

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

DANIEL BORBA

ESTUDOS E ENSAIOS DE EMC PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS  
ELETRÔNICOS

Joinville

21/08/2019

DANIEL BORBA

ESTUDOS E ENSAIOS DE EMC PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS  
ELETRÔNICOS

Monografia apresentada ao curso de mecatrônica industrial do Campus de Joinville do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial.

Orientador: Joice Luiz Jeronimo

Joinville

21/08/18

Borba, Daniel.

ESTUDOS E ENSAIOS DE EMC PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS  
ELETRÔNICOS

/ Daniel Borba. – Joinville, SC, 2019.

95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso superior em Mecatrônica Industrial - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Mecatrônica industrial, Joinville, 2019.

Orientador: Joice Luiz Jeronimo

1 Compatibilidade eletromagnética. 2 Emissões radiada e conduzida. 3 Termopares. 4 Descargas eletrostáticas.

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

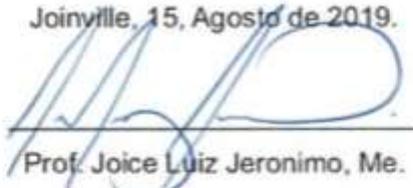
ESTUDOS E ENSAIOS DE EMC PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS  
ELETRÔNICOS

DANIEL BORBA

ESTUDOS E ENSAIOS DE EMC PARA DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Mecatrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 15, Agosto de 2019.



Prof. Joice Luiz Jeronimo, Me.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Joinville



Prof. André Bonetto Trindade

Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Jaraguá do Sul



Prof. Rafael Gomes Faust, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade de estudar em uma instituição federal e prover a mim os recursos para realizar este curso superior.

Agradeço ao colega de trabalho Mestre Engenheiro André Gomes Videira pelo auxílio, compartilhamento de conhecimentos e paciência.

Agradeço a minha orientadora Mestre eng. Joice Luiz Jeronimo pelo auxílio e incentivo durante todo o trabalho, e ao meu orientador Doutor Thiago Alencar Moreira de Barros agradeço também pelas orientações e conselhos.

Agradeço a minha noiva Suelen da Silva Massaneiro que, em momentos difíceis, sempre me motivou para seguir em frente durante todo o curso. Por último, mas não menos importante, agradeço aos amigos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado.

Dedico este trabalho aos meus pais, Jair Borba e Marlilei J.F. Borba  
(Daniel Borba, 2019)

## RESUMO

Neste trabalho serão apresentados estudos e ensaios de compatibilidade eletromagnética (*EMC*) e algumas técnicas para medição de temperatura com o uso de termopares em produtos eletrônicos. Para os ensaios de EMC serão abordados resultados e análise de emissão radiada, emissão conduzida e descarga eletrostática. Sobre os ensaios de temperatura com termopares, será avaliado a sua susceptibilidade à interferências de sinais eletromagnéticos externos.

Os ensaios foram realizados no laboratório de EMC da WEG na subdivisão *Drives and Controls*. A empresa multinacional é fabricante de motores, componentes de automação, produtos de eletrônica industrial e tecnologias em energias renováveis.

Através da análise dos componentes e circuitos eletrônicos serão abordadas técnicas para se reduzir os níveis das emissões eletromagnéticas e mostrar também fenômenos que descargas eletrostáticas podem causar em um circuito eletrônico.

As configurações (*setups*) para realização de cada ensaio serão abordadas em conformidade com o padrão de normas internacionais, normas estas que também serão brevemente comentadas. Para os ensaios de temperatura, serão apresentadas técnicas para realizar as medições necessárias com uso de termopares, tendo o intuito de evitar problemas com acoplamentos de ruídos de alta frequência nestas medições e acrescentar possibilidades para identificar a presença de interferências eletromagnéticas nas medições.

Palavras-chave: Compatibilidade eletromagnética. Emissões radiada e conduzida. Descargas eletrostáticas, termopares.

## **ABSTRACT**

In this work will be presented EMC tests and some techniques for temperature measurement with the use of thermocouples in electronic products.

For the EMC tests will be addressed results and analysis of radiated emission, conducted emission and electrostatic discharge. About temperature tests with thermocouples, their susceptibility to interference from external electromagnetic signals will be evaluated.

The tests were performed in the WEG EMC laboratory in the Drives and Controls subdivision. The multinational company is a manufacturer of motors, automation components, industrial electronics products and renewable energy technologies.

Through the analysis of electronic components and circuits will be approached techniques to reduce emissions levels and how to reduce the susceptibility to electrostatic discharges of an electronic product.

The settings (setups) for each test will be addressed in accordance with the international standards, which will also be briefly commented. For the temperature tests, techniques will be presented to perform the necessary measurements with the use of thermocouples, in order to avoid problems with coupling of high frequency noises in these measurements and to add possibilities to identify the presence of electromagnetic interferences in the measurements.

