11 - Montagem de um ensaio realizado diretamente no solo.....	30
Figura 12 - Montagem de um ensaio realizado em mesa isolante.....	30
Figura 13 - Transientes rápidos na tensão de alimentação.....	34
Figura 14 - Circuito de Proteção com Varistor (MOV)	37
Figura 15 - Curva de Características V/I do Varistor S14K250.....	38
Figura 16 - Forma de Onda da Corrente do Surto.....	39
Figura 17 - Forma de Onda para cálculo da Energia.....	39
Figura 18 - Modelo para Simulação do Varistor.....	40
Figura 19 - Simulação com Proteção do Varistor.....	41
Figura 20 - Monitoramento de Tensão no Dreno dos Mosfets para Proposta 1.....	41
Figura 21 - Zoom no Dreno dos Mosfets para Proposta 1.....	42
Figura 22 - Circuito de Proteção com TVS e Indutor.....	43
Figura 23 - Simulação com TVS e Indutor.....	44
Figura 24 - Monitoramento de Tensão no Dreno dos Mosfets para Proposta 2.....	45
Figura 25 - Zoom no Dreno dos Mosfets para Proposta 2.....	45
Figura 26 - Circuito de Proteção com Diodo e Capacitor Eletrolítico.....	46
Figura 27 - Simulação com Diodo e Capacitor Eletrolítico.....	47
Figura 28 - Monitoramento de Tensão no Dreno dos Mosfets para Proposta	47
Figura 29 - Zoom no Dreno dos Mosfets para Proposta 3.....	48
Figura 30 - Formas de aplicação das descargas eletrostáticas durante os ensaios.....	49
Figura 31 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de EDS.....	49
Figura 32 - <i>Driver</i> e Equipamento para Teste de Transientes Rápidos.....	50

Figura 33 - Forma de Onda dos Surtos de Tensão.....	51
Figura 34 - Ensaio de Imunidade a Sobretensão.....	51
Figura 35 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Neutro na Amostra 1.....	52
Figura 36 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Terra na Amostra 1.....	53
Figura 37 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Neutro-Terra na Amostra 1....	53
Figura 38 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Neutro na Amostra 2.....	54
Figura 39 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Terra na Amostra 2.....	55
Figura 40 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Neutro-Terra na Amostra 2...	55
Figura 41 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Neutro na Amostra 3.....	56
Figura 42 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Terra na Amostra 3.....	57
Figura 43 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Neutro-Terra na Amostra 3...	57
Figura 44 - Ensaio de Correntes Injetadas em Modo Comum.....	59
Figura 45 - Circuito para Geração da Queda de Tensão.....	60
Figura 46 - Forma de Onda da Queda de Tensão obtida através da simulação.....	60
Figura 47 - Resultado do Ensaio de Interrupção de Tensão.....	61
Figura 48 - Fluxograma da Metodologia Implementada.....	62
Figura A.1 - Forma de Onda de Corrente de Descarga de Contato Ideal a 4 kV.....	71
Figura B.1 - Forma de Onda de um Único Pulso em uma Carga de 50Ω.....	74
Figura C.1 - Forma de Onda da Tensão de Circuito Aberto.....	78
Figura C.2 - Forma de Onda da Corrente de Curto-circuito.....	78
Figura D.1 - Formas de Onda para Ensaio em Nível 1.....	80
Figura E.1 - Forma de Onda de Queda de Tensão.....	83
Figura E.2 - Forma de Onda de uma Interrupção.....	84
Figura E.3 - Forma de Onda da Variação de Tensão.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de Equipamentos Compatíveis com a Norma	31
Tabela A.1 - Níveis de Teste para Descargas Eletrostáticas.....	69
Tabela A.2 - Especificações Gerais.....	70
Tabela A.3 - Parâmetros da forma de onda da corrente para Descarga por Contato.....	70
Tabela B.1 - Níveis de Teste para Transientes Rápidos.....	72
Tabela B.2 - Parâmetros do Gerador de Testes.....	73
Tabela B.3 - Valores de pico de tensão de saída e taxas de repetição.....	73
Tabela C.1 - Níveis de Teste para Sobretensão.....	76
Tabela C.2 - Características do Gerador para Testes.....	77
Tabela C.3 - Definições da Forma de Onda	77
Tabela C.4 - Relação entre Tensão de Circuito Aberto e Corrente de Curto-circuito.....	78
Tabela D.1 - Níveis de Teste para Correntes Injetadas.....	79
Tabela D.2 - Características do Gerador de Ensaios.....	80
Tabela E.1 - Níveis de Ensaio para Quedas de Tensão.....	81
Tabela E.2 - Níveis de Ensaio para Interrupções.....	82
Tabela E.3 - Níveis de Ensaio para Variações de Tensão.....	82
Tabela E.4 - Características do Gerador de Testes.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS

Abilumi	Associação Brasileira de Importadores de Produtos de Iluminação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DOE	<i>Department of Energy EUA</i> (Departamento de Energia dos Estados Unidos da América)
EMC	<i>Eletromagnetic Compatibility</i> (Compatibilidade Eletromagnética)
EMI	<i>Eletromagnetic Interference</i> (Interferência Eletromagnética)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
NBR	Norma Brasileira
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Raiz do Valor Quadrático Médio)
TVS	<i>Transient Voltage Suppressor</i> (Supressor de Tensões Transientes)
VBR	Tensão de Ruptura do TVS
VWM	Tensão de Alimentação Nominal do TVS

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.....	17
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 <i>DRIVER</i> PARA LUMINÁRIA DE LED.....	19
2.1.1 Circuito de Proteção	21
2.1.2 Filtro EMI.....	21
2.1.3 Conversores DC/DC <i>Boost</i>	23
2.1.4 Conversor DC/DC <i>Flyback</i>	24
2.2 NORMATIVAS PARA <i>DRIVERS</i> PARA LED	27
2.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CRIAÇÃO DE UM LABORATÓRIO INTERNO.....	29
2.4 ENSAIOS PARA CUMPRIMENTO COM OS REQUISITOS DA EMC	33
2.4.1 Descargas Eletrostáticas - IEC 61000-4-2	33
2.4.2 Transientes Rápidos - IEC 61000-4-4	34
2.4.3 Sobretensão - IEC 61000-4-5	34
2.4.4 Correntes Injetadas em Modo Comum - IEC 61000-4-6	35
2.4.5 Campos Magnéticos de Frequência - IEC 61000-4-8	35
2.4.6 Quedas de Tensão, Interrupções e Variações de Tensão - IEC 61000-4-11 ...	36
2.5 PROPOSTAS DE CUMPRIMENTO COM OS REQUISITOS DA EMC.....	36
2.5.1 Circuito de Proteção com Varistor	37
2.5.2 Circuito de Proteção com TVS e Indutor	42
2.5.3 Circuito de Proteção com Diodo e Capacitor Eletrolítico.....	46
2.6 RESULTADOS OBTIDOS	48
2.6.1 Imunidade a Descargas Eletrostáticas - IEC 61000-4-2.....	48
2.6.2 Imunidade a Transientes Rápidos - IEC 61000-4-4	50
2.6.3 Imunidade a Sobretensão - IEC 61000-4-5.....	51
2.6.4 Imunidade a Correntes Injetadas em Modo Comum - IEC 61000-4-6	59

2.6.5	Imunidade a Quedas de Tensão, Interrupções e Variações de Tensão - IEC 61000-4-11.....	59
2.7	METODOLOGIA PARA PROJETO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS EM CONFORMIDADE COM A IEC 61547.....	61
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
	REFERÊNCIAS.....	64
	APÊNDICE A - Detalhamento de Testes da IEC61000-4-2.....	71
	APÊNDICE B - Detalhamento de Testes da IEC61000-4-4.....	74
	APÊNDICE C - Detalhamento de Testes da IEC61000-4-5.....	77
	APÊNDICE D - Detalhamento de Testes da IEC61000-4-6.....	81
	APÊNDICE E - Detalhamento de Testes da IEC 61000-4-11.....	83

INTRODUÇÃO

A energia elétrica está diretamente relacionada com o desenvolvimento econômico-social, influenciando positivamente a evolução tecnológica, o crescimento industrial, além de possibilitar melhor qualidade de vida à sociedade. Realizando uma avaliação nas fontes geradoras de energia elétrica a nível mundial, é possível verificar que são utilizadas majoritariamente fontes energéticas não renováveis. Essas fontes são emissoras de gases geradores do efeito estufa, dessa forma há uma mobilização para que se passe a utilizar fontes de energia renováveis, com o intuito de auxiliar na preservação do meio ambiente e dos recursos naturais. (VENTURA FILHO, 2009).

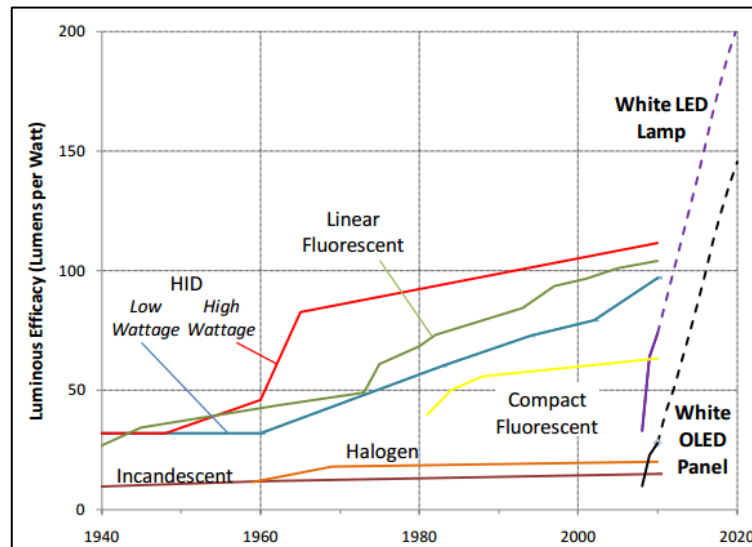
A eletricidade desempenha um papel fundamental no ramo industrial, sendo a principal fonte de energia para 79% das empresas brasileiras, podendo representar um percentual superior a 40% dos custos de produção. O aumento constante no custo da energia elétrica faz com que as instituições zelem cada vez mais pela segurança no fornecimento e pela utilização consciente da energia. Para garantir maiores índices de competitividade no mercado, as indústrias buscam adotar medidas para minimizar o elevado custo da eletricidade, tais como: o acréscimo de ações para combate às perdas de energia; o aumento dos programas de eficiência energética voltados ao ramo industrial; e a adoção de novas tecnologias que permitam realizar um melhor gerenciamento do consumo de energia. (FIRJAN, 2017).

Conforme Morais (2015) aproximadamente 14% de toda energia elétrica consumida no mundo é destinada à iluminação. As fontes de iluminação artificial passaram por grande transformação ao longo dos anos, iniciando na criação da lâmpada incandescente por Thomas Alva Edison em 1879, seguidas pelas lâmpadas halógenas, fluorescentes, de descarga em alta pressão, até chegar ao LED (*Light Emitting Diode*) ou diodo emissor de luz, que inicialmente era utilizado apenas como luz de sinalização em aparelhos eletroeletrônicos, porém passou a ser a fonte luminosa mais difundida no mercado de iluminação em virtude dos grandes desafios tecnológicos que vem superando. (GUARINELLO, 2013).

Perdas de energia elétrica comprometem a confiabilidade do sistema elétrico, além de afetarem negativamente o meio ambiente. Dessa forma, há um aumento na conscientização para uso de tecnologias energeticamente eficientes, proporcionando um crescimento na utilização de lâmpadas de LED, que possuem maior eficiência energética em relação às tecnologias anteriores, além de serem ecologicamente corretas. (SCOPACASA, 2008; SOLA, KOVALESKI, 2006). Na Figura 1 é apresentado um levantamento realizado pelo DOE (*Department of Energy EUA*) a partir do qual é possível verificar que as fontes de iluminação

incandescente e fluorescente obtiveram um desenvolvimento de desempenho nos últimos 70 anos, porém a tendência para os próximos anos é que haja uma estagnação na evolução dessas tecnologias, em contrapartida o LED passará a progredir em termos de eficácia e custo podendo dobrar sua relação custo/benefício até o ano de 2020.

Figura 1 - Eficácia das Fontes Luminosas - Previsão para 2020.



Fonte: (DOE, 2011).

As tensões e correntes nominais para acionamento dos LEDs são incompatíveis com a rede elétrica, dessa forma, faz-se necessária a utilização de um *driver* para efetuar o controle das grandezas elétricas envolvidas no acendimento dos mesmos, proporcionando um funcionamento adequado e seguro. O *driver* deve ser robusto e confiável para assegurar que todo o conjunto possa operar corretamente, atingindo a expectativa de vida prevista. (MONTEIRO, CARVALHO, NOGUEIRIA, 2014).

Para assegurar a confiabilidade do *driver*, devem ser obedecidas algumas normas e padrões durante o projeto de desenvolvimento destes equipamentos. Estas normatizações devem ser respeitadas pelos fabricantes, garantindo padrões de qualidade e desempenho satisfatórios aos seus produtos. Uma destas normas trata do conceito de compatibilidade eletromagnética (EMC) que está associado ao fato de um sistema ser eletromagneticamente compatível ou não. Perturbações eletromagnéticas são fenômenos físicos capazes de provocar alterações no desempenho de equipamentos eletrônicos, dessa forma existem normas técnicas para estabelecer limites máximos de emissão de campos eletromagnéticos, e também de

verificar se o desempenho dos equipamentos submetidos a estas perturbações é satisfatório. (NOGUEIRA, 2013).

O presente trabalho visou a pesquisa de técnicas que possam minimizar ou neutralizar os danos que as interferências eletromagnéticas podem causar aos *drivers* para LED, com a finalidade de garantir um aumento na confiabilidade do produto.

1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

As lâmpadas de LED estão ganhando espaço no mercado de iluminação sendo impulsionadas pela busca de maior eficiência energética. De acordo com a Associação Brasileira de Importadores de Produtos de Iluminação (Abilumi), realizando um comparativo entre a economia de energia elétrica que as lâmpadas de LED geram em relação às lâmpadas incandescentes, tem-se uma redução de até 85% no consumo, se comparadas com as lâmpadas fluorescentes, a redução é de pelo menos 40% e com as fontes a vapor de mercúrio o consumo de energia elétrica cai em até 70%. (MOREIRA, 2015).

A durabilidade das lâmpadas e luminárias de LED depende diretamente do *driver* que está sendo utilizado, pois ocorrendo qualquer anomalia de funcionamento no mesmo, conseqüentemente acarretará na falha da lâmpada ou luminária, prejudicando o sistema como um todo. Um dos requisitos para assegurar a confiabilidade do *driver* trata do conceito de compatibilidade eletromagnética. Segundo Liz (1999) um equipamento possui compatibilidade eletromagnética se atingir os seguintes requisitos: não causar interferência eletromagnética (EMI) em outros sistemas; não ser susceptível a interferência eletromagnética (EMI) gerada por outros sistemas; e não causar interferência eletromagnética (EMI) nele próprio.

A propagação de energia eletromagnética de um sistema para outro pode ser dividida em quatro subgrupos: emissões conduzidas, emissões radiadas, susceptibilidade à condução e susceptibilidade à radiação. O foco deste trabalho está no remodelamento de um *driver* para LED existente para o que mesmo possa atender a norma IEC 61547 (Equipamentos para fins de iluminação geral - Requisitos de Imunidade Eletromagnética), no que diz respeito a susceptibilidade à condução. Essa norma não é obrigatória, porém a empresa está buscando se adaptar às normas internacionais para assegurar maior confiabilidade a seus produtos nos requisitos de compatibilidade eletromagnética. Após todas as etapas validadas será proposta uma metodologia de cumprimento aos requisitos da IEC61547 que poderá ser utilizado no desenvolvimento de outros *drivers* para LED.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Propor e implementar circuitos de proteção à imunidade eletromagnética em *driver* para LED, a partir de normas que tratam dos testes referentes a área de iluminação, permitindo a verificação do desempenho deste produto, adequando-o às exigências dos órgãos normativos do setor.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar pesquisa bibliográfica sobre compatibilidade eletromagnética;
- b) Analisar o *driver* para LED objeto de estudo;
- c) Propor métodos de redução de interferência eletromagnética em *driver* para LED existente e mapear os componentes mais susceptíveis aos ensaios de EMC;
- d) Realizar simulações dos métodos implementados;
- e) Realizar implementação e testes práticos dos métodos propostos;
- f) Analisar o impacto dos resultados e propor uma metodologia para o cumprimento aos requisitos da compatibilidade eletromagnética.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DRIVER PARA LUMINÁRIA DE LED

A geração de energia elétrica ocorre de duas formas: em tensão ou corrente alternada (AC), e em tensão ou corrente contínua (DC). Dependendo das características de aplicação, é possível consumi-la exatamente como está sendo fornecida, ou realizar a conversão desta energia para adequá-la às necessidades da carga utilizada. São utilizados conversores estáticos (*drivers*), lineares ou chaveados, para efetuar o condicionamento da tensão elétrica. Em aplicações envolvendo iluminação utilizam-se reguladores chaveados, pois possuem maior eficiência se comparados aos lineares. A Figura 2 apresenta o *driver* para LED utilizado como objeto de estudo.

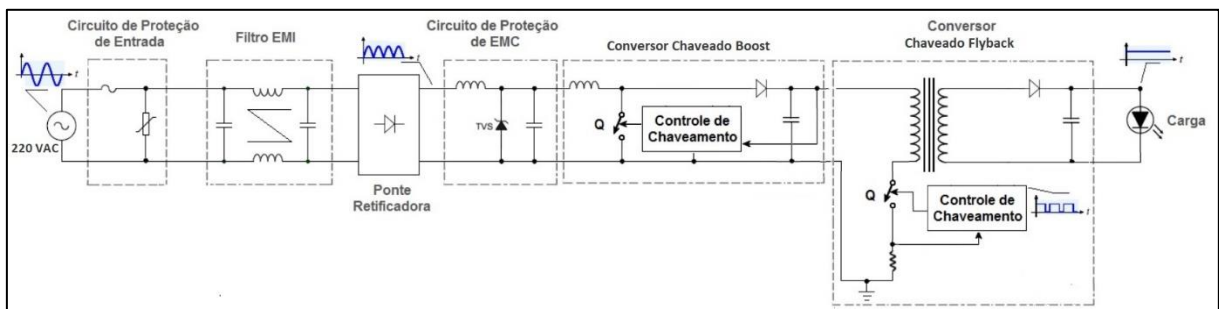
Figura 2 - *Driver* Objeto de Estudo.



Fonte: Divulgação Intral (2017).

A Figura 3 ilustra um diagrama de blocos simplificado de um *driver* para LED com conversor chaveado, contendo as principais formas de onda que compõe o circuito.

Figura 3 - Diagrama de Blocos Simplificado de *Driver* para LED.



Fonte: A autora (2017).

O *driver* é composto basicamente por um circuito de proteção, um filtro EMI, uma ponte retificadora, dois conversores chaveados DC/DC, circuitos para controle de chaveamento e filtro de saída. A função de cada um dos blocos apresentados é descrita abaixo:

- a. Circuito de Proteção de Entrada: fusíveis e varistores são utilizados para preservar os demais componentes do circuito eletrônico contra surtos de tensão e/ou corrente.
- b. Filtro EMI (*Eletromagnetic Interference*): possui a função de filtrar ruídos gerados pelo *driver*, para que os mesmos não influenciem na fonte de alimentação do circuito.
- c. Ponte Retificadora: realiza a conversão da tensão senoidal fornecida pela fonte de alimentação para uma tensão contínua. Os diodos são responsáveis pela retificação do sinal.
- d. Circuito de Proteção de EMC (*Eletromagnetic Compatibility*): para conversores que não possuem filtros capacitivos na entrada do circuito, faz-se necessária a utilização de um circuito de proteção adicional contra surtos de tensão. Este circuito é inserido após a ponte retificadora, podendo ser implementado com a utilização de um indutor, um capacitor e um TVS (*Transient Voltage Suppressor*).
- e. Conversor *Boost*: é um conversor elevador de tensão, caracterizado por ter entrada em corrente e saída em tensão. O circuito do *Boost* é composto basicamente por um indutor, uma chave (MOSFET), um diodo e um capacitor. Sua principal função é efetuar a correção do fator de potência.
- f. Conversor *Flyback*: é um conversor isolado que pode atuar tanto como elevador, quanto como rebaixador de tensão. É composto por uma chave (MOSFET) conectada a um indutor isolado, que proporciona isolamento galvânico entre os enrolamentos primários e secundários, capacitor e diodo de comutação. Suas principais funções são: proteger a fonte de entrada e tensão de alimentação contra interferências eletromagnéticas e realizar a isolação entre a carga e a fonte de entrada.
- g. Controle de Chaveamento: usualmente o comando de chaveamento é realizado por um circuito integrado dedicado, podendo operar com controle de tensão ou corrente. O método de controle pode ser efetuado através de modulação por largura de pulso ou por modulação em frequência, através de uma malha de realimentação de tensão ou corrente no enrolamento secundário ou primário.
- h. Carga: composta por associação de LEDs. A quantidade de LEDs a ser utilizada como carga dependerá das características elétricas dos LEDs, bem como da tensão e corrente de saída fornecidas pelo *driver*.

