

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**LEANDRO PRYTULA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPATIBILIDADE  
ELETROMAGNÉTICA DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS  
NAS ATIVIDADES DE ELEVAÇÃO DE PESSOAS**

Porto Alegre

2020

**LEANDRO PRYTULA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPATIBILIDADE  
ELETROMAGNÉTICA DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS  
NAS ATIVIDADES DE ELEVAÇÃO DE PESSOAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Computação.

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Álvaro Augusto  
Almeida de Salles

Porto Alegre

2020

LEANDRO PRYTULA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE COMPATIBILIDADE  
ELETROMAGNÉTICA DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS  
NAS ATIVIDADES DE ELEVAÇÃO DE PESSOAS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles, UFRGS

Doutor pela London University - Londres, Inglaterra

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adroaldo Raizer, UFSC

Doutor pela Institut National Polytechnique Grenoble – Grenoble, França

Prof. Dr. Gilson Ignácio Wirth, UFRGS

Doutor pela Universitaet Dortmund - Dortmund, Alemanha

Prof. Dr. Raphael Martins Brum, UFRGS

Doutor pela Université Montpellier 2 - Montpellier, França

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sérgio Luis Haffner

Porto Alegre, agosto de 2020.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização do trabalho.

Ao Professor Álvaro Augusto Almeida de Salles pela orientação no desenvolvimento desta pesquisa.

A minha esposa Suselen, pelo incentivo e apoio durante este período de estudo.

## RESUMO

Inspeção e manutenção em linhas de transmissão e distribuição de alta tensão de energia elétrica precisam ser realizadas sem interrupção no fornecimento de energia e para realizá-las há necessidade de máquinas para transporte de material e elevação de pessoas. Este equipamento de elevação deve ser isolado do solo para manter a segurança do trabalhador durante sua atividade e, neste contexto, é apresentado como solução a utilização de um guindaste veicular com um cesto acoplado para execução da tarefa, adequado à norma de segurança vigente no país. Para adequação à esta norma e garantia de segurança do operador são propostos neste trabalho o desenvolvimento de uma lança isolada para acoplamento do cesto, uma central eletrônica para nivelamento do cesto, um controle remoto operando por radiofrequência e um receptor para o controle remoto no equipamento de guindar. O desenvolvimento dos equipamentos eletrônicos foi realizado com propósito de certificá-los quanto a compatibilidade eletromagnética sob normativas nacionais e internacionais, sendo abordados no desenvolvimento a escolha dos componentes eletrônicos, técnicas construtivas das placas eletrônicas e dos encapsulamentos e técnicas de desenvolvimento de *firmware*. Para validação dos resultados foram realizados ensaios em laboratórios especializados em ensaios de compatibilidade eletromagnética e de ensaio de isolamento, e posteriormente os equipamentos foram submetidos a situações reais de uso.

**Palavras-chave: Alta Tensão. Compatibilidade Eletromagnética. Radiofrequência.**

## **ABSTRACT**

Maintenance and inspection on distribution and transmission lines should be done without interrupt the energy service. In order to carry out these maintenance it's necessary to use equipment in order to transport the material and to lift the worker. This lifting equipment must be isolated from the ground to maintain the safety of the worker during his activity and is presented as a solution the use of a vehicular crane with a coupled basket to perform the task, suitable to the current safety standard in the country. In order to comply with this standard and guarantee the operator's safety, this work proposes the development of an isolated boom for coupling the basket, an electronic equipment for leveling the basket, a remote control operating by radio frequency and a receiver for the remote control in the crane. The development of electronic equipment was carried out with the purpose of certifying them as to electromagnetic compatibility under national and international regulations, being applied in the development the choice of electronic components, constructive techniques of electronic boards and encapsulations and firmware development techniques. To validate the results, tests were performed in laboratories specialized in electromagnetic compatibility tests and insulation tests, and subsequently the equipment was subjected to real situations of use.

**Keywords: High Voltage. Electromagnetic Compatibility. Radio frequency.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Guindaste veicular com cesto acoplado.....	13
Figura 2 - Partes principais do guindaste veicular.....	14
Figura 3- Central de nivelamento. ....	16
Figura 4- Receptor do controle e Controle Remoto. ....	17
Figura 5 - Sistema para ocorrência de EMI.....	23
Figura 6 - EMI conduzida.....	24
Figura 7 - EMI radiada. ....	25
Figura 8 - Emissões e Susceptibilidade Eletromagnéticas. ....	25
Figura 9 - Limites gerais de emissão a 3m. ....	30
Figura 10 - Configuração para teste de ESD. ....	31
Figura 11 - Exemplo de instalação de teste. ....	34
Figura 12 - Forma de onda na saída do gerador de RF.....	35
Figura 13 - Ensaio NBR IEC 61000-4-6 com rede de acoplamento/desacoplamento. ....	36
Figura 14 - Configuração para ensaio de isolamento categoria C. ....	39
Figura 15 - (a) Circuito equivalente resistor com diagrama de Bode. (b) Circuito equivalente capacitor com diagrama de Bode. (c) Circuito equivalente indutor com diagrama de Bode.....	41
Figura 16 - Diodo Shottky na supressão de ruídos de bobina e na proteção de ponte "H" .....	42
Figura 17 - Aplicação de fusível resetável e supressores de ruído na alimentação, em ponte "H" e em barramento de comunicação. ....	43
Figura 18 - Optoacoplador para acionamento de cargas. ....	44
Figura 19 - Segmentação. ....	45
Figura 20 - Single-point Grounding. ....	46
Figura 21 - Placas do controle remoto.....	47
Figura 22 - Placa da Central de nivelamento.....	47
Figura 23 - Placas do Receptor do controle.....	48
Figura 24- Watchdog timer atualizado em rotina de interrupção.....	50
Figura 25 - Comparação de sinais de acionamento de chaves e de EMI. ....	51
Figura 26 - Sistema realimentado de posicionamento do nivelador do cesto. ....	52
Figura 27- Pacote de dados com endereço e CRC.....	53
Figura 28 - Célula GTEM.....	56
Figura 29 - Pontos de aplicação da Central de nivelamento.....	56
Figura 30 - Cabos da Central de nivelamento. ....	59
Figura 31 - Pontos de aplicação do Controle remoto .....	60
Figura 32 - Pontos de aplicação do Receptor do controle. ....	63
Figura 33 - Cabos do Receptor do controle.....	65
Figura 34 - Ensaio de Fator de Segurança Lança. ....	68
Figura 35 - Ensaio de Isolação da Lança.....	69
Figura 36 - Comando eletrônico.....	70
Figura 37 - Bomba de emergência.....	71

Figura 38 - Receptor do controle.....	71
Figura 39 - Sensores de pressão e ângulo.....	72
Figura 40 - Sensores indutivos .....	72
Figura 41 - Coluna Luminosa.....	73
Figura 42 - Caixa de emergência.....	73
Figura 43 - Adaptação para acoplamento da lança.....	74
Figura 44 - Central de nivelamento.....	74
Figura 45 - Teste do sistema sem operador na caçamba.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distâncias de segurança para manutenção. ....	15
Tabela 2 - Limites Gerais de emissão. ....	29
Tabela 3 - Níveis de teste de equipamentos. ....	32
Tabela 4 - Níveis de ensaio relacionado a telefones de rádio digitais e outros dispositivos emissores de RF de uso geral. ....	33
Tabela 5 - Níveis ensaio NBR IEC 61000-4-6. ....	37
Tabela 6 - Valores de ensaio de projeto para equipamentos Categoria C. ....	38
Tabela 7 – Resultado do teste de descarga eletrostática na Central de nivelamento. ....	57
Tabela 8 - Resultado do teste de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados na Central de nivelamento. ....	58
Tabela 9 - Resultado do Ensaio de Imunidade à perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência na Central de nivelamento. ....	59
Tabela 10 - Resultado das medições do ensaio Anatel. ....	60
Tabela 11 - Resultado do teste de descarga eletrostática no Controle remoto. ....	61
Tabela 12 - Resultado do teste de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados no Controle remoto. ....	62
Tabela 13 – Resultado do teste de descarga eletrostática no Receptor do controle. ....	64
Tabela 14 - Resultado do Ensaio de Imunidade à perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência no Receptor do Controle. ....	66
Tabela 15 - Resultado do teste de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados no Receptor do controle. ....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

CCITT - *Comité Consultatif Internationale de Telegraphie et Telephonie*

CISPR - *Comite International Special des Perturbations Radioeetriques*

CRC - *Cyclic Redundancy Check*

EIRP - Potência Equivalente Isotropicamente Radiada (*Effective Isotropic Radiated Power*)

EMC – Compatibilidade Eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility*)

EMI – Interferência Eletromagnética (*Electromagnetic Interference*)

ESD – Descarga Eletroestática (*Electrostatic Discharge*)

FCC - *Federal Communications Comission*

GTEM - Gigahertz Transverso Eletromagnético

IEC - *Internacional Electrotechnical Commission*

SMD - *Surface Mount Device*

THD - *Through-Hole Device*

TVS – Diodo supressor de Transientes (*Transient voltage supressor diode*)

VDR – Resistor Dependente de Tensão (*Voltage Dependent Resistor*)

## SUMÁRIO

<b>1 APRESENTAÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3 REQUERIMENTOS DO SISTEMA</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3.1 Caçamba</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3.2 Equipamentos eletrônicos no equipamento de guindar</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3.3 Precauções necessárias</b> .....	<b>18</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.1 Aspectos gerais e conceito</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.1 Caminho de Propagação</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.1.1 Propagação conduzida</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.1.2 Propagação radiada</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2.2.1 Federal Communications Commission (FCC)</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.2.2 Internacional Electrotechnical Commission (IEC) e Comite International Special des Perturbations Radioeetriques (CISPR)</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.2.3 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA)</b> ..	<b>27</b>
<b>2.2.3.1 Resolução nº 680 e Ato 14448 da Anatel</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.3.2 NBR IEC 61000-4-2:2013 – Compatibilidade eletromagnética – Ensaio e técnicas de medição - Ensaio de imunidade a descarga eletrostática (ABNT, 2013)</b> .....	<b>30</b>
<b>2.2.3.3 NBR IEC 61000-4-3:2014 – Compatibilidade eletromagnética – Ensaio e técnicas de medição - Ensaio de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência irradiados (ABNT, 2014)</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.3.4 NBR IEC 61000-4-6:2019 – Compatibilidade eletromagnética (EMC) – Técnicas de medição e ensaio – Imunidade a perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência (ABNT, 2019)</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2.3.5 NBR 16092:2018 – Cestas aéreas – especificações e ensaios (ABNT, 2018)</b> .....	<b>37</b>
<b>3 DESENVOLVIMENTO DOS EQUIPAMENTOS</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1.1 Placas de circuito impresso</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1.2 Outros componentes dos equipamentos</b> .....	<b>49</b>
<b>3.1.3 Firmware</b> .....	<b>49</b>
<b>4 RESULTADOS DOS ENSAIOS</b> .....	<b>55</b>
<b>4.1.1 Central de nivelamento</b> .....	<b>56</b>
<b>4.1.2 Controle Remoto</b> .....	<b>59</b>
<b>4.1.3 Receptor do controle</b> .....	<b>62</b>
<b>4.2.1 Ensaio de Fator de Segurança conforme NBR 16092:2018</b> .....	<b>67</b>
<b>4.2.2 Ensaio de Isolação Categoria C conforme NBR 16092:2018</b> .....	<b>68</b>
<b>5 TESTES EM CAMPO</b> .....	<b>70</b>
<b>5.1.1 Substituição de comandos hidráulicos e instalação de bomba de emergência</b> .....	<b>70</b>
<b>5.1.2 Instalação do Receptor do controle</b> .....	<b>71</b>
<b>5.1.3 Instalação de sensores</b> .....	<b>72</b>

<b>5.1.4 Instalação de sinalizadores .....</b>	<b>73</b>
<b>5.1.5 Caixa de emergência.....</b>	<b>73</b>
<b>5.1.6 Instalação da Lança isolada.....</b>	<b>74</b>
<b>5.1.7 Central de nivelamento .....</b>	<b>74</b>
<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>76</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>

## **1 APRESENTAÇÃO**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

A utilização de equipamentos eletrônicos para construção de máquinas têm sido uma necessidade constante no cotidiano, quer seja para acréscimo de funções, para diminuição de custos ou melhorias em operações existentes. No entanto, para correta operação, diminuição de necessidade de peças de reposição e segurança na utilização em máquinas é necessário que os mesmos sejam testados e certificados para que não causem interferências em equipamentos próximos a ele e que não tenham seu funcionamento afetado por outros equipamentos eletrônicos ou pelo ambiente no qual está instalado ou operando. Sob esta principal condição este trabalho é apresentado, de forma que serão analisados todos os desenvolvimentos e testes de equipamentos eletrônicos utilizados na operação de um equipamento de guindar com um cesto acoplado para elevar pessoas, em conformidade com as normas vigentes de segurança referentes a esta máquina, operando próximo a redes elétricas energizadas, as quais são geradoras de campos eletromagnéticos que podem interagir com os mesmos.

### **1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO**

A necessidade de utilização de energia elétrica tanto em ambientes industriais com residenciais tem aumentado constantemente no Brasil. Com essa grande demanda por eletricidade é necessário que as linhas de transmissão e de distribuição operem corretamente em sua plenitude e estejam o mínimo tempo possível desligadas, sendo esta questão importante tanto para que os consumidores não fiquem sem energia como para as companhias de distribuição e transmissão que são avaliadas neste quesito por indicadores de duração e frequência de interrupção pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL,2016).

Estas linhas de distribuição e transmissão estão localizadas não só em ambientes urbanos, mas também em locais rurais, em matas, locais de difícil acesso. Logo, para realizar a manutenção, é necessário a utilização de um equipamento que seja capaz de acessar tais locais, que comporte a equipe de trabalho e materiais de trabalho, e, como as linhas são instaladas sobre estruturas com até 30m de altura (ANEEL,2010), é necessário que seja capaz de elevar os materiais e eletricitas até a altura desejada. Neste contexto, a melhor opção é a utilização de guindastes veiculares com cesto acoplado, conforme mostra a Figura 1.

**Figura 1 - Guindaste veicular com cesto acoplado.**



Fonte: própria.

Na Figura 2 é mostrado um guindaste veicular com suas principais partes de composição destacados, a saber:

- a. Comando principal – movimenta os cilindros do equipamento de guindar, como cilindro de giro, cilindro de elevação, cilindro de inclinação e cilindros de lança;
- b. Comando de estabilizadores (patolas) – movimenta os cilindros de estabilização do guindaste;

Em consonância ao fato da utilização de guindastes veiculares para elevar pessoas, desde 2011, está em vigor no Brasil o Anexo XII da Norma Regulamentadora NR12 (BRASIL, 2016), o qual trata da elevação de pessoas por equipamentos de guindar. Por esta norma, aspectos construtivos e operacionais do equipamento de guindar devem ser respeitados, sendo que destacam-se os pontos:

- a. A caçamba (cesto onde o operador entra para ser elevado) deve ter isolamento para garantir a segurança do operador;
- b. Inclinômetro com indicação de inclinação próximo aos comandos de estabilizadores;
- c. Limitador de carga eletrônico, com indicador luminoso e sonoro;
- d. Intertravamento entre os comandos principal (movimentação do equipamento de guindar no “solo”), da caçamba e dos estabilizadores;
- e. Monitoramento da posição do guindaste para movimentação de estabilizadores;
- f. A caçamba deve possuir sistema de nivelamento ativo e independente da gravidade;
- g. O operador na caçamba deve realizar os movimentos no equipamento de guindar.

Figura 2 - Partes principais do guindaste veicular.



Fonte: própria.

Para análise de cenário, algumas outras características importantes referentes aos níveis de tensão e métodos de trabalho são definidas. Os níveis de tensão das linhas de distribuição, conforme (ANEEL,2015), são classificados em:

- a. Baixa Tensão – tensões inferiores a 1kV;
- b. Média Tensão – tensões entre 1kV e 69kV;
- c. Alta Tensão – tensões entre 69kV e 238 kV.

Os métodos de trabalho do electricista para realizar a manutenção na rede energizada são classificados em três grupos (SOBRINHO, 2011):

- a. Método ao contato – o trabalhador tem contato com a rede energizada por equipamentos de proteção individual. Limitado a manutenções em até 34,5kV;
- b. Método à distância – o electricista utiliza ferramentas montadas em bastões fabricados com materiais isolantes para realizar o serviço à distância, ficando separado das partes

energizadas por estas ferramentas, observando as distâncias de segurança, conforme Tabela 1;

- c. Método ao potencial – o eletricista tem contato direto com o condutor energizado, com tensões até 800kV, utilizando uma vestimenta condutiva composta por roupa, capuz, luvas e botas, a qual é conectada a este condutor. Esta vestimenta funciona como uma Gaiola de Faraday e a pessoa em seu interior encontra-se protegida dos efeitos do campo elétrico.

**Tabela 1 - Distâncias de segurança para manutenção.**

Faixa de tensão nominal da instalação elétrica em kV	Distância de segurança em metros
<1	0,20
≥1 e <3	0,22
≥3 e <6	0,25
≥6 e <10	0,35
≥10 e <15	0,38
≥15 e <20	0,40
≥20 e <30	0,56
≥30 e <36	0,58
≥36 e <45	0,63
≥45 e <60	0,83
≥60 e <70	0,90
≥70 e <110	1,00
≥110 e <132	1,10
≥132 e <150	1,20
≥150 e <220	1,60
≥220 e <275	1,80

Fonte: Sobrinho, 2011.

Estas informações serão utilizadas para estabelecer os requerimentos necessários para o desenvolvimento do sistema para operação em linhas energizadas.

### 1.3 REQUERIMENTOS DO SISTEMA

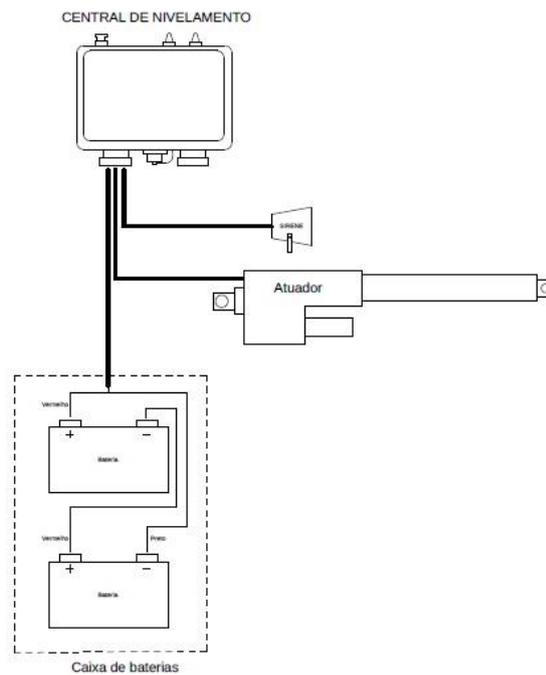
Com os dados mostrados no capítulo 1.2, podem ser estabelecidos os requerimentos para o desenvolvimento do sistema.

### 1.3.1 Caçamba

Para direta isolação da caçamba em relação a lança do guindaste foi proposta a utilização de uma lança de fibra preenchida com poliuretano, com comprimento de 2,8m, de forma a deixar a ponta da lança do equipamento de guindar afastada a uma distância maior que as distâncias de segurança indicadas na Tabela 1.

Para o nivelamento automático da caçamba foi proposta a utilização de um equipamento eletrônico com monitoramento de inclinação que acione um cilindro elétrico para realizar a correção da inclinação. A Figura 3 mostra a configuração proposta para a caçamba. Para que o operador tenha comando sobre o equipamento de guindar foi proposta a utilização de um controle remoto, alimentado também por baterias, com joysticks proporcionais para controle dos movimentos.

**Figura 3- Central de nivelamento.**



Fonte: própria.