**Key words:** Electromagnetic compatibility; Emissions radiated and conducted; Electrostatic discharge.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Característica dos ruídos .....	21
Figura 2 - Circuito flyback - modo diferencial .....	22
Figura 3 - Circuito flyback ruído modo comum .....	23
Figura 4 - Par de condutores com correntes de modo comum e diferencial .....	24
Figura 5 - Enrolamento dos condutores no núcleo de ferrite.....	25
Figura 6 - Limites de emissão conduzida para classe A.....	28
Figura 7- Limites de emissão conduzida para classe B .....	28
Figura 8 – Limites pra emissão radiada classe A .....	29
Figura 9 – Limites para emissão radiada classe B .....	29
Figura 10 - Limites de emissão conduzida classes C1 e C2 .....	30
Figura 11 – Limites emissão conduzida Classe C3.....	30
Figura 12 - Limites para emissão radiada classe C1 e C2 .....	30
Figura 13 - Limites para emissão radiada classe C3.....	31
Figura 14 – Exemplo de resultado de emissão conduzida conforme IEC 61800-3 ...	35
Figura 15 – Medições de pico, quase pico e media .....	36
Figura 16 - Receiver ROHDE&SCHWARZ 9kHz-3GHz .....	37
Figura 17- Cabo coaxial pontas para conexões .....	37
Figura 18 - Atenuador ESH3-Z2 .....	37
Figura 19 - Conexão atenuador + Receiver .....	38
Figura 20 - LISN .....	38
Figura 21 – LISN esquemático .....	39
Figura 22 – Setup de ensaio emissão conduzida 01.....	39
Figura 23 – Setup de ensaio emissão conduzida 02.....	40
Figura 24 – Setup macro da emissão conduzida .....	40
Figura 25 - Encontrando a frequência de corte .....	42
Figura 26 – Estapas inversor de frequência.....	44
Figura 27 – Filtro de capacitores Y.....	44
Figura 28 - Resultado da emissão conduzida com capacitores Y de 4,7nF .....	45
Figura 29 - Resultado da emissão conduzida com capacitores Y de 2,2nF .....	45
Figura 30 - Núcleo de ferrite na saída para o motor em inversor de frequência.....	46
Figura 31 - Resultado sem aplicação do núcleo de ferrite .....	47
Figura 32 - Resultado com aplicação do núcleo de ferrite .....	47
Figura 33 - Resultado inicial sem filtro para emissão conduzida.....	48
Figura 34 - Resultado com filtro de emissão conduzida.....	49
Figura 35 - Esquemático do filtro aplicado .....	49
Figura 36 - Setup Macro para emissão radiada .....	51
Figura 37 - Célula GTEM .....	53
Figura 38 – Célula GTEM vista interna com destaque para o Septum.....	53
Figura 39 - Absorvedores de campo eletromagnético .....	54
Figura 40 - Conexão coaxial GTEM .....	54
Figura 41 – Posicionamento da amostra sob ensaio em célula GTEM.....	55
Figura 42 – Resultado da emissão radiada inicial da chave de partida.....	56
Figura 43 - Esquema da fonte chaveada e aplicação do capacitor .....	57
Figura 44 - Ruídos gerados através de circuitos digitais .....	58
Figura 45 - Ruído de alta frequência provocado por capacitâncias .....	58
Figura 46 – Aplicação dos indutores no circuito de comunicação.....	59
Figura 47 - Resultado da emissão radiada da chave de partida com alterações .....	59
Figura 48- Modo de aplicação do ferrite nos cabos de alimentação .....	60
Figura 49 - Resultado inicia da emissão radiada da fonte.....	61

Figura 50 - Resultado com utilização do ferrite nos cabos de alimentação da fonte.	61
Figura 51 - Termopar .....	64
Figura 52 - Medição de temperatura no componente.....	64
Figura 53 - Registrador de temperatura YOKOGAWA MV2000 .....	65
Figura 54 - Ensaio de susceptibilidade ao campo eletromagnético.....	67
Figura 55 - Curva de resfriamento da barra .....	67
Figura 56 - Foto do setup influencia campo eletromagnético .....	68
Figura 57 - Área ampliada da Figura 45.....	68
Figura 58 - Resultado de medição com campo elétrico alto.....	69
Figura 59 - Acoplamento capacitivo representação física e circuito equivalente.....	70
Figura 60 - Representação do acoplamento capacitivo .....	71
Figura 61 - Termopar no acoplamento capacitivo.....	71
Figura 62 - Foto do acoplador capacitivo .....	72
Figura 63 - UCS500N .....	72
Figura 64 - Sinal enviado ao acoplador capacitivo .....	73
Figura 65 - Setup utilizando acoplador capacitivo .....	73
Figura 66 - Efeito capacitivo no termopar não blindado .....	74
Figura 67 - Efeito da blindagem sobre o acoplamento / circuito equivalente. ....	74
Figura 68 - Termopares blindados.....	76
Figura 69 - Comparação termopar com e sem blindagem .....	76
Figura 70 - capacitância do corpo humano .....	78
Figura 71 - Descarga em chapa próxima de um equipamento.....	79
Figura 72 - Configuração para medição de tensão induzida em ESD.....	81
Figura 73 - Setup para ensaio de medição da tensão induzida e campo magnético	82
Figura 74 - Cabo coaxial com semicírculo .....	83
Figura 75 - Tensão induzida com descarga de +5kV.....	84
Figura 76 - Resultado da tensão induzida -5kV.....	85
Figura 77 - Resultado da tensão induzida -9kV.....	86
Figura 78 - Resultado da tensão induzida +9kV.....	87
Figura 79 - Medição de tensão induzida e campo magnético .....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, E UNIDADES