Nos próximos tópicos são apresentadas as características dos principais blocos que compõem o *driver* para LED de forma detalhada.

2.1.1 Circuito de Proteção

Surtos de tensão podem surgir durante a operação normal do sistema de transmissão de energia elétrica, ou podem ser oriundos de descargas atmosféricas. Seu tempo de duração normalmente está na faixa de nano segundos, e suas características são de um sinal oscilatório amortecido com transientes íngremes. Para evitar danos aos demais componentes que compõem os *drivers* para LED, se faz necessária a implementação de circuitos de proteção, obedecendo os requisitos contidos na norma IEC 61000-4-5 (FINDER, 2012). Um exemplo simples e eficaz de implementação, é composto pela inserção de um varistor na entrada do circuito. Varistores são componentes eletrônicos que possuem resistência variável dependendo da tensão aplicada em seus terminais, sua aplicação está relacionada à proteção contra sobretensão. Ocorrendo uma sobretensão, o varistor entra em modo de condução, elevando a corrente ao máximo, protegendo tanto a rede elétrica, quanto o restante do circuito eletrônico do *driver*. (POZZATTI, 2015).

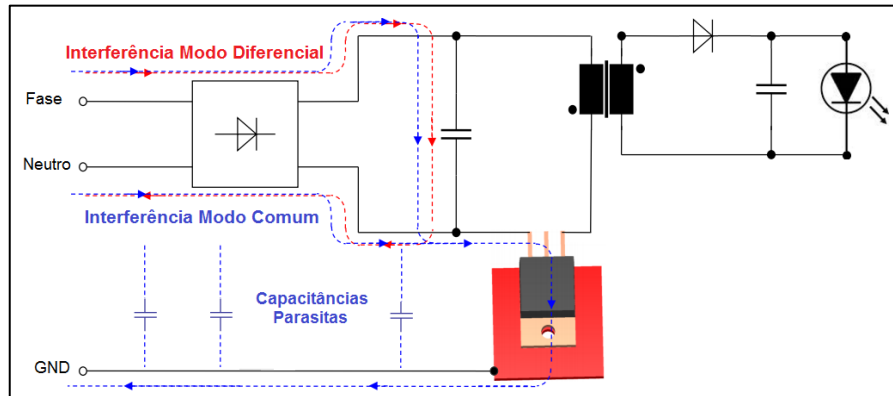
2.1.2 Filtro EMI

A compatibilidade eletromagnética (EMC) pode ser definida como a capacidade de determinado equipamento operar de forma satisfatória em ambiente eletromagnético, sem interferir em equipamentos próximos ou sem sofrer perturbações oriundas de outros sistemas. Dessa forma, a EMC está relacionada a dois aspectos: a emissão e a susceptibilidade eletromagnética. O primeiro aspecto está relacionado com a limitação de energia eletromagnética emitida, controlando o ambiente eletromagnético no qual o equipamento está inserido, enquanto o segundo trata do nível máximo de perturbação eletromagnética que pode ser tolerado sobre determinado sistema, sem degradar seu funcionamento. A Interferência Eletromagnética (EMI) se caracteriza por uma perturbação de origem eletromagnética, seus efeitos causam degradação no desempenho de sistemas eletroeletrônicos. A condução é o mecanismo através do qual as interferências eletromagnéticas são inseridas ou retiradas de

determinado equipamento, podendo se manifestar na forma de ruído conduzido em modo comum ou diferencial. (OTT, 1988).

A EMI conduzida em modo diferencial, também conhecida como ruído simétrico, circula sobreposta à corrente de alimentação do circuito, estando diretamente relacionada às altas variações de corrente e sendo fortemente dependente da forma de onda da corrente de entrada. Essa interferência é oriunda da forma de onda triangular de alta frequência da corrente de comutação, sua frequência varia entre 150 kHz e 30 MHz, sendo superior à frequência fundamental. A EMI conduzida em modo comum, também denominada de ruído assimétrico, circula entre os condutores de alimentação e o condutor de aterramento, utilizando elementos parasitas existentes entre o circuito eletrônico e o aterramento do equipamento. As altas taxas de variação de tensão e as capacitâncias parasitas, são as principais fontes causadoras deste tipo de ruído. (ZIENTARSKI, 2009; SARTORI, 2009). A Figura 4 ilustra o comportamento das correntes causadoras de ruído em modo comum e em modo diferencial em um conversor estático *Flyback*.

Figura 4 - Circulação do Ruído em Modo Comum e Diferencial.



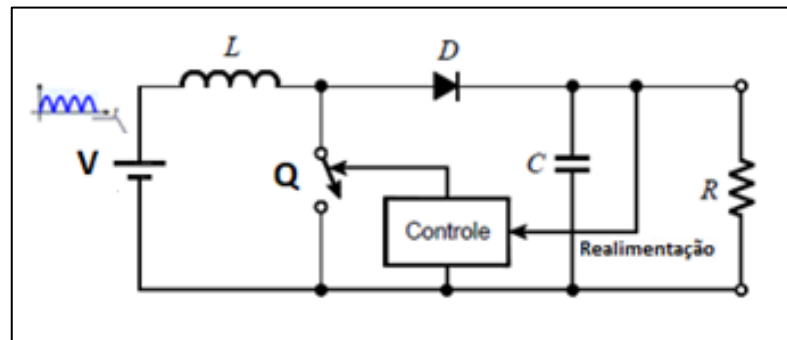
Fonte: Adaptado de (PEDRONI et. al., 2016).

O controle de emissão de interferência eletromagnética pode ser realizado através da inserção de um filtro de EMI no circuito do *driver* para LED, utilizado para minimizar a interferência eletromagnética conduzida, capaz de atuar tanto na filtragem de ruídos simétricos, quanto de ruídos assimétricos. (BELTRAME, 2010; SARTORI, 2009).

2.1.3 Conversores DC/DC *Boost*

O Conversor *Boost*, ou elevador de tensão, possui como principal característica realizar a alimentação da carga com uma tensão de saída superior à tensão de entrada. A Figura 5 ilustra o diagrama elétrico desta topologia, sendo que a carga é representada pelo resistor (R).

Figura 5 - Diagrama Elétrico do Conversor *Boost*.

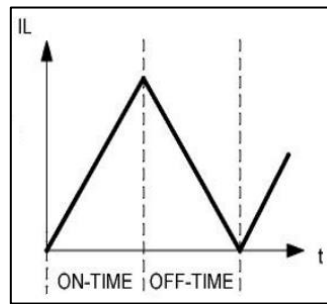


Fonte: (FILADELFO, 2010).

Seu princípio de funcionamento consiste em duas etapas. Quando a chave Q está em modo de condução, a fonte de alimentação V está fornecendo energia para a magnetização do indutor. Quando ocorre o bloqueio da chave Q o diodo entra em condução e a fonte de alimentação V se soma à tensão armazenada anteriormente pelo indutor, fornecendo energia à carga. (BARBI, 2007; RASHID, 2011; VAN DER BROECK, 2007).

O conversor *Boost* implementado no *driver* atua em modo de condução crítico, para correção do fator de potência, fazendo a chave entrar em condução no momento em que a corrente atingir o zero. Desta forma se mantém a característica de efetuar o desligamento do diodo e a entrada em condução da chave sob corrente nula. Nesse modo de operação, a corrente do indutor cresce até seu valor máximo, e em seguida diminui até zero, antes de iniciar o próximo ciclo. A Figura 6 ilustra a forma de onda da corrente no indutor para o conversor *Boost*, em modo de operação crítico.

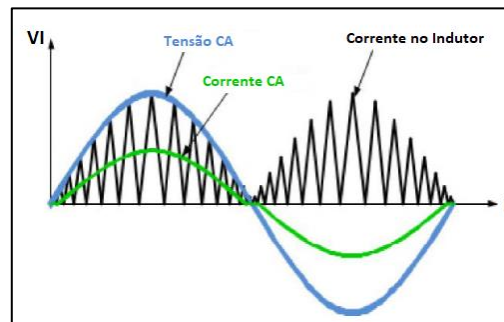
Figura 6 - Corrente no Indutor para Modo de Condução Crítico.



Fonte: (INFINEON, 2015).

A corrente de pico no indutor, mostrada na cor preta na Figura 7, segue o comportamento senoidal da tensão de entrada retificada, porém é possível identificar a presença de harmônicas de alta frequência nessa corrente. Dessa forma se faz necessária a implementação de um filtro passa baixas, com a finalidade impedir a propagação dessas harmônicas. Quando a corrente do indutor for filtrada, seu valor médio torna-se senoidal, conforme forma de onda de cor verde, proporcionando um alto fator de potência e um baixo valor de THD. (INFINEON, 2015).

Figura 7 - Corrente de Pico no Indutor.

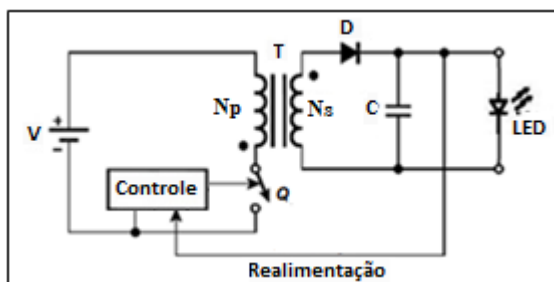


Fonte: Adaptado de (INFINEON, 2015).

2.1.4 Conversor DC/DC *Flyback*

O conversor *Flyback* pode atuar como abaixador ou elevador de tensão, fazendo uso de um indutor acoplado, responsável pela isolação elétrica entre a fonte de entrada e a carga. O diagrama elétrico genérico desta topologia é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Diagrama Elétrico do Conversor *Flyback*.



Fonte: Adaptado de (FILADELFO, 2010).

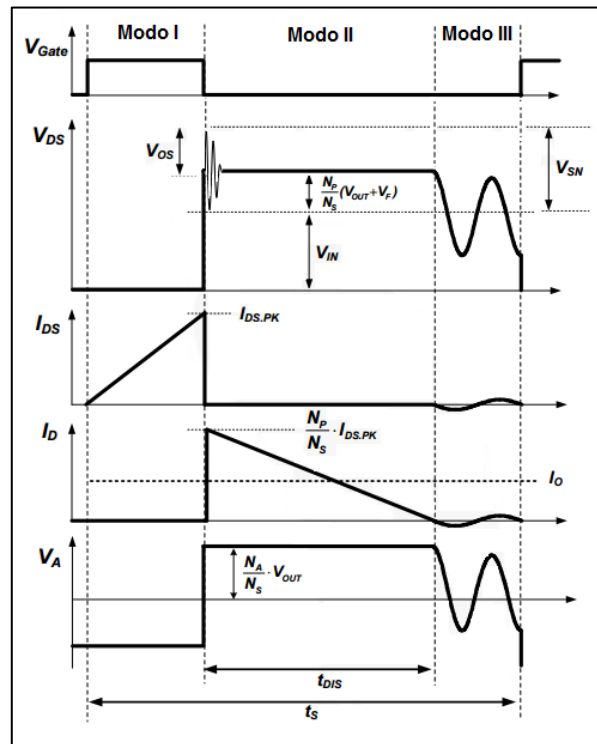
Seu princípio de funcionamento consiste em duas etapas. Quando a chave Q está em condução o enrolamento primário do indutor é magnetizado através da corrente fornecida pela fonte de entrada V. Quando ocorre o bloqueio da chave Q a polaridade do indutor é invertida, fazendo com que o diodo entre em condução, dessa forma a energia armazenada anteriormente pelo enrolamento primário, é transferida para a carga. (BARBI, 2007; RASHID, 2011; VAN DER BROECK, 2007).

O controle da tensão de saída geralmente é realizado por um circuito integrado dedicado, uma das técnicas amplamente aplicadas é a modulação por largura de pulso, ou PWM (*Pulse Width Modulation*) que consiste na comparação de dois sinais de tensão, um de baixa frequência (referência) e o outro de alta frequência (portadora), resultando em um sinal alternado com frequência fixa e largura de pulso variável. Em conversores CC/CC, a referência é um sinal de tensão contínuo. Para efetuar a comparação do sinal de referência com a portadora é utilizado um circuito modulador, a largura do pulso na saída deste circuito varia de acordo com a amplitude do sinal de referência em comparação com o sinal portador. (POZZATTI, 2015).

O método convencional de controle dos conversores *Flyback* é realizado através de uma malha de realimentação de tensão ou corrente no enrolamento secundário, sendo necessária a utilização de um optoacoplador para manter o sinal de saída conectado ao controlador de forma isolada. Com a finalidade de reduzir a complexidade do sistema e o custo de produção, o controle do conversor *Flyback* pode ser realizado através do método PSR (*Primary Side Regulation*), no qual é utilizado um circuito de alimentação proveniente do primário. (ZHAO et al, 2014).

O conversor *Flyback* funciona em modo de operação descontínua, pois propicia uma melhor regulação da corrente de saída, alto fator de potência e baixas taxas de distorção harmônica. Seu princípio de funcionamento é composto por três modos de operação conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Formas de Onda do *Flyback* em Operação Descontínua.



Fonte: Adaptado de (Fairchild, 2014).

- Modo I: Durante o período em que a chave (Q) está em condução, a tensão de entrada (V_{IN}) é aplicada no enrolamento primário do indutor, dessa forma ocorre o aumento linear da corrente de dreno (I_{DS}), iniciando em zero até atingir o valor de pico ($I_{DS.PK}$). Durante este modo de operação, a energia extraída da fonte de alimentação de entrada (V_{IN}) é armazenada no enrolamento primário do indutor.
- Modo II: No momento em que ocorre o bloqueio da chave (Q), a energia armazenada no enrolamento primário do indutor é transferida para o secundário, fazendo com que o diodo (D) entre em condução. A energia recebida através do enrolamento secundário é aplicada à carga, fazendo com que a corrente no diodo (I_D) diminua linearmente, partindo do valor de pico ($I_{DS.PK} \cdot (N_P/N_S)$) até chegar a zero. Ao final do tempo de descarga da corrente do indutor (t_{DIS}), toda energia que foi armazenada é entregue à carga. Quando a chave (Q) é desligada, uma elevada tensão aparece nos terminais da mesma, por ação da indutância de dispersão do indutor.
- Modo III: No momento em que a corrente no diodo for igual a zero, a tensão do enrolamento auxiliar do indutor sofre uma oscilação, como consequência da ressonância entre o enrolamento primário (L_M) e o capacitor carregado através da chave (Q). A corrente de saída (I_o) pode ser estimada a partir da utilização da

corrente de dreno de pico ($I_{DS.PK*(NP/NS)}$). O valor da corrente de dreno de pico é determinado através do detector de tensão de pico (V_{CS}) e o detector de tempo de descarga da corrente do indutor (t_{DIS}). A partir da obtenção desses valores e do período de comutação, é possível estimar a corrente de saída com as seguintes equações.

$$I_o = \frac{1}{2} \cdot \frac{t_{DIS}}{t_S} \cdot V_{CS} \cdot n_{PS} \cdot \frac{1}{R_S} \quad 2.1$$

$$\frac{t_{DIS}}{t_S} \cdot V_{CS} = 0,25 \quad 2.2$$

$$I_o = 0,125 \cdot \frac{n_{PS}}{R_S} \quad 2.3$$

Onde:

t_{DIS} é o tempo de condução do diodo do secundário.

t_S é o período.

V_{CS} é a tensão no resistor sensor de corrente (comparador interno 0,25 V).

n_{PS} é a relação de espiras entre o primário e o secundário.

R_S é o resistor sensor de corrente.

A corrente de saída calculada (I_o), é comparada com uma referência de tensão de alta precisão no interior do circuito integrado, gerando uma tensão de erro (V_{COMI}) que determina o tempo de ativação da chave (Q) a partir do controle do modo de tensão. (FAIRCHILD, 2014).

2.2 NORMATIVAS PARA DRIVERS PARA LED

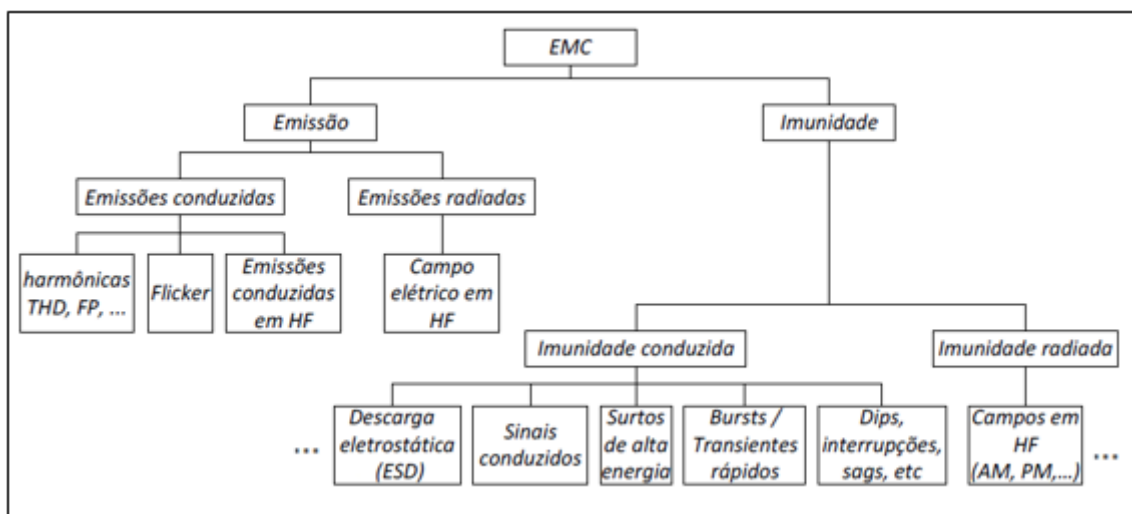
A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) é um órgão privado sem fins lucrativos que estabelece normas, visando a padronização dos processos produtivos realizados no Brasil. As NBRs (Normas Brasileiras) são normas técnicas estipuladas por pesquisadores e profissionais de cada área de conhecimento, que devem ser aprovadas por uma entidade nacional ou internacional, neste caso a ABNT.

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) é uma organização mundial que prepara e publica normas internacionais para padronização de tecnologias nas áreas elétrica, eletrônica e relacionadas, buscando melhorar a segurança e otimizar a utilização de energia elétrica.

A criação de normas de compatibilidade eletromagnética surge como requisito adicional para o projeto de sistemas eletrônicos, com a finalidade de controlar os níveis de interferência eletromagnética que podem ser gerados ou que devem ser suportados pelos equipamentos conectados à rede elétrica. Existem duas classes de normas para sistemas eletrônicos: as impostas por agências governamentais, e as impostas pelo fabricante do produto. As primeiras são legais e compulsórias para realização do controle da imunidade do equipamento, bem como da interferência gerada por ele. Já as segundas tratam do desempenho do produto, garantindo que o equipamento seja confiável e de qualidade. (SCHLICHTING, 2003).

A compatibilidade eletromagnética (EMC) é composta por dois aspectos: emissão e imunidade. A emissão radiada é a maneira pela qual a interferência eletromagnética é transferida para o interior ou exterior do sistema através do ar, sem a intervenção de meios metálicos, ocorrendo como consequência das correntes que circulam através das trilhas, cabos ou terminais de semicondutores, gerando campos eletromagnéticos. As emissões conduzidas são encaminhadas para dentro ou fora do sistema através de condutores metálicos ou elementos parasitas. (PAUL, 1992). A Figura 10 apresenta os subgrupos da Compatibilidade Eletromagnética.

Figura 10 – Subgrupos da Compatibilidade Eletromagnética.



Fonte: (HELDWEIN, 2015).

O ponto principal desta pesquisa é a imunidade conduzida, portanto será dada maior ênfase sobre este tópico, principalmente no que se refere a normatização e seus limites.

A norma internacional IEC 61547 trata dos requisitos de imunidade eletromagnética, aplicada em equipamentos de iluminação, tais como lâmpadas, equipamentos auxiliares e acessórios, projetados para serem alimentados por uma rede elétrica de baixa tensão, ou para operarem com baterias. As premissas de imunidade eletromagnética definidas por essa norma referem-se a: descargas eletrostáticas; campos eletromagnéticos de rádio frequência; campos magnéticos de frequência; transientes rápidos; correntes injetadas (modo comum); sobretensão; quedas de tensão, interrupções e variações de tensão; e flutuações de tensão.

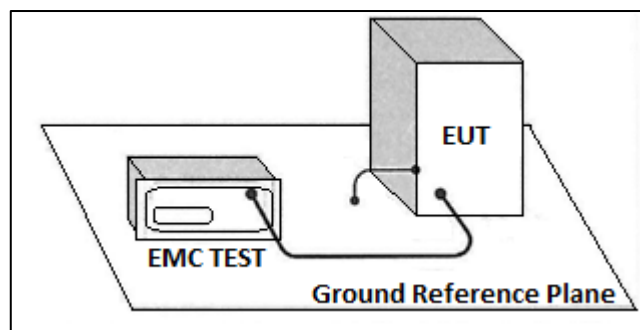
Para realização dos ensaios de imunidade a interferência eletromagnética, faz-se necessária a utilização de equipamentos de testes específicos para esta finalidade, que estão aptos a simular todos os requisitos especificados pela norma. Os próximos tópicos apresentam as duas possibilidades para efetuar os ensaios: através do desenvolvimento de um laboratório interno na empresa, ou executar os ensaios em laboratórios terceirizados.