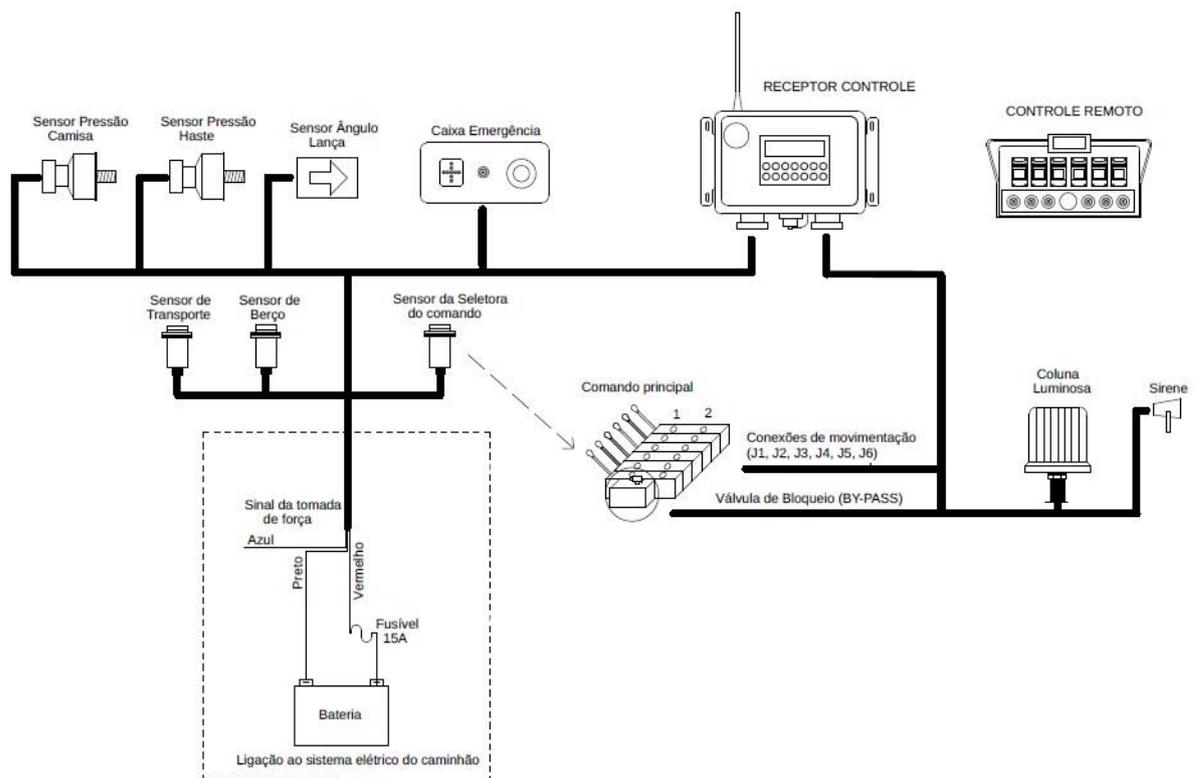
Estes equipamentos estarão localizados a distâncias menores ou ligeiramente maiores que as distâncias de segurança indicadas na Tabela 1.

Os equipamentos eletrônicos, por serem alimentados por baterias, não necessitariam de conexões elétricas ou hidráulicas ao guindaste, mantendo assim a correta isolação da caçamba, sendo consideradas então como a solução mais viável para implementação.

### 1.3.2 Equipamentos eletrônicos no equipamento de guindar

Para monitorar a inclinação, limitar a carga, realizar o intertravamento entre os comandos principal, de movimentação na caçamba e de estabilizadores, monitorar a posição da lança e receber os sinais do controle remoto, exigências do Anexo XII da NR12, foi proposta a montagem de uma única central eletrônica. Esta central eletrônica possui conexões a sensores de pressão para verificação de carga, sensores de ângulo e indutivos para monitoramento de posição do guindaste e da lança, sensor de inclinação interno à central eletrônica para verificar a inclinação do veículo, conexões ao comando hidráulico para movimentar a máquina, e teclas de interface para o operador realizar a seleção dos comandos de movimentação. A Figura 4 mostra a configuração do sistema proposto.

**Figura 4- Receptor do controle e Controle Remoto.**



Fonte: própria.

### 1.3.3 Precauções necessárias

Como os equipamentos eletrônicos serão operados próximos a fontes de campos eletromagnéticos provenientes de linhas de tensão elevada e alguns terão radiofrequência em sua operação é necessário que os mesmos sejam avaliados quanto a sua compatibilidade eletromagnética (EMC). No decorrer do trabalho serão apresentadas as normas utilizadas para teste nos equipamentos eletrônicos.

## 1.4 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho a serem alcançados no trabalho são:

- a. Desenvolvimento de um nivelador eletrônico para caçambas de elevação de pessoas com vista a EMC. Este equipamento no decorrer do trabalho será denominado central de nivelamento;
- b. Desenvolvimento de um controle remoto para operação de equipamento de guindar com vista à EMC, sendo denominado no decorrer do trabalho como controle remoto;
- c. Desenvolvimento de uma central eletrônica com limitador de carga, inclinômetro, sistema de posição de lança e intertravamento entre comandos do equipamento de guindar com vista a EMC. Esta central, no decorrer do trabalho, será denominada receptor do controle;
- d. Desenvolvimento de uma lança para isolação de caçamba.

Todos os objetivos listados contribuem para a finalidade de obtenção de um equipamento seguro para operação, pois como envolve a movimentação de um operador em altura considerável e próximo à rede elétrica de tensão elevada energizada não podem ocorrer problemas de funcionamento no equipamento.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo, é realizada a apresentação do trabalho, por meio de uma introdução ao tema e o contexto de desenvolvimento do trabalho. Nele também são apresentados os requerimentos e os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo é realizado o embasamento teórico do trabalho, iniciando pela revisão da bibliografia existente referente a equipamentos eletrônicos operando próximos à redes de alta tensão e revisão referente as interferências provenientes de linhas de alta tensão. Posteriormente, são apresentados os conceitos de compatibilidade eletromagnética e as normatizações vigentes às quais os equipamentos desenvolvidos serão submetidos.

No terceiro capítulo são apresentadas as técnicas para desenvolvimento dos equipamentos para atendimento das normas de EMC e para atendimento da isolação requerida da lanca.

No quarto capítulo os resultados obtidos nos ensaios em laboratório são mostrados.

No quinto capítulo descreve-se a aplicação prática do equipamento.

No sexto capítulo, as conclusões do trabalho e as propostas de trabalho futuras são apresentadas.

No sétimo capítulo são apresentadas as referências.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A respeito da operação de equipamentos eletrônicos próximos a redes de alta tensão, na bibliografia é encontrado um campo de aplicação principalmente no que se refere a inspeção das mesmas. Nesta aplicação é encontrado uma diversidade de trabalhos de construção de robôs dedicados que percorrem as linhas realizando a inspeção bem como de veículos aéreos não tripulados, com a principal característica de todos eles serem operados ou monitorados via *wireless*.

Em (GROCH, 2013) é apresentada implantação de um veículo aéreo não tripulado para inspeção de linhas de alta tensão. O desenvolvimento deste trabalho foi realizado com vistas a manter o veículo a uma distância segura da rede evitando que sobre tensões transitórias coloquem-no em risco. Adicionalmente o veículo leva um analisador de espectro para verificar as emissões entre 9kHz e 6GHz, e conclui que as frequências de “faíscas” estavam em frequência acima de 3,5GHz. Quanto a EMC, este trabalho limitou-se a utilizar blindagem em cabos e encapsulamentos para minimizar ruídos em leitura de conversor analógico para digital. Em (VEERAPPAN, 2011) é apresentado o desenvolvimento de um robô para inspeção de linhas de alta tensão. Neste trabalho foi utilizado um sistema alimentado por baterias, composto por câmeras e link de transmissão de dados por radiofrequência operando em 2.4GHz, com potência de 1mW e tendo sua movimentação realizada por motores de passo. Quanto a EMC, este trabalho também faz menção a blindagem, mas não são realizados maiores estudos sobre o tema. Em (ZHENG, 2010) é realizado o desenvolvimento de um robô de inspeção em linhas de transmissão em alta tensão que percorre os condutores. Este sistema é composto por uma eletrônica embarcada baseada no controlador PC/104, motores para realizar o deslocamento e desvio de obstáculos, GPS, câmeras comuns e com infravermelho para obtenção de informações de vídeo e de temperatura, além de um sistema de comunicação *wireless* baseado no protocolo LAN TCP/IP. O enfoque deste trabalho está no desvio de obstáculos, não é realizado estudo referente à EMC.

Dos resultados obtidos nos trabalhos analisados pode-se concluir que é possível a utilização de equipamentos eletrônicos próximos a redes de alta tensão controlando circuitos compostos por motores, sensores diversos, GPS e sistemas de comunicação *wireless* para transmissão de dados com baixa potência de transmissão próximos a linhas de alta tensão, todos alimentados por baterias. Apesar de não ser realizado estudo específico sobre EMC

nestes trabalhos, devido aos testes práticos realizados nos mesmos, conclui-se que é possível operar equipamentos eletrônicos próximos à alta tensão com segurança.

Quanto às emissões eletromagnéticas de redes de alta tensão foram analisados estudos para verificação de intensidade de campo próximos as mesmas. Em (SUPRIANTO, et al, 2017) foram realizadas análises computacionais e medidas para emissões eletromagnéticas sobre seres humanos próximos à linha de transmissão. Os resultados obtidos indicaram que existem campos eletromagnéticos de valores elevados próximos aos condutores de alta tensão, os quais inclusive poderiam ser prejudiciais à saúde humana. Em (LEÃO, 2008) foi realizado um estudo para verificar a rádio interferência gerada por linhas de transmissão nos arredores da mesma, considerando também emissões espúrias advindas de efeito corona e outros problemas da linha de transmissão, indicando, também que as linhas de transmissão não emitem ondas acima de 300MHz capazes de causar interferência em sistemas de televisão. Este estudo também aconselha a não utilização de equipamentos eletrônicos e de telecomunicações a distâncias menores de 20m sob tempo de chuva no caso de uma linha de 500kV, mas não faz restrições a distância sob tempo bom.

Dos resultados obtidos nestes trabalhos pode-se concluir que as linhas de alta tensão geram ondas eletromagnéticas capazes de interferir no funcionamento de equipamentos eletrônicos e, devido sua intensidade, até mesmo danificá-lo permanentemente. Dos mesmos também verifica-se que as emissões principais das linhas de alta tensão se encontram abaixo de 300MHz.

O estudo em realização justifica e diferencia-se dos demais principalmente por envolver equipamentos que não podem em hipótese alguma sofrer falhas que causem mau funcionamento, movimentos involuntários ou errôneos durante sua operação, pois envolve a segurança de operadores em alturas elevadas e próximos a alta tensão. Isto não significa também que na ocorrência de alguma interferência os equipamentos continuem em operação normal, mas devem ser capazes de interpretar a ocorrência de interferências e atuar de forma a evitar comportamentos que coloquem em risco a segurança do operador.

## 2.2 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

### 2.2.1 Aspectos gerais e conceito

Os fenômenos envolvendo emissão de ondas eletromagnéticas são conhecidos desde o princípio da utilização de equipamentos de comunicação que utilizam eletricidade. Os fenômenos envolvendo emissões eletromagnéticas podem ser gerados de forma proposital (como por exemplo, em transmissores de radiofrequência) ou de forma natural (como por exemplo, em raios). Outros equipamentos, tais como computadores, por sua forma de operação baseada em pulsos digitais também são capazes de gerar emissões eletromagnéticas. O fato é que estas emissões eletromagnéticas são capazes de gerar interferência e causar mau funcionamento em equipamentos eletrônicos instalados próximos as fontes geradoras das emissões. Essas emissões eletromagnéticas são denominadas como interferência eletromagnética – EMI.

Devido aos problemas gerados pelas operações mencionadas foi desenvolvida a área de compatibilidade eletromagnética – EMC. Um equipamento é eletromagneticamente compatível se satisfaz três critérios de operação, conforme (PAUL, 2006):

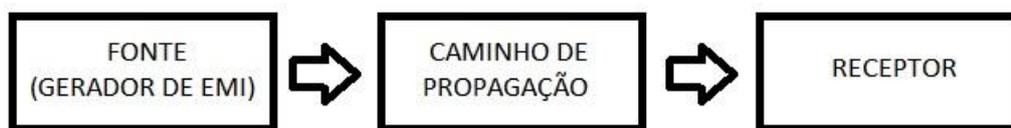
- a. Não causa interferência eletromagnética (EMI) em outros sistemas;
- b. Não é suscetível a emissões (EMI) geradas por outros sistemas;
- c. Não causa interferência (EMI) em si próprio.

Inicialmente a maior atenção à EMC era dada pela indústria aeronáutica, mas com o passar do tempo as demais indústrias passaram a focar suas atenções nesta área. Com o adensamento dos componentes eletrônicos, em uma diminuta pastilha de silício, sendo que grande parte destes circuitos são digitais, e a grande utilização destes componentes em equipamentos eletrônicos em geral, a interferência pode causar alteração em bits e consequentemente mau funcionamento (MATOS, 2016). No entanto, o desenvolvimento com vistas à EMC não tem sido desejado apenas para alcançar um desempenho satisfatório, mas em alguns países é necessário que os equipamentos atendam requisitos de EMC para que possam ser comercializados (PAUL, 2006).

Pelo conceito de EMC pode-se verificar que no problema de EMI é necessária a existência de uma Fonte (Gerador de EMI), um caminho de propagação e um Receptor. O sistema obtido é mostrado na Figura 5. É importante também ter conhecimento que a interferência ocorre somente se a energia absorvida pelo receptor for suficiente para o mesmo

se comportar de maneira indesejada. Logo, a maneira que o receptor processa a energia recebida é importante para saber se ocorre interferência.

**Figura 5 - Sistema para ocorrência de EMI**



Fonte: própria.

Então, para prevenir problemas de EMI trata-se a questão nas três etapas do sistema:

- a. Reduzir as emissões indesejadas na fonte;
- b. Tornar o caminho de propagação o mais ineficiente possível;
- c. Tornar o receptor o menos possível suscetível às emissões.

Para conseguir estes objetivos, pode-se por exemplo, para reduzir as emissões, aumentar tempos de subida e descida de sinais de comando. Tempos muito curtos geram mais componentes de alta frequência e componentes de alta frequência aumentam a eficiência do caminho de propagação ou acoplamento. Desta forma, deve-se sempre realizar a real necessidade do equipamento, sabendo que detalhes podem influenciar profundamente na questão de EMC.

## **2.2.1 Caminho de Propagação**

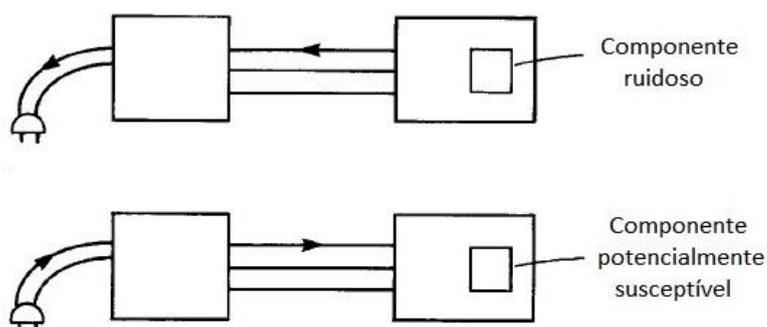
Pelo sistema mostrado na Figura 5, verifica-se a existência de um caminho de propagação. Este caminho, também chamado de acoplamento, pode ocorrer por meio conduzido ou por meio radiado (MATTOS, 2016).

### **2.2.1.1 Propagação conduzida**

A condução é o mecanismo pelo qual as interferências são levadas para dentro ou para fora de um sistema por condutores metálicos ou elementos parasitas. Esse método de propagação é extremamente importante para equipamentos conectados à rede elétrica de alimentação, não apenas devido os equipamentos eletrônicos injetarem componentes

harmônicos de corrente na mesma, mas também porque muitos deles podem receber ruídos da rede e propagar para as cargas a eles conectadas, normalmente provenientes de outros equipamentos eletrônicos, descargas atmosféricas, descargas eletrostáticas e transitórios na rede elétrica (SCHLICHTING, 2003). A EMI neste meio de propagação pode percorrer não só condutores em si, mas também pelos próprios componentes eletrônicos por meio de capacitâncias intrínsecas, ou ainda por capacitâncias da placa. Desta forma, para reduzir a EMI é necessário o conhecimento do comportamento em frequência dos componentes eletrônicos utilizados e conhecimento de *lay-out* de placas de circuito impresso. A Figura 6 mostra a susceptibilidade e a emissão de EMI conduzida de um componente conectado à rede elétrica.

**Figura 6 - EMI conduzida.**



Fonte: Paul, 2006, adaptada.

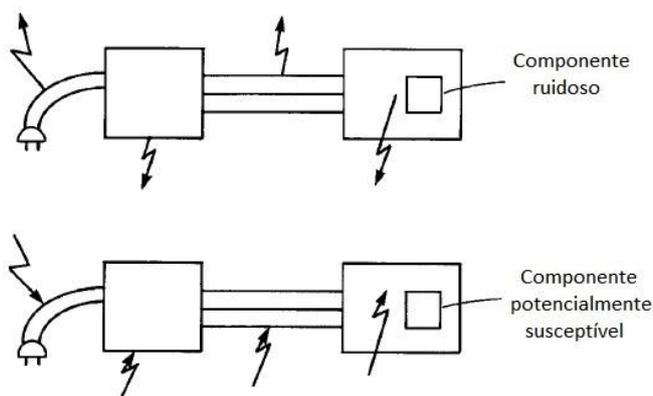
Normalmente as agências normalizadoras impõem limites à emissão por condução pois devido a conexão à rede elétrica o ruído gerado pode se propagar por ela. É importante também destacar que a EMI conduzida por cabos pode gerar também EMI radiada, afetando equipamentos próximos aos cabos (LIZ, 1999).

### 2.2.1.2 Propagação radiada

Quando a propagação ocorrer pelo ar, pelo vácuo, pelo solo ou por outro meio dielétrico (não metálico) diz-se que a propagação é radiada (MATTOS, 2016). Estas emissões, quando não intencionais, ocorrem devido ao funcionamento de motores elétricos com escovas, soldadores elétricos, ignição de motores a explosão, descargas atmosféricas, efeito corona, etc., e em equipamentos eletrônicos em geral devido à circulação de correntes em trilhas, cabos, caminhos fechados (*loop*) gerando componentes eletromagnéticos com

intensidade dependente principalmente de fatores com a amplitude e frequência da corrente, comprimento de trilhas ou cabos. Quanto a emissões radiadas intencionais, temos os telefones celulares, transmissores de rádio e televisão, radares, etc., os quais, devido à larga utilização nos dias atuais, constituem importantes fontes de EMI. A Figura 7 mostra a susceptibilidade e a emissão de EMI radiada de um componente conectado à rede elétrica.

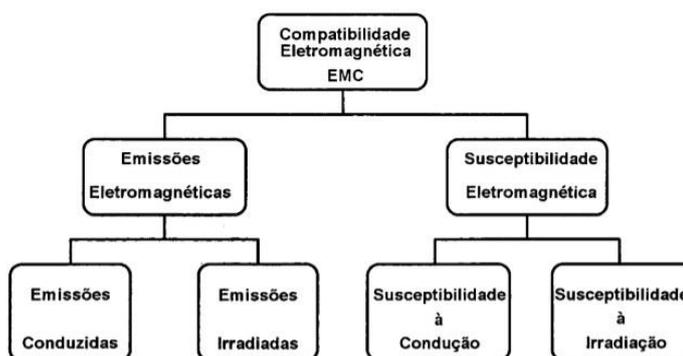
**Figura 7 - EMI radiada.**



Fonte: PAUL, 2006, adaptada.

Finalmente, para que um equipamento alcance a EMC, exige-se que o equipamento atenda a requisitos tanto de emissão eletromagnética e de susceptibilidade eletromagnética (LIZ, 1999), conforme mostra a Figura 8.

**Figura 8 - Emissões e Susceptibilidade Eletromagnéticas.**



Fonte: LIZ, 1999.

### 2.2.2 LEGISLAÇÃO E NORMATIZAÇÃO

A avaliação da EMC é resultado da imposição de objetivos adicionais ao projeto de equipamentos eletrônicos. Estes objetivos adicionais advêm da necessidade do equipamento

ser eletromagneticamente compatível com o ambiente onde será utilizado. Há basicamente duas classes de requerimentos de EMC impostas aos sistemas eletrônicos:

- a. Leis impostas por agências governamentais;
- b. Requerimentos impostos pelo próprio fabricante do equipamento.

As leis impostas pelo governo são mandatórias e não podem ser evitadas ou negligenciadas. São requerimentos para minimizar os ruídos gerados pelos equipamentos, com vistas a reduzir a “poluição magnética” gerada pelos produtos, e, para que os mesmos possam ser comercializados, é necessário que atendam a essas leis.