CISPR11 - (*“Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement”*).

Célula GTEM – Equipamento utilizado para realizar ensaios de emissão e imunidade radiada.

ESD – Descarga eletrostática (*Electrostatic discharge*).

EUT – Equipamento sob teste (*Equipment under test*).

EMC – Compatibilidade eletromagnética (*Electromagnetic compatibility*)

GTEM – Giga hertz transverso eletromagnético (*Gigahertz tranverse electromagnetic*).

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina.

LISN – Rede estabilizadora de impedância de linha (*Line Impedance Stabilization Network*).

LOOP – Caminho por onde possa circular corrente elétrica.

RF – Rádio Frequência.

SETUP – Configuração de ensaio.

Septum – Antena localizada na parte interna da célula GTEM.

TEM – Transverso eletromagnético (*Transverse electromagnetic*).

A – Ampére, unidade de medida para corrente elétrica.

db – Decibel.

dbuV – Decibel micro Volt.

Hz- Unidade de frequência.

nT – nano tesla, unidade de medida para campo magnético.

pF – Pico Faraday, unidade de medida para capacitância.

uF – Micro Faraday, unidade de medida para capacitância.

V – Volt, unidade de medida para potencial elétrico.

K – 10 elevado ao expoente 3.

G - 10 elevado ao expoente 9.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
1.1 Objetivo Geral .....	17
1.1.1 Objetivos específicos.....	17
1.2. JUSTIFICATIVA.....	18
2.INTRODUÇÃO A COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA.....	19
2.1 RUÍDOS DE MODO COMUM OU DIFERENCIAL. ....	21
2.1.2 RUÍDO DE MODO COMUM.....	22
2.2 TRILHAS DE TERRA OU GND .....	23
2.3 EFEITO PELICULAR ( <i>SKIN</i> ).....	23
2.4 TORÓIDES.....	24
2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 2 .....	26
3.NORMAS E ÓRGÃOS .....	27
3.1 CISPR11.....	27
3.2 IEC 61800-3 .....	29
3.3 IEC61000-4-20 .....	31
3.4 IEC 61000-4-2 .....	31
3.5 UL508C .....	31
3.6 Organismo certificador UL ( <i>underwriters laboratories</i> ) .....	32
4. EMISSÃO CONDUZIDA.....	33
4.1 O ENSAIO.....	33
4.1.1 MEDIÇÕES DE PICO, QUASE PICO E MÉDIA.....	35
4.2 EQUIPAMENTOS.....	36
4.2.1 ANALISADOR DE ESPECTRO.....	36
4.2.1.1 CONEXÕES RECEIVER.....	37
4.2.2 LISN. ....	38
4.3 SETUP PARA ENSAIO.....	39
4.4 PROJETO DE FILTRO PARA EMISSÃO CONDUZIDA .....	40
4.5 ESTUDOS DE CASO .....	43
4.5.1 PRIMEIRO ESTUDO DE CASO.....	43
4.5.2 SEGUNDO ESTUDO DE CASO. ....	46
4.5.3 TERCEIRO ESTUDO DE CASO.....	48
4.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 4 .....	50