2.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CRIAÇÃO DE UM LABORATÓRIO INTERNO

Para implementação de um laboratório para testes de compatibilidade eletromagnética, devem ser observados pontos importantes para a criação do ambiente, tais como: o local para realização dos ensaios deve estar livre de condensação de umidade e/ou água parada no chão ou nas superfícies de trabalho; não pode apresentar sinais de poeira significativa ou substâncias contaminantes; a temperatura no laboratório pode variar na faixa de 15° C a 40° C; a umidade relativa do ar deve estar entre 10% e 85%; o ambiente deve possuir boa iluminação e ventilação, incluindo capuzes e sopradores para remoção de gases; as paredes e os pisos devem ser não inflamáveis; o equipamento sob testes deve ser cercado por barreiras físicas de contenção de chamas e explosões; o laboratório deve ser equipado com extintores apropriados para incêndios elétricos e químicos; não é permitida a presença de materiais inflamáveis na área de testes; a área de testes deve estar bem sinalizada, preferencialmente com barreiras físicas; e manter pessoal não autorizado fora do laboratório durante a realização dos ensaios, os testes somente podem ser realizados por indivíduos devidamente treinados, que possuam total informações sobre os riscos dos ensaios, e que tenham completo domínio sobre os equipamentos contidos no laboratório. (THERMO FISCHER SCIENTIFIC, 2004).

O equipamento de testes deve ser instalado em superfície nivelada, livre de vibrações, com no mínimo seis centímetros de distância das paredes e/ou de outros equipamentos de ensaios, permitindo que o instrumento possua um fluxo de ar adequado em todos os lados. Os ensaios contidos nas normas envolvem a geração de pulsos de alta frequência, dessa forma deve ser realizado aterramento no local onde os testes serão executados. Os padrões especificam que o piso da área de teste deve ser coberto com cobre ou alumínio com uma espessura mínima de 0,254 centímetros, que deve ser ligada à construção do solo. Além disso, o gabinete do equipamento de testes deve estar diretamente conectado ao plano de referência do solo. A Figura 11 ilustra a montagem de um ensaio realizado diretamente no solo. (THERMO FISCHER SCIENTIFIC, 2004).

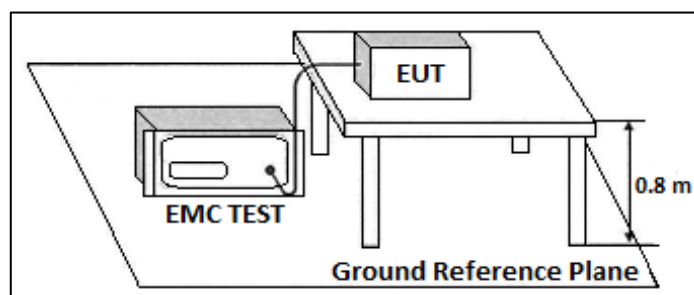
Figura 11 - Montagem de um ensaio realizado diretamente no solo.



Fonte: Adaptado de (THERMO FISCHER SCIENTIFIC, 2004).

Quando utilizados com mesas, o equipamento a ser ensaiado deve ser colocado em uma mesa isolante com 0,8 metros de altura, conforme apresenta a Figura 12.

Figura 12 - Montagem de um ensaio realizado em mesa isolante.



Fonte: Adaptado de (THERMO FISCHER SCIENTIFIC, 2004).






Os ensaios de descargas eletrostáticas envolvem a geração de pulsos de alta tensão, por essa razão deve ser realizado o aterramento do local onde o ensaio será realizado. O tamanho





mínimo da área de aterramento é de 1 m², o tamanho exato dependerá das dimensões do instrumento a ser ensaiado. O aterramento deve ser feito em folha de alumínio ou cobre com espessura mínima de 0,25 milímetros, ou espessura mínima de 0,65 milímetros para outros metais. O equipamento a ser ensaiado deve estar posicionado a uma distância mínima de um metro das paredes e de demais estruturas metálicas presentes no ambiente, quando os testes forem realizados em mesas, elas devem ser isoladas e possuir altura de 0,8 metros. (THERMO FISCHER SCIENTIFIC, 2004).

Os equipamentos de teste utilizados para realização dos ensaios devem ser compatíveis com a norma internacional de compatibilidade eletromagnética, a IEC 61547. A Tabela 1 apresenta uma relação destes equipamentos, juntamente com o custo para aquisição dos mesmos.

Tabela 1 - Relação de Equipamentos Compatíveis com a Norma.

(continua)

Equipamento	Foto do Equipamento	Marca	Testes	Preço (US\$)
AXOS8 Compact Immunity Test System		Haefely Hipotronics	IEC 61000-4-4	30.800,00
			IEC 61000-4-5	
			IEC 61000-4-11	
AXOS5 Compact Immunity Test System		Haefely Hipotronics	IEC 61000-4-4	30.800,00
			IEC 61000-4-5	
			IEC 61000-4-11	
ONYX 16 ESD Simulator/Gun, 16kV		Haefely Hipotronics	IEC 61000-4-2	6.950,00
Compact NX5 BS-1-300-16; Burst, Surge		EM Test	IEC 61000-4-4	20.080,00
			IEC 61000-4-5	
			IEC 61000-4-11	
EMCPro Plus EMC Test System		Thermo Fisher	IEC 61000-4-4	20.500,00
			IEC 61000-4-5	
			IEC 61000-4-8	
			IEC 61000-4-11	

(conclusão)				
NSG 434 ESD Simulator/Gun: 8.8kV Air, 6.6kV Contact		Teseq	IEC 61000-4-2	5.790,00
SG61000-5		Lisun Electronics	IEC 61000-4-5	7.950,00
ESD61000-2		Lisun Electronics	IEC 61000-4-2	4.980,00
EFT61000-4		Lisun Electronics	IEC 61000-4-4	7.850,00

Fonte: A autora (2017).

Para a implementação de um laboratório de compatibilidade eletromagnética que possibilite os ensaios de acordo com a IEC 61547 deve-se investir em infraestrutura do laboratório, mesas e acoplamentos de planos de terra além da aquisição dos equipamentos. O valor orçado para construção do laboratório é de aproximadamente 20 mil reais em estrutura física, somados a 68 mil reais para equipamentos de teste fabricados no continente asiático, ou a 125 mil reais para equipamentos fabricados no continente europeu.

No momento a empresa não está realizando investimentos em novos equipamentos para o laboratório, dessa forma os ensaios de imunidade foram realizados em laboratórios de terceira parte, neste caso na Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, CIENTEC, instituição que atua com prestação de serviços tecnológicos para empresas públicas e privadas através da realização de ensaios, calibrações e consultorias, para que as organizações ofereçam produtos de qualidade, testados de acordo com as normas vigentes. O investimento para locação de um dia de laboratório para realização dos ensaios no CIENTEC é de R\$ 980,00.

Os próximos tópicos apresentam as características dos testes de imunidade eletromagnética realizados no *driver* para LED, para que o mesmo cumpra os requisitos contidos na IEC 61547.

2.4 ENSAIOS PARA CUMPRIMENTO COM OS REQUISITOS DA EMC

2.4.1 Descargas Eletrostáticas - IEC 61000-4-2

A descarga eletrostática, ESD (do inglês *Electrostatic Discharge*) é um fenômeno físico de descarga elétrica, resultante do desequilíbrio de cargas geradas pelo atrito entre objetos, sendo definido como um evento que transmite uma quantidade finita de carga entre dois corpos de diferentes potenciais. A ESD ocorre de maneira rápida, com o propósito de equilibrar a carga entre dois objetos, dessa forma durante o movimento dessas cargas, ocorre a elevação da corrente que circula através dos objetos, podendo causar choques elétricos, geração de interferência eletromagnética, degradação no desempenho de equipamentos eletrônicos e danos irreparáveis aos componentes semicondutores. (JAMES, LIOU, 1998).

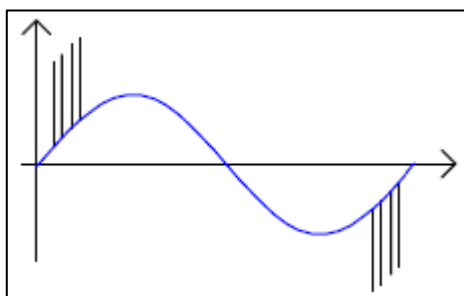
Uma maneira eficaz de proteger o *driver* para LED contra ESD é através da blindagem eletrostática, que utiliza o conceito da gaiola de Faraday, armazenando o equipamento eletrônico no interior de uma caixa metálica. Michael Faraday comprovou em 1836 que um corpo no interior de um condutor, permanece isolado sem receber influência de descargas elétricas, devido a distribuição de cargas que ocorre na superfície. Metais possuem baixa resistência elétrica, sendo bons condutores elétricos, dessa forma, quando são energizados, a carga permanece concentrada na superfície externa, gerando um campo elétrico perpendicular à superfície que é direcionado para o exterior da caixa, resultando em um campo elétrico nulo no compartimento interno. Esse sistema de blindagem é amplamente utilizado, pois impede a entrada de campos elétricos ou eletromagnéticos, resultando na proteção dos componentes que estiverem no interior da caixa metálica. (GREASON, 1987; MELO, 2014).

Os fabricantes de equipamentos eletrônicos visam constantemente o aumento da confiabilidade de seus produtos, com isso cresce a necessidade da busca por soluções de proteção contra fenômenos físicos externos. Para prevenir os efeitos indesejáveis das descargas eletrostáticas é imprescindível conhecê-los, para que sejam aplicadas as melhores ferramentas para minimizar e/ou eliminar estes problemas. De acordo com a IEC 61000-4-2, as descargas eletrostáticas podem ocorrer de duas formas: através do contato humano com o equipamento, ou pelo contato entre dois objetos. A ESD causa maiores danos aos sistemas eletrônicos quando acontece entre dois objetos, dessa forma os testes especificados por esta norma simulam de forma adequada esta condição. O detalhamento do teste de imunidade é apresentado no Apêndice A.

2.4.2 Transientes Rápidos - IEC 61000-4-4

Uma das anomalias encontradas nas linhas de transmissão que afetam a qualidade da energia elétrica são os transientes rápidos, também denominados de *Bursts*, estes fenômenos normalmente ocorrem devido a circuitos comutadores. Os transientes rápidos, ilustrados pela Figura 13, se manifestam sobrepostos a tensão nominal da rede de alimentação, sendo caracterizados por uma sequência de pulsos de alta tensão, podendo ser positivos ou negativos, com valores de amplitude e frequência variáveis. (GIACOMINI, 2007).

Figura 13 - Transientes rápidos na tensão de alimentação.



Fonte: Adaptado de (GIACOMINI, 2007).

Os transientes rápidos são grandes causadores de falhas em equipamentos eletrônicos, para minimizar seus danos podem ser utilizados componentes para proteção dos circuitos, tais como varistores, diodos supressores de tensão e centelhadores a gás. Os testes de imunidade a esses fenômenos, tem como principal objetivo assegurar que o *driver* para LED esteja apto a operar de forma adequada, mesmo quando submetido a influências destes transientes. A norma IEC 61000-4-4 rege a padronização e procedimentos para realização dos testes, garantindo que as condições simuladas sejam condizentes com a realidade, a fim de estabelecer características de desempenho para o ambiente no qual o equipamento estará inserido. O detalhamento dos testes de imunidade é apresentado no Apêndice B. (CORMIER, BOXLEITNER, 1991).

2.4.3 Sobretensão - IEC 61000-4-5

Sobretensões podem ocorrer por descargas atmosféricas ou por comutação. As descargas atmosféricas são fenômenos naturais, nos quais os raios provocam um impulso de corrente que pode alcançar dezenas de milhares de amperes. As sobretensões de comutação são

geradas na rede elétrica, devido a comutações de máquinas de elevada potência, como motores elétricos, ou por defeitos na rede de alimentação. Esses acontecimentos geram uma sobretensão no sistema eletrônico que pode causar danos irreparáveis aos equipamentos. (FINDER, 2012).

Circuitos de proteção aplicados na entrada do conversor chaveado tornam o dispositivo imune a transientes oriundos da fonte de alimentação, fazendo com que o *driver* para LED esteja de acordo com a regulamentação de compatibilidade eletromagnética, além de contribuir para melhores padrões de segurança e desempenho. A IEC 61000-4-5 especifica os requisitos necessários para execução dos testes, os quais são detalhados no Apêndice C.

2.4.4 Correntes Injetadas em Modo Comum - IEC 61000-4-6

As correntes injetadas em modo comum, também denominadas de ruídos assimétricos, circulam entre os condutores de alimentação e o condutor de aterramento, utilizando elementos parasitas existentes entre o circuito eletrônico e o aterramento do equipamento. Ocorrem frequentemente nas faixas de frequência mais altas, entre os semicondutores e dissipadores de calor. As altas taxas de variação de tensão e as capacitâncias parasitas, são as principais fontes causadoras deste tipo de ruído. (ZIENTARSKI, 2009)

A fonte das perturbações definidas pela IEC 61000-4-6 é basicamente um campo eletromagnético de transmissores de frequências que podem afetar todo o comprimento dos cabos conectados ao *driver*. Através da rede de cabos de alimentação, o equipamento é exposto a correntes que fluem através do sistema de cabeamento conectados ao equipamento de teste, sendo representados por dispositivos de acoplamento e desacoplamento. O teste de cabo é um método importante para verificar a suscetibilidade a radiofrequência. A IEC 61000-4-6 especifica os requisitos necessários para execução dos testes, os quais são detalhados no Apêndice D.

2.4.5 Campos Magnéticos de Frequência - IEC 61000-4-8

Conforme IEC 6100-4-8 os campos magnéticos aos quais os equipamentos eletrônicos são submetidos podem influenciar no correto funcionamento do sistema. Esses campos magnéticos são gerados por uma corrente à referida frequência de rede nos cabos condutores ou por outros dispositivos tais como transformadores, podendo possuir curta duração, ou

ocorrer de forma contínua. Esse ensaio é obrigatório somente em equipamentos que possuam elementos sensíveis a campos magnéticos, tais como sensores magnéticos ou de efeito Hall, dessa forma não se aplica ao *driver* para LED objeto de estudo.

2.4.6 Quedas de Tensão, Interrupções e Variações de Tensão - IEC 61000-4-11

O correto funcionamento dos *drivers* para LED pode ser prejudicado por quedas, interrupções e variações de tensão provenientes da fonte de alimentação. As quedas de tensão e as interrupções são causadas por falhas no sistema de fornecimento de energia elétrica, já as variações de tensão ocorrem devido a oscilações contínuas de cargas conectadas a rede de alimentação.

As quedas ou afundamentos de tensão, são reduções de curta duração na magnitude da tensão RMS, sendo caracterizados por sua magnitude e duração, além de serem um dos maiores problemas de qualidade de energia enfrentado pelos consumidores, pelo fato de ocorrerem com maior frequência do que as interrupções. Nas interrupções acontece a perda completa de tensão, quando algum dispositivo de proteção interrompe o circuito por determinado período de tempo, normalmente se manifesta quando houver falhas no circuito de alimentação do sistema. Quedas de tensão ocorrem durante o período de falhas nos circuitos de alimentação paralelos ou no sistema de transmissão causando distorções de tensão, mas não resultando em interrupções reais. (MCGRANAGHAN, MUELLER, SAMOTYI, 1993).

De acordo com a IEC 61000-4-11, esses fenômenos são de natureza aleatória e podem ser caracterizados em termos de desvio da tensão e duração nominal para fins de simulação em laboratório. O detalhamento dos ensaios é apresentado no Apêndice E.

Os próximos tópicos tratam do desenvolvimento de três propostas de dispositivos de proteção à imunidade eletromagnética, para que o *driver* utilizado como objeto de estudo esteja apto a cumprir os requisitos de compatibilidade eletromagnética contidos na IEC 61547.

2.5 PROPOSTAS DE CUMPRIMENTO COM OS REQUISITOS DA EMC

A partir dos requisitos contidos na norma IEC 61547 é possível o desenvolvimento de propostas de dispositivos de proteção à imunidade eletromagnética no *driver* para LED, com a

finalidade de adequá-lo às exigências dos órgãos normativos na área de iluminação no que diz respeito à imunidade eletromagnética.

Oscilações na rede de alimentação com duração na faixa dos milissegundos podem causar danos instantâneos e irreparáveis aos *drivers* para LED, dessa forma é imprescindível a utilização de circuitos de proteção para bloquear anomalias que tornam o equipamento mais susceptível a falhas.

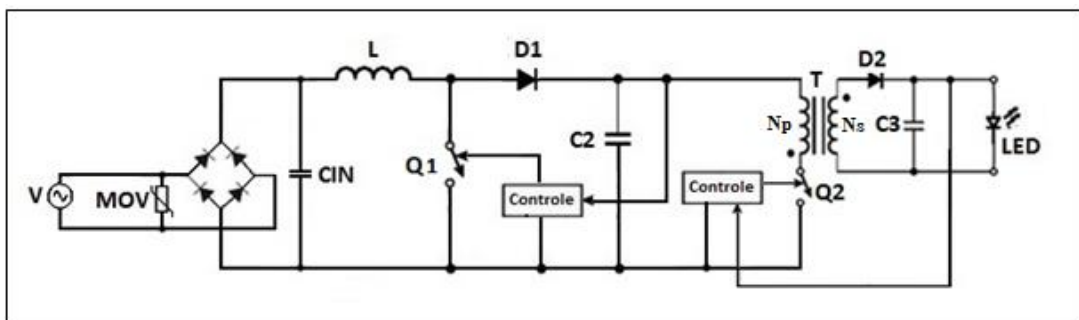
Circuitos de proteção aplicados na entrada do conversor chaveado tornam o dispositivo imune a transientes oriundos da fonte de alimentação, fazendo com que o *driver* para LED esteja de acordo com a regulamentação de compatibilidade eletromagnética, além de contribuir para melhores padrões de segurança e desempenho. Os seguintes tópicos apresentam três propostas de circuitos de proteção contra sobretensões.

2.5.1 Circuito de Proteção com Varistor

Varistores são dispositivos não-lineares dependentes da tensão, sendo tipicamente utilizados para a supressão de tensões e outros transientes de alta energia. É um componente eletrônico cujo valor de resistência elétrica é uma função inversa da tensão aplicada nos seus terminais. Isto é, à medida que a diferença de potencial sobre o varistor aumenta, sua resistência diminui. As seguintes características devem ser analisadas para especificação dos varistores: tensão máxima de operação, corrente máxima de operação, máxima absorção de energia, capacitância e máxima carga permanente. (EPCOS, 2008).

A Figura 14 ilustra uma topologia de circuito de proteção que utiliza um varistor na entrada do circuito.

Figura 14 - Circuito de Proteção com Varistor (MOV).



Fonte: Adaptado de (INFINEON, 2014).

Uma técnica de aproximação pode ser utilizada para estimar a energia (E) do transiente que será absorvida pelo varistor. Para determinar a energia absorvida, é utilizada a seguinte equação. (LITTELFUSE, 1999).

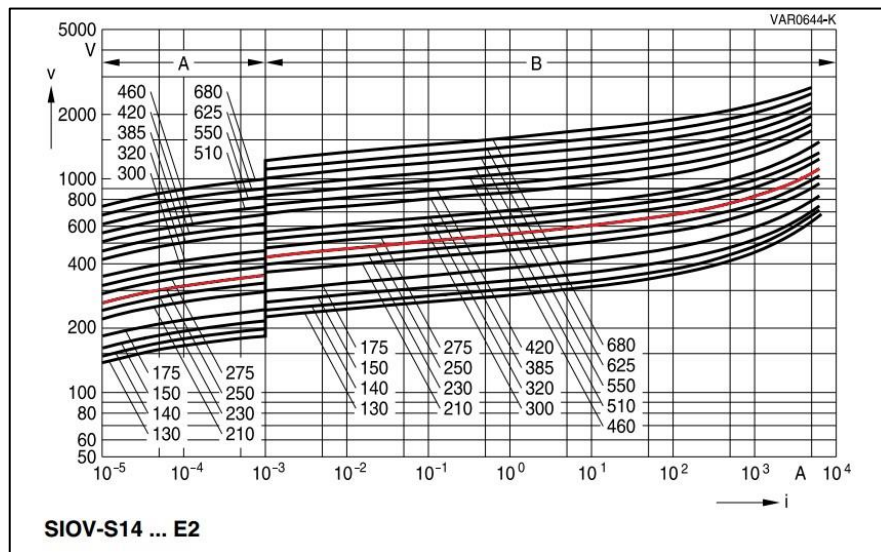
$$E = \int_0^t V_C(t) * i(t) * \Delta t dt \quad 2.4$$

$$E = k * V_C * i * t \quad 2.5$$

Onde i é a corrente de pico aplicada, V_C é a tensão de grampo, t é a duração do impulso e k é uma constante, que corresponde à forma de onda de corrente durante o impulso.