Já os requerimentos impostos pelos fabricantes estão pautados na satisfação dos usuários dos equipamentos. Se os equipamentos têm funcionamento afetado durante o uso por, por exemplo, uma descarga eletrostática, o produto fica com uma imagem ruim frente aos consumidores e pode perder mercado. Para auxiliar no desenvolvimento e fiscalizar a operação de equipamentos diversos órgãos e comitês atuam na área de EMC.

#### **2.2.2.1 Federal Communications Commission (FCC).**

Nos Estados Unidos, o órgão responsável pela comunicação por cabos e por radiofrequência é o *Federal Communications Commission (FCC)*. Parte significativa da responsabilidade para controlar interferências eletromagnéticas cabe a este órgão. Para este órgão, equipamentos de radiofrequência são equipamentos capazes de emitir energia por radiação ou condução com frequências entre 9kHz e 300 GHz. Qualquer equipamento eletrônico que opere com *clock* acima de 9kHz se enquadra nos requerimentos da FCC, com número limitado de exceções (PAUL, 2006).

#### **2.2.2.2 Internacional Electrotechnical Commission (IEC) e Comité International Special des Perturbations Radioéletriques (CISPR).**

Em âmbito internacional, normas para a avaliação da EMC têm sido criadas e verificadas pelo *Comité International Special des Perturbations Radioéletriques (CISPR)*. A CISPR é um órgão fundado em 1934, responsável por criar padrões para controlar a interferência eletromagnética em equipamentos elétricos e eletrônicos e é parte da *Internacional Electrotechnical Commission (IEC)*, sendo esta uma agência responsável por criar padrões para facilitar o comércio entre países. Apesar da CISPR não ser um órgão normalizador,

diversos países e órgãos reguladores adotam os limites de emissão publicados e estes passam a ter força de lei (PAUL, 2006). A atuação da CISPR e IEC cobre toda a faixa de radiofrequências de 9 kHz a 400 GHz. Se um padrão CISPR não cobrir o intervalo total de frequências de 9 kHz a 400 GHz, ele incluirá, em sua cláusula de escopo, informações sobre o intervalo de frequências realmente coberto (IEC, 2011). O escopo dos padrões da CISPR visam a proteção da recepção de rádio contra interferências causadas pela operação de aparelhos e sistemas elétricos ou eletrônicos no ambiente eletromagnético, a especificação de instrumentação de medição, instalações, métodos e análise estatística para a medição de perturbação, limites para distúrbios de rádio causados por aparelhos e sistemas elétricos ou eletrônicos e requisitos para a imunidade de aparelhos elétricos, equipamentos multimídia, equipamentos de tecnologia da informação e instalações receptoras de transmissão de som e televisão por interferência (CISPR, 2019).

### **2.2.2.3 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA)**

Fundada em 1940, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é uma empresa privada sem fins lucrativos, sendo considerada Foro Nacional de Normalização. A ABNT também adotou e traduziu normas da CISPR IEC para orientar fabricantes sobre a questão da EMC, logo o escopo de normas publicados pela ABNT atende a mesma gama de equipamentos e faixa de frequências das normas originais. As principais normas introduzidas pela ABNT em relação a EMC são referentes a NBR IEC 61000-4 e NBR IEC 60601.

A respeito de legislação no Brasil, duas agências do Governo Federal exigem que equipamentos sob sua responsabilidade tenham atendidas as exigências quanto à compatibilidade eletromagnética (RAIZER, 2019).

A primeira é a Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA, a qual tem por finalidade institucional promover a proteção da saúde da população, por intermédio do controle sanitário da produção e consumo de produtos e serviços submetidos à vigilância sanitária, inclusive dos ambientes, dos processos, dos insumos e das tecnologias a eles relacionados. Neste escopo de aplicação, equipamentos eletromédicos devem ser certificados quanto à sua compatibilidade eletromagnética, conforme Instrução Normativa - IN N° 49, de 22 de novembro de 2019 (ANVISA, 2019). Nesta instrução normativa constam que os ensaios

de compatibilidade eletromagnética devem ser realizados em conformidade, principalmente, com as normas traduzidas pela ABNT.

A segunda é a Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, criada em 1997, sendo a primeira agência reguladora do país. Entre as principais atribuições da ANATEL destacam-se implementar, em sua esfera de atribuições, a política nacional de telecomunicações, administrar o espectro de radiofrequências e o uso de órbitas, expedindo as respectivas normas, expedir ou reconhecer a certificação de produtos, observados os padrões e as normas por ela estabelecidos e reprimir infrações aos direitos dos usuários. No escopo de expedição de normas, a ANATEL publicou, respectivamente, em junho e em dezembro de 2017 a Resolução número 680 e o Ato Anatel 14448. Estas publicações aprovam o Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita e alteram o Regulamento dos Serviços de Telecomunicações, o Regulamento de Gestão da Qualidade do Serviço de Comunicação Multimídia, o Regulamento do Serviço de Comunicação Multimídia e o Regulamento do Serviço Limitado Privado, além de aprovar os requisitos técnicos para a avaliação de conformidade de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita (ANATEL, 06/2017) (ANATEL, 12/2017).

### **2.2.3 NORMAS APLICADAS AOS EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS**

Após a análise das normas criadas em âmbito internacional e com a necessidade de aprovar os equipamentos para operação, primeiramente, dentro do território brasileiro, verificou-se que devem ser utilizadas as normativas que seguem para desenvolvimento dos produtos. Como os testes referentes às normas serão executados em laboratórios certificados, não serão descritos os equipamentos utilizados para realização dos mesmos, mas apenas configurações e objetivos dos testes.

#### **2.2.3.1 Resolução nº 680 e Ato 14448 da Anatel**

Conforme descrito no capítulo 1.3, foi proposta a utilização de um controle remoto para realizar a movimentação do equipamento de guindar. Este controle remoto, por operar por radiofrequência, deve obrigatoriamente ser certificado junto a ANATEL.

## a) Faixa de operação

A Resolução nº 680, Anexo I, Capítulo II, artigo 7º, tabela I, restringe as faixas de operação de equipamentos de radiação restrita. Logo, para estar fora das faixas de restrição e pela possibilidade de utilização de módulos de radiofrequência existentes no mercado, a faixa de operação do controle remoto foi definida entre 433-435 MHz (ANATEL, 06/2017).

## b) Potência radiada da portadora

O Ato 14448 da Anatel, item 4.1.5, define que equipamentos de radiação restrita operando na faixa 433-435 MHz devem ter sua potência equivalente isotropicamente radiada (EIRP) limitada a 10 mW, e as emissões fora das faixas de radiofrequência especificada ser inferiores a 250 nW (EIRP) para radiofrequências de até 1000 MHz e 1µW (EIRP) para radiofrequências superiores a 1000 MHz (ANATEL, 12/2017).

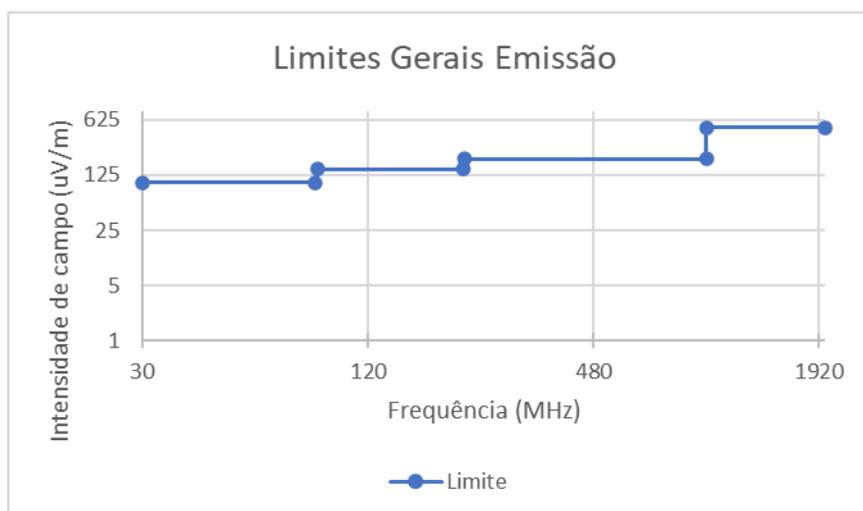
## c) Emissões Espúrias

A Resolução nº 680, Anexo I, Capítulo II, artigo 8º, tabela II, define os limites gerais de emissão de equipamentos de radiação restrita (ANATEL, 06/2017). A Tabela 2 mostra os limites de emissões espúrias e a Figura 9 mostra graficamente os valores de medição a 3m de distância.

**Tabela 2 - Limites Gerais de emissão.**

Faixa de radiofrequências	Intensidade de campo (microvolt por metro)	Distância da medida (metro)
9 – 490 kHz	$2.400 / f(\text{kHz})$	300
490 – 1705 kHz	$24.000 / f(\text{kHz})$	30
1.705 – 30 MHz	30	3
30 – 88 MHz	100	3
88 – 216 MHz	150	3
216 – 960 MHz	200	3
> 960 MHz	500	3

Fonte: Anatel, 06/2017.

**Figura 9 - Limites gerais de emissão a 3m.**

Fonte: própria.

Os ensaios de emissões a serem realizados devem ser executados com o equipamento sobre uma mesa de madeira posta sobre uma plataforma giratória comandada a distância que permita rotação de 360°. A antena receptora deve estar localizada conforme as distâncias da Tabela 2 e altura da antena receptora variada de 1 a 4 metros para frequências maiores que 30MHz e 1 metro para frequências menores.

#### d) Outras medidas em EMC

O Ato 14448 da Anatel, itens 4.1.6 e 4.1.7, definem que outros requisitos técnicos de EMC e de Segurança Elétrica vigentes deverão ser observados no processo de avaliação da conformidade (ANATEL, 12/2017). No entanto, não foram especificados quais os requisitos devem ser atendidos, logo, testes desta natureza nos equipamentos estarão inclusos nas normas dos itens seguintes deste trabalho.

### **2.2.3.2 NBR IEC 61000-4-2:2013 – Compatibilidade eletromagnética – Ensaios e técnicas de medição - Ensaio de imunidade a descarga eletrostática (ABNT, 2013)**

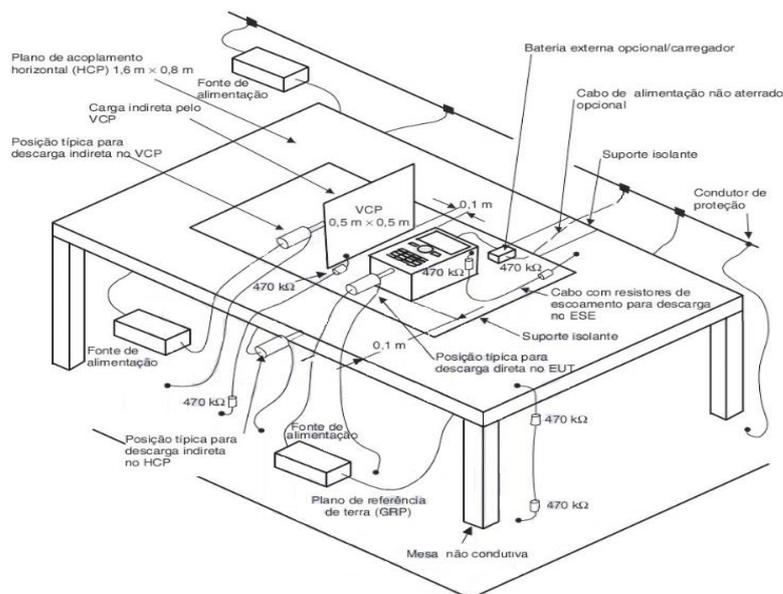
Esta norma se refere aos requisitos de imunidade do equipamento eletrônico sujeito às descargas de eletricidade estática diretamente a partir de operadores em objetos adjacentes (ABNT,2013). Para correta operação todos equipamentos eletrônicos descritos no capítulo 1.3

devem ser submetidos aos ensaios desta norma, a saber o controle remoto, a central de nivelamento e o receptor do controle.

Os ensaios realizados nesta norma são de dois tipos: descarga por contato em superfícies condutoras e nos planos de acoplamento e descarga pelo ar em superfícies de isolamento. Todos os ensaios a serem realizados nos equipamentos serão realizados em laboratório, não em seus locais finais de instalação.

A configuração deste ensaio é composta por um plano de referência (chapa metálica de cobre ou alumínio) de 0,25mm de espessura, com dimensão projetada no mínimo de 0,5m além das dimensões do plano de acoplamento horizontal (HCP), posicionado sobre o piso do laboratório e conectado ao sistema de aterramento de proteção. Sobre este plano é colocada uma mesa de madeira com 0,8m de altura e sobre a mesa é posicionado o plano de acoplamento horizontal, com medidas de 1,6m x 0,8m. sobre o HCP é colocado um suporte de isolamento de 0,5mm de espessura e sobre ele é colocado o equipamento em teste e seus cabos. Perpendicularmente a mesa é colocado o plano de acoplamento vertical (VCP), que consiste de uma chapa de 0,5 x 0,5m localizada à distância de 0,1m do equipamento em teste. Conectados ao VCP e HCP estão cabos de aterramento com resistores de 470k $\Omega$ , os quais são utilizados para evitar que a carga aplicada aos planos desapareçam instantaneamente. A Figura 10 mostra a configuração destes ensaios.

**Figura 10 - Configuração para teste de ESD.**



Fonte: ABNT, 2013.

A execução do ensaio de ESD deve ser realizada com o equipamento em operação com condições de funcionamento representativas. A aplicação da carga por contato é realizada então no VCP, no HCP e diretamente no equipamento em partes condutoras, como gabinetes, parafusos, carcaça de conectores, etc. Já a descarga pelo ar é realizada em partes não condutoras do equipamento, tais como teclas, leds e outras partes passíveis de contato com o operador. A Tabela 3 mostra os limites de tensão aplicados durante os testes. Para seleção do nível de ensaio foram consideradas normas padrões de testes antigos da Anatel, as quais consideram equipamentos de radiação restrita como nível 3.

**Tabela 3 - Níveis de teste de equipamentos.**

Descarga por contato		Descarga pelo ar	
Nível	Tensão de ensaio kV	Nível	Tensão de ensaio kV
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
x <sup>a</sup>	Especial	x <sup>a</sup>	Especial

<sup>a</sup> "x" pode ser qualquer nível, acima, abaixo ou entre os outros. O nível deve ser prescrito na especificação dedicada ao equipamento. Se tensões mais elevadas do que aquelas mostradas forem especificadas, pode ser necessário equipamento de ensaio especial.

Fonte: ABNT, 2013.

A avaliação dos resultados do ensaio é classificada nos termos da perda de função ou da degradação do desempenho do equipamento sob ensaio, sendo que este desempenho é definido pelo fabricante ou solicitante do ensaio. Existem quatro classificações recomendadas:

- a) Desempenho normal dentro dos limites especificados pelo fabricante, solicitante ou comprador;
- b) Perda temporária de função ou degradação do desempenho que cessa depois que a perturbação cessa, e da qual o equipamento sob ensaio recupera seu desempenho normal, sem intervenção do operador;
- c) Perda temporária de função ou degradação do desempenho, cuja correção exige a intervenção do operador;
- d) Perda de função ou degradação de desempenho que não é recuperada, devido a dano no hardware ou software, ou à perda de dados.

### 2.2.3.3 NBR IEC 61000-4-3:2014 – Compatibilidade eletromagnética – Ensaios e técnicas de medição - Ensaio de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência irradiados (ABNT, 2014)

Esta norma se refere aos requisitos de imunidade do equipamento eletrônico para a energia eletromagnética radiada a partir de qualquer fonte (ABNT, 2014). Para correta operação todos equipamentos eletrônicos descritos no capítulo 1.3 devem ser submetidos aos ensaios desta norma, a saber o controle remoto, a central de nivelamento e o receptor do controle.

A intensidade de campo que pode ser utilizado como radiofrequência radiada durante o ensaio é mostrada na Tabela 4.

**Tabela 4 - Níveis de ensaio relacionado a telefones de rádio digitais e outros dispositivos emissores de RF de uso geral.**

<b>Nível</b>	<b>Intensidade de campo de ensaio V/m</b>
1	1
2	3
3	10
4	30
X	Especial
NOTA: x é um nível de ensaio aberto e a intensidade do campo associado pode ser de qualquer valor. Este nível pode ser dado na norma do produto.	

Fonte: ABNT, 2014.

Nesta tabela consta a classificação do nível em 5 classes:

- a. Classe 1: Baixo nível de radiação eletromagnética ambiente. Níveis típicos de locais de rádio/televisão localizadas a mais de 1km, e transmissores/receptores de baixa potência;
- b. Classe 2: Ambiente de radiação eletromagnética moderada. Transceptores portáteis de baixa potência (tipicamente menor do que 1W nominal) estão em uso, mas com restrições de utilização em estreita proximidade com o equipamento. Um ambiente típico comercial.
- c. Classe 3: Ambiente de radiação eletromagnética severa. Transceptores portáteis (2 W nominais ou mais ) estão em uso relativamente perto do equipamento, mas não a

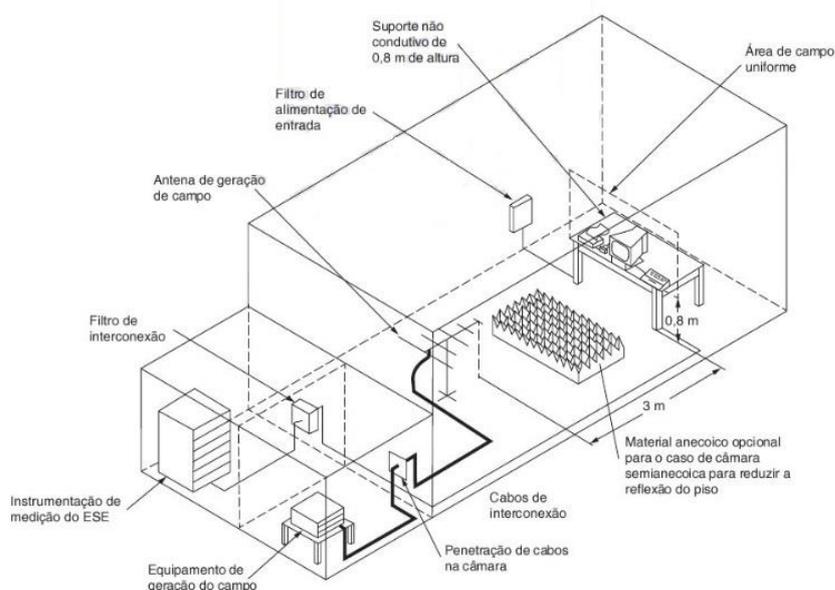
menos de 1m. Transmissores de alta potência estão em estreita proximidade com os equipamentos, e equipamentos ISM podem estar localizados perto. Um ambiente típico industrial.

- d. Classe 4: Transceptores portáteis estão em uso a menos de 1m do equipamento. Outras fontes de interferência significativas podem estar a 1m do equipamento.
- e. Classe X: x é um nível aberto que pode ser negociado e especificado em norma de produto ou especificação do equipamento.

Devido a utilização dos equipamentos ser em um veículo, os mesmos podem operar próximos a fontes de RF, logo os equipamentos serão submetidos ao nível 3 de ensaio.