5. EMISSÃO RADIADA .....	51
5.1 EQUIPAMENTOS .....	52
5.1.1 ANALISADOR DE ESPECTRO .....	52
5.1.3 CONEXÕES DA CÉLULA GTEM .....	54
5.2 SETUP PARA ENSAIO .....	55
5.3 PRIMEIRO ESTUDO DE CASO EMISSÃO RADIADA .....	55
5.3.1 SEGUNDO ESTUDO DE CASO EMISSÃO RADIADA .....	60
5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 5 .....	62
6. INFLUÊNCIA DE SINAIS ELETROMAGNÉTICOS SOBRE MEDIÇÕES DE TEMPERATURA. ....	63
6.1 TERMOPAR .....	63
6.2 REGISTRADOR DE TEMPERATURA .....	64
6.3 ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA .....	65
6.4 O PROBLEMAS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA .....	66
6.5 ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS .....	66
6.5.1 VERIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AO CAMPO ELETROMAGNÉTICO	66
6.5.1.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	69
6.5.2 VERIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AO CAMPO ELÉTRICO .....	69
6.5.2.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	70
6.5.3 VERIFICAÇÃO DA SUCEPTIBILIDADE AO ACOPLAMENTO CAPACITIVO ..	70
6.5.3.1 RESULTADOS AO ACOPLAMENTO CAPACITIVO .....	73
6.5.3.2 TÉCNICA PARA REDUÇÃO DO ACOPLAMENTO CAPACITIVO .....	74
6.6 CONCLUSÃO DO CAPITULO 6 .....	77
7. CAMPOS ELÉTRICOS GERADOS A PARTIR DE DESCARGAS HUMANAS EM CHAPAS METÁLICAS.....	78
7.1 DESCARGA ELETROSTÁTICA HUMANA.....	78
7.2 CAMPOS TRANSITÓRIOS DE ESD EVENTO DE REFERÊNCIA.....	80
7.3 ENSAIO PARA VERIFICAR A TENSÃO INDUZIDA EM UM SEMIÍCULO.....	81
7.3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO:.....	81
7.3.4 PONTEIRA SEMIÍCULO .....	83
<b>7.4 RESULTADOS</b> .....	<b>83</b>
7.4.1 PRIMEIRA MEDIÇÃO:.....	83
7.4.2 SEGUNDA MEDIÇÃO:.....	84

7.4.3 TERCEIRA MEDIÇÃO.....	85
7.4.4 QUARTA MEDIÇÃO: .....	86
7.4.5 QUINTA MEDIÇÃO:.....	87
7.5 FATORES QUE PODEM CONTRIBUIR PARA RESULTADOS DIFERENCIADOS NAS MEDIDAS DE ESD: .....	89
7.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 7 .....	90
8. CONCLUSÃO.....	91
REFERÊNCIAS.....	92

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do uso, tanto em áreas industriais quanto residenciais, os equipamentos eletrônicos passaram a utilizar circuitos cada vez mais avançados, utilizando altas frequências (*High frequency* - HF) podendo atingir frequências na ordem dos GHz. Possuindo tamanhos cada vez menores através do uso de tecnologia SMD (*surface mounting device*), e placas com maior número de camadas (*layers*).

O aumento da frequência pode contribuir para a diminuição do tamanho físico dos equipamentos, com o uso por exemplo das fontes chaveadas que possuem tamanho muito menor em relação às lineares, pois utilizam de frequências na ordem de KHz para o chaveamento de MOSFET's [10].

O uso de alta frequência também pode possibilitar a comunicação em rádio frequência (RF), sem fio (*Wireless*), *Bluetooth*® entre outras formas de comunicação sem fio, requisitos indispensáveis para a Indústria 4.0 [11].

Porém o aumento da frequência tende a ser um agravante em produtos eletrônicos do ponto de vista de emissões de ruídos elétricos, sejam emitidos através cabos, assim chamado de emissões conduzidas, ou irradiados através do ar, denominado emissão radiada. [12]

Inúmeras causas de emissões de ruídos elétricos podem coexistir em um único circuito ou ambiente, sejam elas devido à frequência de chaveamento em fontes chaveadas, utilização de sinais em alta frequência para comunicação, chaveamento de cargas indutivas como transformadores ou indutores, ausência de filtros de entrada sejam eles de modo comum ou diferencial, *layout* inadequado gerando grandes *loops* ou laços de correntes parasitas, trilhas mal posicionadas gerando efeitos de acoplamento capacitivos, retificadores e outros.[ 4][12]

O tamanho reduzido de um produto gera menos gasto com materiais e diminuição do espaço físico necessário em uma instalação, item muito importante na indústria. Esta redução, porém, pode piorar a dissipação térmica dos componentes eletrônicos o que pode gerar um sobreaquecimento, para que isto não aconteça é necessário saber se os componentes do produto estão em condições ideais de trabalho, e, a fim de atender as normas regulamentadoras são necessárias algumas medições de temperatura nos componentes de um produto durante seu funcionamento. O procedimento para se medir temperaturas

em componentes normalmente é feito através do uso de termopares. [8]

Alguns cuidados são de extrema importância para a obtenção de resultados de temperatura confiáveis, pois estas medições são sinais de baixa tensão e podem sofrer interferências devido a ruídos eletromagnéticos gerados através do próprio produto a ser monitorado devido aos efeitos capacitivos e indutivos. [5]

A redução de tamanho também pode implicar em redução de barreiras dielétricas entre carcaças e placas de circuito impresso, podendo gerar problemas com descargas eletrostáticas (*electrostatic discharge - ESD*). [2]

Problemas envolvendo EMC vem tornando-se mais presentes no dia a dia do cidadão comum e até mesmo no meio industrial ou laboratorial. No Brasil, poucas portarias do Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) abrangem ensaios relacionados a EMC, porém no mercado europeu e americano já existe esta preocupação onde, as normas da Comissão Internacional Eletrotécnica (*International Electrotechnical Commission - IEC*), que abrange a comunidade europeia, e a Comissão Federal de Comunicações (*Federal Communications Commission - FCC*), que abrange o mercado americano, já estabelecem limites para emissões e imunidades com relação a EMC.