Para execução dos cálculos e validação para aplicação no *driver* para LED, será utilizado o varistor da Epcos modelo S14K250, conforme curva de características V/I apresentada na Figura 15.

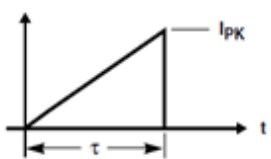
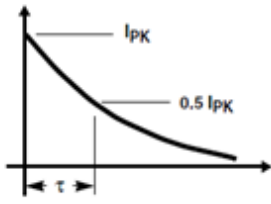
Figura 15 - Curva de Características V/I do Varistor S14K250.



Fonte: Adaptado de (EPCOS, 2008).

A determinação da constante k é realizada pela característica da forma de onda da corrente do surto, conforme apresentado na Figura 16.

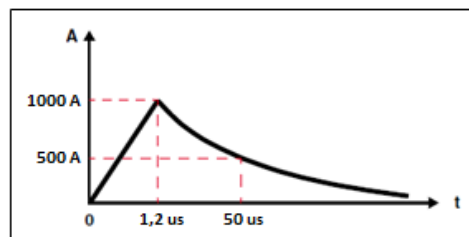
Figura 16 - Forma de Onda da Corrente do Surto.

FORMA DE ONDA	EQUAÇÃO	K
	$I_{pK} \left(\frac{t}{\tau} \right)$	0.5
	$I_{pK} e^{-t/1.44\tau}$	1.4

Fonte: Adaptado de (LITTELFUSE, 1999).

Considerando a característica exponencial da forma de onda do surto de tensão contida na IEC 61000-4-5, o cálculo da energia total do surto é realizado dividindo-se a forma de onda em duas partes, sendo calculadas duas energias separadamente, que serão somadas para obtenção da energia total. A primeira seção da forma de onda vai de 0 a $1,2 \mu\text{s}$ e a segunda seção vai de $1,2 \mu\text{s}$ a $50 \mu\text{s}$ conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 - Forma de Onda para cálculo da Energia.



Fonte: Adaptado de (LITTELFUSE, 1999).

Considerando uma impedância da fonte geradora do surto de 2Ω , o cálculo da energia total contida no surto de tensão é apresentado abaixo.

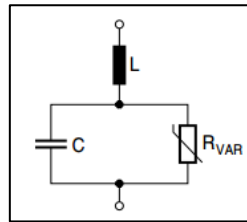
$$E_1 = 0,5 * 840 * 1000 * 1,2 \times 10^{-6} = 0,504 J \quad 2.6$$

$$E_2 = 1,4 * 840 * 1000 * (50 - 1,2) \times 10^{-6} = 57,39 J \quad 2.7$$

$$E_{total} = E_1 + E_2 = 0,504 + 57,39 = 57,89 J \quad 2.8$$

O modelo para simulação do varistor é apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Modelo para Simulação do Varistor.



Fonte: (EPCOS, 2008).

Onde:

L é a indutância de condução, determinada por 1 nH para cada milímetro do varistor.

C é a capacitância interna do varistor, fornecida pelo fabricante.

R_{VAR} é o elemento não linear do varistor, definido pela curva característica V/I.

A curva de características V/I é uma função logarítmica, dessa forma sua taxa de variação (α) é determinada a partir da seguinte aproximação.

$$\alpha = \frac{\log I_2 - \log I_1}{\log V_{2-} - \log V_2} \quad 2.9$$

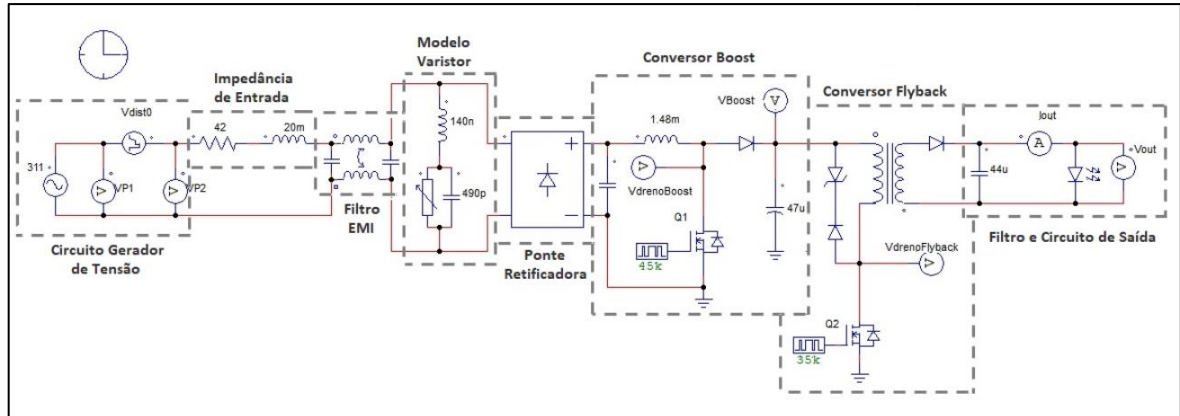
$$\alpha = \frac{\log(1000) - \log(0,001)}{\log(830) - \log(430)} \approx 21 \quad 2.10$$

A função do elemento não linear é obtida através das características da curva V/I. Inicialmente determina-se qual é o valor de tensão correspondente a uma corrente de 10 A, isso porque o valor do logaritmo de 10 é igual a 1. A partir da obtenção deste valor de tensão, realiza-se sua soma com a taxa de variação multiplicada pelo elemento dependente. Para o varistor modelo S14K250, foi determinada a seguinte equação para o elemento não linear. (EPCOS, 2008).

$$v(i) = 550 + (21 * \log(i)) \quad 2.11$$

Para comprovação do funcionamento do varistor escolhido foi realizada uma simulação do modelo do componente fornecido pelo fabricante, através da utilização do software Psim, conforme ilustra a Figura 19.

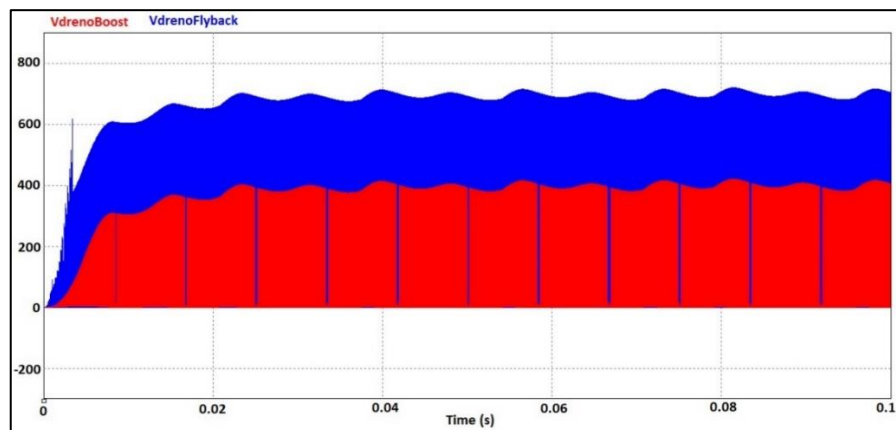
Figura 19 - Simulação com Proteção do Varistor.



Fonte: A autora (2017).

O componente eletrônico mais crítico do circuito do *driver* em termos de tensão é o Mosfet, pois é aplicada diretamente a ele a tensão oriunda da rede de alimentação somada à tensão contida no transformador. Dessa forma, para validação do modelo apresentado na simulação é realizado um monitoramento na tensão de dreno do Mosfet. A tensão máxima suportada por este componente no circuito do *Boost* é de 600 V, e de 800 V no circuito do *Flyback*. A Figura 20 apresenta o monitoramento de tensão realizado no Dreno dos Mosfets, comprovando que os surtos de tensão foram suprimidos conforme esperado, garantindo ao *driver* para LED uma operação segura e em conformidade com a IEC 61547.

Figura 20 - Monitoramento de Tensão no Dreno dos Mosfets para Proposta 1.



Fonte: A autora (2017).

A Figura 21 apresenta um zoom da tensão no dreno dos Mosfets no momento de comutação das chaves, comprovando que não ocorreram *spikes* de tensão e que os surtos foram suprimidos.

Figura 22 - Zoom no Dreno dos Mosfets para Proposta 1.



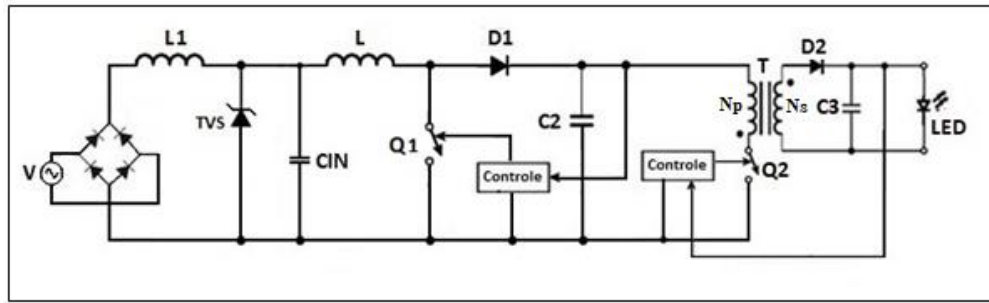
Fonte: A autora (2017).

O fabricante informa que a energia máxima absorvida pelo varistor S14K250 é de 65 J, comprovando desta forma que o modelo de varistor escolhido pode ser utilizado no *driver* para LED para suprimir surtos de tensão em conformidade com as exigências dos órgãos normativos na área de iluminação no que diz respeito à imunidade contra sobretensões.

2.5.2 Circuito de Proteção com TVS e Indutor

Os diodos de supressão, também denominados supressores de transientes de tensão (TVS), são componentes eletrônicos com características semelhantes a um diodo Zener, porém possuem a capacidade de absorver maiores quantidades de energia. Na figura 22 é possível visualizar uma topologia de circuito de proteção que utiliza um TVS e um indutor.

Figura 22 - Circuito de Proteção com TVS e Indutor.



Fonte: Adaptado de (INFINEON, 2014).

O esquema elétrico é composto por um circuito divisor de tensão utilizando um indutor adicional e um TVS após a ponte retificadora. O diodo supressor de tensão entra em modo de condução antes que a tensão de ruptura inversa seja alcançada, absorvendo a energia oriunda do transiente. (INFINEON 2014).

Conforme Walters (1999), para seleção do TVS deve ser definida qual a tensão operacional máxima de pico estará no ponto da proteção pretendida no circuito, devendo incluir tensões de pico repetitivas, tais como picos senoidais destinados a operação normal, porém deve-se excluir quaisquer transientes de tensão indesejados que necessitam ser suprimidos. Esta tensão de funcionamento determinará a seleção da Tensão de Alimentação Nominal (VWM) do TVS. Em seguida deve ser especificada a Tensão de Ruptura (VBR), que é tipicamente 10% superior que a VWM. Para aplicação no circuito do *driver* para LED a especificação do TVS foi definida conforme segue abaixo.

$$VWM_{TVS} = (220 + 10\%) * \sqrt{2} = 342 V \quad 2.12$$

$$VBR_{TVS} = (342 + 10\%) \approx 380 V \quad 2.13$$

A especificação do indutor é realizada da seguinte forma. Inicialmente determina-se qual a corrente máxima que pode percorrer o diodo supressor de tensão sem que ocorra a queima do mesmo. O valor de potência do TVS é fornecido pelo fabricante, e o cálculo da corrente é efetuado da seguinte forma.

$$P_{TVS} = VBR_{TVS} * I_{TVS} \quad 2.14$$

$$1500 = 380 * I_{TVS} \quad 2.15$$

$$I_{TVS} = \frac{1500}{380} = 3,95 \text{ A} \quad 2.16$$

A partir disso, é realizado o cálculo para especificação do indutor a ser utilizado.

$$vL = L \frac{di}{dt} \quad 2.17$$

$$vL = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad 2.18$$

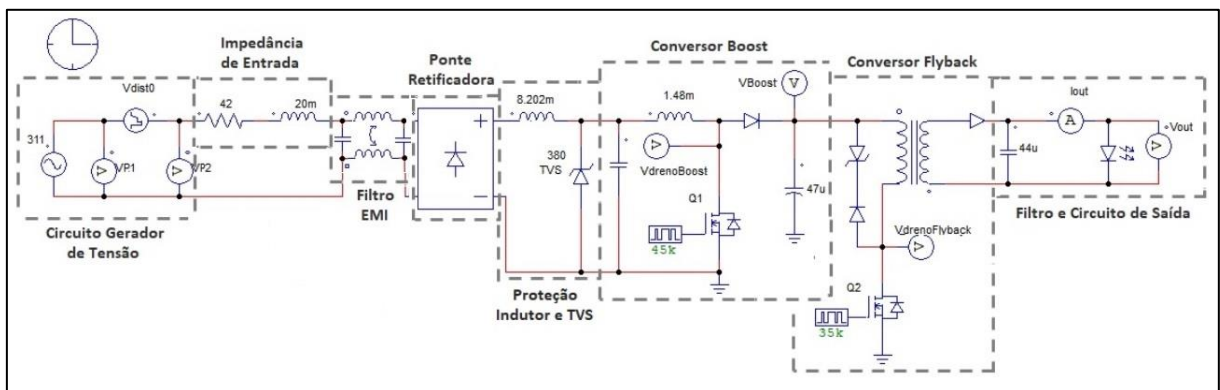
$$vL = L \frac{i - i_o}{t - t_o} \quad 2.19$$

$$2000 - 380 = L \frac{3,95 - 0}{20\mu - 0} \quad 2.20$$

$$L = \frac{1620}{197500} = 8,202 \text{ mH} \quad 2.21$$

Com a finalidade de comprovar que o circuito proposto acima é capaz de suprimir surtos de tensão que podem ocorrer na rede elétrica, foi realizada uma simulação a partir da utilização do software Psim. A Figura 23 apresenta o circuito simulado, sendo utilizada a forma de onda para simulação dos surtos de tensão apresentada na Figura 33.

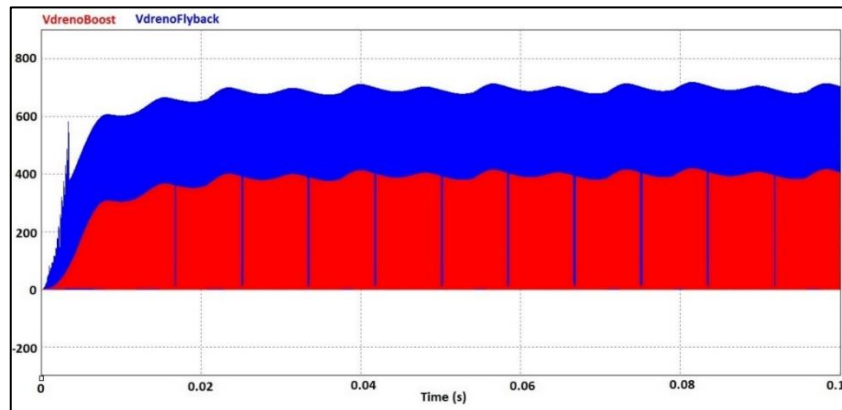
Figura 23 – Simulação com TVS e Indutor.



Fonte: A autora (2017).

A funcionalidade do circuito proposto foi comprovada através da realização de um monitoramento na tensão dos pinos de Dreno dos Mosfets. Quando a forma de onda da sobretensão é aplicada ao circuito, o indutor e o TVS propostos, devem minimizar o valor do surto para valores inferiores a 600 V e 800 V, assegurando dessa forma que não haverá danos aos Mosfets e ao restante do circuito eletrônico. A Figura 24 apresenta o monitoramento de tensão realizado nos Dreno dos Mosfets, comprovando que os surtos de tensão foram suprimidos conforme esperado, garantido ao *driver* para LED uma operação segura e em conformidade com a IEC 61547.

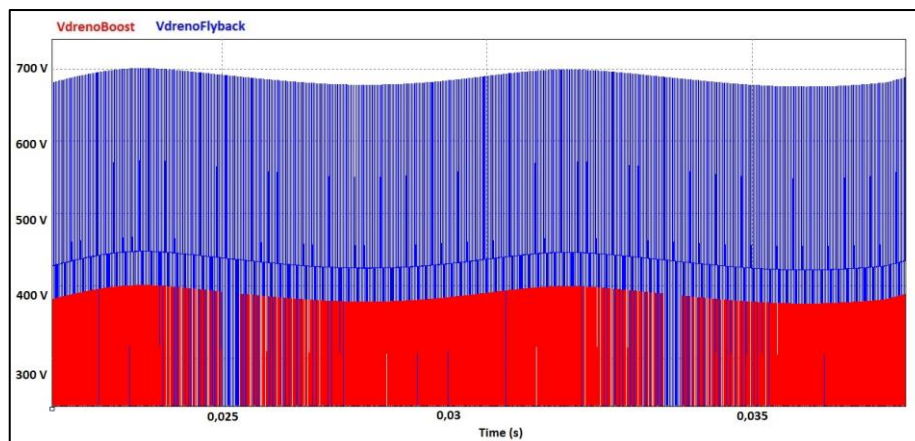
Figura 24 - Monitoramento de Tensão no Dreno dos Mosfets para Proposta 2.



Fonte: A autora (2017).

A Figura 25 apresenta um zoom da tensão no dreno dos Mosfets no momento de comutação das chaves, comprovando que não ocorreram *spikes* de tensão e que os surtos foram suprimidos.

Figura 25 - Zoom no Dreno dos Mosfets para Proposta 2.

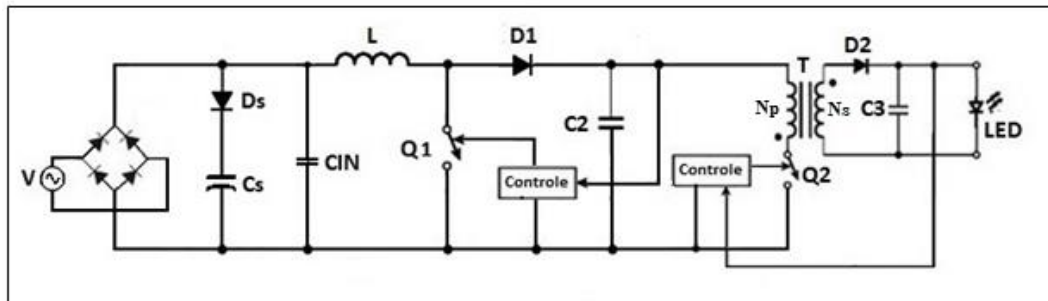


Fonte: A autora (2017).

2.5.3 Circuito de Proteção com Diodo e Capacitor Eletrolítico

Uma terceira proposta para minimizar os danos causados por surtos de tensão é utilizar um capacitor eletrolítico em série com um diodo de bloqueio de alta tensão, como mostrado na Figura 26. O capacitor absorverá a energia da sobretensão para limitar altas tensões provenientes da fonte de alimentação. Uma desvantagem para esta solução é o tamanho físico do capacitor necessário para suprimir esses surtos e a alta tensão que sempre estará presente no capacitor. (INFINEON, 2014).

Figura 26 - Circuito de Proteção com Diodo e Capacitor Eletrolítico.



Fonte: Adaptado de (INFINEON, 2014).

A tensão máxima sobre o diodo e o capacitor eletrolítico, é a tensão fornecida pelo circuito, no caso do *driver* para LED, 342 V conforme determinado anteriormente na equação 2.12. A especificação do capacitor é realizada para a absorção da energia do pulso, determinada anteriormente na equação 2.15.

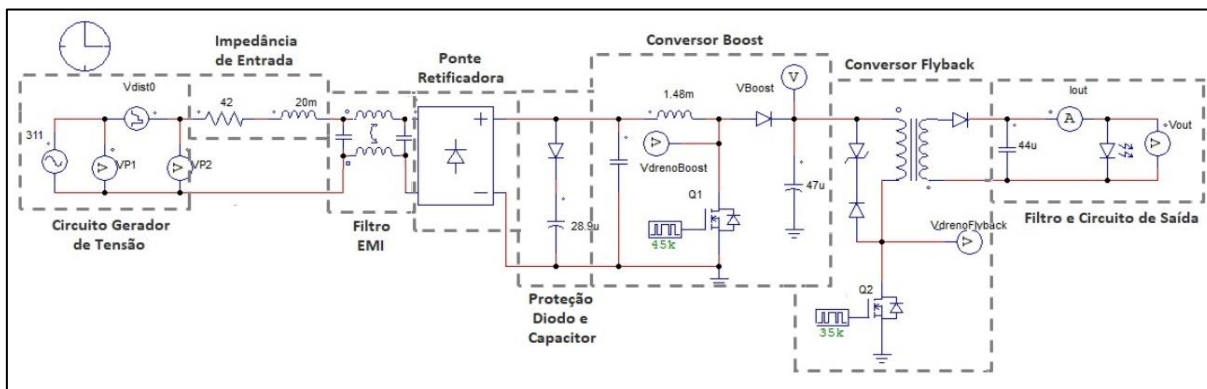
$$E = \frac{1}{2} * C * V^2 \quad 2.22$$

$$C = \frac{E}{0,5 * V^2} \quad 2.23$$

$$C = \frac{57,89}{0,5 * 2000^2} = 28,9 \mu F \quad 2.24$$

A comprovação do circuito proposto foi realizada através da simulação no software Psim apresentada na Figura 27. A forma de onda utilizada para simulação dos surtos de tensão é apresentada na Figura 33.