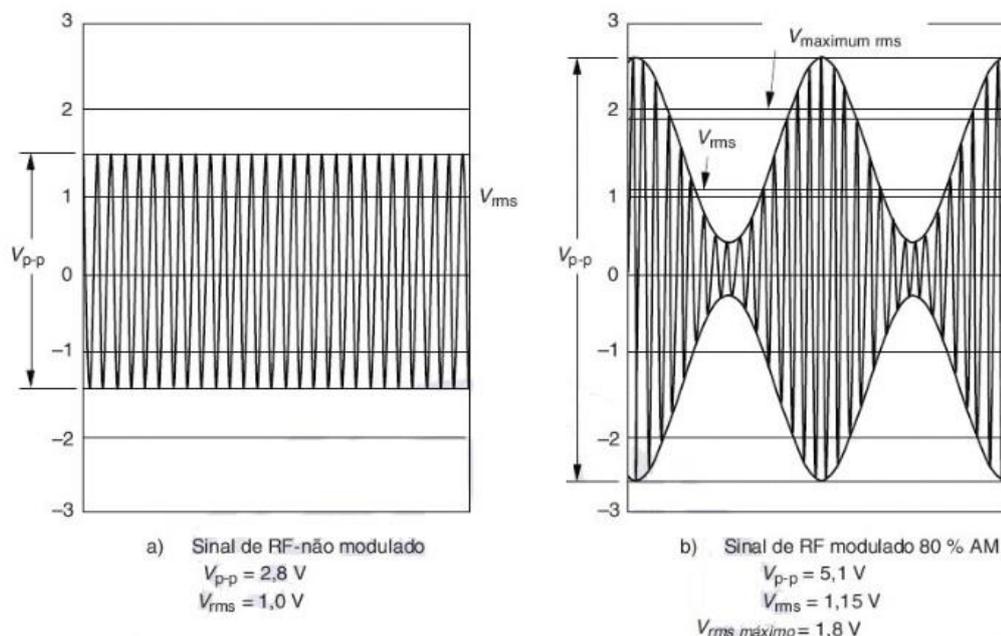
O ensaio do equipamento deve ser realizado em um ambiente blindado forrado por absorvedores, de forma a evitar que a radiofrequência gerada não interfira em comunicação de rádios e não sofra interferência de radiofrequências externas. Isso inclui câmaras anecóicas e semi-aneecóicas. O equipamento é colocado dentro deste ambiente, sobre uma mesa não-condutiva de 0,8m de altura. Uma antena, posicionada a 3m de distância do equipamento, emitirá o campo eletromagnético ao equipamento varrendo a faixa de frequência de ensaio (80MHz a 1GHz), sendo que o equipamento deverá ter cada uma de suas faces submetidas ao campo eletromagnético gerado. A Figura 11 mostra a configuração do ensaio. O sinal de RF utilizado no ensaio deve ter modulação em amplitude com índice de modulação de 80% a 1kHz. A Figura 12 mostra o sinal que deve ser utilizado no ensaio.

**Figura 11 - Exemplo de instalação de teste.**



Fonte: ABNT, 2014.

**Figura 12 - Forma de onda na saída do gerador de RF.**



Fonte: ABNT, 2014.

A avaliação dos resultados do ensaio, assim como a NBR IEC61000-4-2, é classificada nos termos da perda de função ou da degradação do desempenho do equipamento sob ensaio, sendo que este desempenho é definido pelo fabricante ou solicitante do ensaio.

#### **2.2.3.4 NBR IEC 61000-4-6:2019 – Compatibilidade eletromagnética (EMC) – Técnicas de medição e ensaio – Imunidade a perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência (ABNT, 2019)**

Esta norma refere-se aos requisitos de imunidade conduzida de equipamentos eletrônicos à perturbações eletromagnéticas provenientes de transmissores intencionais de radiofrequência na faixa de 150kHz a 80MHz (ABNT, 2019). Para aplicação desta norma é necessário que o equipamento tenha no mínimo um cabo e/ou condutor por meio do qual os campos possam ser captados pelo equipamento. Logo, devem ser submetidos aos ensaios desta norma o nivelador eletrônico da caçamba e a central eletrônica no equipamento de guindar.

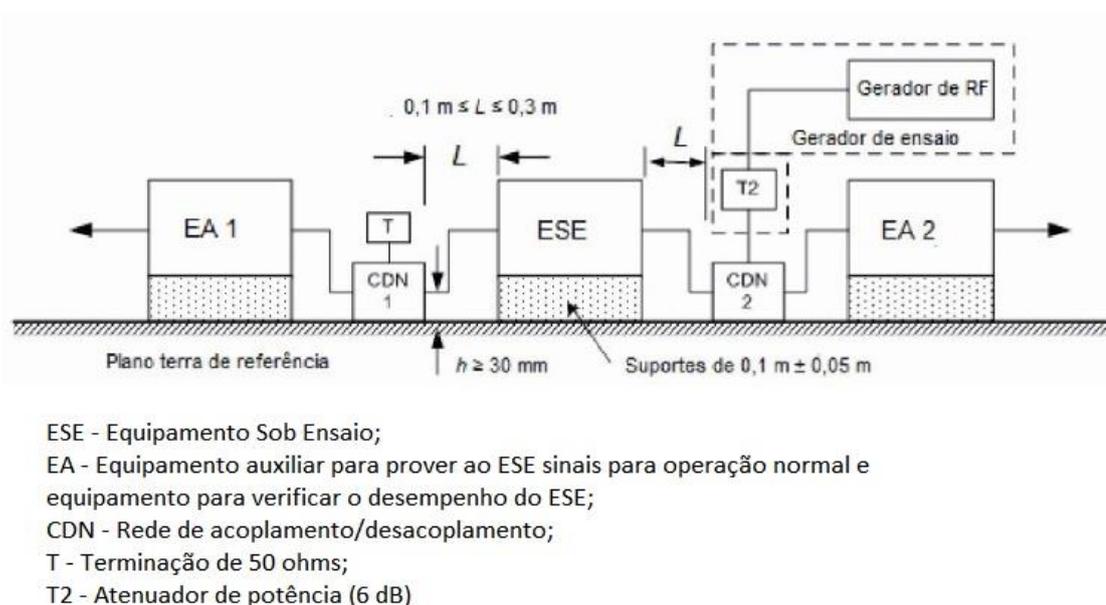
Este ensaio consiste na aplicação de uma perturbação de radiofrequência nos cabos do equipamento de forma a avaliar se esta ao ser captada pelos cabos pode afetar o

funcionamento do equipamento. A injeção desta perturbação pode ser realizada de duas formas:

- Utilizando uma rede de acoplamento e desacoplamento – este dispositivo acopla a perturbação ao cabo em questão por meio de uma ligação em série no cabo.
- Utilizando um alicate eletromagnético – este dispositivo é colocado ao redor do cabo e induz perturbação no cabo por meio de acoplamento indutivo e capacitivo.

O sinal de perturbação aplicado deve ser modulado em amplitude, similar ao utilizado na NBR IEC 61000-4-3, mostrado na Figura 12, com frequência variada entre 150kHz a 80MHz. A configuração do ensaio é mostrada na Figura 13.

**Figura 13 - Ensaio NBR IEC 61000-4-6 com rede de acoplamento/desacoplamento.**



Fonte: ABNT, 2019.

O nível de perturbação do sinal não modulado é mostrado na Tabela 5 e a classificação do nível de ensaio segue a orientação:

- Classe 1: Ambiente de baixo nível de radiação eletromagnética. Nível típico onde estações de rádio/televisão são localizadas a uma distância de mais de 1km, e nível típico para transceptores de baixa potência;
- Classe 2: Ambiente de nível moderado de radiação eletromagnética. Transceptores portáteis de baixa potência (tipicamente menor do que 1W nominal) estão em uso, mas com restrição de uso muito próximo ao equipamento. Um ambiente típico comercial.
- Classe 3: Ambiente de radiação eletromagnética severa. Transceptores portáteis (2 W nominais ou mais) estão em uso relativamente próximos ao equipamento, mas não a

menos de 1m. Transmissores de radiodifusão de alta potência estão muito próximos ao equipamento, e equipamento ISM pode estar localizado nas proximidades.

- d) Classe X: x é um nível aberto que pode ser negociado em recomendações ou especificações dedicadas do equipamento.

A análise destes itens permite enquadrar o equipamento na classe 3 de ensaio.

**Tabela 5 - Níveis ensaio NBR IEC 61000-4-6.**

<b>Faixa de frequência 150 kHz – 80 MHz</b>		
<b>Nível</b>	<b>Nível de tensão (f.e.m.)</b>	
	<b>U<sub>o</sub> (V)</b>	<b>U<sub>o</sub> dB(μV)</b>
1	1	120
2	3	129,5
3	10	140
X	Especial	
NOTA: X pode ser qualquer nível, acima, abaixo ou intermediário em relação aos outros níveis. O nível tem que ser especificado na documentação do equipamento.		

Fonte: ABNT, 2019.

A avaliação dos resultados do ensaio, assim como a NBR IEC61000-4-2 e NBR IEC 61000-4-3, é classificada nos termos da perda de função ou da degradação do desempenho do equipamento sob ensaio, sendo que este desempenho é definido pelo fabricante ou solicitante do ensaio.

#### **2.2.3.5 NBR 16092:2018 – Cestas aéreas – especificações e ensaios (ABNT, 2018)**

Esta norma refere-se às especificações e ensaios para desenvolvimento de equipamentos utilizados especificamente para elevar pessoas (diferentemente do guindaste em que os equipamentos deste trabalho serão instalados, que é projetado para elevar cargas e pode elevar pessoas por meio do cesto acoplado à lança do mesmo) (ABNT, 2018). No entanto o Anexo XII da NR12 referencia esta norma para ensaio de isolamento e resistência mecânica (fator de segurança) da lança em fibra.

O fator de segurança para componentes estruturais é classificado pelo tipo de material que a estrutura é fabricada. Para estruturas fabricadas em materiais dúcteis (basicamente metais),

o fator de segurança deve ser maior que dois. Para estruturas fabricadas em materiais não dúcteis e plásticos reforçados por fibra de vidro é requerido um fator de segurança de cinco. O teste é realizado aplicando no equipamento em teste a capacidade de carga nominal multiplicada por cinco durante quatro minutos, não podendo ocorrer ruptura da estrutura durante este período.

Referente à isolação do sistema, a NBR 16092 classifica os equipamentos em três categorias:

- a) Categoria A – equipamento projetado para trabalhos em que a lança isolante é considerada como isolamento primário para trabalho com a mão nua (ao potencial). Esta categoria de isolação permite trabalhos com tensões acima de 138 kV.
- b) Categoria B – equipamento projetado para trabalhos em que a lança isolante não é considerada como isolamento primário, mas como secundário. Esta categoria requer o uso de ferramentas para trabalho em linha viva, com os níveis de isolação adequados, e nela estão contidos equipamentos que trabalham com tensões acima de 46 kV.
- c) Categoria C - equipamento projetado para trabalhos em que a lança isolante não é considerada como isolamento primário, mas como secundário. Esta categoria requer o uso de ferramentas para trabalho em linha viva, com os níveis de isolação adequados, e nela estão contidos equipamentos que trabalham com tensões abaixo de 46 kV.

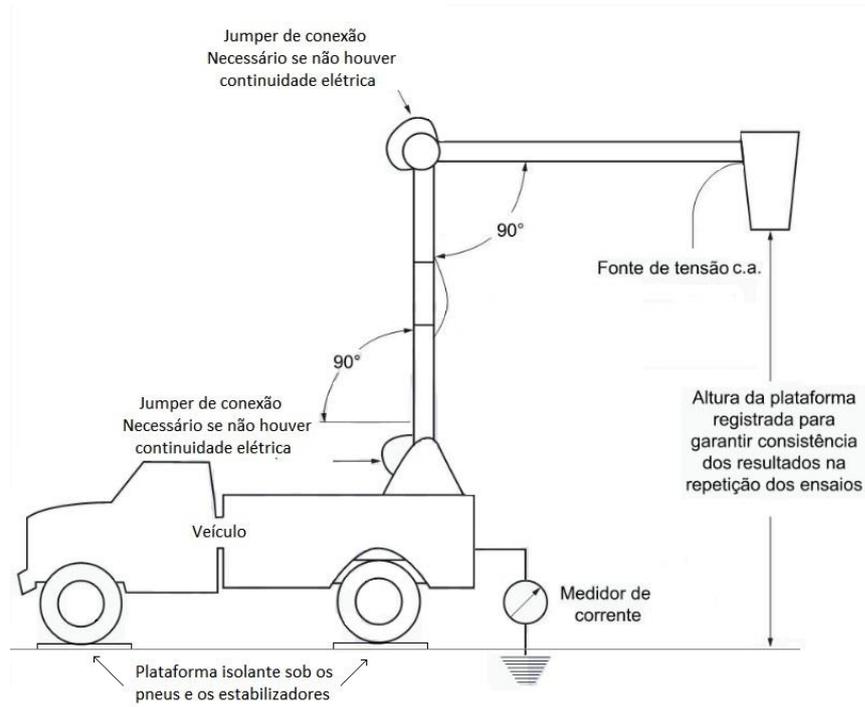
A lança do projeto em questão foi classificada na categoria C. Para o ensaio de equipamentos de categoria C o arranjo é mostrado na Figura 14.

O teste de isolação consiste na aplicação de uma tensão por meio de uma fonte de corrente alternada na caçamba por certo período de tempo e entre o veículo e o solo é inserido um amperímetro para medir a corrente de fuga do equipamento, sendo considerado aprovado se o nível de corrente de fuga não ultrapassar o nível máximo estipulado durante todo o período do teste. Os níveis de tensão, o tempo de teste e a corrente de fuga admissível para o ensaio de qualificação da lança são mostrados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Valores de ensaio de projeto para equipamentos Categoria C.**

<b>Classificação da unidade</b> kV eficaz	<b>Tensão a 60 Hz</b> kV eficaz	<b>Corrente máxima admissível</b> $\mu$ A eficaz	<b>Tempo de ensaio</b> min
46 e abaixo	100	1 000	3

Fonte: ABNT, 2019.

**Figura 14 - Configuração para ensaio de isolamento categoria C.**

Fonte: ABNT, 2019.

## 3 DESENVOLVIMENTO DOS EQUIPAMENTOS

### 3.1 EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

O desenvolvimento dos equipamentos eletrônicos deve ser capaz de atender às especificações de segurança de utilização, ser ergonomicamente confortável para operação, atender às especificações de EMC e ter o menor custo possível. Para atender estes requisitos serão analisados o desenvolvimento das placas eletrônicas, os invólucros, cabos e componentes elétricos em geral.

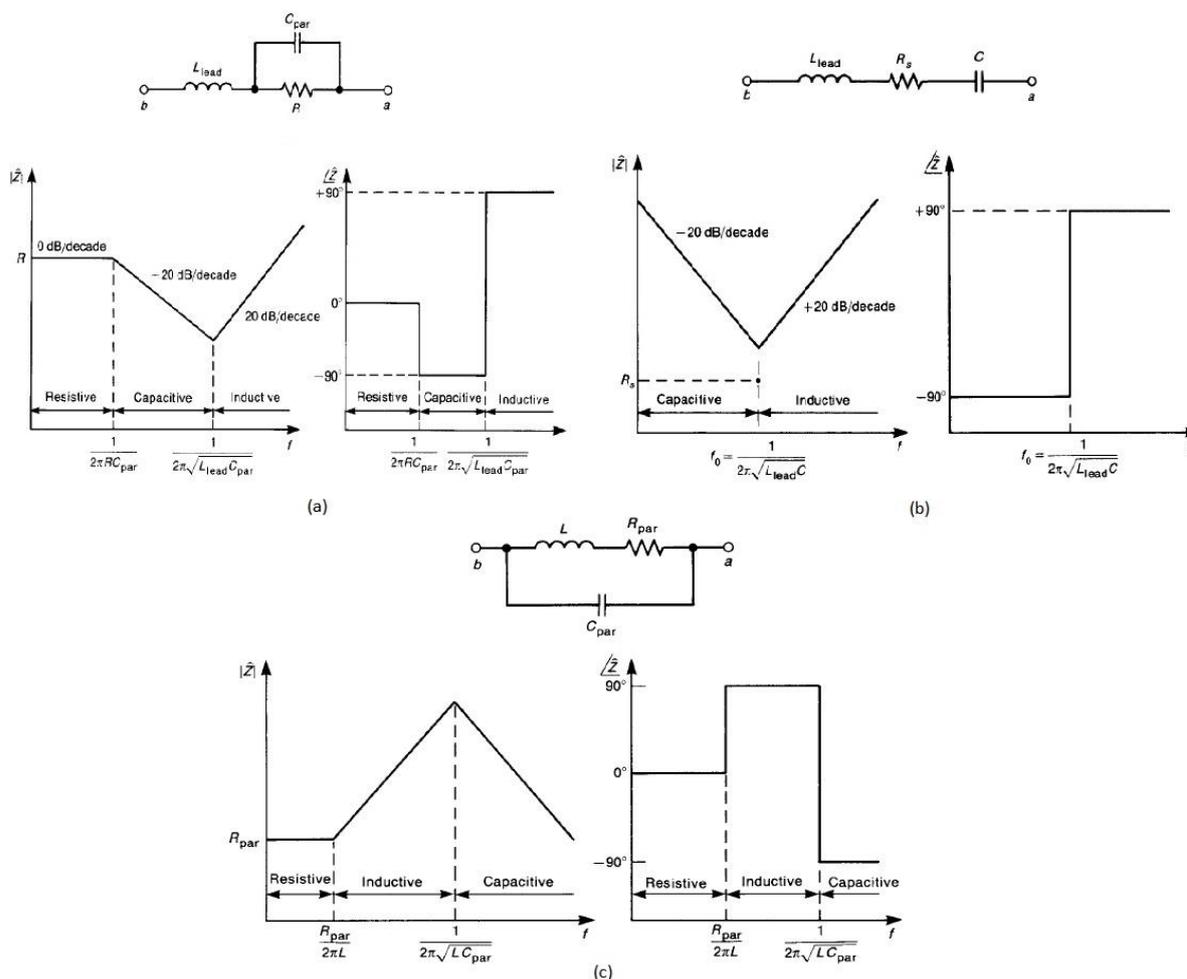
#### 3.1.1 Placas de circuito impresso

As placas de circuito impresso devem seguir práticas de *layout* e utilização de componentes capazes de reduzir as emissões de radiofrequência bem como tenham imunidade à interferências externas.

##### 3.1.1.1 Encapsulamento de componentes

Existem basicamente dois tipos de encapsulamento para todos componentes eletrônicos: com terminais (*Through-Hole Device* – THD) e sem terminais (*Surface Mount Device* – SMD). Os terminais, tanto quanto maiores, formam componentes parasitas que alteram o comportamento dos mesmos na resposta em frequência (PAUL, 2006). Na Figura 15 é mostrado o efeito dos terminais sobre um resistor, sobre um capacitor e sobre um indutor. Tipicamente, em componentes passivos com dois terminais, os terminais formam pequenos indutores, cerca de 1nH/mm por terminal. Na região dos terminais também é produzido um efeito capacitivo. Já componentes SMD por não possuírem terminais possuem indutâncias e efeitos capacitivos menores. Do ponto de vista de EMC componentes SMD são considerados melhores que THD (FREESCALE, 2005). A escolha de componentes com menores parasitas tem maior influência no controle da emissão de radiofrequência indesejada.

**Figura 15 - (a) Circuito equivalente resistor com diagrama de Bode. (b) Circuito equivalente capacitor com diagrama de Bode. (c) Circuito equivalente indutor com diagrama de Bode.**



Fonte: Paul, 2006.

No desenvolvimento dos equipamentos eletrônicos foram utilizados preferencialmente componentes SMD, à exceção de alguns componentes que devido aos terminais facilitam a montagem e devido a disponibilidade de componentes no Brasil.

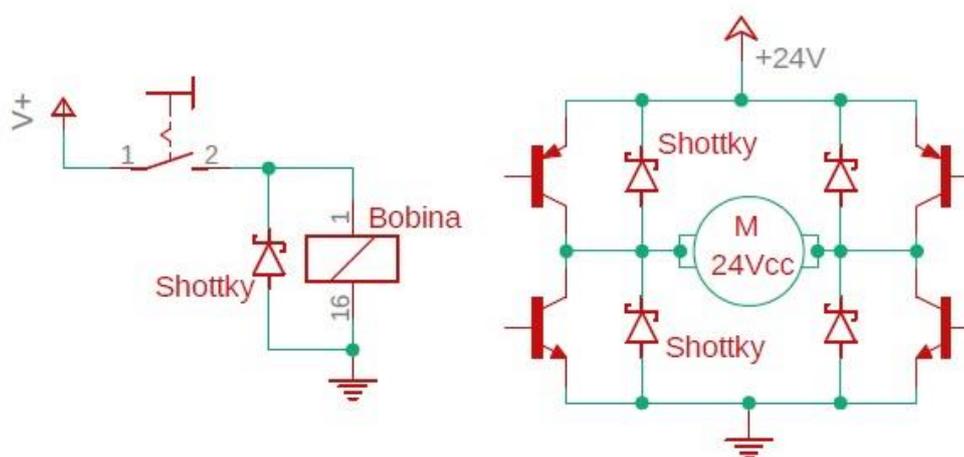
### 3.1.1.2 Supressores de ruídos

Supressores de ruídos são componentes que em placas absorvem energia e protegem desta forma os demais componentes do circuito. Para este fim componentes de diferentes materiais podem ser usados.