Produtos que não conseguem atingir estes limites não podem ser comercializados nestes mercados. Para conseguir atingir bons resultados em ensaios de EMC como por exemplo emissão radiada, emissão conduzida, ESD e também conseguir boas medições de temperatura alguns estudos e boas práticas serão apresentados.

## 1.1 Objetivo Geral

Apresentar os ensaios de emissão conduzida, emissão radiada, ESD e medições de temperatura com uso de termopares. Abordar também suas normas e avaliação dos resultados de ensaios, apresentar problemas e soluções com EMC em termopares.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Mostrar o que são emissões conduzida e radiada;
- Oferecer normas que regulamentam os níveis de emissões;
- Apresentar como é feita a realização dos ensaios de emissão conduzida e radiada.
- Identificar causas das emissões radiada e conduzida, aplicar métodos para redução destas;
- Explicar como é feito o ensaio de elevação de temperatura;
- Explicar o uso do termopar e suas susceptibilidades a interferências eletromagnéticas;
- Mostrar métodos para diminuir a interferência em termopares;
- Explicar o que são descargas eletrostáticas;
- Mostrar normas que regulamentam ensaios de ESD;
- Apresentar o comportamento de uma descarga eletrostática em um equipamento;

## 1.2. JUSTIFICATIVA

O estudo da compatibilidade eletromagnética é de extrema importância na sociedade atual, pois campos eletromagnéticos podem afetar o funcionamento de circuitos eletrônicos, circuitos estes que atualmente estão presentes nas áreas: industrial, aviação, automotiva, naval e outras. [11] [4]

A principal preocupação com os estudos em EMC é garantir a segurança dos usuários e da sociedade como um todo, sendo assim não é suficiente que um produto eletrônico funcione corretamente, mas sim que este não prejudique também o funcionamento de outros. [1]

Um exemplo prático de interferência entre equipamentos é o uso de um liquidificador em uma rede residencial, há casos em que ao ligar o liquidificador um televisor apresenta falhas em sua imagem, e ao desligar o liquidificador o televisor volta a funcionar normalmente. Neste caso o liquidificador pode estar com seus níveis de emissão conduzida ou radiada muito elevados. [4]

Há uma preocupação muito grande nas indústrias com relação a EMC, pois atualmente os sistemas de proteção ao trabalhador usam microeletrônica e transmissão de sinais, para impedir acessos a locais perigosos e ou para evitar erro humano em máquinas. [11]

Apesar de todos os produtos eletrônicos que possuem certificações nos órgãos vigentes para EMC possuírem uma boa robustez contra fenômenos eletromagnéticos, um produto altamente ruidoso no quesito EMC, que esteja no mesmo ambiente ou rede, pode danificar ou comprometer o funcionamento daquele que está conforme com as normas de EMC.

## 2 INTRODUÇÃO A COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY EMC).

Um equipamento é dito eletromagneticamente compatível quando seu funcionamento não afeta a si e aos equipamentos no mesmo ambiente. [12]

Para que estas condições possam ser atendidas serão apresentados alguns ensaios que devem ser realizados, porém para que haja um melhor entendimento algumas definições devem ser revisadas: [15] [1]

Definições comumente utilizadas:

- Perturbações eletromagnéticas: Sinais eletromagnéticos indesejáveis e variantes no tempo, podem modificar o comportamento de circuitos eletrônicos ou até mesmo provocar a queima dos mesmos.
- Interferência eletromagnética (*EMI*): É a perda de operação de um dispositivo devido a perturbações eletromagnéticas.
- Compatibilidade eletromagnética (*EMC*): Um dispositivo é compatível eletromagneticamente quando seu funcionamento não influencia negativamente o funcionamento de outros dispositivos ou a si mesmo.
- Emissão radiada: Emissões de ondas eletromagnéticas que se propagam através do ar.
- Emissão conduzida: Emissões de perturbações eletromagnéticas que utilizam condutores elétricos para se propagarem.
- Imunidade radiada: Imunidade a ondas eletromagnéticas emitidas por outros equipamentos ou pelo mesmo através do ar.
- Imunidade conduzida: Imunidade a perturbações eletromagnéticas emitidas por outros equipamentos ou pelo mesmo através de condutores elétricos.
- GTEM: Sigla utilizada para giga-hertz transverso-eletromagnética.
- Célula GTEM: Equipamento utilizado para ensaios de emissão radiada e imunidade radiada.
- Estação de trabalho com linha de impedância estabilizada ou *Line impedance stabilization network* (LISN): Rede de alimentação utilizada para ensaios de emissão conduzida, este equipamento funciona como um filtro passa baixa.