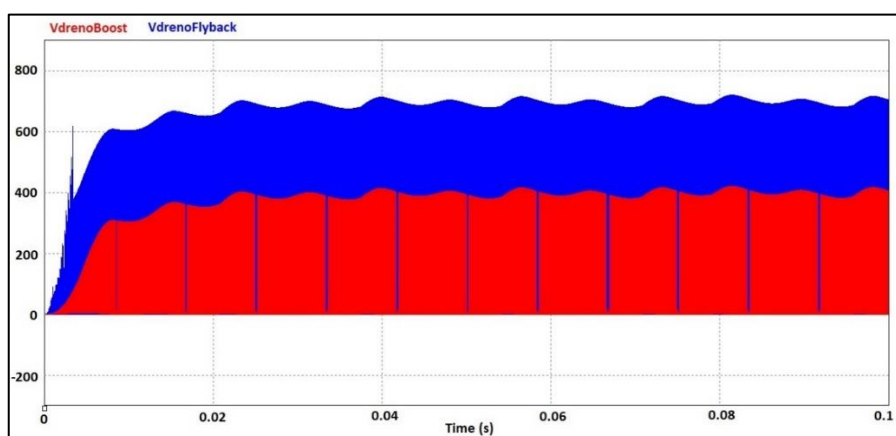
Figura 27 - Simulação com Diodo e Capacitor Eletrolítico.



Fonte: A autora (2017).

A funcionalidade do circuito proposto foi confirmada através da realização um monitoramento na tensão dos pinos de Dreno dos Mosfets. Quando a forma de onda da sobretensão é aplicada ao circuito, o diodo e o capacitor eletrolítico propostos, devem minimizar o valor do surto para valores inferiores 600 V para o *Boost* e inferiores a 800 V para o *Flyback*, assegurando dessa forma que não haverá danos aos Mosfets e ao restante do circuito eletrônico. A Figura 28 apresenta o monitoramento de tensão realizado nos Drenos dos Mosfets, comprovando que os surtos de tensão foram suprimidos conforme esperado, garantido ao *driver* para LED uma operação segura e em conformidade com a IEC 61547.

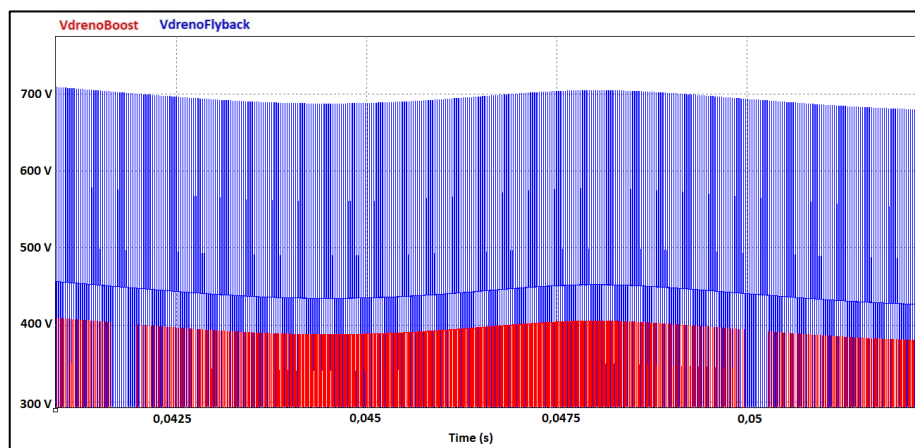
Figura 28 - Monitoramento de Tensão no Dreno dos Mosfets para Proposta 3.



Fonte: A autora (2017).

A Figura 29 apresenta um zoom da tensão no dreno dos Mosfets no momento de comutação das chaves, comprovando que não ocorreram *spikes* de tensão e que os surtos foram suprimidos.

Figura 29 - Zoom no Dreno dos Mosfets para Proposta 3.



Fonte: A autora (2017).

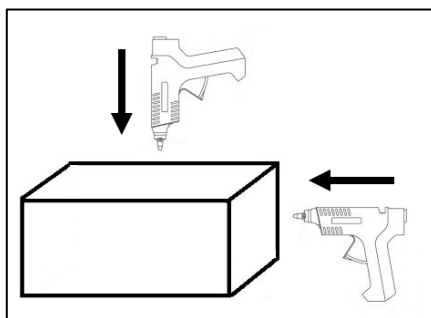
Os próximos tópicos apresentam os resultados práticos obtidos durante realização dos ensaios no CIENTEC, os testes foram executados conforme requisitos contidos na IEC 61547 utilizando nível de ensaio 1, que caracteriza ambientes tipicamente industriais.

2.6 RESULTADOS OBTIDOS

2.6.1 Imunidade a Descargas Eletrostáticas - IEC 61000-4-2

O método de ensaio utilizado foi a descarga por contato, no qual aplicam-se vinte descargas eletrostáticas (10 com polaridade positiva e 10 com polaridade negativa) com amplitude de 4 kV em cada peça de metal visível do invólucro, excluindo-se os terminais. A Figura 30 apresenta o modo que as descargas por contato foram aplicadas ao *driver* durante a realização dos testes, tanto no sentido vertical, quanto no horizontal. Também foram aplicadas as descargas nos planos horizontal e vertical da mesa na qual o *driver* estava instalado.

Figura 30 - Formas de aplicação das descargas eletrostáticas durante os ensaios.



Fonte: A autora (2017).

A Figura 31 ilustra o equipamento gerador de descargas eletrostáticas utilizado para realização do ensaio.

Figura 31 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de EDS.



Fonte: A autora (2017).

O critério de desempenho para este ensaio é determinado pela IEC 61547, o qual estabelece que durante a realização dos testes, não devem ser observadas mudanças na intensidade luminosa e o *driver* deve manter suas características normais de operações dentro dos limites especificados pelo fabricante.

Durante a execução do ensaio o *driver* manteve suas características de operação e permaneceu em perfeitas condições de funcionamento sem sofrer mudanças na intensidade

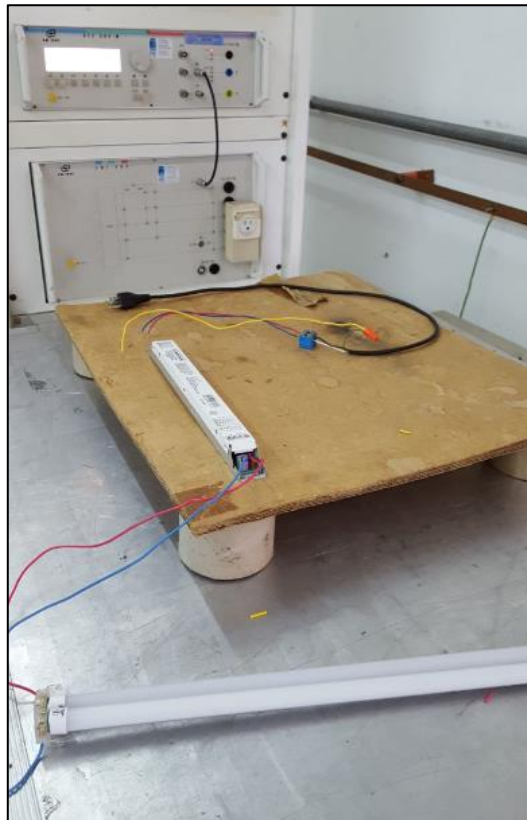
luminosa, dessa forma foi aprovado no ensaio, podendo ser considerado imune a descargas eletrostáticas.

2.6.2 Imunidade a Transientes Rápidos - IEC 61000-4-4

Os transientes rápidos foram aplicados durante 2 minutos com polaridade positiva e 2 minutos com polaridade negativa, a uma amplitude de 1 kV com frequência de 5 kHz.

A Figura 32 apresenta o *driver* sendo preparado para realização do ensaio.

Figura 32 - *Driver* e Equipamento para Teste de Transientes Rápidos.



Fonte: A autora (2017).

O critério de desempenho para este ensaio é determinado pela IEC 61547, o qual estabelece que durante a realização dos testes, a intensidade da luz pode ser alterada para qualquer valor. Após encerramento do ensaio, a intensidade luminosa deve retornar ao seu valor nominal dentro de um minuto.

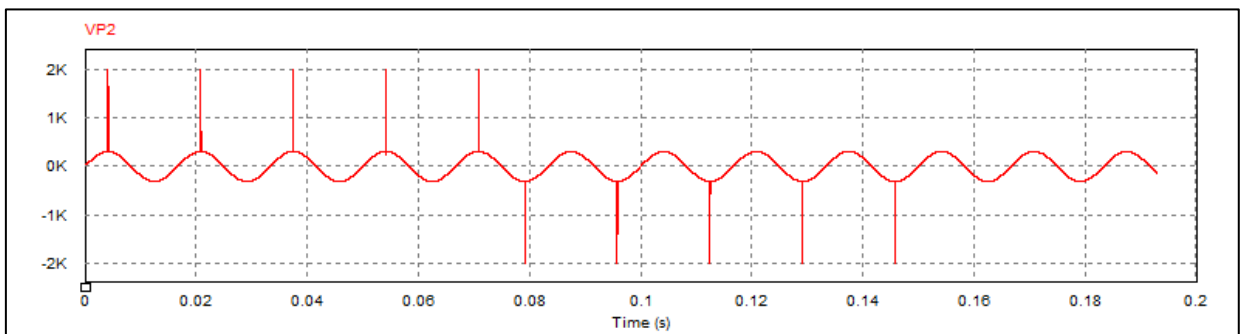
Durante a execução do ensaio o *driver* manteve suas características normais de operação e permaneceu em perfeitas condições de funcionamento sem sofrer mudanças na intensidade

luminosa, dessa forma foi aprovado no ensaio, podendo ser considerado imune a transientes rápidos.

2.6.3 Imunidade a Sobretensão - IEC 61000-4-5

Os ensaios são realizados conforme requisitos contidos na norma IEC 61547, no qual devem ser aplicados à onda de tensão de corrente alternada, 5 impulsos positivos quando o ângulo de fase corresponde a 90° e cinco impulsos negativos quando o ângulo de fase corresponde a 270° , conforme ilustra a Figura 33.

Figura 33 - Forma de Onda dos Surtos de Tensão.

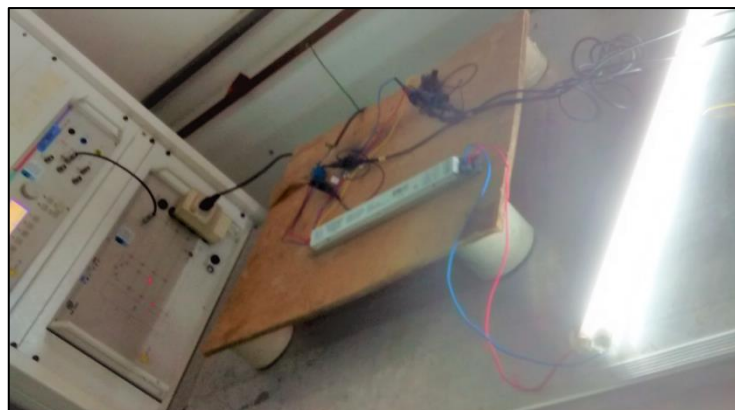


Fonte: A autora (2017).

Os surtos de tensão devem ser aplicados entre os terminais fase-terra e neutro-terra com uma amplitude de 2 kV, e entre os terminais neutro-fase com amplitude de 1 kV.

A Figura 34 ilustra o *driver* durante realização do ensaio de imunidade a sobretensão.

Figura 34 - Ensaio de Imunidade a Sobretensão.



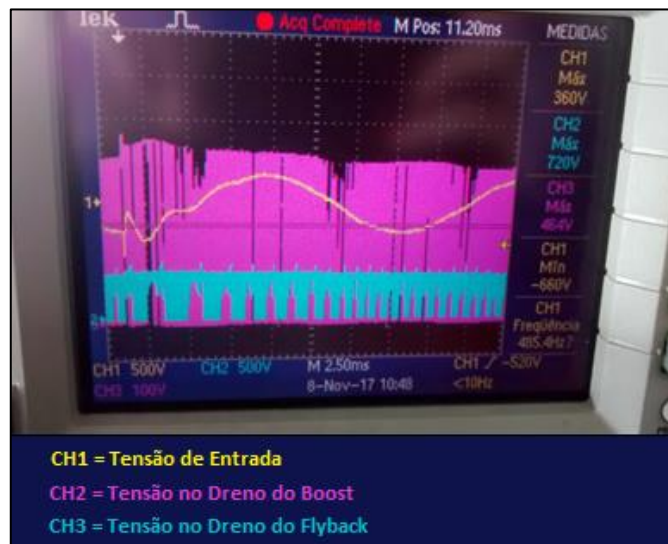
Fonte: A autora (2017).

Este ensaio de imunidade foi realizado em três *drivers* distintos, cada um deles com a implementação de uma das propostas de circuitos de proteção desenvolvidas durante este trabalho.

2.6.3.1 Proteção com Varistor

A primeira amostra foi implementada com o acréscimo do circuito de proteção com varistor, foi utilizado modelo S14K250 com energia de 65 J. A Figura 35 ilustra as formas de onda obtidas para aplicação de surto entre os terminais Fase-Neutro.

Figura 35 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Neutro na Amostra 1.

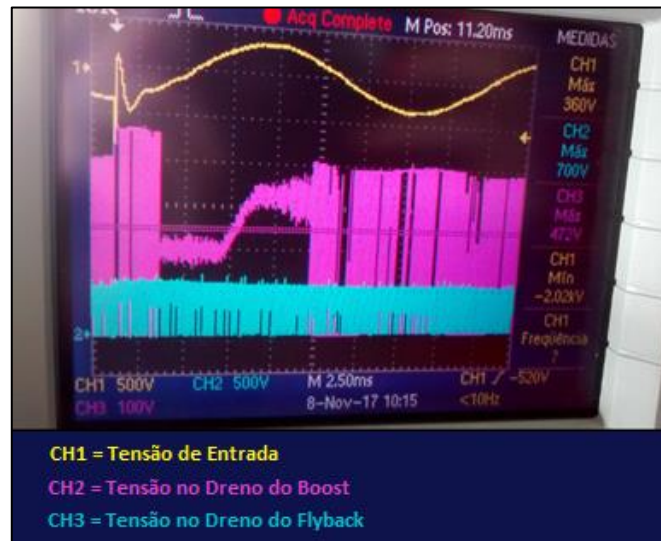


Fonte: A autora (2017).

Avaliando-se as formas de onda obtidas, é possível confirmar que as tensões nas chaves permaneceram com valores inferiores aos limites máximos especificados. A tensão no Mosfet do *Boost* é de 464 V, e a tensão no Mosfet do *Flyback* é igual a 720 V.

A Figura 36 ilustra as formas de onda obtidas para aplicação de surto entre os terminais Fase-Terra.

Figura 36 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Terra na Amostra 1.

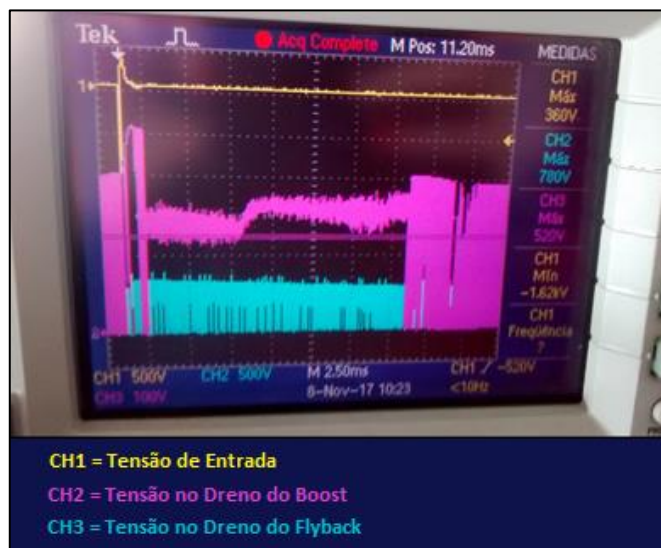


Fonte: A autora (2017).

Avaliando-se as formas de onda obtidas, é possível confirmar que as tensões nas chaves permaneceram com valores inferiores aos limites máximos especificados. A tensão no Mosfet do *Boost* é de 472 V, e a tensão no Mosfet do *Flyback* é igual a 700 V.

A Figura 37 ilustra as formas de onda obtidas para aplicação de surto entre os terminais Neutro-Terra.

Figura 37 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Neutro-Terra na Amostra 1.



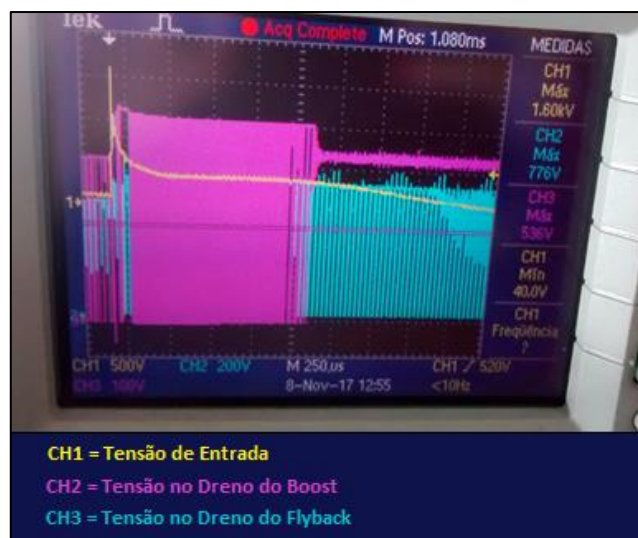
Fonte: A autora (2017).

Avaliando-se as formas de onda obtidas, é possível confirmar que as tensões nas chaves permaneceram com valores inferiores aos limites máximos especificados. A tensão no Mosfet do *Boost* é de 520 V, e a tensão no Mosfet do *Flyback* é igual a 780 V.

2.6.3.2 Proteção com Indutor e TVS

A segunda amostra foi implementada com o acréscimo do circuito de proteção com o indutor e o TVS. A Figura 38 ilustra as formas de onda obtidas para aplicação de surto entre os terminais Fase-Neutro.

Figura 38 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Neutro na Amostra 2.



Fonte: A autora (2017).

Avaliando-se as formas de onda obtidas, é possível confirmar que as tensões nas chaves permaneceram com valores inferiores aos limites máximos especificados. A tensão no Mosfet do *Boost* é de 536 V, e a tensão no Mosfet do *Flyback* é igual a 776 V.

A Figura 39 ilustra as formas de onda obtidas para aplicação de surto entre os terminais Fase-Terra.

Figura 39 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Terra na Amostra 2.

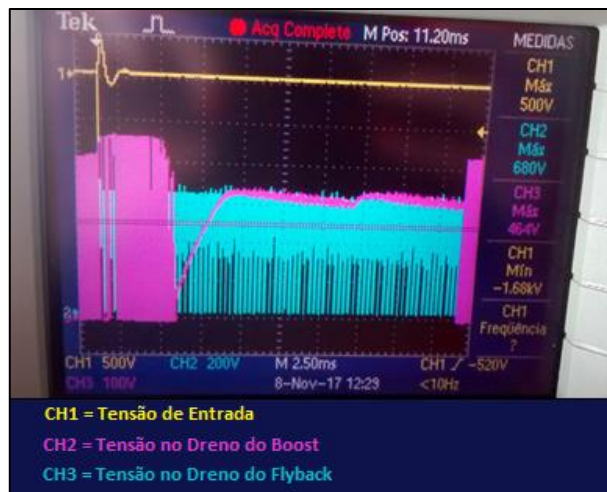


Fonte: A autora (2017).

Avaliando-se as formas de onda obtidas, é poss'vel confirmar que as tens'es nas chaves permaneceram com valores inferiores aos limites m'aximos especificados. A tens'o no Mosfet do *Boost* ' de 464 V, e a tens'o no Mosfet do *Flyback* ' igual a 704 V.

A Figura 40 ilustra as formas de onda obtidas para aplica'o de surto entre os terminais Neutro-Terra.

Figura 40 - Formas de Onda para Sobretens'o entre Terminais Neutro-Terra na Amostra 2.



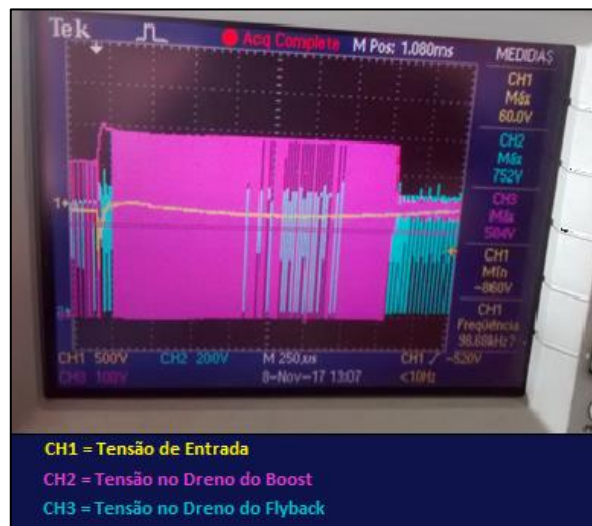
Fonte: A autora (2017).