### a) Diodos Schottky

Diodos Schottky são componentes semicondutores com baixa queda de tensão quando diretamente polarizados e com uma resposta rápida a transientes de tensão e *spikes* (FREESCALE, 2005). No desenvolvimento dos equipamentos eletrônicos este componente foi utilizado nos reguladores de tensão chaveados, na supressão de ruídos de chaveamento de relés, na proteção de ponte “H” e na proteção das saídas de acionamento de bobinas de comando (similar a supressão de chaveamento de relés). A Figura 16 mostra as aplicações do Diodo Schottky na supressão de ruídos de bobina e na proteção de ponte “H”.

**Figura 16 - Diodo Schottky na supressão de ruídos de bobina e na proteção de ponte "H".**



Fonte: própria.

### b) Fusíveis resetáveis (*Resettable PTC*)

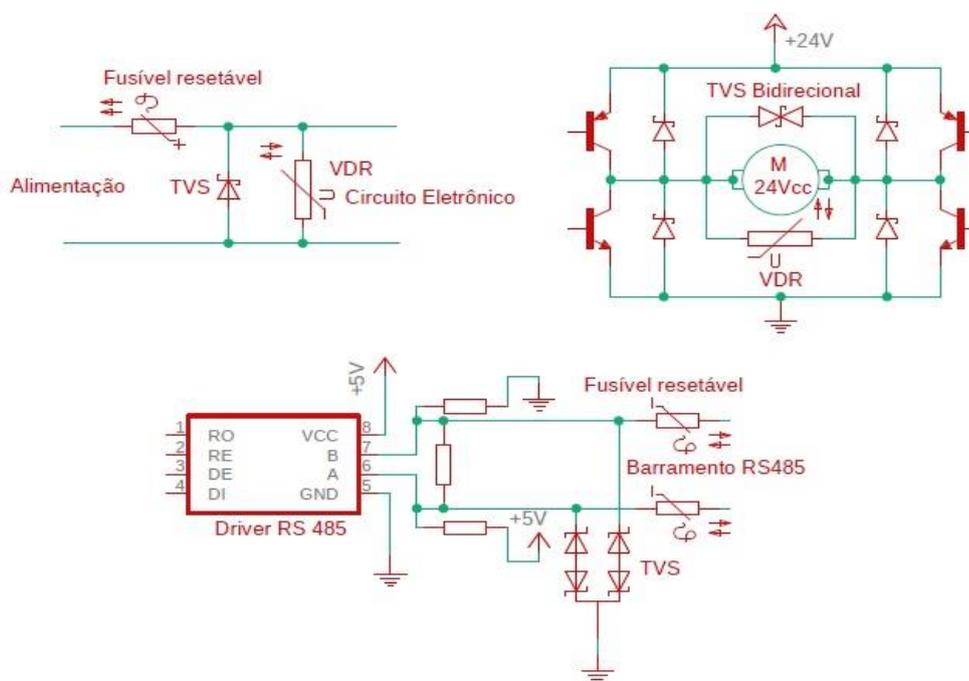
Fusíveis resetáveis são utilizados na proteção de equipamentos contra sobrecorrente, são componentes que ao ser atingida uma determinada corrente ( $I_{trip}$ ) aumentam sua temperatura e conseqüentemente sua resistência, mantendo essa resistência até que a corrente, e conseqüentemente sua temperatura, diminuam (LITTELFUSE, 2014).

No desenvolvimento dos equipamentos o uso de fusíveis resetáveis é realizado em barramentos de comunicação e na entrada de alimentação. Este componente é utilizado acompanhado de diodos supressores (TVS) ou Resistores Dependentes de Tensão (VDR), e sua aplicação pode ser vista na Figura 17.

c) *Transient voltage suppressor diode – TVS e Voltage Dependent Resistor – VDR*

Diodos TVS operam no modo avalanche e possuem curva característica similar ao diodo zener. As principais diferenças entre um zener e um TVS está no fato de que o mesmo consegue dissipar uma grande quantidade de energia em um intervalo de tempo muito curto e o tempo de reação é muito pequeno, na faixa dos picosegundos (SEMTECH, 2000). Resistores VDR operam diminuindo sua resistência quando a tensão em seus terminais atinge um limite de tensão, criando um caminho de menor resistência para os transientes (FREESCALE, 2005).

**Figura 17 - Aplicação de fusível resetável e supressores de ruído na alimentação, em ponte "H" e em barramento de comunicação.**



Fonte: própria.

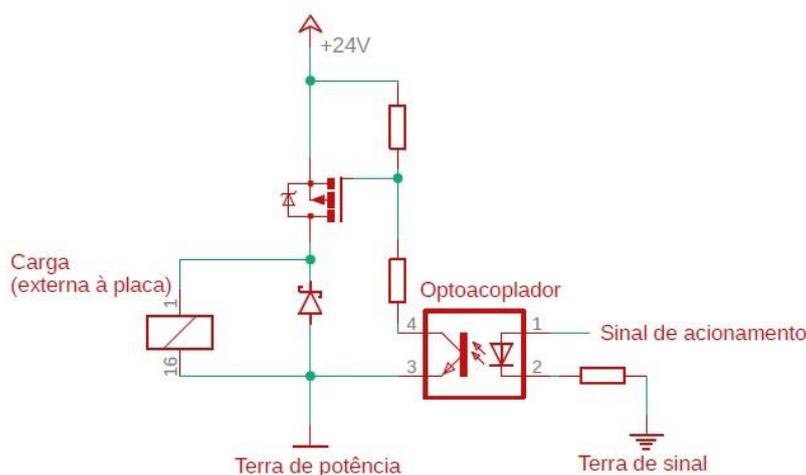
No desenvolvimento dos equipamentos TVS e VDR foram utilizados na proteção de ponte "H", na proteção de barramentos de comunicação e na supressão de ruídos provenientes da alimentação. A Figura 17 mostra a utilização destes componentes.

### 3.1.1.3 Optoacopladores

Optoacopladores são componentes eletrônicos que permitem o acionamento de cargas por meio de luz, sem necessidade de contato. Estes componentes são constituídos por um LED em sua porta de acionamento e por um fototransistor na porta de saída.

No desenvolvimento dos equipamentos eletrônicos estes componentes são utilizados para separar o terra do circuito de potência dos terras dos circuitos de sinal, sendo que os mesmos acabam se unindo apenas próximo à bateria que os alimenta, a pelo menos 1m de distância. A Figura 18 mostra como o optoacoplador é inserido no circuito.

**Figura 18 - Optoacoplador para acionamento de cargas.**



Fonte: própria.

### 3.1.1.4 Layout das placas

Para minimizar os problemas com EMI é importante que o layout das placas de circuito impresso seja desenvolvido com alguns cuidados. As figuras 21, 22 e 23 mostram os cuidados envolvidos no desenvolvimento de cada uma das placas.

#### a) Número de camadas (layers)

As placas desenvolvidas são todas com duas faces, pois não há necessidade de alta densidade de componentes, as frequências dos sinais não são muito elevadas e o custo de produção é menor.

### b) Circuitos reguladores de tensão

Reguladores de tensão devem ter em sua saída capacitores de desacoplamento adequados, o mais próximo possível do componente, pois a distância entre o regulador e a carga pode causar um efeito indutivo e causar oscilação interna no regulador. Tipicamente capacitores de 0,1 $\mu$ F são posicionados próximos à entrada e à saída do regulador para evitar a oscilação e capacitores maiores (da ordem de 100 $\mu$ F ou maiores) são utilizados para reduzir o *ripple* na saída (FREESCALE, 2005).

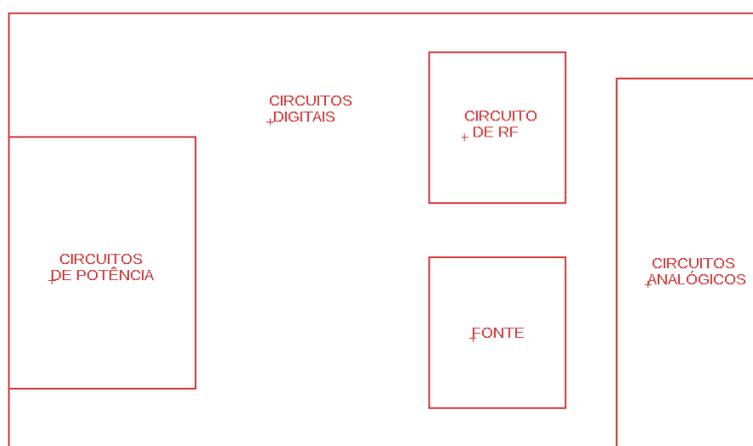
### c) Desacoplamento local

Cada circuito integrado possui próximo a seus pinos de alimentação um capacitor de valor alto e um capacitor de valor mais baixo, tipicamente 10 $\mu$ F e 100nF. Esses capacitores auxiliam a eliminar *ripple*, fornecem energia em demandas de potência e eliminam ruídos de chaveamento (MONTROSE, 2000). Apesar desta recomendação ser para circuitos digitais, os circuitos analógicos também receberam estes capacitores.

### d) Segmentação

A segmentação é separação física dos diferentes tipos de circuitos, mantendo as correntes envolvidas confinadas a pontos específicos da placa (FREESCALE, 2005). Os circuitos foram separados basicamente em cinco blocos e cada equipamento não necessariamente possui todos: fonte, circuitos digitais, circuitos analógicos, circuitos de RF e circuitos de potência. A Figura 19 mostra como é realizada a segmentação.

**Figura 19 - Segmentação.**

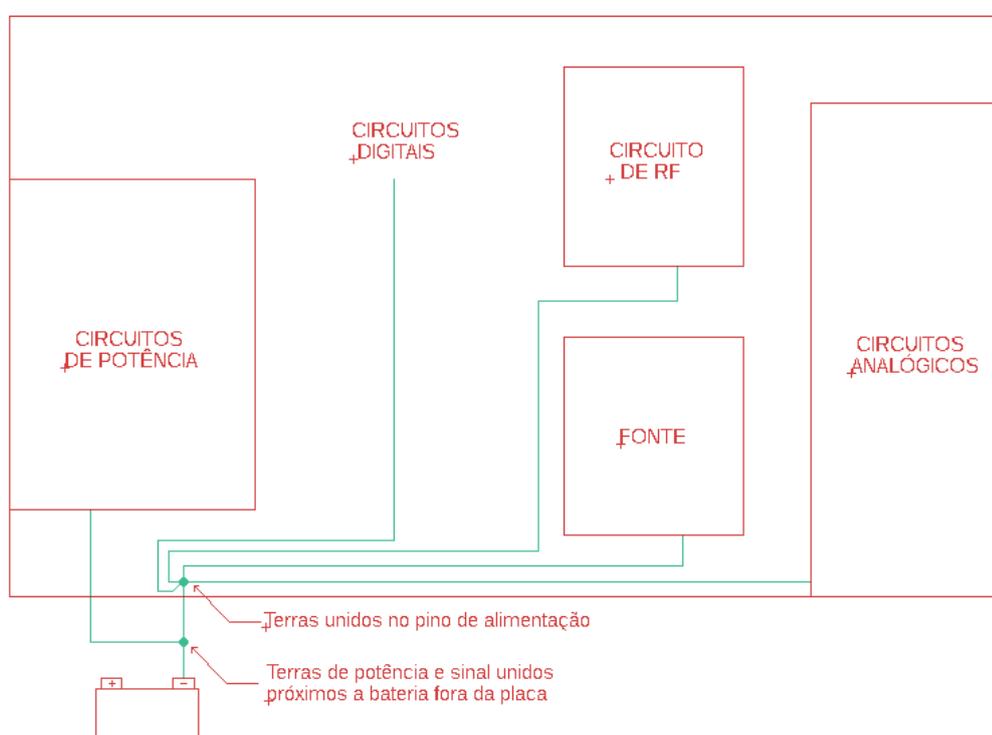


Fonte: própria.

e) Aterramento (*grounding*)

O método de aterramento utilizado nas placas é o *Single-Point Grounding*. Este método de aterramento é utilizado em circuitos com frequências abaixo de 1MHz. Este tipo de aterramento é utilizado principalmente em circuitos de áudio e instrumentação analógica, como é o caso do projeto em questão (MONTROSE, 2000). Além da utilização de um pino único de terra no conector de alimentação onde os terras dos circuitos digitais e analógicos se encontram, o terra do circuito de potência possui um pino separado e só se une aos demais terras na bateria de alimentação do equipamento. Cada um dos terras também está conectado a um plano diferente na placa. A Figura 20 mostra como é realizado o aterramento nas placas.

**Figura 20 - Single-point Grounding.**

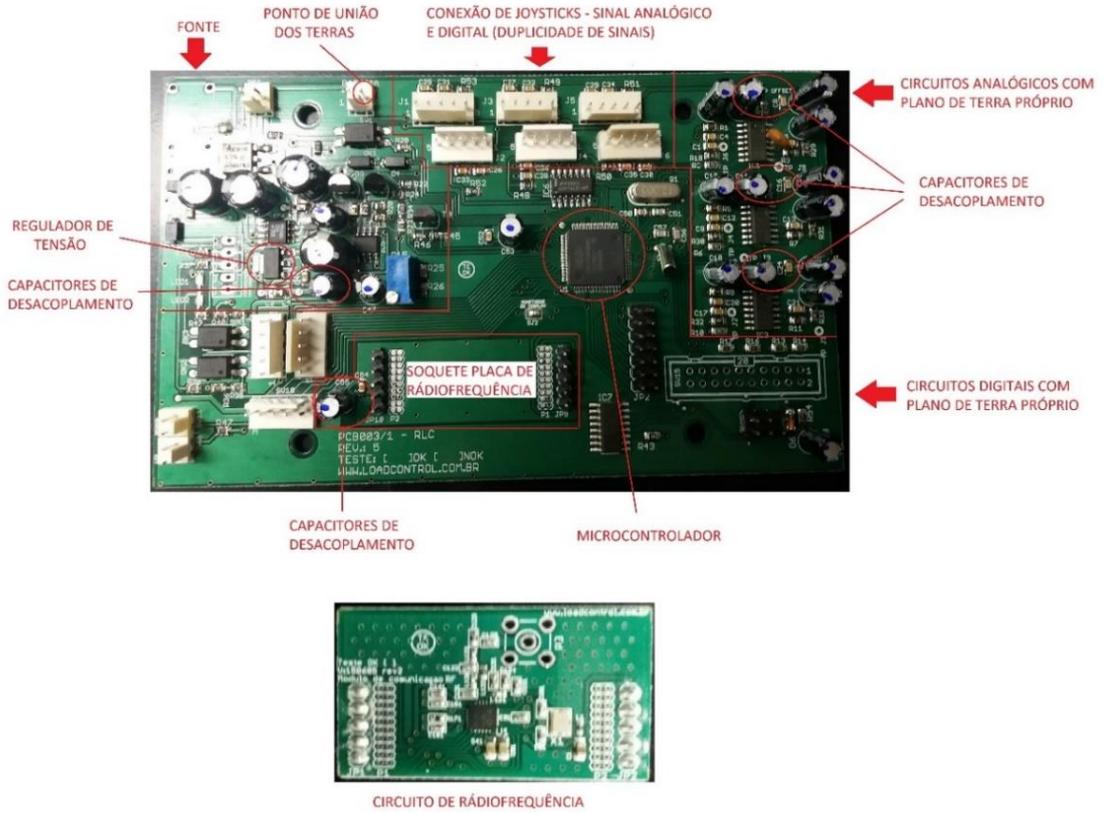


Fonte: própria.

f) Duplicidade de sinais

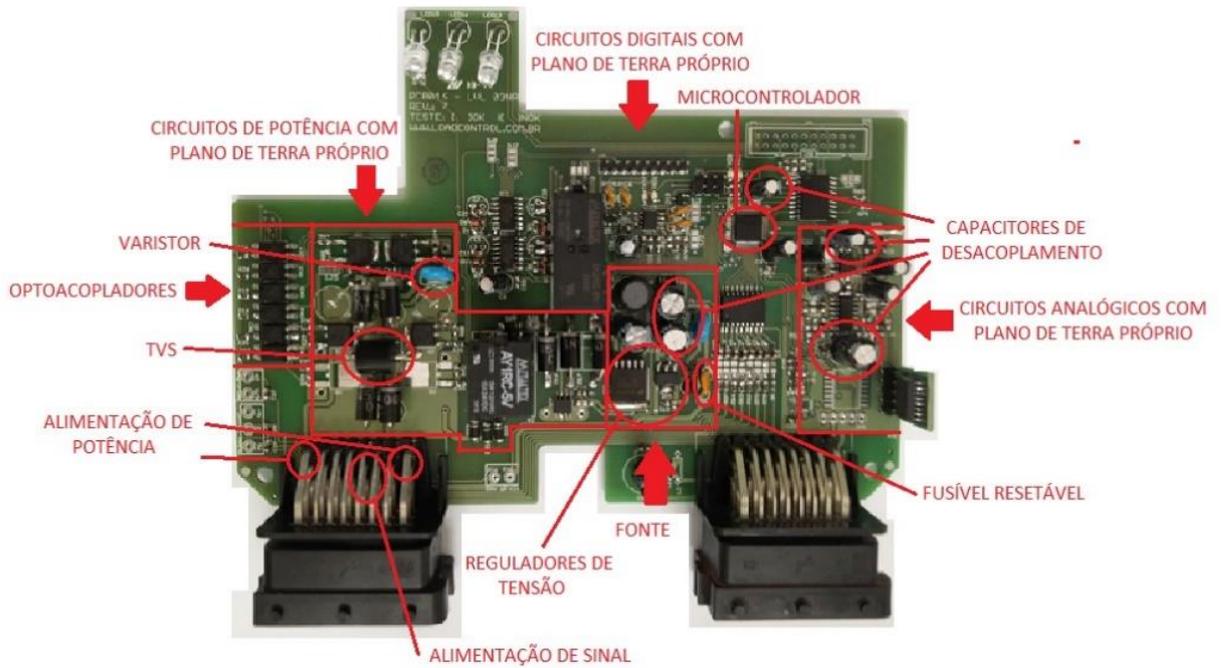
Sinais críticos nas placas, como os dos manípulos (*joysticks*) do controle remoto, responsáveis pelo acionamento do equipamento de guindar, possuem sinal analógico que controla a velocidade do movimento e um sinal digital que verifica se o manípulo realmente foi acionado. Esta duplicidade, portanto, é realizada por um sinal analógico e um digital, pois a forma como uma interferência afeta os dois circuitos, em teoria, é diferente.