- Plano de aterramento: Superfície condutiva “chapa” utilizada como aterramento, muito comum em laboratórios de *EMC*.
- Correntes de modo comum: Correntes de alta frequência que circulam de duas ou mais fases de alimentação de um produto para seu aterramento.
- Correntes de modo diferencial: Correntes de alta frequência que circulam entre as fases de um produto.
- Descargas eletrostáticas (*ESD*): Descargas provocadas por acúmulo de cargas elétricas e a diferença destas cargas entre dois corpos.
- Equipamento sob teste (*EUT*): Equipamento que está sendo submetido ao ensaio.

Para garantir que um produto esteja em conformidade com as normas de EMC no quesito emissões, dois ensaios devem ser realizados, são eles: [1]

- Emissão conduzida e emissão radiada.

No quesito imunidade existem quatro ensaios são eles:

- Imunidade conduzida
- Imunidade radiada
- ESD
- Transientes rápidos (surtos)

No presente trabalho, será abordado apenas o ensaio de ESD no âmbito das imunidades.

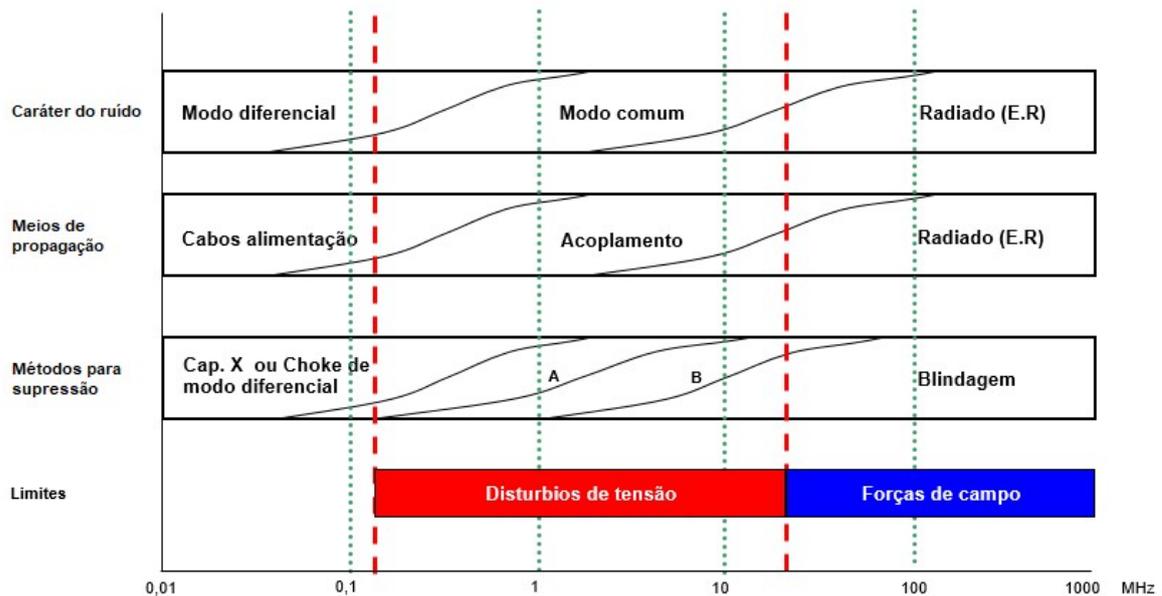
## 2.1 RUIDOS DE MODO COMUM OU DIFERENCIAL.

Em muitos casos o ideal é primeiramente descobrir qual o tipo de ruído que está presente no equipamento, no quesito corrente de modo comum ou diferencial, pois ambos podem afetar tanto os ensaios de emissão radiada quanto emissão conduzida, pois estas correntes geram ruídos que podem se propagar através dos cabos ou através do ar.

A antena que propaga a rádio frequência pode ser até mesmo os próprios cabos de alimentação ou cabos de aterramento de um produto, dependendo do fenômeno presente.

Diz-se “corrente de modo diferencial” quando há correntes parasitas que circulam entre fases ou linhas de alimentação, já as “correntes de modo comum” são correntes parasitas de duas ou mais fases ou linhas de alimentação para um ponto comum, normalmente terra ou GND. [4][12]

Uma ferramenta que ajuda a definir quais os ruídos presentes num circuito e como suprimi-los é o quadro de representação dos ruídos conforme Figura 01. [9]



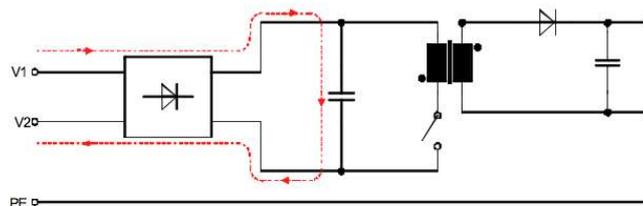
Legenda: A - Capacitor y, B plano de aterramento.