Avaliando-se as formas de onda obtidas, é possível confirmar que as tensões nas chaves permaneceram com valores inferiores aos limites máximos especificados. A tensão no Mosfet do *Boost* é de 464 V, e a tensão no Mosfet do *Flyback* é igual a 680 V.

2.6.3.3 Proteção com Diodo e Capacitor Eletrolítico

A terceira amostra foi implementada com o acréscimo do circuito de proteção com o diodo em série com o capacitor eletrolítico. A Figura 41 ilustra as formas de onda obtidas para aplicação de surto entre os terminais Fase-Neutro.

Figura 41 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Neutro na Amostra 3.

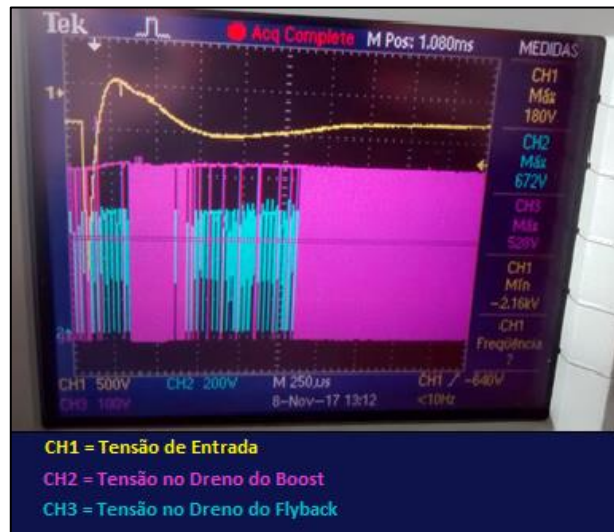


Fonte: A autora (2017).

Avaliando-se as formas de onda obtidas, é possível confirmar que as tensões nas chaves permaneceram com valores inferiores aos limites máximos especificados. A tensão no Mosfet do *Boost* é de 504 V, e a tensão no Mosfet do *Flyback* é igual a 752 V.

A Figura 42 ilustra as formas de onda obtidas para aplicação de surto entre os terminais Fase-Terra.

Figura 42 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Fase-Terra na Amostra 3.

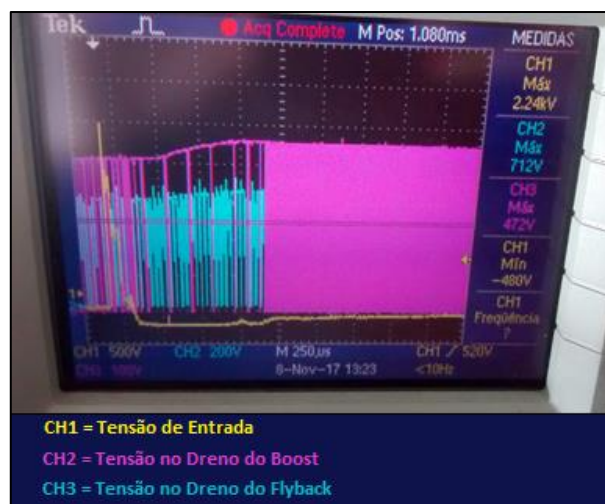


Fonte: A autora (2017).

Avaliando-se as formas de onda obtidas, é possível confirmar que as tensões nas chaves permaneceram com valores inferiores aos limites máximos especificados. A tensão no Mosfet do *Boost* é de 528 V, e a tensão no Mosfet do *Flyback* é igual a 672 V.

A Figura 43 ilustra as formas de onda obtidas para aplicação de surto entre os terminais Neutro-Terra.

Figura 43 - Formas de Onda para Sobretensão entre Terminais Neutro-Terra na Amostra 3.



Fonte: A autora (2017).

Avaliando-se as formas de onda obtidas, é possível confirmar que as tensões nas chaves permaneceram com valores inferiores aos limites máximos especificados. A tensão no Mosfet do *Boost* é de 472 V, e a tensão no Mosfet do *Flyback* é igual a 712 V.

Após a realização de todos os ensaios de sobretensão, é possível constatar que para as três amostras implementadas, a tensão no Mosfet do *Boost* manteve valores inferiores a 600 V, e a tensão no Mosfet do *Flyback* permaneceu com valores inferiores a 800 V, garantindo que as chaves operassem abaixo de seus valores máximos de tensão. Apesar de em alguns momentos a tensão no dreno do *Boost* sofrer períodos de desligamento devido à elevada tensão aplicada na entrada, esse comportamento não afetou o funcionamento dos *drivers* ensaiados, pois os mesmos permaneceram em operação constante durante a execução destes ensaios.

Para avaliação de desempenho deve ser utilizado o critério descrito na IEC 61547, no qual o dispositivo pode sofrer desligamentos e alterações na intensidade luminosa durante a realização do ensaio, porém deve recuperar suas características de operação trinta minutos após encerramento do teste.

Durante a execução do ensaio as três amostras de *drivers* mantiveram suas características normais de operação e permaneceram em perfeitas condições de funcionamento sem sofrer mudanças na intensidade luminosa, dessa forma foram aprovados no ensaio, podendo ser considerados imunes a sobretensão.

Com a finalidade de verificar qual dos circuitos de proteção propostos é o mais viável em termos de custo de implementação para a empresa, foi realizada uma avaliação no valor da matéria prima para aplicação de cada um deles. A solução com proteção do varistor se mostrou a mais viável, representando um acréscimo de 0,17% no custo com matéria-prima, seguida pela proposta do diodo com o capacitor eletrolítico, que representam um aumento no custo de produção de 0,51%. Já a proposta com o indutor e o TVS é a opção mais cara, que impactaria em um aumento de 0,77% no custo do produto final. O acréscimo de componentes eletrônicos no *driver* para LED afeta diretamente no preço do produto final estipulado pela empresa, sendo um dos elementos fundamentais na determinação da participação de mercado e lucratividade das organizações.

2.6.4 Imunidade a Correntes Injetadas em Modo Comum - IEC 61000-4-6

Para realização deste ensaio foi aplicada uma tensão de 3 V, com uma faixa de frequência variando de 150 kHz e 80 MHz. O incremento da frequência ocorre a cada 3 segundos.

A Figura 44 ilustra o ensaio de correntes injetadas realizado no *driver* para LED.

Figura 44 - Ensaio de Correntes Injetadas em Modo Comum.



Fonte: A autora (2017).

O critério de desempenho para este ensaio é determinado pela IEC 61547, o qual estabelece que durante e após a realização dos testes, não deve ser observada nenhuma mudança na intensidade da luz e o *driver* deve permanecer em funcionamento conforme pretendido.

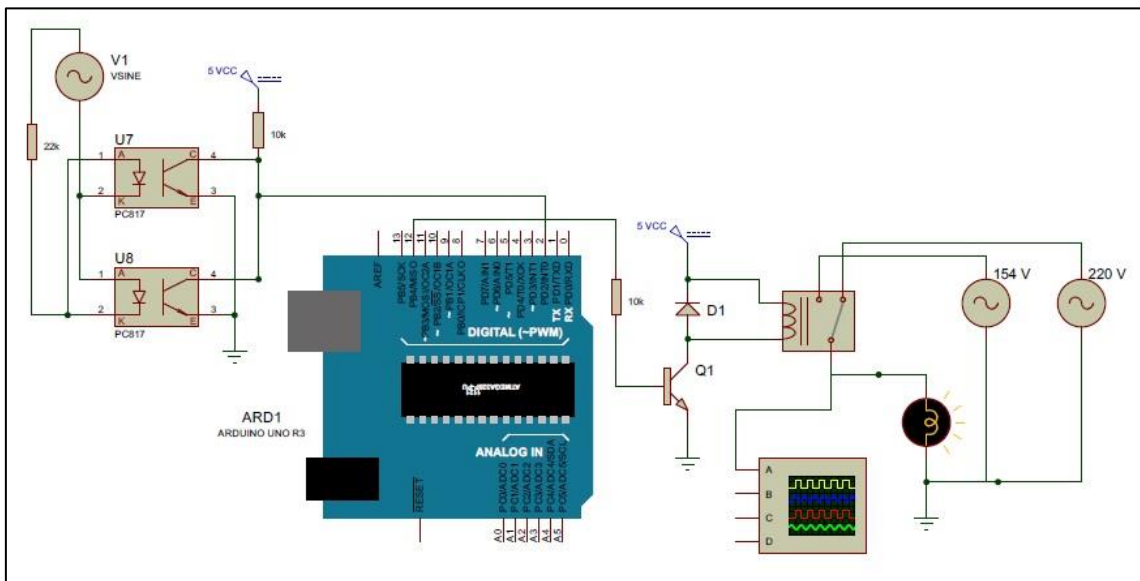
Durante a execução do ensaio o *driver* manteve suas características de operação e permaneceu em perfeitas condições de funcionamento sem sofrer mudanças na intensidade luminosa, dessa forma foi aprovado no ensaio, podendo ser considerado imune a correntes injetadas em modo comum.

2.6.5 Imunidade a Quedas de Tensão, Interrupções e Variações de Tensão - IEC 61000-4-11

Para realização do ensaio de imunidade a queda de tensão deve ser aplicada a entrada do *driver* uma forma de onda senoidal que sofre uma queda de tensão de 70% do valor nominal durante dez ciclos. A Figura 45 apresenta o circuito implementado no simulador Proteus para geração da forma de onda da queda de tensão. O circuito mantém a carga alimentada com uma tensão de 220 V. Para alimentação de 154 V durante o período de tempo de 166 milissegundos exigido pela norma, o microcontrolador enviará um sinal ao relé que fará a comutação da tensão

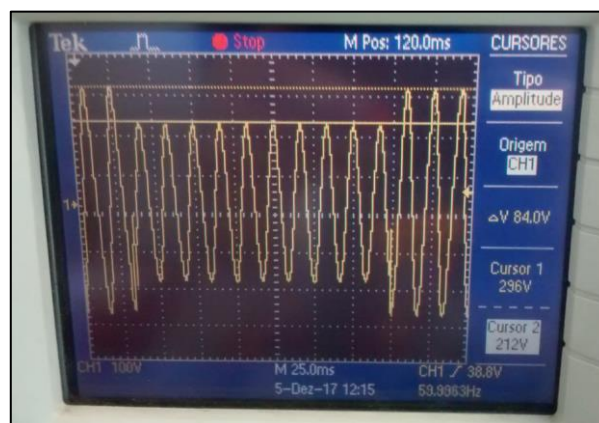
de alimentação. Após operação em dez ciclos com 70% do valor de tensão nominal, o circuito retorna a operar com tensão de 220 V. Para assegurar que as alterações de tensão ocorram quando a onda senoidal de entrada passar pelo ponto de zero volts é utilizado um circuito detector de passagem por zero. A forma de onda com a queda de tensão obtida durante realização do teste prático pode ser visualizada na Figura 46.

Figura 45 - Circuito para Geração da Queda de Tensão.



Fonte: A autora (2017).

Figura 46 - Forma de Onda da Queda de Tensão obtida durante ensaio.



Fonte: A autora (2017).

Para ensaio de imunidade a interrupções o *driver* sofre uma pausa no fornecimento de energia durante 300 ciclos da tensão senoidal, que correspondem a um tempo de 5 segundos. O resultado deste teste é apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Resultado do Ensaio de Interrupção de Tensão.



Fonte: A autora (2017).

O ensaio de imunidade a variação de tensão, com transição gradual entre a tensão nominal e a tensão modificada, é opcional, dessa forma não foi realizado.

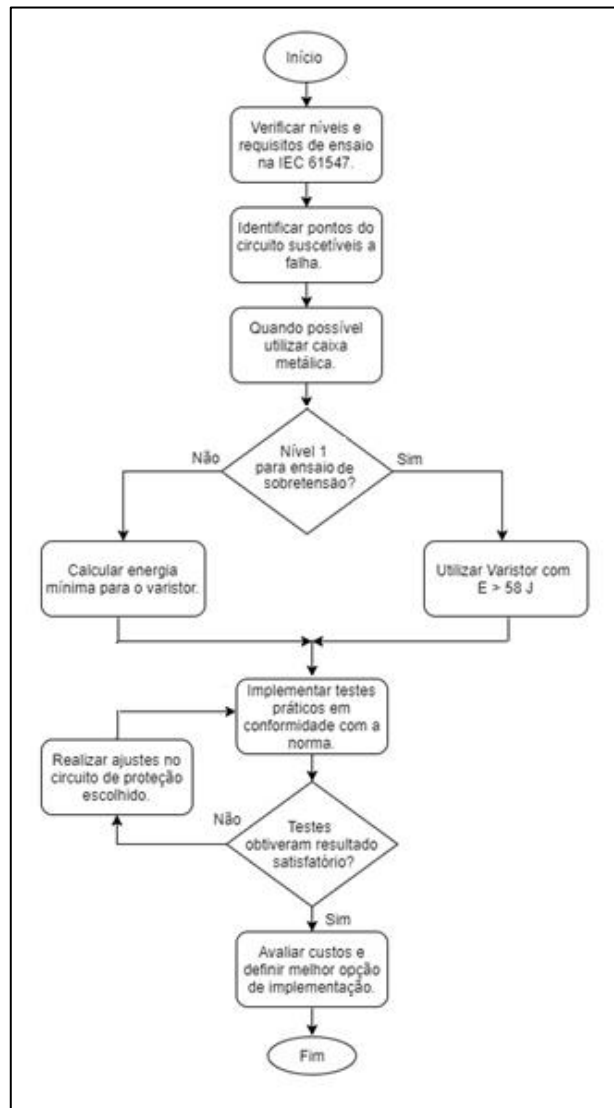
O critério de desempenho para estes ensaios é determinado pela IEC 61547, o qual estabelece que durante e após a realização dos testes, são permitidos desligamentos e alterações na intensidade luminosa. Trinta minutos após encerramento do ensaio todas as funções devem voltar a operar normalmente.

Durante a execução dos ensaios de queda e interrupção de tensão, o *driver* manteve suas características de operação, sofrendo desligamento somente durante o período da interrupção, voltando a operar normalmente sem intervenção, quando a tensão de entrada foi aplicada, dessa forma foi aprovado no ensaio, podendo ser considerado imune a queda e interrupções de tensão.

2.7 METODOLOGIA PARA PROJETO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS EM CONFORMIDADE COM A IEC 61547

A partir do desenvolvimento deste trabalho, foi possível definir uma metodologia a ser utilizada para projetar circuitos eletrônicos na área de iluminação que atendam aos requisitos de imunidade eletromagnética de acordo com especificação contidas na IEC 61547. A execução do projeto deve seguir os passos apresentados no fluxograma ilustrado na Figura 48.

Figura 48 - Fluxograma da Metodologia Implementada.



Fonte: A autora (2017).

A metodologia desenvolvida tem o objetivo de simplificar a execução de projetos futuros, para que os mesmos estejam aptos a atender os requisitos de imunidade eletromagnética definidos pela IEC 61547. Os principais tópicos a serem avaliados durante o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos são a identificação dos pontos suscetíveis a falha, e a partir dessa definição, determinar a melhor opção de circuito de proteção para cada aplicação. Finalmente devem ser avaliados os custos de implementação juntamente com os resultados obtidos de acordo com critérios de desempenho contidos na norma.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou uma análise das principais características do *driver* utilizado para efetuar o controle das grandezas elétricas envolvidas no acendimento dos LED, como forma de assegurar a confiabilidade do mesmo. Apresentou-se o conceito de compatibilidade eletromagnética e seus respectivos subgrupos, bem como as normas que regem os conceitos de EMC dando maior ênfase à imunidade conduzida.

Foram propostos três métodos para tornar o *driver* para LED comercializado pela empresa em conformidade com a IEC 61547, iniciando dessa forma a implementação de circuitos de proteção para imunidade eletromagnéticas, tendo a finalidade de adequá-lo às exigências dos órgãos normativos na área de iluminação. Os resultados obtidos através dos cálculos, simulações e ensaios práticos realizados comprovam a eficácia dos três circuitos de proteção abordados, sendo possível minimizar os danos causados pela interferência eletromagnética, aumentando a confiabilidade do *driver* utilizado como objeto de estudo.

A partir da análise dos resultados obtidos foi desenvolvida uma metodologia que pode ser utilizada como base para projetos futuros, com a finalidade de facilitar a implementação de projetos que estejam aptos a ser aprovados em todos os requisitos de imunidade eletromagnética definidos pela norma.

REFERÊNCIAS

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência: Projetos de Fontes Chaveadas**. 2ª ed., Florianópolis,, Edição do Autor, 2007, 332p.

BELTRAME, Fernando et al. EMI conduzida gerada por conversores estáticos aplicados à correção do fator de potência. **Sba Controle & Automação**, Campinas, v. 23, n. 1, fev. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592012000100001>. Acesso em: 05 ago. 2017.

CORMIER, B.; BOXLEITNER, W. **Electrical fast transient (EFT) testing: an overview**. Published in IEEE: International Symposium on Electromagnetic Compatibility. pp. 291-296. 1991. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/148240/>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

DOE. **Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan**. March 2011. (Washington, DC: U.S. Department of Energy).

EPCOS, **SIOV Metal Oxide Varistors Data Book**, 2008, 318 p. Disponível em: <<http://www.schmid-multitech.sk/images/SIOVMetalOxideVaristors.pdf>>. Acesso em 12 ago. 2017.

FAIRCHILD, **Application Note NA-5076 Design a High Power Factor Flyback Converter Using FL7733A for an LED Driver with Ultra-Wide Output Voltage**. 2014, 15p. . Disponível em: <www.fairchildsemi.com> Acesso em: 08 ago. 2017.

FILADELFO, Fernando Ribeiro. **Desenvolvimento de um conversor estático controlado por PWM para luminária de iluminação pública com LEDs**. 2010. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/97072>>. Acesso em: 29 ago. 2017.

FINDER. **Guia para aplicação de Dispositivos de Proteção contra Surtos – DPS**. 2012. Disponível em: <<http://www.instalacoeseltricas.com/Findernet/download/section/PDFs/guia-dps.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2017.

FIRJAN. **Quanto custa a energia elétrica para a pequena e média indústria no Brasil?**. 2017. 7 f. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-a-energia-eletrica.htm>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

GIACOMINI, Neomar. **Projeto de um Gerador de Transientes Rápidos para Aplicação em testes de Interferência Eletromagnética**. 2007. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2007. Disponível em: <<http://www.lepo.joinville.udesc.br/index.php?site=publicacoes&tipo=dissertacoes>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

GREASON, William D. **Review of the Effect of Electrostatic Discharge and Protection Techniques for Electronic Systems**. IEEE Transactions On Industry Applications, v. 23, n. 2,

pp. 205-216, mar/abr. 1987. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4504895/>>. Acesso em: 16 ago. 2017.

GUARINELLO, Teodoro Queiroz. **Tecnologia de Estado Sólido: Impactos ambientais e econômicos**. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

HELDWEIN, Marcelo Lobo. **Projeto de Filtros para Compatibilidade Eletromagnética**. In: SIMECS – Workshop sobre Interferência Eletromagnética. **Anais...** Caxias do Sul, 2015.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 61547 - Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements**, 2009, 21p.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 61000-4-2: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test**, 2008, 67p.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 61000-4-4: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-4: Electrical Fast Transient/Burst Immunity Test**, 2004, 36p.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 61000-4-5: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test**, 2005, 54p.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 61000-4-6: Compatibilidad electromagnética (EMC) - Parte 4-6: Testing and measurement techniques - Inmunidad a las perturbaciones conducidas, inducidas por los campos de radiofrecuencia**, 2014, 93p.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 61000-4-8: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-8: Testing and Measurement Techniques - Power Frequency Magnetic Field Immunity test**, 2011, 38p.

IEC - International Electrotechnical Commission. **IEC 61000-4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests**, 2004, 60p.

INFINEON, **Application Note AN-1195 Primary Side Regulated LED Driver using the IRS2983**, 2014. 30 p. Disponível em: <<http://www.infineon.com/dgdl/an-1195.pdf?fileId=5546d462533600a40153559b13df115a>>. Acesso em: 02 set. 2017.

INFINEON, **IRS 2505L μ PFC Control IC Design Guide**, 2015. 22 p. Disponível em: <https://www.infineon.com/dgdl/an_201508_pl16_012.pdf?fileId=5546d462533600a4015364c508a02a2f>. Acesso em: 02 set. 2017.

INTRAL. **Indústria de Materiais Elétricos**. Disponível em: <<http://www.intral.com.br/>> Acesso em: 18 out. 2017.

JAMES, Vinson E.; LIOU J. J. **Electrostatic Discharge in Semiconductor Devices: An Overview**. Proceedings of the IEEE, v. 86, n. 2, pp. 399-418, fev. 1998. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/659493/>>. Acesso em: 18 ago. 2017.