**Figura 21 - Placas do controle remoto.**



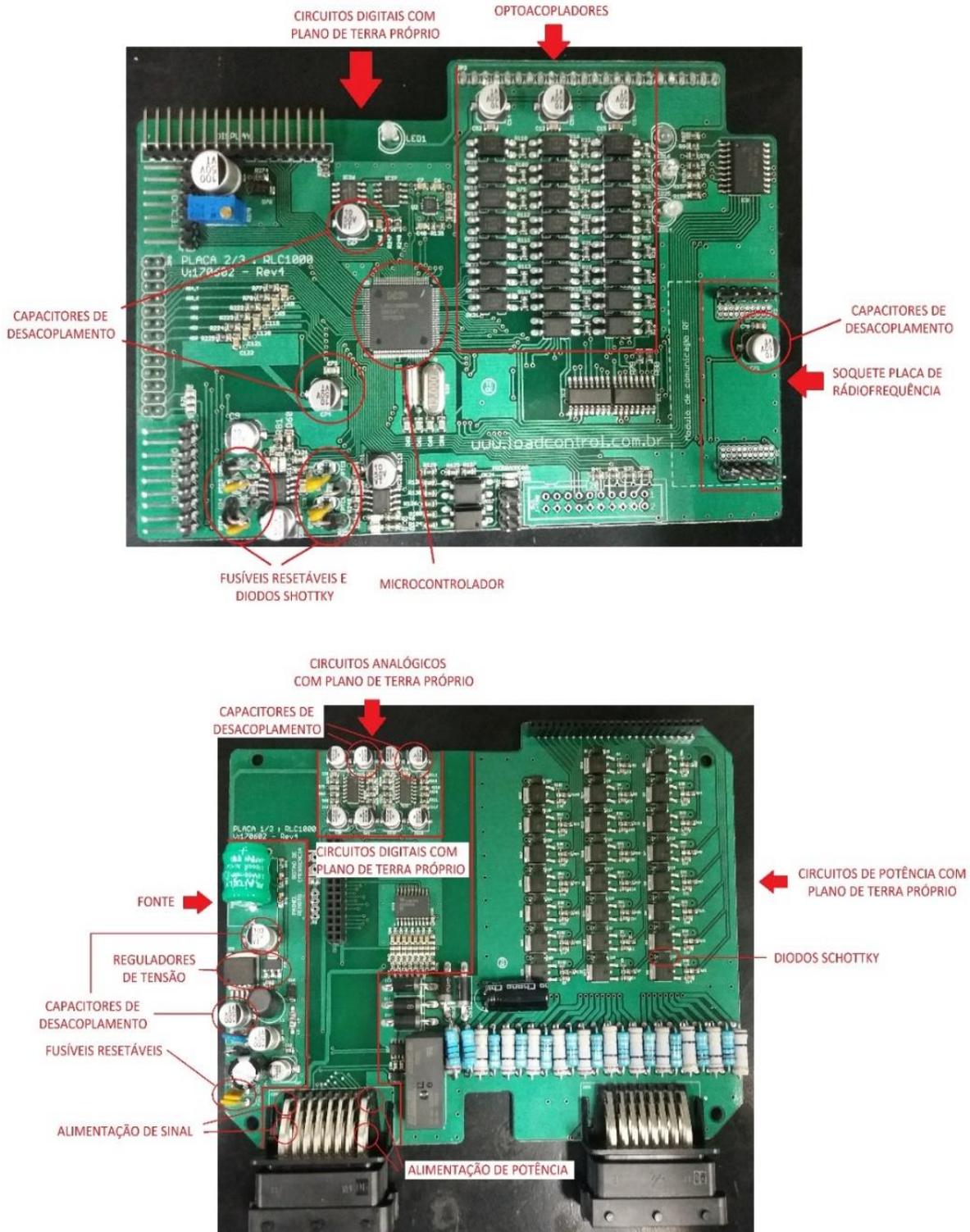
Fonte: própria.

**Figura 22 - Placa da Central de nivelamento.**



Fonte: própria.

Figura 23 - Placas do Receptor do controle.



Fonte: própria.

## **3.1.2 Outros componentes dos equipamentos**

### **3.1.2.1 Caixas**

As caixas utilizadas nos equipamentos são todas plásticas. O principal motivo de utilizar este tipo de invólucro é a ergonomia na utilização, o grau de proteção contra intempéries e vedação contra entrada de água (IP65). Caixas metálicas além de serem mais difíceis de confeccionar com o grau de proteção necessário aumentariam a temperatura interna do equipamento, visto que os mesmos ficam expostos à radiação solar. A principal desvantagem da utilização de caixa plástica é o fato de que as mesmas não funcionam como uma barreira para RF, no entanto, por serem plásticas, não conduzem ESD às placas.

### **3.1.2.2 Botões, chaves e manípulos (joysticks)**

A utilização de botões, chaves e *joysticks* seguiu o critério de condução de ESD. Todas componentes utilizados possuem acionamentos plásticos e especificamente as chaves ainda possuem uma capa protetora feita em silicone para proteção contra água.

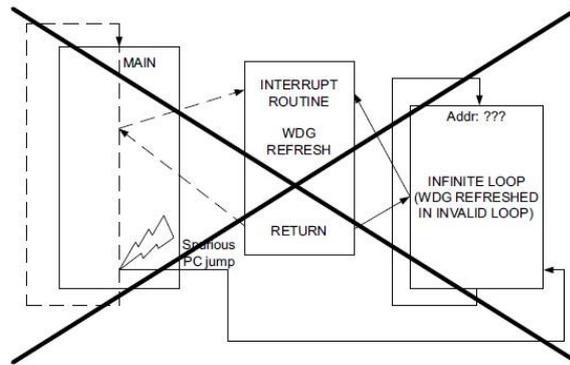
## **3.1.3 Firmware**

Realizar o desenvolvimento do *Firmware* dos equipamentos levando em conta questões de EMC melhora o desempenho do sistema e normalmente é menos custoso de implementar que soluções via *Hardware*. Distúrbios nos circuitos analógicos e digitais podem ser gerenciados via *Firmware* (STMICROELECTRONICS, 2014). As técnicas utilizadas são descritas a seguir.

### 3.1.3.1 Watchdog Timer (WDT)

O *Watchdog* é uma das ferramentas mais eficazes contra falhas no microcontrolador. Esta funcionalidade é um contador que ao fim da contagem reinicia o microcontrolador e a maneira de evitar que isto aconteça é periodicamente atualizar este contador. Para um correto funcionamento é necessário que a função *Watchdog* seja configurada o mais rápido possível após o reset do microcontrolador e que seu valor não seja atualizado em rotinas de interrupção (STMICROELECTRONICS, 2014). A Figura 24 mostra porque o *Watchdog* não deve ser atualizado em uma rotina de interrupção. Todos os equipamentos eletrônicos no desenvolvimento proposto utilizam este princípio.

**Figura 24- Watchdog timer atualizado em rotina de interrupção.**

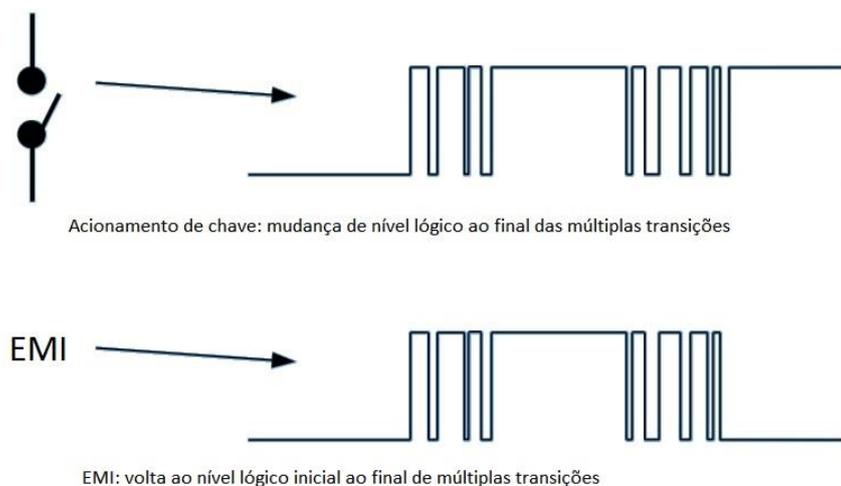


Fonte: STMICROELECTRONICS, 2014.

### 3.1.3.2 Debouncing

Chaves e botões ao serem acionados não fecham o contato diretamente e isto causa múltiplas transições de sinal durante um único acionamento dos mesmos antes da mudança de nível lógico. EMI pode causar o mesmo efeito transitório nas entradas, gerando pulsos e ruídos que poderiam ser entendidos como acionamentos de chaves, se não houver tratamento do sinal adequadamente. A aplicação de rotinas de *debouncing* ajuda a evitar que a EMI seja interpretada como um acionamento de entradas digitais no microcontrolador (GANSSLE, 2008), e por isso não foi implementada apenas em botões e chaves, mas em todas as entradas digitais dos microcontroladores. A Figura 25 mostra o comportamento esperado de uma chave e de um sinal gerado por EMI. Todos os equipamentos eletrônicos no desenvolvimento proposto utilizam este princípio.

**Figura 25 - Comparação de sinais de acionamento de chaves e de EMI.**



Fonte: própria.

### **3.1.3.3 Realização de médias de leituras nos conversores analógicos para digital (AD)**

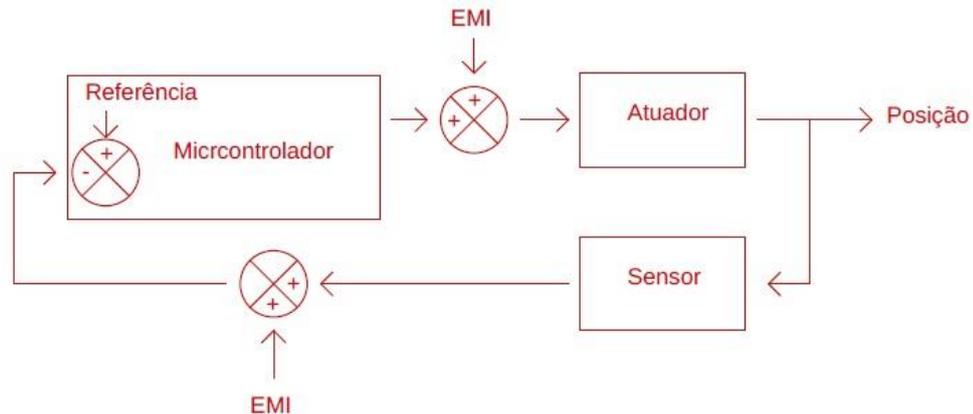
As leituras dos canais AD dos microcontroladores são realizadas periodicamente e é realizada uma média destas leituras para evitar potenciais erros provenientes de EMI (STMICROELECTRONICS, 2014). Em todos os equipamentos eletrônicos propostos foi utilizado este princípio. Por se tratar de um método que causa atraso de atualização de valores, para cada tipo de sinal analógico foi determinado um número de amostras diferente para se obter uma resposta temporal adequada.

### **3.1.3.4 Verificação de sistema de controle de malha fechada**

Em sistemas de controle de malha fechada informações sobre como a saída do processo evolui são utilizadas para determinar o sinal de controle a ser aplicado no processo a cada instante. Essa informação é fornecida por um sensor que normalmente converte a grandeza física em sinal elétrico. O sinal do sensor é então comparado com um sinal de referência e a diferença entre o sinal do sensor e o de referência é utilizado para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo (BAZANELLA, et al, 2005).

A principal utilização de sistema de controle de malha fechada no desenvolvimento proposto está na central de nivelamento, sistema mostrado na Figura 26. Neste sistema temos internamente configurado no microcontrolador o sinal de referência, um sensor fornecendo o sinal de posição ao microcontrolador e o microcontrolador enviando sinais a um atuador para correção desta posição. Como no microcontrolador existe uma predição do sinal que o sensor de posição deve fornecer quando enviado sinal para o atuador, qualquer sinal diferente do esperado faz com que o microcontrolador cesse o envio de sinal ao atuador, fazendo-se necessário a intervenção do operador do sistema para normalização do funcionamento. Esta função evita não apenas os efeitos de EMI, mas também de qualquer outra falha que possa ocasionar erros de posição no cesto.

**Figura 26 - Sistema realimentado de posicionamento do nivelador do cesto.**



Fonte: própria.

### 3.1.3.5 Cyclic Redundancy Check (CRC)

Em sistemas onde é necessário a comunicação de dados, é preciso verificar a integridade da informação enviada e recebida. Para realizar essa verificação foram criados mecanismos baseados em cálculos envolvendo os dados transmitidos, comumente chamado de *Checksum*. Este valor calculado é anexado a mensagem com os dados e enviado ao destinatário. O destinatário recebe os dados, recalcula o valor e compara com o valor recebido junto aos dados. Se o valor enviado junto com a mensagem e o valor calculado no destinatário forem diferentes houve erro durante a transmissão. O método *Checksum* mais utilizado para a verificação da integridade de dados é o *Cyclic Redundancy Check (CRC)*. Este método não é apenas uma simples soma dos dados enviados, mas um método de detecção de erros utilizando uma divisão polinomial, realizado desta forma para evitar que alterações

complementares em bits da mensagem (por exemplo, um bit “0” alterado para “1” e um bit “1” alterado para “0” na mesma mensagem) façam uma mensagem com erros ser reconhecida como correta (MAXINO, et al, 2009).

A verificação por CRC no desenvolvimento dos equipamentos ocorre na transmissão dos dados do controle remoto à central eletrônica no equipamento de guindar. Nesta comunicação duas etapas de CRC foram utilizadas: a primeira etapa calculada dentro do *firmware* desenvolvido para o controle remoto, ao enviar o pacote de dados ao circuito integrado gerador de RF, e a segunda etapa é gerada automaticamente no próprio circuito integrado responsável pelo envio de dados via RF. A Figura 27 mostra como é utilizado o CRC. No receptor do controle, o circuito integrado receptor de RF verifica automaticamente o CRC gerado pelo transmissor de RF e o microcontrolador do receptor do controle verifica o CRC gerado no controle remoto. O CRC utilizado no *firmware* é de 16 bits, com o polinômio CRC-CCITT ( $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ ). Com a aplicação deste polinômio a chance de um erro não ser detectado é 1 em 65536 (PRESS, et al, 2007). O CRC utilizado no circuito integrado gerador de RF também é de 16 bits, no entanto não há especificação do polinômio utilizado nesta verificação (TEXAS, 2020). Caso uma mensagem, tanto no circuito integrado de RF, como no microcontrolador, seja detectada com falhas a mesma é descartada. Caso o receptor do controle não receba pacotes válidos durante 0,8 segundos os dados recebidos em pacotes posteriores não realizam função na central, sendo necessário que o receptor do controle receba um pacote de reinicialização para tornar a realizar funções de movimentação.

**Figura 27- Pacote de dados com endereço e CRC.**



Fonte: própria.

### 3.1.3.6 Endereçamento

O conjunto controle remoto e o receptor do controle funcionam em par casado, ou seja, o transmissor de um controle remoto somente realiza movimentos no receptor se ambos possuírem o mesmo endereço interno. Este recurso possibilita a operação de até trinta e quatro

conjuntos de equipamentos iguais em locais próximos sem interferência mútua. O registro de endereço é armazenado no microcontrolador do controle remoto e no receptor do controle e na inicialização de ambos é enviada ao circuito integrado de RF, que utiliza este endereço no envio de dados. A Figura 27 mostra a utilização do endereçamento no pacote de dados.

### **3.1.3.7 Duplicidade de registros na RAM**

Para evitar que alterações em registradores da memória RAM causem mau funcionamento foram implementadas redundância de informação em valores considerados essenciais para correta operação do equipamento. Sempre que necessário utilizar as informações essenciais, os valores dos dois registradores são comparados, de forma que uma diferença de valores faz com que ou os valores tentem ser restaurados sem afetar a operação ou é necessário intervenção do operador no equipamento (reinicialização).

## **3.2 LANÇA ISOLADA**

O desenvolvimento da lança isolada necessita atender os dois aspectos exigidos pela NBR 16092:2018, a isolação e o fator de segurança. Para atingir estes requisitos, foi construído um braço com seção retangular construído de plástico reforçado com fibra de vidro com 2,8m de comprimento, sendo que este material é o responsável pela isolação. Para acoplamento do braço foram colocados insertos metálicos em ambas as extremidades do mesmo, de modo a permitir o acoplamento do equipamento à lança do guindaste.

## 4 RESULTADOS DOS ENSAIOS

### 4.1 EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

Os equipamentos eletrônicos foram ensaiados em laboratório especializado localizado no estado de Santa Catarina.

Para realização dos ensaios referentes à emissões da Anatel foi utilizado um analisador de espectro, conectado ao ponto de emissão de RF.

Para os ensaios de imunidade à descargas eletrostáticas foi utilizado um aplicador portátil e quando da necessidade de aplicação das descargas no HCP e VCP o aplicador foi conectado eletricamente a estes planos e então acionado. Nos ensaios foram aplicadas as tensões do nível 3 de ensaio.

Para os ensaios de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados foi utilizada uma célula Gigahertz Transverso Eletromagnético (GTEM), a qual é considerada um modelo híbrido das câmaras transversal-eletromagnética (TEM) e anecóicas e pode ser usada tanto para medidas de interferência quanto para testes de susceptibilidade eletromagnética (WEINZIERL, 2004). A Figura 28 mostra este tipo de câmara. O sinal radiado pela GTEM foi o mesmo apresentado pela norma respectiva ao nível 3 de ensaio.

Para os ensaios de Imunidade à perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência foram utilizados uma CDN para aplicação nos cabos de alimentação e um alicate eletromagnético para aplicação de perturbação nos demais cabos. O nível de ensaio nos cabos de alimentação foi o nível 3 e nos demais cabos nível 2.

Quanto aos resultados obtidos nos ensaios, nas seções seguintes serão descritos os mesmos.

**Figura 28 - Célula GTEM.**



Fonte: própria.

#### 4.1.1 Central de nivelamento

##### 4.1.1.1 Ensaio de imunidade à descarga eletrostática

Para aplicação de descarga eletrostática foram definidos os pontos, conforme mostra a Figura 29.

**Figura 29 - Pontos de aplicação da Central de nivelamento.**



Fonte: própria.

Para a aplicação de descarga no HCP e VCP, com quaisquer das faces do equipamento voltadas para o plano o equipamento operou corretamente quando o potencial do plano foi elevado a 6kV. Para os mesmos planos e faces com o potencial em -6kV houve desligamento do equipamento enquanto o potencial permanecia no plano, voltando o equipamento a funcionar assim que o potencial foi removido.

Para a aplicação de descarga diretamente em pontos condutores do equipamento, quando aplicado +6kV no ponto 10 houve desligamento do equipamento enquanto a descarga era aplicada, voltando a funcionar assim que removida. Para a aplicação de -6kV houve desligamento do equipamento quando a descarga foi aplicada nos pontos 3,8 e 10, voltando o equipamento a funcionar assim que cessada a descarga.

Para descarga em partes não condutoras foram aplicadas as tensões de -8kV e +8kV. A aplicação desta descarga não ocasionou problemas de funcionamento no equipamento. A Tabela 7 resume todos os resultados obtidos no ensaio.

**Tabela 7 – Resultado do teste de descarga eletrostática na Central de nivelamento.**

Ponto ou face	HCP		VCP		CONDUTORES		NÃO CONDUTORES	
	+6kV	-6kV	+6kV	-6kV	+6kV	-6kV	+8kV	-8kV
1	-	-	-	-	ok	ok	-	-
2	-	-	-	-	ok	ok	-	-
3	-	-	-	-	ok	ok	-	-
4	-	-	-	-	ok	ok	-	-
5	-	-	-	-	ok	ok	-	-
6	-	-	-	-	ok	ok	-	-
7	-	-	-	-	ok	ok	-	-
8	-	-	-	-	ok	ok	-	-
9	-	-	-	-	ok	ok	-	-
10	-	-	-	-	desligou	desligou	-	-
Superior	-	-	ok	desligou	-	-	ok	ok
Inferior	-	-	ok	desligou	-	-	ok	ok
Direita	-	-	ok	desligou	-	-	ok	ok
Esquerda	-	-	ok	desligou	-	-	ok	ok
Frontal	ok	desligou	ok	desligou	-	-	ok	ok
Traseira	ok	desligou	ok	desligou	-	-	ok	ok

Com os resultados obtidos a classificação da Central de nivelamento em termos de perda ou degradação de desempenho é:

*“Perda temporária de função ou degradação do desempenho que cessa depois que a perturbação cessa, e da qual o equipamento sob ensaio recupera seu desempenho normal, sem intervenção do operador.”*

#### 4.1.1.2 Ensaio imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados

Neste ensaio o equipamento foi submetido em todas as suas faces, conforme definido na Figura 29, a aplicação de radiofrequência e não houve mau funcionamento sob nenhuma condição. A Tabela 8 mostra os resultados obtidos.

Com os resultados obtidos a classificação da Central de nivelamento em termos de perda ou degradação de desempenho é:

*“Desempenho normal dentro dos limites especificados pelo fabricante, solicitante ou comprador.”*

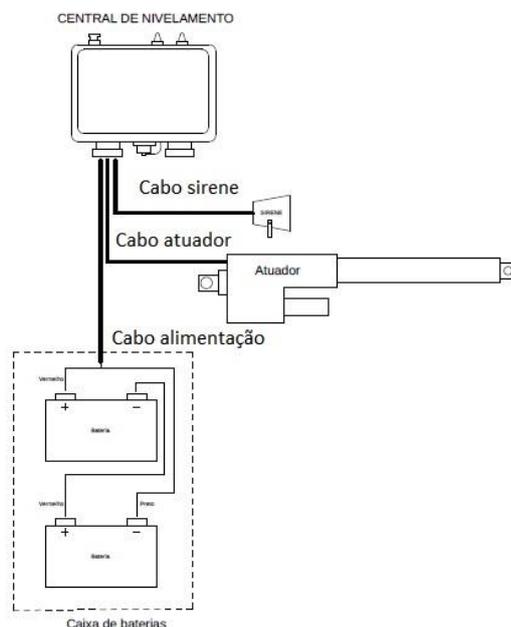
**Tabela 8 - Resultado do teste de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados na Central de nivelamento.**

Face	Faixa de frequência: 80MHz a 1GHz
	Intensidade de campo: 10 V/m
Superior	ok
Inferior	ok
Direita	ok
Esquerda	ok
Frontal	ok
Traseira	ok

#### 4.1.1.3 Ensaio de Imunidade à perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência

Para o ensaio de imunidade induzida em cabos na Central de nivelamento, três cabos foram considerados para aplicação: o cabo de alimentação, o cabo de acionamento da sirene e o cabo de acionamento do atuador, conforme mostra a Figura 30. Em nenhuma das aplicações houve mau funcionamento do equipamento. A Tabela 9 mostra os resultados obtidos.