Figura 1 - Característica dos ruídos

### 2.1.1 RUÍDO DE MODO DIFERENCIAL.

Usando o exemplo de um conversor flyback (Figura 02), observa-se que a corrente parasita de modo diferencial (traçado vermelho) circula nas as linhas de alimentação. A corrente de modo diferencial circula em dois sentidos diferentes com amplitudes iguais, para o sinal diferencial a corrente flui de (V1) para o circuito volta em (V2). As correntes parasitas de modo diferencial podem ocorrer por efeitos capacitivos de trilhas, componentes ou entre camadas da placa de circuito impresso.

As tensões sobre cada condutor têm como referência de potencial o plano de terra. Para os sinais de modo diferencial, a tensão de V1 menos V2 é igual à tensão diferencial. Através de um indutor, este sinal irá criar campos magnéticos opostos que se anulam mutuamente. [4] [12]



*Figura 2 - Circuito flyback - modo diferencial*

### 2.1.2 RUIDO DE MODO COMUM.

Neste caso a corrente parasita de modo comum circula no mesmo sentido em ambos os caminhos do circuito (Figura 03). O caminho de retorno deste é geralmente através do condutor de terra ou de um dos condutores de entrada. Existe uma capacitância parasita, que cria um caminho para a corrente de modo comum a fluir para “terra”, esta corrente não vai fluir através da carga, uma vez que não há nenhuma diferença de potencial entre elas. As magnitudes dos sinais são iguais, estes se somam em vez de cancelar mutuamente. O resultado será uma alta impedância para o sinal de modo comum, que passará a ser fortemente atenuada. Este potencial pode variar em relação à “terra”. Conforme a variação do potencial do terra, o ruído também irá variar. Usando aterramentos independentes também pode-se criar uma diferença de potencial, resultando em ruído de modo comum. Isso é muito comum uma vez que estes podem criar diferenças de potencial (DDP) entre os aterramentos. Isto também ocorre em fontes sem ligação à terra, tais como as remotas. Certificar-se de que o



reatância deste local.

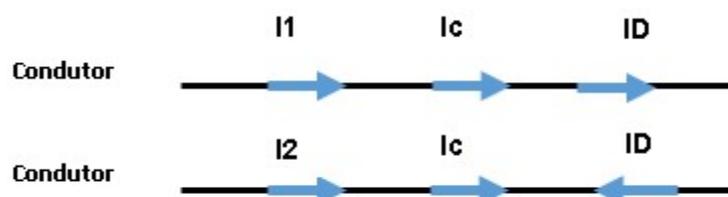
O aumento da reatância no centro do condutor por sua vez faz com que a corrente tenda a circular pelas bordas do condutor onde a reatância é menor, o que causa diminuição da área efetiva de condução e, um aumento da sua resistência aparente. [5] [17]

Em grande parte dos equipamentos eletrônicos faz-se o uso de fontes chaveadas onde a frequência de chaveamento está na ordem de kHz, logo o efeito *skin* está presente nestas aplicações, portanto ao dimensionar as trilhas não se deve considerar apenas a corrente que a circula, mas também sua frequência. [10][12]

## 2.4 TORÓIDES.

É muito comum o uso de toróides, ferrites ou derivados quando se trata de eliminar ruídos de modo comum ou diferencial, há casos em que apenas adicionando um núcleo de ferrite nos cabos de alimentação, aterramento, saída para motor ou em cabos com frequências altas de um produto, diminua drasticamente os níveis de emissão radiada ou conduzida. [5] [12][7]

Para exemplificar o comportamento de um toróide com núcleo de ferrite, será apresentado um exemplo utilizando dois condutores apresentados na Figura 4, as correntes  $I_1$  e  $I_2$  serão decompostas em correntes de modo comum  $I_C$  e diferencial  $I_D$ . [22]



*Figura 4 - Par de condutores com correntes de modo comum e diferencial*

As correntes de modo diferencial tem direções opostas, já as correntes de modo comum tem mesmo sentido. Tendo os dois condutores com correntes de modo comum e diferencial, estes serão enrolados em um núcleo de ferrite como mostra a Figura 5. Será considerado que os enrolamentos dos dois condutores serão iguais, então  $L_1 = L_2 = L$ . No indutor as indutâncias mútua e própria serão iguais. Esta construção de enrolamento com núcleo de ferrite cria uma impedância que aumenta

com o aumento da frequência das correntes que circulam nos condutores. As correntes parasitas de modo comum e diferencial são de frequências elevadas, logo toróide com núcleo de ferrite atenua e dissipa parte destas correntes. [22]

Para calcular o efeito do núcleo para as correntes parasitas de modo comum, calcula-se a impedância de um enrolamento. [22]

$$Z_1 = \frac{pLI_1 + pMI_2}{I_1} \quad (2.1)$$

Onde:

$Z_1$  = Impedância =  $Z_{cm}$  = Impedância de modo comum

$L$  = Indutância do enrolamento

$M$  = Indutância mútua

$I_1$  = Corrente no condutor 1

$I_2$  = Corrente no condutor 2

$p = j\omega$ (frequência angular)