LITTELFUSE, **Application Note AN9771.1 Selecting a Littelfuse Varistor**, 1999. 6 p. Disponível em: <http://www.littelfuse.com/~media/electronics_technical/application_notes/varistors/littelfuse_selecting_a_littelfuse_varistor_application_note.pdf>. Acesso em 09 out. 2017.

LIZ, Muriel Bittencourt de. **Introdução à Compatibilidade Eletromagnética em Conversores Estáticos**. 1999. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/81098/143022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

MARTELETO, Douglas Coelho. **Avaliação do diodo emissor de luz (LED) para iluminação de interiores**. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MCGRANAGHAN, Mark F.; MUELLER, David R.; SAMOTYI, Marek J. **Voltage Sags in Industrial Systems**. Proceedings of the IEEE Transactions on Industry Applications, v. 29, n. 20, pp. 397-403, mar/abr. 1993. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/216550/>>. Acesso em: 25 ago. 2017.

MELO, Rezeneide Guimarães. **Planejamento para Minimização de Fatores de Risco relacionados a descargas elétricas em programas de habitação e urbanização no estado do Pará**. 2014. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/6143>>. Acesso em: 18 ago. 2017.

MONTEIRO, Raul Vitor Arantes; CARVALHO, Bismarck Castillo; NOGUEIRIA, Fernando. **Drivers de Lâmpadas de LED: Topologias, Aplicações e Desempenho**. E&S - Engineering And Science. Cuiabá. ed.1, v.2. p. 1-7. nov. 2014. Disponível em: <<http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/1916/1507>>. Acesso em: 10 out. 2017.

MORAIS, Luciano Cardoso de. **Estudo sobre o Panorama da Energia Elétrica no Brasil e Tendências Futuras**. 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/132645/000852309.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

MOREIRA, Bruno. **Led conquista mercado no Brasil e no mundo**. O Setor Elétrico, São Paulo, ano. 10, ed. 109, p.60-66, fev. 2015. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/2016/2017/02/01/ed-109-fevereiro-2015/>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

NOGUEIRA, Fernando José. **Avaliação Experimental de Luminárias Empregando LEDs orientadas à Iluminação Pública**. 2013. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2013. Disponível em: <http://www.ufjf.br/ppee/files/2014/03/Dissertação-Fernando_Nogueira_versão-corrigida_parahomologacao_CD.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2017.

OTT, H. W. **Noise Reduction Techniques in Electronic Systems**. 2ª ed. New York: Wiley-Interscience, 1988.

PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. New York: Wiley, 1992.

PEDRONI, Rafael. et al. Estudo de Caso de um Filtro de Interferência Eletromagnética para Equipamentos de Iluminação utilizando Diodos Emissores de Luz. In: Congresso Brasileiro de Automática. **Anais...** Vitória: Anais do Congresso Brasileiro de Automática. 2016. Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/>>. Acesso em: 12 set. 2017.

PINTO, Rafael Adaime. **Projeto e Implementação de lâmpadas para iluminação de interiores empregando diodos emissores de luz (LEDs)**. 2008 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Santa Maria, 2008. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_arquivos/7/TDE-2009-02-12T120630Z1881/Publico/RAFAELADAIMEPINTO.pdf> Acesso em 09 set. 2017.

POZZATTI, Evandro. **Projeto e Análise de uma Fonte Chaveada em Alta Frequência para Laboratório de Ensino com Saídas: $\pm 12\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 3,3\text{ V}$ e variável até 25 V** . 2015. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4891/1/CM_COELE_2015_2_02.pdf>. Acesso em: 03 set. 2017.

RASHID, Muhammad Harunur. **Power electronics handbook: devices, circuits, and applications**. 3ed. Amsterdam, NE: Elsevier, 2011, 1389 p.

ROBERTS, Steve. **DC/DC Book of Knowledge: Practical tips for the User**. Gmunden: Recom Engineering GmbH & Co Kg, 2014. 234 p.

SARTORI, Hamilton Confortin. **Uma Nova Metodologia de Projeto para a Otimização do Volume do Conversor Boost PFC**. 2009. 143 f. Dissertações (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_arquivos/7/TDE-2009-08-26T143806Z2204/Publico/SARTORI,HAMILTONCONFORTIN.pdf>. Acesso em: 12 set. 2017.

SCHLICHTING, Luis Carlos Martinhago. **Contribuição ao estudo da Compatibilidade Eletromagnética aplicada aos Conversores Estáticos**. 2003. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/85109>>. Acesso em: 18 set. 2017.

SCOPACASA, Vicente A. **Introdução à Tecnologia de LED**. Revista LA_PRO, São Paulo, ed.1, p. 5-10, novembro 2008. Disponível em: <http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/LA_Pro1/02%20%20pro_leds_Vis%C3%A3o_Geral.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2017.

SOLA, A.; KOVALESKI, J. Eficiência energética nas indústrias: cenários & oportunidades. In: XXIV ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...** Florianópolis: Anais do XXIV ENEGEP, 2006.

THERMO FISCHER SCIENTIFIC, **KeyTek EMCPro PLUS System: Operations Manual**. 2004. 122p. Disponível em: <<https://www.thermofisher.com/br/en/home.html>>. Acesso em: 18 set. 2017.

VAN DER BROECK, H., SAUERLANDER, G., WENDT, M. **Power driver topologies and control schemer for LEDs**. Applied Power Electronics Conference, 2007, 1375p.

VASSOLER, Volnei. **Mudança de tecnologia e como isso pode ajudar na redução de consumo na iluminação das empresas**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 5, n. 2, p. 382-397, nov. 2016. Disponível em: <http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/3316/281>. Acesso em: 08 de set de 2017.

VENTURA FILHO, Altino. **O Brasil no Contexto Energético Mundial**. vol. 6. São Paulo: Nova Série Naippe, 2009. 22 p. Disponível em: <http://www.naippe.fm.usp.br/arquivos/livros/Livro_Naippe_Vol6.pdf>. Acesso em: 17 set. 2017.

VIEIRA, Igor da Costa. **Projeto de um conversor Flyback auto oscilante de baixo custo para LEDs de potência**. 2009. 112f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8CUGXG>>. Acesso em 29 set. 2017.

WALTERS, Kent. **How To Select Transient Voltage Suppressors**, 1999. Disponível em: <https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/14650-how-to-select-a-transient-voltage-suppressor>. Acesso em: 26 ago 2017.

ZHAO, Chen. et al. **Improved Synchronous Rectifier Driving Strategy for Primary-Side Regulated (PSR) Flyback Converter in Light-Load Mode**. Ieee Transactions On Power Electronics, v. 29, n. 12, pp. 6506-6517, dez. 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6739160/>>. Acesso em: 02 out. 2017.

ZIENTARSKI, Jonatan Rafael Rakoski. **Análise, Modelagem e Validação Experimental de uma Metodologia para o Projeto do Indutor em Conversores Boost PFC**. 2009. 138 f. Dissertações (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_arquivos/7/TDE-2009-08-07T125951Z-2183/Publico/ZIENTARSKI, JONATAN RAFAEL RAKOSKI.pdf>. Acesso em: 05 out. 2017.

APÊNDICE A – Detalhamento de Testes da IEC 61000-4-2

A geração de descargas eletrostáticas é especialmente favorecida pela combinação de materiais sintéticos e baixa umidade do ar. Uma quantidade mensurável de tensão estática encontrada no ambiente foi utilizada para definir requisitos de imunidade. Os níveis de ensaio devem ser selecionados da forma mais realista possível, de acordo com a instalação e as condições ambientais.

Nível 1: Caracterizado pela presença de materiais antiestéticos e umidade relativa do ar de 35%.

Nível 2: Caracterizado pela presença de materiais antiestéticos e umidade relativa do ar de 10%.

Nível 3: Caracterizado pela presença de materiais sintéticos e umidade relativa do ar de 50%.

Nível 4: Caracterizado pela presença de materiais sintéticos e umidade relativa do ar de 10%.

Os pontos de teste a serem considerados incluem pontos sobre perfis metálicos isolados eletricamente do solo ou qualquer ponto na área de controle. A descarga de contato é o método de ensaio mais utilizado. Em cada peça de metal visível do invólucro, devem ser aplicadas vinte descargas eletrostáticas (10 com polaridade positiva e 10 com polaridade negativa), excluindo-se os terminais. Quando não for possível aplicar as descargas por contato, devem ser utilizadas descargas pelo ar. Os níveis de teste são apresentados na Tabela A.1.

Tabela A.1 - Níveis de Teste para Descargas Eletrostáticas.

Descarga por Contato		Descarga pelo Ar	
Nível	Tensão de Teste	Nível	Tensão de Teste
1	2 kV	1	2 kV
2	4 kV	2	4 kV
3	6 kV	3	8kV
4	8 kV	4	15 kV

Fonte: Adaptado de (IEC 2008).

O equipamento gerador de ensaio deve satisfazer as especificações indicadas nas Tabelas A.2 e A.3.

Tabela A.2 - Especificações Gerais

Parâmetros	Valores
Tensão de Saída, modo de descarga por contato*	De 1 kV a 8 kV (nominal)
Tensão de Saída, modo de descarga pelo ar*	De 2 kV a 15 kV (nominal)***
Tolerância da Tensão de Saída	$\pm 5\%$
Polaridade da Tensão de Saída	Positivo e Negativo
Tempo de espera	≥ 5 segundos
Modo de Operação da Descarga	Descargas Individuais**

* Tensão de circuito aberto medida no eletrodo de descarga do gerador.

** O gerador deve ser capaz de gerar uma taxa de repetição de no mínimo 20 descargas por segundo para fins exploratórios.

*** Não é necessária a utilização de um gerador com capacidade de descarga pelo ar de 15 kV se a tensão máxima a ser utilizada no teste for inferior a este valor.

Fonte: Adaptado de (IEC 2008).

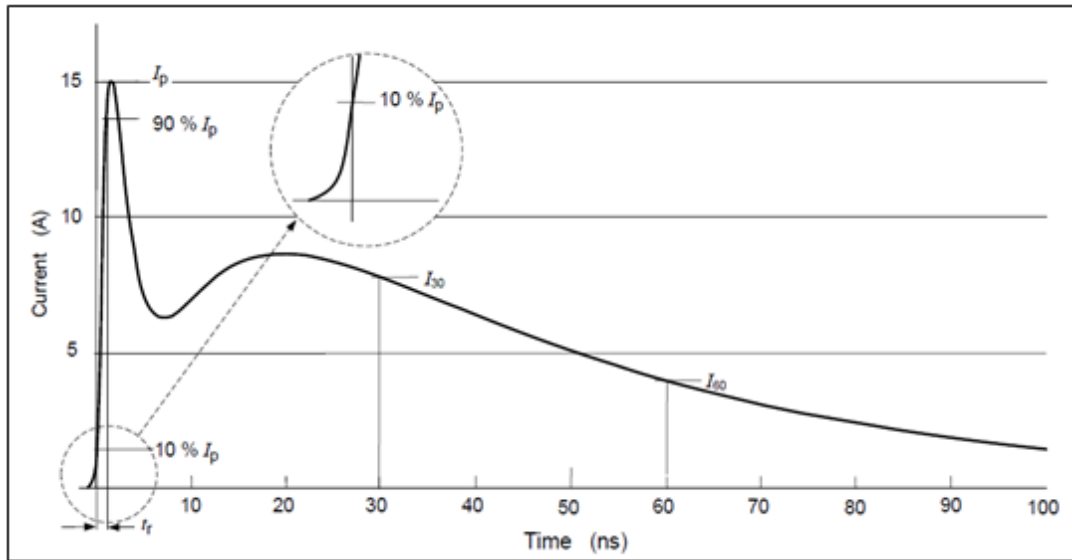
Tabela A.3 - Parâmetros da forma de onda da corrente para Descarga por Contato.

Nível	Tensão Indicada	Primeiro pico da Corrente de Descarga	Tempo de Subida tr ($\pm 25\%$)	Corrente ($\pm 30\%$) a 30 ns	Corrente ($\pm 30\%$) a 60 ns
1	2 kV	7,5 A	0,8 ns	4 A	2 A
2	4 kV	15 A	0,8 ns	8 A	4 A
3	6 kV	22,5 A	0,8 ns	12 A	6 A
4	8 kV	30 A	0,8 ns	16 A	8 A

Fonte: Adaptado de (IEC 2008).

A figura A.1 apresenta uma forma de onda de corrente ideal e os pontos de medição definidos nas Tabelas A.2 e A.3.

Figura A.1 - Forma de Onda de Corrente de Descarga de Contato Ideal a 4 kV.



Fonte: IEC (2008).

APÊNDICE B - Detalhamento de Testes da IEC 61000-4-4

Os níveis de ensaio devem ser selecionados para simular uma situação realista. Os testes de imunidade estão correlacionados com esses níveis, a fim de estabelecer características de desempenho para o ambiente em que o equipamento deverá operar. Com base em práticas comuns de instalação, a seleção de níveis de teste recomendada é a seguinte:

Nível 1: Ambiente bem protegido, com instalação que suprime todos os transientes rápidos nos circuitos de alimentação e de controle; há separação entre linhas de alimentação (AC e DC) e cabos de alimentação blindados.

Nível 2: Ambiente protegido, com instalação com supressão parcial de transientes rápidos nos circuitos de alimentação e de controle; fraca separação dos circuitos industriais com circuitos associados a ambientes de níveis de severidade mais elevados e separação física dos cabos de alimentação.

Nível 3: Ambiente industrial típico, com ausência de supressão de transientes rápidos nos circuitos de alimentação e de controle; má separação dos circuitos industriais de outros circuitos associados a ambientes com níveis de gravidade mais elevados; e fraca separação entre os cabos de alimentação, de controle, de sinal e de comunicação.

Nível 4: Ambiente industrial severo, com ausência de supressão de transientes rápidos nos circuitos de alimentação e de controle; ausência de separação dos circuitos industriais com outros circuitos associados a ambientes de níveis de severidade mais elevados; e ausência de separação entre os cabos de alimentação, de controle, de sinal e de comunicação.

Os níveis de teste são apresentados na Tabelas B.1, sendo aplicados durante 2 minutos com polaridade positiva e 2 minutos com polaridade negativa.

Tabela B.1 - Níveis de Teste para Transientes Rápidos.

Nível	Na Porta de Alimentação		Nas Portas de Entrada/Saída do Sinal	
	Pico de Tensão	Taxa de Repetição	Nível	Pico de Tensão
1	0,5 kV	5 ou 100 kHz	1	0,5 kV
2	1 kV	5 ou 100 kHz	2	1 kV
3	2 kV	5 ou 100 kHz	3	2 kV
4	4 kV	5 ou 100 kHz	4	4 kV

Fonte: Adaptado de (IEC 2004).

O equipamento utilizado para realização dos ensaios deve possuir as seguintes características:

- A faixa de tensão de saída com carga de 1000Ω deve ser de 0,25 kV a 4 kV.
- A faixa de tensão de saída com carga de 50Ω deve ser de 0,125 kV a 2 kV
- O gerador deve ser capaz de funcionar em condições de curto-circuito.

Nas Tabelas B.2 e B.3 são apresentados outros parâmetros do gerador de testes.

Tabela B.2 - Parâmetros do Gerador de Testes.

Características	Carga de 50Ω	Carga de 1000Ω
Polaridade	Positiva e Negativa	Positiva e Negativa
Tipo de Saída	Coaxial	Coaxial
Capacitor de Bloqueio DC	$10 \text{ nF} \pm 20\%$	$10 \text{ nF} \pm 20\%$
Frequência de Repetição	Conforme Tabela D.3	Conforme Tabela D.3
Duração do Transiente	$15 \text{ ms} \pm 20\%$ a 5 kHz $0,75 \text{ ms} \pm 20\%$ a 100 kHz	$15 \text{ ms} \pm 20\%$ a 5 kHz $0,75 \text{ ms} \pm 20\%$ a 100 kHz
Período do Transiente	$30 \text{ ns} \pm 20\%$	$30 \text{ ns} \pm 20\%$
Tempo de Subida do Pulso	$5 \text{ ns} \pm 30\%$	$5 \text{ ns} \pm 30\%$
Duração do Pulso	$50 \text{ ns} \pm 30\%$	50 ns com tolerância de -15 ns a +100 ns
Tensão de Pico do Pulso	Conforme Tabela D.3 $\pm 10\%$	Conforme Tabela D.3 $\pm 20\%$
Impedância da Carga	$50 \Omega \pm 2\%$	$1000 \Omega \pm 2\%$ em paralelo com um capacitor $\leq 6 \text{ pF}$

Fonte: A autora (2017).

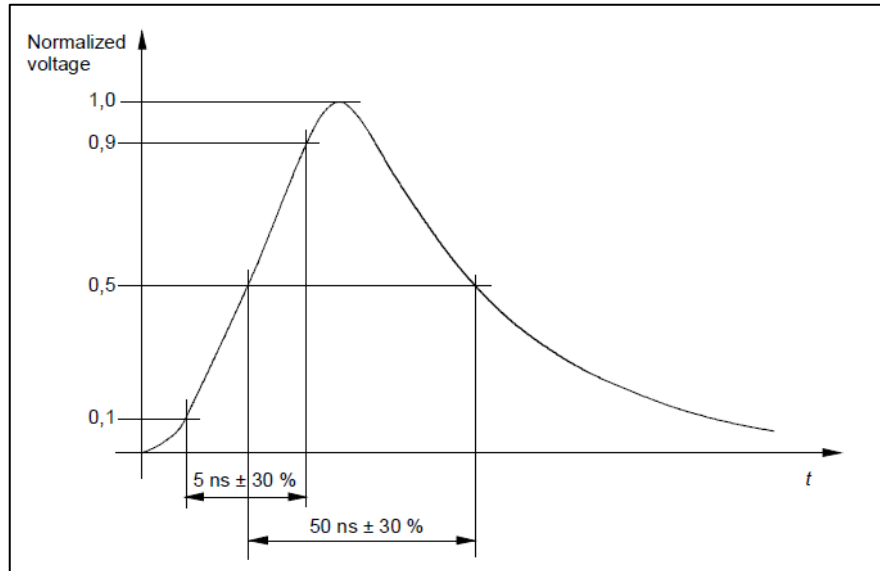
Tabela B.3 - Valores de pico de tensão de saída e taxas de repetição.

Tensão Aplicada	Vp (circuito aberto)	Vp (1000Ω)	Vp (50Ω)	Frequência de Repetição
0,25 kV	0,25 kV	0,24 kV	0,125 kV	5 ou 100 kHz
0,5 kV	0,5 kV	0,48 kV	0,25 kV	5 ou 100 kHz
1 kV	1 kV	0,95 kV	0,5 kV	5 ou 100 kHz
2 kV	2 kV	1,9 kV	1 kV	5 ou 100 kHz
4 kV	4 kV	3,8 kV	2 kV	5 ou 100 kHz

Fonte: Adaptado de (IEC 2004).

A Figura B.1 representa a forma de onda ideal para ser aplicada durante os ensaios.

Figura B.1 - Forma de Onda de um Único Pulso em uma Carga de 50Ω .



Fonte: IEC (2004).

APÊNDICE C - Detalhamento de Testes da IEC 61000-4-5

A seleção dos níveis de ensaio deve basear-se nas condições reais de instalação.

Nível 1: Ambiente elétrico parcialmente protegido. Todos os cabos de entrada são fornecidos com proteção de sobretensão (primário). As unidades do equipamento estão bem interligadas por uma rede de ligação à terra, que não é significativamente influenciada pela instalação de energia elétrica ou relâmpagos. O equipamento eletrônico tem sua fonte de alimentação completamente separada dos outros equipamentos. Operações de comutação podem gerar tensões de interferência dentro da sala. A tensão de sobretensão não pode exceder 500 V.

Nível 2: Ambiente elétrico onde os cabos estão bem separados. A instalação é aterrada através de uma conexão separada ao sistema de aterramento da instalação de energia que pode ser submetida a tensões de interferência geradas pela própria instalação ou por um raio. A alimentação do equipamento eletrônico é separada de outros circuitos, geralmente por um transformador dedicado para a alimentação de rede. Circuitos não protegidos estão presentes na instalação, mas bem separados e em número restrito. As sobretensões não devem exceder 1 kV.

Nível 3: Ambiente elétrico onde os cabos de alimentação e de sinal funcionam em paralelo. A instalação é aterrada com sistema de aterramento comum da instalação de energia que pode ser submetida a tensões de interferência geradas pela própria instalação ou por relâmpagos. A corrente devido a falhas de aterramento, operações de comutação e relâmpagos na instalação de energia, pode gerar tensões de interferência com amplitudes relativamente altas no sistema de aterramento. Equipamentos eletrônicos protegidos e equipamentos elétricos menos sensíveis estão conectados à mesma rede de alimentação. Os cabos de interconexão podem ser parcialmente cabos externos, mas próximos à rede de aterramento. As cargas indutivas não suprimidas estão presentes na instalação e geralmente não há separação dos diferentes cabos de campo. As sobretensões não podem exceder 2 kV.