**Figura 30 - Cabos da Central de nivelamento.**



Fonte: própria.

**Tabela 9 - Resultado do Ensaio de Imunidade à perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência na Central de nivelamento.**

Cabo	Aplicador: CDN	Aplicador: Alicete Eletromagnético
	Faixa de frequência: 150kHz a 1GHz	Faixa de frequência: 150kHz a 1GHz
	Uo: 10 V	Uo: 3 V
Alimentação	ok	-
Sirene	-	ok
Atuador	-	ok

Com os resultados obtidos a classificação da Central de nivelamento em termos de perda ou degradação de desempenho é:

*“Desempenho normal dentro dos limites especificados pelo fabricante, solicitante ou comprador.”*

#### 4.1.2 Controle Remoto

##### 4.1.2.1 Ensaio Anatel Potência radiada da portadora e emissões espúrias

Para realizar as verificações de emissões do equipamento, o ponto de conexão da antena do transmissor foi conectado ao analisador de espectro e realizadas as medições de potência e frequências envolvidas. Primeiramente foram realizadas as medições de potência da portadora

em três canais de operação do controle remoto, sendo que todas as frequências analisadas apresentaram emissões de potência dentro das especificações da Anatel. Também no canal intermediário de operação foram analisadas as emissões das harmônicas da portadora, indicando que não há emissão de espúrios além dos limites estabelecidos pela Anatel nas mesmas. A Tabela 10 mostra os resultados obtidos nas medições.

**Tabela 10 - Resultado das medições do ensaio Anatel.**

Canal	Frequência portadora (MHz)	Potência	Atenuação 2ª harmônica	Atenuação 3ª harmônica
0	432.9971	9.72mW	-	-
17	434.9742	9.73mW	-43 dBm	-34 dBm
33	434.3754	9.77mW	-	-

#### 4.1.2.2 Ensaio de imunidade à descarga eletrostática

Para aplicação de descarga eletrostática foram definidos os pontos de aplicação, conforme mostra a Figura 31. Para este ensaio o equipamento foi ligado e mantido em comunicação com o receptor do controle para verificar se não ocorreria perda de sinal ou algum mau funcionamento que acionasse alguma das saídas.

**Figura 31 - Pontos de aplicação do Controle remoto**



Fonte: própria.

Para a aplicação de descarga no HCP e VCP, com quaisquer das faces do equipamento voltadas para o plano o equipamento operou corretamente quando aplicados os potenciais de -6kV e +6kV.

Para a aplicação de descarga diretamente em pontos condutores do equipamento o equipamento com tesões de -6kV e +6kV o equipamento permaneceu funcionando corretamente.

Para descarga em partes não condutoras foram aplicadas as tensões de -8kV e +8kV. A aplicação desta descarga também não ocasionou problemas de funcionamento no equipamento. A Tabela 11 resume todos os resultados obtidos no ensaio.

Com os resultados obtidos a classificação do Controle remoto em termos de perda ou degradação de desempenho é:

*“Desempenho normal dentro dos limites especificados pelo fabricante, solicitante ou comprador.”*

**Tabela 11 - Resultado do teste de descarga eletrostática no Controle remoto.**

Ponto ou face	HCP		VCP		CONDUTORES		NÃO CONDUTORES	
	+6kV	-6kV	+6kV	-6kV	+6kV	-6kV	+8kV	-8kV
1	-	-	-	-	ok	ok	-	-
2	-	-	-	-	ok	ok	-	-
3	-	-	-	-	ok	ok	-	-
...	-	-	-	-	ok	ok	-	-
42	-	-	-	-	ok	ok	-	-
43	-	-	-	-	ok	ok	-	-
44	-	-	-	-	ok	ok	-	-
Superior	-	-	ok	ok	-	-	ok	ok
Inferior	-	-	ok	ok	-	-	ok	ok
Direita	-	-	ok	ok	-	-	ok	ok
Esquerda	-	-	ok	ok	-	-	ok	ok
Frontal	ok	ok	ok	ok	-	-	ok	ok
Traseira	ok	ok	ok	ok	-	-	ok	ok

#### **4.1.2.3 Ensaio imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados**

Neste ensaio o equipamento foi submetido a perturbação em todas as suas faces, conforme definido na Figura 31. Para este ensaio o equipamento foi ligado e mantido em comunicação com o receptor do controle para verificar se não ocorreria perda de sinal ou algum mau funcionamento que acionasse alguma das saídas. A aplicação de radiofrequência na face frontal, na faixa de 470MHz a 530MHz causou acionamentos em chaves digitais de acionamentos, e em valores analógicos dos joysticks. Ambas as situações foram corrigidas

durante o teste, nas chaves digitais com acréscimo de capacitores próximos as respectivas entradas no microcontrolador e nos joysticks a troca de cabos com conectores que estavam com mau contato eliminaram o problema. A Tabela 12 mostra os resultados obtidos.

Com os resultados obtidos a classificação do Controle remoto em termos de perda ou degradação de desempenho é:

*“Desempenho normal dentro dos limites especificados pelo fabricante, solicitante ou comprador.”*

**Tabela 12 - Resultado do teste de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados no Controle remoto.**

Face	Faixa de frequência: 80MHz a 470MHz	Faixa de frequência: 470MHz a 530MHz	Faixa de frequência: 530MHz a 1GHz
	Campo: 10 V/m	Campo: 10 V/m	Campo: 10 V/m
Superior	ok	ok	ok
Inferior	ok	ok	ok
Direita	ok	ok	ok
Esquerda	ok	ok	ok
Frontal	ok	ok - após correções de <i>hardware</i>	ok
Traseira	ok	ok	ok

#### 4.1.3 Receptor do controle

Para os ensaios do Receptor do controle, o mesmo sempre foi mantido em comunicação com o Controle remoto para verificar se não ocorreria perda de sinal, algum mau funcionamento que acionasse alguma das saídas ou ainda perda de comunicação.

##### 4.1.3.1 Ensaio de imunidade à descarga eletrostática

Para aplicação de descarga eletrostática foram definidos os pontos de aplicação, conforme mostra a Figura 32.

**Figura 32 - Pontos de aplicação do Receptor do controle.**



Fonte: própria.

Para a aplicação de descarga no VCP, com quaisquer das faces do equipamento voltadas para o plano o equipamento operou corretamente quando o potencial  $-6\text{kV}$  e  $+6\text{kV}$  foi aplicado. Para o plano HCP para a face frontal e traseira com o potencial em  $-6\text{kV}$  e  $+6\text{kV}$  houve perda de informações no display do equipamento, retornando ao normal após o equipamento ser reiniciado.

Para a aplicação de descarga diretamente em pontos condutores do equipamento, quando aplicado  $+6\text{kV}$  e  $-6\text{kV}$  no ponto 10 houve a mesma perda de informações no display e perda de comunicação, retornando ao normal após o equipamento ser reiniciado. No ponto 2, com aplicação de  $-6\text{kV}$  houve perda de informações no display.

Para descarga em partes não condutoras foram aplicadas as tensões de  $-8\text{kV}$  e  $+8\text{kV}$ . A aplicação desta descarga próxima ao display, na face frontal, ocasionou a mesma perda de informações no display retornando ao normal após o equipamento ser reiniciado. A Tabela 13 resume todos os resultados obtidos no ensaio.

Com os resultados obtidos a classificação do Receptor do controle em termos de perda ou degradação de desempenho é:

*“Perda temporária de função ou degradação do desempenho, cuja correção exige a intervenção do operador.”*

Apesar da classificação exigir a intervenção do operador, não houve mau funcionamento que ocasionasse risco ao operador, pois apenas informações visuais foram perdidas, e a comunicação é reestabelecida assim que cessa a perturbação.

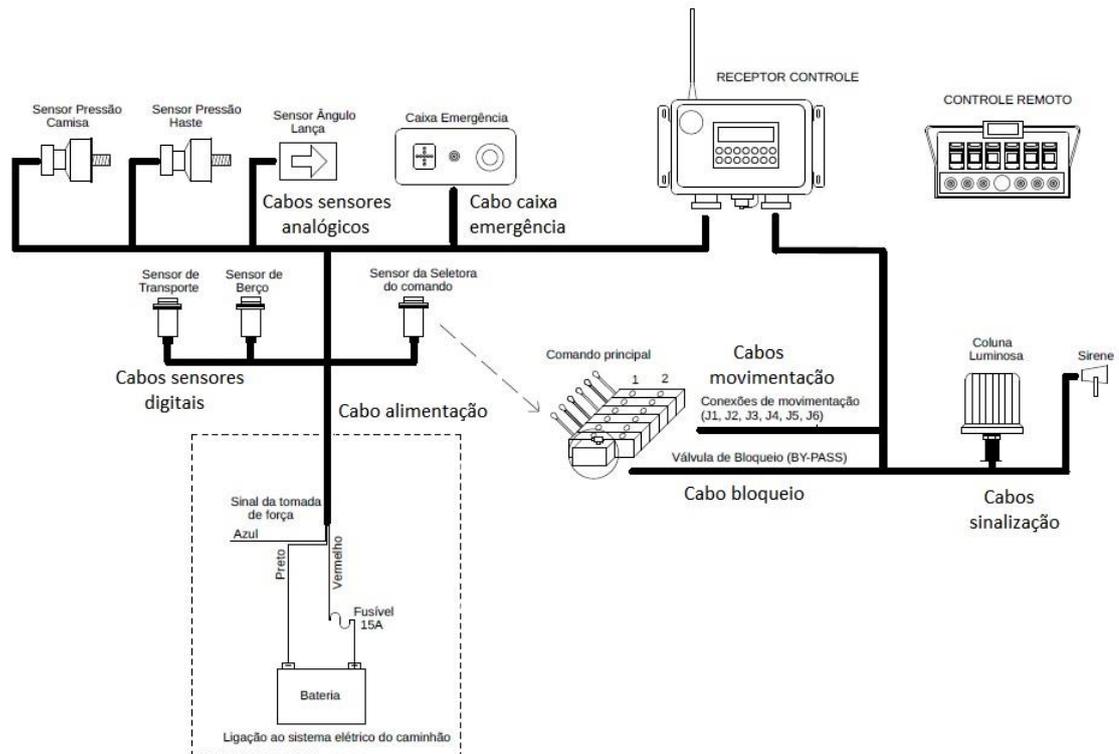
**Tabela 13 – Resultado do teste de descarga eletrostática no Receptor do controle.**

Ponto ou face	HCP		VCP		CONDUTORES		NÃO CONDUTORES	
	+6kV	-6kV	+6kV	-6kV	+6kV	-6kV	+8kV	-8kV
1	-	-	-	-	ok	ok	-	-
2	-	-	-	-	ok	perda display	-	-
3	-	-	-	-	ok	ok	-	-
4	-	-	-	-	ok	ok	-	-
5	-	-	-	-	ok	ok	-	-
6	-	-	-	-	ok	ok	-	-
7	-	-	-	-	ok	ok	-	-
8	-	-	-	-	ok	ok	-	-
9	-	-	-	-	ok	ok	-	-
10	-	-	-	-	perda display e comunicação	perda display e comunicação	-	-
11	-	-	-	-	-	-	ok	ok
Superior	-	-	ok	ok	-	-	ok	ok
Inferior	-	-	ok	ok	-	-	ok	ok
Direita	-	-	ok	ok	-	-	ok	ok
Esquerda	-	-	ok	ok	-	-	ok	ok
Frontal	perda display	perda display	ok	ok	-	-	perda display	perda display
Traseira	perda display	perda display	ok	ok	-	-	ok	ok

#### **4.1.3.2 Ensaio de Imunidade à perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência**

Para o ensaio de imunidade induzida em cabos no Receptor do controle, dezessete cabos foram considerados para aplicação, mas resumiu-se suas definições em sete tipos: cabo de alimentação, cabos de sinalização, o cabo de bloqueio, cabos de movimentação, cabo da caixa de emergência, cabo dos sensores analógicos e cabos dos sensores digitais, conforme mostra a Figura 33.

**Figura 33 - Cabos do Receptor do controle.**



Fonte: própria.

Na aplicação de radiofrequência no cabo de alimentação houve perda de comunicação na frequência entre 2,4 MHz e 2,9 MHz com o Controle remoto enquanto a perturbação era aplicada. Desta forma, foi adicionado um indutor no negativo de alimentação de sinal e um capacitor de 1nF após o indutor conectado também ao positivo de sinal. Desta forma a perda de comunicação cessou. Nas aplicações de radiofrequência no cabo de bloqueio e nos cabos de movimentação, na faixa de frequência entre 4,73 MHz a 4,92 MHz também houve perda de comunicação. Nos demais cabos não houve qualquer interferência durante o teste. Em todos os casos a comunicação é reestabelecida assim que a perturbação cessa. A Tabela 14 mostra os resultados obtidos durante o teste.

Com os resultados obtidos a classificação do Receptor do controle em termos de perda ou degradação de desempenho é:

*“Perda temporária de função ou degradação do desempenho que cessa depois que a perturbação cessa, e da qual o equipamento sob ensaio recupera seu desempenho normal, sem intervenção do operador.”*

**Tabela 14 - Resultado do Ensaio de Imunidade à perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência no Receptor do Controle.**

Cabo	Aplicador: CDN	Aplicador: CDN	Aplicador: CDN	Aplicador: Alicate Eletromagnético	Aplicador: Alicate Eletromagnético	Aplicador: Alicate Eletromagnético
	Faixa de frequência: 150kHz a 2,5MHz	Faixa de frequência: 2,5MHz a 2,9MHz	Faixa de frequência: 2,9MHz a 1GHz	Faixa de frequência: 150kHz a 4,73MHz	Faixa de frequência: 4,73MHz a 4,92MHz	Faixa de frequência: 4,92MHz a 1GHz
	Uo: 10 V	Uo: 10 V	Uo: 10 V	Uo: 3 V	Uo: 3 V	Uo: 3 V
Alimentação	ok	ok - após correções de <i>hardware</i> aplicadas	ok	-	-	-
Sinalização	-	-	-	ok	ok	ok
Movimentação	-	-	-	ok	perda comunicação	perda comunicação
Bloqueio	-	-	-	ok	perda comunicação	perda comunicação
Caixa emergência	-	-	-	ok	ok	ok
Sensores analógicos	-	-	-	ok	ok	ok
Sensores digitais	-	-	-	ok	ok	ok

#### 4.1.3.3 Ensaio imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados

Neste ensaio o equipamento foi submetido em todas as suas faces a radiação de radiofrequência, conforme definido na Figura 32. Para este ensaio, em todas as faces, houve acionamento de botões do teclado entre 180MHz a 210 MHz. Este problema foi solucionado durante o teste com o acréscimo filtro resistor-capacitor na entrada do microcontrolador referente as teclas. Para outras duas frequências específicas, 370MHz e 425MHz, também sob todas as faces, houve perda de comunicação. A Tabela 15 mostra o resumo deste ensaio.

Com os resultados obtidos a classificação do Receptor do controle em termos de perda ou degradação de desempenho é:

*“Perda temporária de função ou degradação do desempenho que cessa depois que a perturbação cessa, e da qual o equipamento sob ensaio recupera seu desempenho normal, sem intervenção do operador.”*

**Tabela 15 - Resultado do teste de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência radiados no Receptor do controle.**

Face	Faixa de frequência: 80MHz a 180MHz	Faixa de frequência: 180MHz a 210MHz	Frequências: 370 MHz, 425MHz	Faixa de frequência: Demais entre 210MHz a 1GHz
	Campo: 10 V/m	Campo: 10 V/m	Campo: 10 V/m	Campo: 10 V/m
Superior	ok	ok - após correções de <i>hardware</i>	perda de comunicação	ok
Inferior	ok	ok - após correções de <i>hardware</i>	perda de comunicação	ok
Direita	ok	ok - após correções de <i>hardware</i>	perda de comunicação	ok
Esquerda	ok	ok - após correções de <i>hardware</i>	perda de comunicação	ok
Frontal	ok	ok - após correções de <i>hardware</i>	perda de comunicação	ok
Traseira	ok	ok - após correções de <i>hardware</i>	perda de comunicação	ok

## 4.2 LANÇA ISOLADA

### 4.2.1 Ensaio de Fator de Segurança conforme NBR 16092:2018

O ensaio de fator de segurança foi realizado em laboratório em Minas Gerais. Antes do teste foi realizada a verificação da massa do conjunto estrutural da caçamba com o sistema de nivelamento, a qual totalizou 105 kg. Como o conjunto estrutura da caçamba foi projetado para suportar uma massa de 135 kg, este foi somado a massa estrutural, obtendo a carga de 240 kg que a lança deve suportar em uma operação normal. Logo, com o fator de segurança a lança deve suportar 1200 kg.

A lança foi instalada em uma coluna de sustentação, sendo em sua outra extremidade conectada uma talha manual com uma célula de carga. A Figura 34 mostra o posicionamento dos componentes durante o ensaio.

**Figura 34 - Ensaio de Fator de Segurança Lança.**



Fonte: própria.

Após o posicionamento da lança foi aplicada uma carga de 1200 kg por meio da talha manual, sendo esta carga indicada no display da célula de carga. O conjunto permaneceu com a carga durante 4 minutos, e ao final do teste a carga registrada pela célula de carga era de 1195 kg.

Desta forma concluiu-se que a lança isolada cumpriu o requisito da NBR 16092:2018 de suportar cinco vezes a capacidade nominal de carga de operação, sendo aprovada quanto ao Fator de Segurança.

#### **4.2.2 Ensaio de Isolação Categoria C conforme NBR 16092:2018**

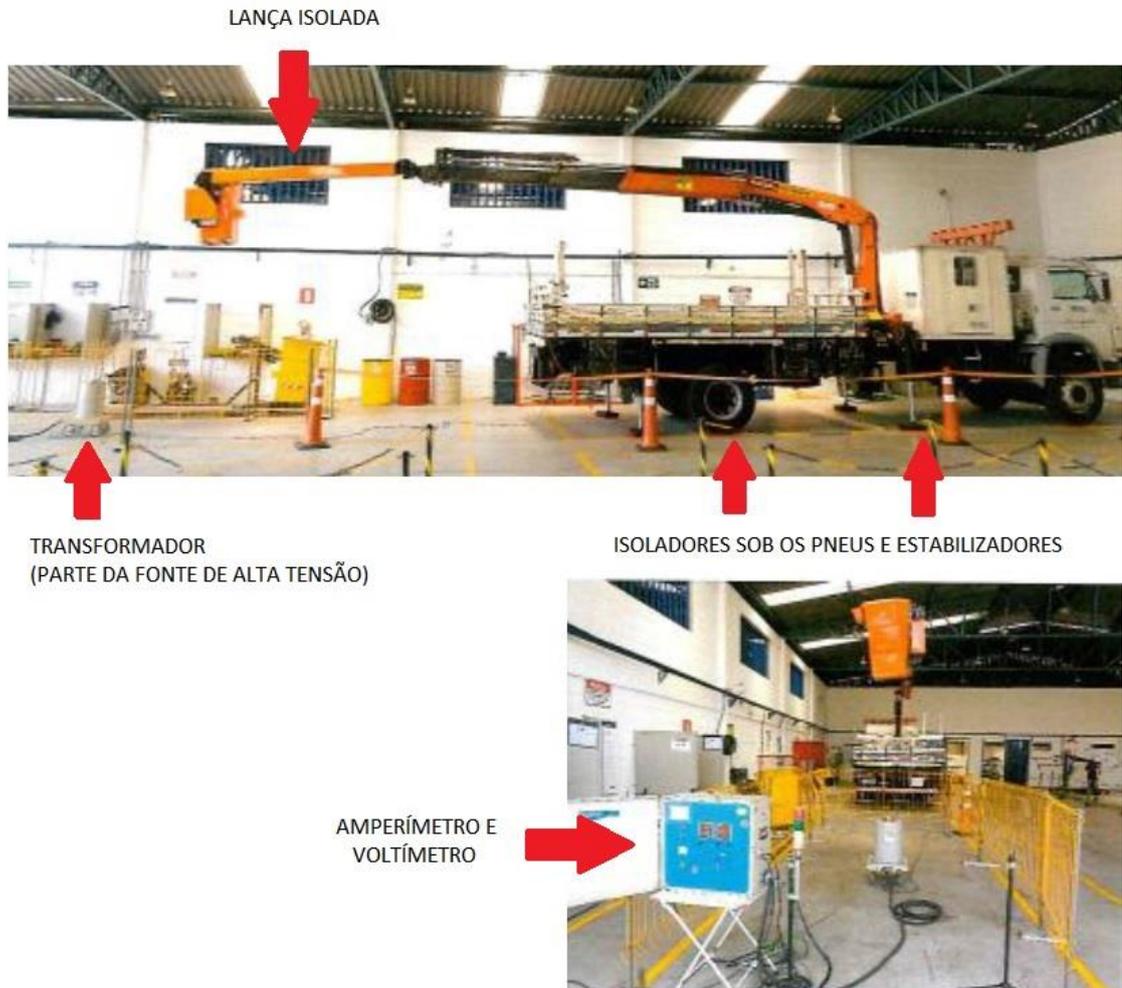
O ensaio de isolação da lança foi realizado em laboratório especializado em ensaios elétricos em Minas Gerais. Para realizar o ensaio, a lança isolada e a caçamba foram instalados em um guindaste articulado disponibilizado pela própria empresa onde foi realizado o teste.

O conjunto guindaste articulado com a lança foi posicionado com seus pneus e estabilizadores sobre isolantes posicionados sobre o piso, de forma que nenhum componente do conjunto ficou eletricamente conectado ao solo. Entre o guindaste e o solo foi colocado um amperímetro para medir a corrente de fuga. Na parte metálica da caçamba foi conectada a fonte de tensão de corrente alternada. A Figura 35 mostra a configuração do ensaio.

Após a instalação de todos os componentes foi realizada a aplicação da tensão na caçamba. A umidade relativa do ar durante o ensaio era de 30%, o valor de tensão aplicado de 100 kV foi aplicado à caçamba durante o período de três minutos. A corrente de fuga medida

foi de  $141,2 \mu\text{A}$ , valor abaixo do limite especificado na NBR 16092, sendo então a lança considerada aprovada para a utilização em Categoria C até 46 kV.

**Figura 35 - Ensaio de Isolação da Lança.**



Fonte: própria.

## 5 TESTES EM CAMPO

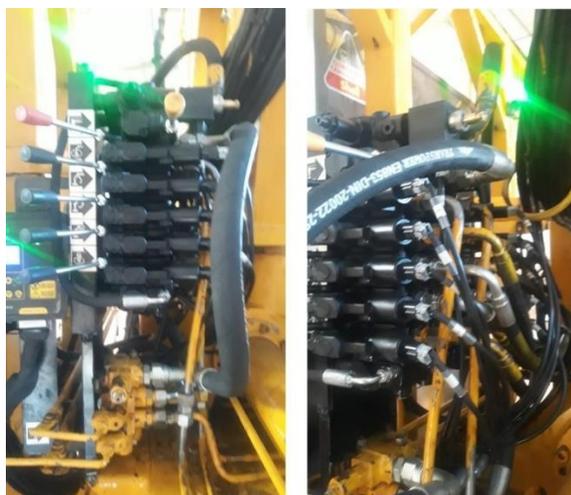
### 5.1 INSTALAÇÃO DOS COMPONENTES

Além dos testes realizados em laboratório, a utilização do equipamento também foi acompanhada em situações reais. Para a utilização do equipamento foi disponibilizado um guindauto com operação totalmente manual, sendo necessário realizar adaptações para permitir a instalação do equipamento. A instalação e calibração de todo o sistema foi realizada em seis dias, devido à complexidade da instalação.

#### 5.1.1 Substituição de comandos hidráulicos e instalação de bomba de emergência

Como o guindauto original possuía um comando hidráulico manual, foi necessário realizar a substituição do mesmo por um modelo eletrônico. As principais características do comando eletrônico são a existência de bobinas onde é possível realizar as conexões para movimentação via controle remoto, de uma válvula de bloqueio controlada por uma bobina também conectada ao receptor do controle, de uma válvula de ajuste de pressão do sistema e de uma seletora manual para no momento de movimentar estabilizadores direcionar o fluxo de óleo para o comando de estabilizadores. A Figura 36 mostra o comando eletrônico instalado já com as conexões advindas do receptor do controle.

**Figura 36 - Comando eletrônico**



Fonte: própria.

Apesar de não ter nenhuma conexão ligação ao sistema elétrico e eletrônico, devido exigência do Anexo XII foi instalada uma bomba manual para operação de emergência em caso de pane na bomba principal do guindauto. A Figura 37 mostra a bomba instalada.

**Figura 37 - Bomba de emergência.**



Fonte: própria.

### 5.1.2 Instalação do Receptor do controle

O Receptor do controle é o principal componente da instalação, sendo instalado próximo ao comando eletrônico, de forma que todas as seleções necessárias a operação, tais como seleção de operação de estabilizadores, movimentação pelas alavancas do comando e operação via controle remoto fiquem próximas, facilitando a utilização. Nele estão conectados todos os demais componentes da instalação. Por estar próximo ao comando também temos um botão de parada de emergência em caso de situação de risco, exigência do Anexo XII da NR12. A Figura 38 mostra a localização do receptor.

**Figura 38 - Receptor do controle**



Fonte: própria.

### 5.1.3 Instalação de sensores

Para operação do sistema limitador de carga foi necessário instalar dois sensores de pressão no cilindro de elevação da máquina e um sensor de ângulo na lança do guindauto. A Figura 39 mostra a instalação dos sensores.

**Figura 39 - Sensores de pressão e ângulo.**



Fonte: própria.

Para liberar o funcionamento dos estabilizadores, dois sensores indutivos foram instalados no guindauto, a fim de permitir a movimentação dos mesmos somente quando o guindauto estiver em uma posição segura para evitar tombamento da máquina. A Figura 40 mostra a instalação dos sensores.

**Figura 40 - Sensores indutivos**



Fonte: própria.

#### 5.1.4 Instalação de sinalizadores

Para indicar a condição de funcionamento dos equipamentos foi instalado um indicador visual com três cores (verde, amarelo e vermelho) chamado de coluna luminosa. Também foi instalada uma sirene para indicar sonoramente qualquer situação de risco. A Figura 41 mostra a coluna luminosa.

**Figura 41 - Coluna Luminosa.**



Fonte: própria.

#### 5.1.5 Caixa de emergência

Por exigência do Anexo XII da NR12 também é necessário que todo o comando possua próximo a si um botão de emergência. Desta forma, próximo ao comando de estabilizadores no lado oposto ao receptor esta caixa supre o requisito da norma. Nesta caixa encontra-se também um indicador de inclinação da máquina para auxiliar o operador no momento de operação dos estabilizadores e uma chave de acionamento de operação de bomba de emergência. A Figura 42 mostra a caixa de emergência.

**Figura 42 - Caixa de emergência**



Fonte: própria.

### 5.1.6 Instalação da Lança isolada

A instalação da lança isolada depende basicamente de uma adaptação mecânica na ponta da lança do guindauto. A forma de conectar a lança é um sistema de engate rápido, que permite acoplar o cesto de forma prática e somente no momento de utilização da caçamba. A Figura 43 mostra a adaptação para acoplamento da lança.

**Figura 43 - Adaptação para acoplamento da lança.**



Fonte: própria.

### 5.1.7 Central de nivelamento

A Central de nivelamento, por ser instalada na caçamba, não necessita realizar nenhuma adaptação, mas apenas realizar o acoplamento da caçamba à lança isolada. A Figura 44 mostra a central na caçamba.

**Figura 44 - Central de nivelamento.**



Fonte: própria.

## 5.2 RESULTADOS DOS TESTES

Os testes do equipamento foram executados em uma empresa de eletrificação no estado de Santa Catarina. O equipamento foi colocado em operação, primeiramente sem nenhum operador dentro da caçamba, como mostra a Figura 45, e posteriormente com operador. O funcionamento foi acompanhado por quinze dias, permanecendo instalado e operando após este período.

**Figura 45 - Teste do sistema sem operador na caçamba.**



Fonte: própria.

Quanto ao funcionamento, houve correta operação do sistema de nivelamento da caçamba, do controle remoto, do receptor de controle com todas suas funções (movimentação da máquina, leitura de sensores, monitoramento de inclinação, monitoramento de carga e intertravamento de comandos). Não houve ocorrências de mau funcionamento ou necessidade de intervenção do operador para retorno de funções. Durante estes testes, inclusive, foram utilizados próximo ao equipamento equipamentos de comunicação via rádio em frequência próxima aos 433 Mhz, para verificar se este equipamento também não causaria nenhum problema ao sistema desenvolvido.

Desta forma, verificou-se que o equipamento foi aprovado em sua operação.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho foram abordados aspectos referentes à segurança de operação de equipamentos de guindar utilizados na elevação de pessoas, com principal utilização em redes com tensão elevada. Esta pesquisa mostrou que não é apenas necessário que o equipamento de guindar tenha um adequado grau de isolamento elétrica, mas que aspectos referentes ao funcionamento de equipamentos eletrônicos nessa atividade sejam avaliados. Dentro deste contexto verificou-se que é necessário e extremamente importante avaliar estes equipamentos quanto a sua compatibilidade eletromagnética.

A análise quanto a compatibilidade eletromagnética é um processo bastante rigoroso, e os cuidados com o desenvolvimento correto do projeto diminuem o tempo e os custos envolvidos para atingir este objetivo, pois o conhecimento prévio do comportamento dos materiais, técnicas, ensaios e configurações que podem ser utilizados permite atingir estas metas com maior facilidade.

Quanto a normas nacionais e internacionais verificou-se que existe uma busca por uma padronização e que praticamente todas aplicações de equipamentos possuem normas para verificação quanto a EMC. Referente a legislação no Brasil, conclui-se que ainda poucos equipamentos possuem exigências ter sua compatibilidade eletromagnética assegurada, e que deveria existir uma maior exigência principalmente em equipamentos de atividades em que a segurança dos operadores está envolvida.

Quanto ao desenvolvimento dos equipamentos pode-se afirmar que os mesmos necessitam de um processo rigoroso de construção para a obtenção de um equipamento estável. Antes do desenvolvimento com vistas à EMC, diversos problemas com versões anteriores destes equipamentos foram encontrados, tais como queima de componentes sem motivo aparente, mau funcionamento tanto em nivelamento quanto em operação de controle remoto, interferência em equipamentos adjacentes por radiofrequência, mau funcionamento em chaves digitais, travamento de software, leituras errôneas em sensores além de perda de informações em tela a qualquer momento, inclusive ao ligar os equipamentos. A atenção à EMC no início dos projetos mencionados neste trabalho eliminou toda essa série de problemas que ocorriam em condições reais de uso e em testes com fontes de ruído no laboratório de desenvolvimento.

Quanto aos testes de laboratório em EMC verificou-se que o único equipamento que operou sem ressalvas foi o Controle remoto, não sofrendo alterações em seu funcionamento após as correções aplicadas durante o ensaio. O Receptor do controle, apesar de necessitar de intervenção do operador para tornar a exibir informações em seu display, não apresentou

falhas que resultassem em perda de segurança de operação. Da mesma forma a Central de nivelamento não obteve funcionamento perfeito, mas a mesma não ocasionou operação insegura e ainda tornou a operar sem necessidade de intervenção do operador assim que cessada a perturbação. Desta forma, todos equipamentos obtiveram resultados que atendem às necessidades envolvidas na operação do sistema como um todo de forma segura. Ainda sobre os testes, pode-se dizer que os mesmos são necessários para prever condições que possam trazer risco a operação.

Quanto aos resultados dos testes em campo, conclui-se que o desenvolvimento do sistema proposto foi adequado e que graças a todos os cuidados envolvidos no projeto e com os testes realizados foi possível obter um equipamento seguro para operação em redes com tensão elevada.

Quanto à possibilidade de trabalhos futuros, pretende-se continuar os desenvolvimentos em termos de segurança de operação dos equipamentos. A primeira etapa considera realizar a certificação do equipamento em termos da IEC 61000-4-8, a qual refere-se à imunidade de equipamentos eletrônicos próximos a campos eletromagnéticos de potência, abrangendo, inclusive, ambientes em subestações de energia de média e alta tensão. Em uma segunda etapa estuda-se a utilização de dois microcontroladores por equipamento para que um monitore a operação do outro, de forma que ações só serão realizadas pelo equipamento caso ambos consigam processar as informações corretamente. Desta forma, objetiva-se certificar os equipamentos em termos da norma EN 62061-2005 que trata de Segurança de máquinas, Segurança funcional de sistemas de controle eletroeletrônico e programável.

## 7 REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR IEC 61000-4-2:2013 – Compatibilidade eletromagnética – Ensaios e técnicas de medição - Ensaio de imunidade a descarga eletrostática.** Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2013.

ABNT. **NBR IEC 61000-4-3:2014 – Compatibilidade eletromagnética – Ensaios e técnicas de medição - Ensaio de imunidade a campos eletromagnéticos de radiofrequência irradiados.** Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2014.

ABNT. **NBR 16092:2018 – Cestas aéreas – Especificações e ensaios.** Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2018.

ABNT. **NBR IEC 61000-4-6:2019 – Compatibilidade eletromagnética (EMC) – Técnicas de medição e ensaio – Imunidade a perturbação conduzida, induzida por campos de radiofrequência.** Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2019.

ANATEL. **Resolução nº 680 de 27 de junho de 2017 – Agência Nacional de Telecomunicações.** Disponível em: < <https://anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>.> Acesso em: novembro de 2019.

ANATEL. **Ato nº14448, de 04 de dezembro de 2017 – Agência Nacional de Telecomunicações.** Disponível em: < <https://www.anatel.gov.br/legislacao/en/atos-de-requisitos-tecnicos-de-certificacao/2017/1139-ato-14448>.> Acesso em: novembro de 2019.

ANEEL. **Anexo II da nota técnica nº 304/2010-SRE/ANEEL- módulos construtivos de linhas de distribuição aéreas. Catálogo referencial de módulos padrões de construção de subestações, linhas e redes de distribuição de energia elétrica.** Setembro de 2010. Disponível em <[www2.aneel.gov.br](http://www2.aneel.gov.br).> Acesso em: setembro 2019.

ANEEL. **Regulação dos serviços de distribuição.** Novembro de 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao>.> Acesso em: novembro de 2019.

ANEEL. **Qualidade do Serviço**. Março de 2016. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2](http://www.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2)> Acesso em: novembro de 2019.

ANVISA. **Instrução normativa - IN n° 49, de 22 de novembro de 2019 - Ministério da Saúde - MS Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA**. Disponível em: <[http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/3682321/%281%29IN\\_49\\_2019\\_.pdf/2c0a291e-8936-4e55-ad07-6f22fdbe41ab](http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/3682321/%281%29IN_49_2019_.pdf/2c0a291e-8936-4e55-ad07-6f22fdbe41ab)> Acesso em: novembro de 2019.

BAZANELLA, A.S.; JUNIOR, J.M.G.S. **Sistemas de Controle – princípios e métodos de projeto**. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2005.

BRASIL. Ministério da Economia (ME). **Anexo XII - Equipamentos de Guindar para Elevação de Pessoas e Realização de Trabalho em Altura**. Setembro de 2016. Disponível em: <[https://sit.trabalho.gov.br/portal/images/SST/SST\\_normas\\_regulamentadoras/NR-12.pdf](https://sit.trabalho.gov.br/portal/images/SST/SST_normas_regulamentadoras/NR-12.pdf)> Acesso em: novembro de 2019.

CISPR. **CISPR Scope**. Disponível em: <[https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:4827829152191:::FSP\\_ORG\\_ID,FSPLANG\\_ID:1298,25](https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:4827829152191:::FSP_ORG_ID,FSPLANG_ID:1298,25)> Acesso em: novembro de 2019.

FREESCALE. **Designing for Board Level Electromagnetic Compatibility AN2321 – Freescale Semiconductor**. Outubro 2005. Disponível em: <[www.nxp.com](http://www.nxp.com)> Acesso em dezembro de 2019.

GANSSELE, J.G. **A Guide to Debouncing – Rev. 3**. The Ganssele Group, 2008.

GROCH, M. **HV Transmission Line and Tower Inspection Safe-Fly Zone Modelling and Metrology**. Dissertação de mestrado. Stellenbosch University, 2013.

IEC. **Standardisation policy of CISPR – CIS 059. 28**. Outubro de 2011. Disponível em: <[https://www.iec.ch/emc/pdf/cispr\\_standardisation\\_policy.pdf](https://www.iec.ch/emc/pdf/cispr_standardisation_policy.pdf)> Acesso em: novembro de 2019.

LEÃO, R.M. **Radio Interferência Proveniente de Linhas de Alta Tensão**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008.

LITTELFUSE. **Fuseology Selection Guide 2014**. Disponível em: <[www.littelfuse.com](http://www.littelfuse.com).>  
Acesso em: novembro de 2019.

LIZ, M. B. – **Introdução à Compatibilidade Eletromagnética em Conversores Estáticos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Instituto de Eletrônica de Potência, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

MATTOS, M.A. **Introdução a Compatibilidade Eletromagnética**. Spdatera.blogspot.com, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em:  
<[https://www.amazon.com.br/kindle/dp/B01IFGF0AK/ref=rdr\\_kindle\\_ext\\_eos\\_detail](https://www.amazon.com.br/kindle/dp/B01IFGF0AK/ref=rdr_kindle_ext_eos_detail).>  
Acesso em: novembro de 2019.

MAXINO, T.C.; KOOPMAN, P.J. **The Effectiveness of Checksums for Embedded Control Networks**. IEEE Transactions On Dependable And Secure Computing, Vol. 6, No. 1, January-March, 2009.

MONTROSE, M.I. **Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance—Second Edition**. IEEE Press Series on Electronic Technology, 2000.

PAUL, C.R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility – Second Edition**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.

PRESS, W.H. et al. **Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Second Edition**. New York: Cambridge University Press, 2007.

RAIZER, A. **Estudo de caso: avaliação de um laboratório de compatibilidade eletromagnética**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/docs/adroaldoRaizer.pdf>.> Acesso em: novembro 2019.

SCHLICHTING, L.C.M. **Contribuição ao estudo da compatibilidade eletromagnética aplicada aos conversores estáticos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SEMTECH. **TVS Diode Application Note SI96-01, 2000**. Disponível em:  
<<https://www.mouser.com/pdfDocs/semtech-si96-01.pdf>.> Acesso em: novembro de 2019.

SOBRINHO. **NR-10 avançada - sep. Capítulo 10 - trabalho sob tensão**. 2011. Disponível em: <[sobrinhoeducacaotecnologia.blogspot.com/2011/10/10-trabalho-sob-tensao-tecnica-de.html](http://sobrinhoeducacaotecnologia.blogspot.com/2011/10/10-trabalho-sob-tensao-tecnica-de.html).> Acesso em: novembro de 2019.

STMICROELECTRONICS. **Software Techniques for Improving Microcontroller EMC Performance – AN1015, Rev. 2. 2014**. Disponível em: <[www.st.com](http://www.st.com).> Acesso em: abril de 2020.

SUPRIANTO, B.; MUNOTO; DWINUGRAHA, A. Analysis Of Electromagnetic Field On Transmission Line To Human Using Infinite Element Method. **World Journal of Research and Review (WJRR)**. Jaipur, Volume 5, Issue 3, pp 61-66, Setembro 2017.

TEXAS. **CC1101 SWRS061I - Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver**. Disponível em: <[www.ti.com](http://www.ti.com).> Acesso em: janeiro 2020.

VEERAPPAN, C.A. **Development of Condition Monitoring Robots for High Voltage Equipment**. Tese de Doutorado. University of Manchester, 2011.

WEINZIERL, D. **Estudo de câmaras de teste de compatibilidade eletromagnética (CEM) através do método de modelagem por linhas de transmissão (TLM)**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

ZHENG, L.; YI, R. Autonomous Inspection Robot for Power Transmission Lines Maintenance While Operating on the Overhead Ground Wires. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, Vol. 7, No. 4, pp. 111-116, 2010.