Nível 4: Ambiente elétrico onde as interligações estão funcionando com cabos externos juntamente com cabos de alimentação. A instalação está ligada ao sistema de aterramento da instalação elétrica que pode estar sujeito a tensões de interferência geradas pela própria instalação ou por um raio. Correntes na faixa kA devido a falhas de aterramento, operações de comutação e relâmpagos na fonte de alimentação, podem gerar tensões de interferência com amplitudes relativamente altas no sistema de aterramento. A rede da fonte de alimentação pode

ser a mesma para o equipamento eletrônico e o outro equipamento elétrico. Os cabos de interconexão são cabos externos, mesmo para o equipamento de alta tensão. A tensão de sobretensão não pode exceder 4 kV.

Nível 5: Ambiente elétrico para equipamentos eletrônicos ligados a cabos de telecomunicações e linhas elétricas aéreas numa área não densamente povoada. Todos estes cabos e linhas são fornecidos com proteção de sobretensão (primária). Fora do equipamento eletrônico não há um sistema de aterramento generalizado. As tensões de interferência devidas a falta de aterramento (correntes até 10 kA) e relâmpagos (correntes até 100 kA) podem ser extremamente elevadas. Os requisitos de teste desta classe são abrangidos pelo nível de ensaio 4.

Os ensaios são realizados conforme dados apresentados na Tabela C.1. Devem ser aplicados à onda de tensão de corrente alternada, 5 impulsos positivos quando o ângulo de fase corresponde a 90° e cinco impulsos negativos quando o ângulo de fase corresponde a 270 °.

Tabela C.1 - Níveis de Teste para Sobretensão.

Nível	Tensão de teste do circuito aberto
1	0,5 kV
2	1 kV
3	2 kV
4	4 kV

Fonte: Adaptado de IEC (2005).

São especificados dois tipos de geradores de ondas para realização dos ensaios. Cada um tem suas aplicações específicas. O gerador de ondas combinadas de 10/700 μ s é usado para testar portas destinadas a conexão a linhas de comunicação simétricas. O gerador de ondas de combinação de 1,2/50 μ s é utilizado em todos os outros casos e, em particular, para testar portas destinadas a linhas elétricas e ligações de sinais de curta distância.

Por convenção, a razão entre a tensão de saída de pico de circuito aberto e a corrente de curto-circuito de pico de um gerador de onda, pode ser considerada a impedância de saída efetiva. As principais características do gerador utilizado para realização dos ensaios são apresentadas na Tabela C.2.

Tabela C.2 - Características do Gerador para Testes.

Polaridade	Positiva e Negativa
Deslocamento de Fase	Entre 0 ° a 360 ° em relação ao ângulo de fase da tensão de linha AC para o equipamento em teste, com uma tolerância de $\pm 10^\circ$
Taxa de Repetição	1 por minuto ou mais rápido
Tensão de Saída de Pico para circuito aberto	Ajustável de 0,5 kV para o nível de teste necessário
Forma de onda da tensão de sobretensão	Conforme Tabela C.3 e Figura C.1
Tolerância de ajuste da tensão de saída	Conforme Tabela C.4
Corrente de saída de pico de curto-circuito	Depende da Tensão de Pico, conforme Tabelas C.3 e C.4
Forma de onda da corrente de sobretensão	Conforme Tabela C.3 e Figura C.2
Tolerância de corrente de saída de curto-circuito	Conforme Tabela C.4
Impedância de saída efetiva	$2 \Omega \pm 10\%$

Fonte: Adaptado de IEC (2005).

A Tabela C.3 apresenta as definições para a forma de onda na saída do gerador com parâmetros de 1,2/50 μs a 8/20 μs .

Tabela C.3 - Definições da Forma de Onda.

Definições	Tempo de Frente (μs)	Tempo para metade do valor (μs)	Tempo de subida (10% - 90%) (μs)	Tempo de Duração (μs)
Tensão de Circuito Aberto	$1,2 \pm 30\%$	$50 \pm 20\%$	$1 \pm 30\%$	$50 \pm 20\%$
Corrente de Curto-circuito	$8 \pm 20\%$	$20 \pm 20\%$	$6,4 \pm 20\%$	$16 \pm 20\%$

Fonte: Adaptado de IEC (2005).

A Tabela C.4 ilustra a relação entre o pico de tensão de circuito aberto e a corrente de pico de curto-circuito.

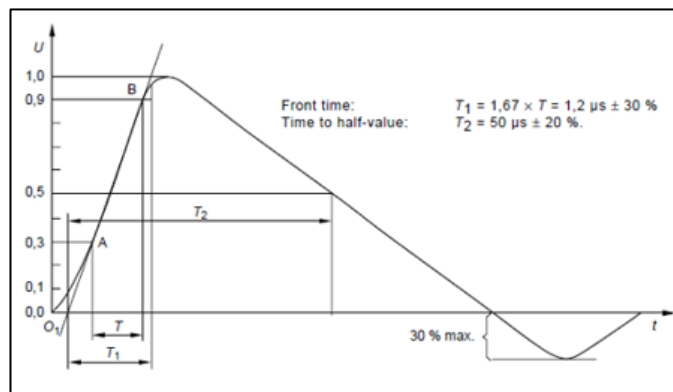
Tabela C.4 - Relação entre Tensão de Circuito Aberto e Corrente de Curto-circuito.

Tensão Pico de Circuito Aberto \pm 10%	Corrente Pico de Curto-circuito \pm 10%
0,5 kV	0,25 kA
1 kV	0,5 kA
2 kV	1 kA
4 kV	2 kA

Fonte: Adaptado de IEC (2005).

Na Figura C.1 é possível verificar a forma de onda de tensão de circuito aberto (1,2/50 μ s) na saída do gerador sem rede de acoplamento/desacoplamento.

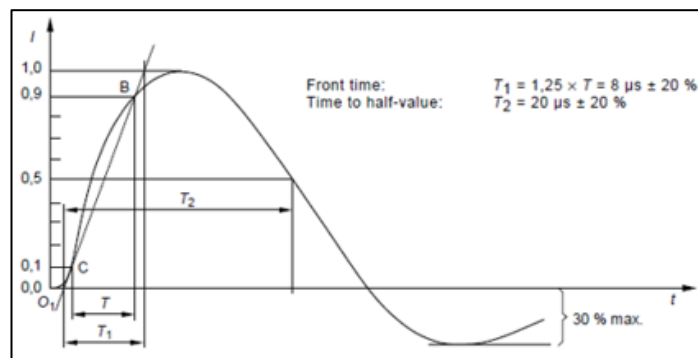
Figura C.1 - Forma de Onda da Tensão de Circuito Aberto.



Fonte: IEC (2005).

A Figura C.2 apresenta a forma de onda da corrente de curto-circuito (8/20 μ s) na saída do gerador sem rede de acoplamento/desacoplamento.

Figura C.2 - Forma de Onda da Corrente de Curto-circuito.



Fonte: IEC (2005).

APÊNDICE D - Detalhamento de Testes da IEC 61000-4-6

Os níveis de teste devem ser selecionados de acordo com o ambiente de radiação eletromagnética a que os equipamentos estão expostos no local da instalação.

Nível 1 - Ambiente com baixa radiação eletromagnética, onde os níveis típicos com rádio/televisão estão localizados a uma distância superior a um quilômetro, e níveis de transceptores de fraca potência.

Nível 2 - Moderado ambiente de radiação eletromagnética, onde transceptores portáteis são utilizados, porém com restrições de uso se estiverem muito próximos ao equipamento. Um típico ambiente comercial.

Nível 3 - Ambiente radiação eletromagnética grave, onde transceptores portáteis são utilizados relativamente próximos ao equipamento, porém não a distâncias inferiores a um metro. Um típico ambiente industrial.

Os níveis de ensaio são aplicados conforme indicado na Tabela D.1, com uma faixa de frequência variando de 150 kHz a 80 MHz.

Tabela D.1 - Níveis de Teste para Correntes Injetadas.

Nível	Nível de Tensão (V)	Nível de Tensão (dB)
1	1	120
2	3	129,5
3	10	140

Fonte: Adaptado de IEC (2014).

O gerador de testes inclui todos os equipamentos e componentes utilizados para proporcionar o sinal de perturbação com o nível exigido em cada rede de acoplamento na porta de entrada com ponto de injeção apropriado. Um conjunto típico compreende os seguintes elementos: geradores de sinais de rádio frequência, atenuadores, comutador de rádio frequência, amplificadores de potência de banda larga e filtros passa baixa.

As principais características do gerador de ensaios são apresentadas na Tabela D.2.

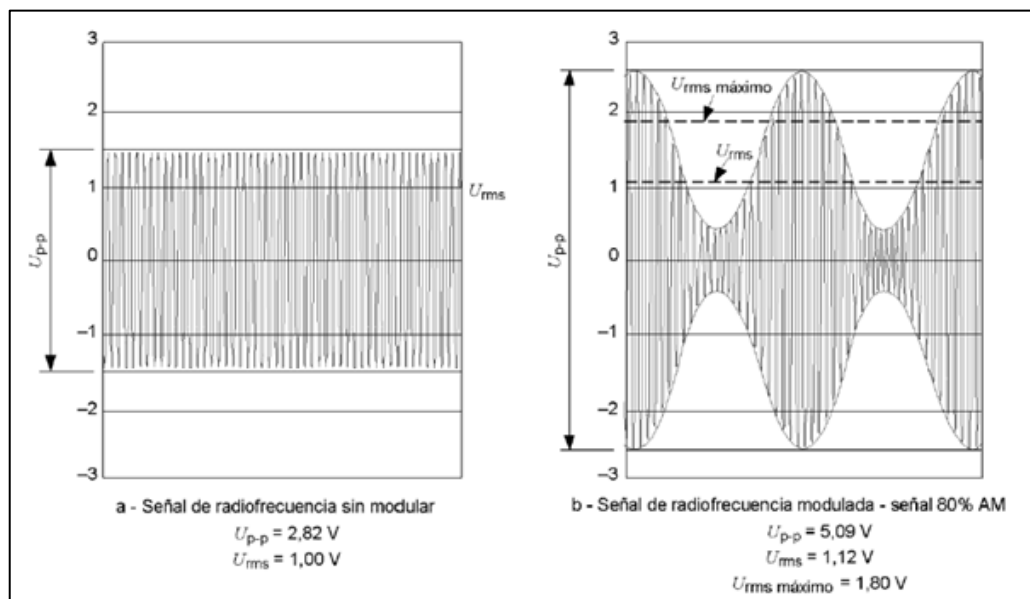
Tabela D.2 - Características do Gerador de Ensaios.

Impedância de Saída	50 Ω
Harmônicas e Distorções	Entre 150 kHz e 80 MHz, qualquer linha espectral parasitária deve ser no mínimo 15 dB inferior ao nível da portadora.
Modulação de Amplitude	Interna ou Externa
Nível de Saída	Suficientemente alto para cobrir o nível de teste.

Fonte: Adaptado de (IEC 2014).

Na figura D.1 é possível verificar as formas de onda obtidas através do gerador de ensaios para testes em Nível 1, a primeira imagem ilustra o sinal de rádio frequência sem modulação, enquanto a segunda apresenta o mesmo sinal com modulação de 80%.

Figura D.1 - Formas de Onda para Ensaios em Nível 1.



Fonte: IEC (2014).

APÊNDICE E - Detalhamento de Testes da IEC 61000-4-11

Os níveis de teste devem ser selecionados de acordo com as características do ambiente no qual os equipamentos estão instalados.

Nível 1: Aplica-se a equipamentos muito sensíveis a perturbações na rede de alimentação de energia elétrica, por exemplo: instrumentação de laboratórios tecnológicos e alguns equipamentos de automação e proteção.

Nível 2: Aplica-se aos pontos de acoplamento comum e de emparelhamento em ambientes industriais. A compatibilidade nesta classe é idêntica à das redes públicas, portanto componentes concebidos para aplicação em redes públicas podem ser utilizados nesta classe de ambiente industrial.

Nível 3: Aplica-se exclusivamente a ambientes industriais. A compatibilidade nesta classe é superior em relação ao nível 2 para fenômenos como: cargas alimentadas com conversores; presença de máquinas de solda, inicialização frequente de motores e variações rápidas de cargas.

Os níveis de ensaios para quedas de tensão são apresentados na Tabela E.1.

Tabela E.1 - Níveis de Ensaios para Quedas de Tensão.

Nível	Duração da Interrupção (para 50 Hz e 60 Hz)				
1	Casos individuais de acordo com o equipamento a ser testado.				
2	0% durante 1 ciclo	0% durante 1 ciclo	70% durante 25 ciclos para 50 Hz e 70% durante 30 ciclos para 60 Hz		
3	0 % durante meio ciclo	0% durante 1 ciclo	40% durante 10 ciclos para 50 Hz 40% durante 12 ciclos para 60 Hz	70% durante 25 ciclos para 50 Hz 70% durante 30 ciclos para 60 Hz	80% durante 250 ciclos para 50 Hz 80% durante 300 ciclos para 60 Hz

Fonte: Adaptado de (IEC 2004).

Para testes de interrupções são utilizados os níveis de ensaio contidos na Tabela E.2.

Tabela E.2 - Níveis de Ensaio para Interrupções.

Nível	Duração da Interrupção (para 50 Hz e 60 Hz)
1	Casos individuais de acordo com o equipamento a ser testado.
2	0% durante 250 ciclos para 50 Hz e 0% durante 300 ciclos para 60 Hz.
3	0% durante 250 ciclos para 50 Hz e 0% durante 300 ciclos para 60 Hz.

Fonte: Adaptado de (IEC 2004).

A Tabela E.3 apresenta os níveis para ensaios de variações de tensão.

Tabela E.3 - Níveis de Ensaio para Variações de Tensão.

Nível da Tensão de Teste	70%
Tempo para Diminuição da Tensão (td)	Abrupto
Tempo em Tensão Reduzida (ts)	1 ciclo
Tempo para Aumento da Tensão (ti)	25 ciclos para 50 Hz 30 ciclos para 60 Hz

Fonte: Adaptado de (IEC 2004).

O equipamento utilizado para realização dos ensaios deve possuir as características contidas na Tabela E.4.

Tabela E.4 - Características do Gerador de Testes.

(continua)

Tensão de Saída sem Carga	Conforme Tabela E.1 \pm 5% da Tensão Residual
Mudança de tensão com carga na saída do gerador: 100% de saída: de 0 A a 16 A 80% de saída: de 0 A a 20 A 70% de saída: de 0 A a 23 A 40% de saída: de 0 A a 40 A	Menos que 5% da Tensão Máxima Menos que 5% da Tensão Máxima Menos que 5% da Tensão Máxima Menos que 5% da Tensão Máxima
Capacidade da Corrente de Saída	16 A RMS por fase da tensão nominal. O gerador deve ser capaz de transportar 20 A a 80% do valor nominal durante uma duração de 5 s. Deve ser capaz de transportar 23 A a 70% da tensão nominal e 40 A a 40% da tensão nominal durante uma duração de 3 s

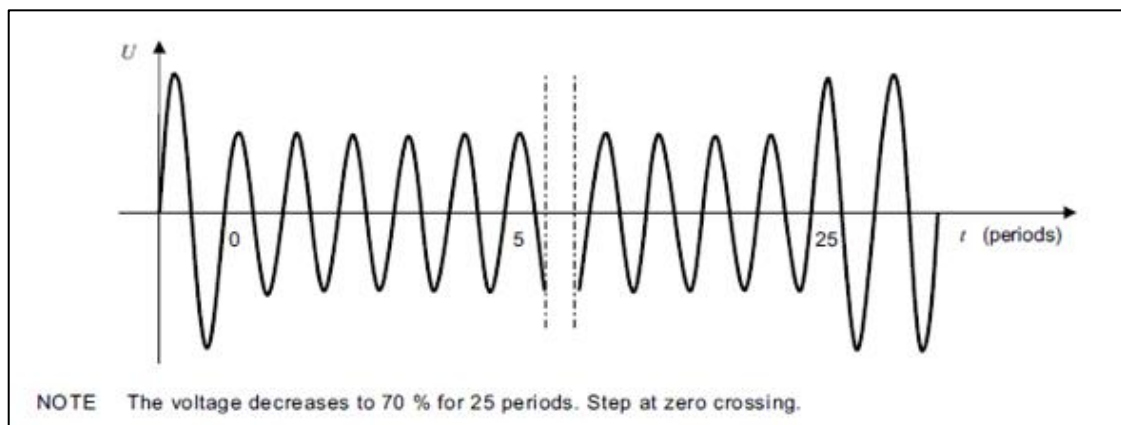
(conclusão)

Capacidade máxima de corrente de entrada	Não é limitado pelo gerador. No entanto, a capacidade máxima de pico do gerador não deve exceder 1000 A para faixa de 250 V a 600 V, 500 A para faixa de 200 V a 240 V, ou 250 A para faixa de 100 V a 120 V.
Pico instantâneo de sobrecarga/subtensão do valor de tensão real, com gerador carregado com 100 Ω.	Menos que 5% da Tensão Máxima
Tempo de subida e queda de tensão durante mudança abrupta, com gerador carregado com 100 Ω.	Entre 1 μ s e 5 μ s
Deslocamento de Fase	De 0° a 360°
Relação entre fase de queda de tensão e interrupções com a potência da frequência	Menor que $\pm 10^\circ$
Controle de passagem de zero dos geradores	$\pm 10^\circ$

Fonte: Adaptado de (IEC 2004).

A Figura E.1 ilustra a forma de onda na saída do gerador para uma aplicação de teste de nível 2, com queda de tensão de 70% em um sinal senoidal.

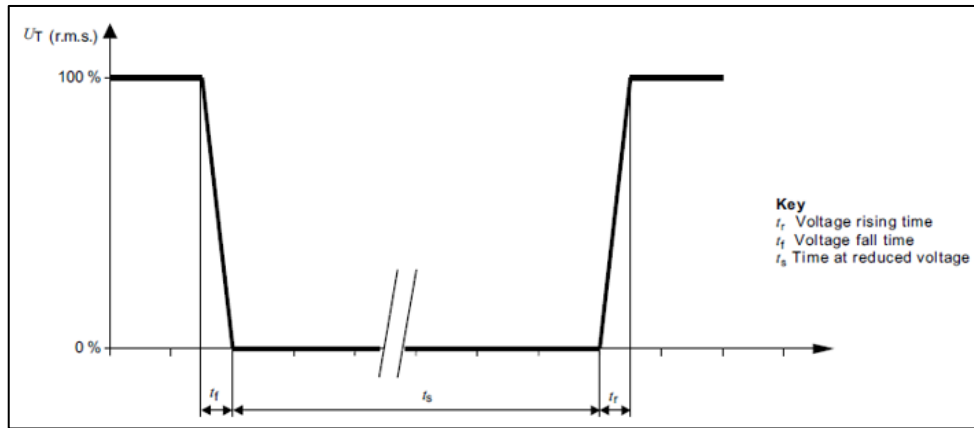
Figura E.1 - Forma de Onda de Queda de Tensão.



Fonte: IEC (2004).

A Figura E.2 apresenta a forma de onda na saída do gerador para uma interrupção.

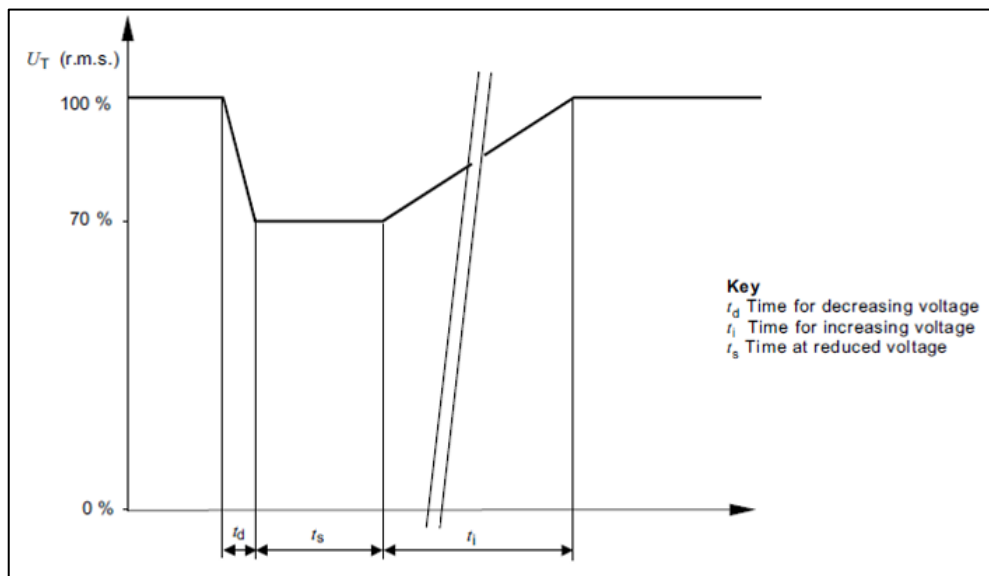
Figura E.2 - Forma de Onda de uma Interrupção.



Fonte: IEC (2004).

A Figura E.3 apresenta a forma de onda na saída do gerador para variação de tensão.

Figura E.3 - Forma de Onda da Variação de Tensão.



Fonte: IEC (2004).