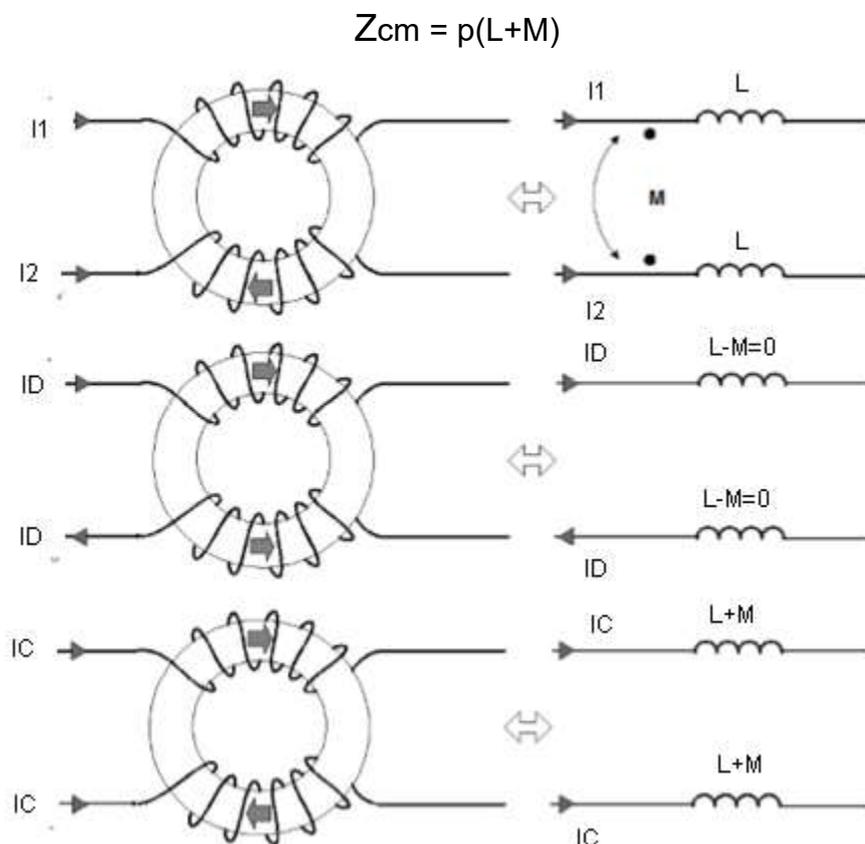


Figura 5 - Enrolamento dos condutores no núcleo de ferrite

Para o bloqueio das correntes de modo comum os condutores devem ser enrolados de modo que os fluxos gerados se somem. [22]

## 2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 2

Neste capítulo apresentou-se uma breve introdução sobre o que são correntes de modo comum e diferencial. Foi possível também identificar se um equipamento apresenta mais ruídos de modo comum ou diferencial através da análise das frequências onde o mesmo possui maiores níveis emissões. Através de uma análise da Figura 1 também pôde-se notar que os ruídos de modo diferencial podem ser reduzidos através da aplicação de capacitores tipo X ou indutores de modo diferencial, já os ruídos de modo comum podem ser reduzidos por aplicação de capacitores Y ou indutores de modo comum. O efeito skin provoca um aumento na impedância de trilhas e cabos, logo, ao utilizar frequências nas ordens de kHz a GHz deve-se levar em conta este efeito no dimensionamento das trilhas e cabos.

### 3.NORMAS E ÓRGÃOS

Neste capítulo serão comentadas normas e órgãos regulamentadores internacionais que foram utilizados ao longo do trabalho.

#### 3.1 CISPR11

Esta Norma aplica-se a equipamentos elétricos industriais, científicos e médicos operando na faixa de frequência de 0 Hz a 400 GHz. Para aparelhos domésticos e similares aplica-se quando este é concebido para gerar ou receber radiofrequência. Esta norma cobre os requisitos de emissão relacionados a perturbações de radiofrequência (RF) na faixa de frequência de 9 kHz a 18 GHz. [1]

O método de ensaio para o ensaio de emissão conduzida neste trabalho foi regido por esta norma que também estabelece como devem ser realizadas as medições e o *setup* de ensaio. Apesar de os inversores de Frequência terem seus limites estabelecidos pela norma IEC 61800-3, outros equipamentos industriais (Soft-starters, relés eletrônicos, controladores lógicos entre outros) referenciam seus limites de emissão aos estabelecidos pela CISPR 11. As classes de equipamentos pela CISPR 11 podem ser definidas da seguinte maneira:

- Classe B – Produtos que utilizam redes elétricas e estão em ambientes residenciais e comerciais.
- Classe A - Produtos que utilizam redes elétricas e estão em ambientes industriais.

Um equipamento residencial como por exemplo um liquidificador deve cumprir os limites de emissão conduzida estabelecidos pela tabela da Figura 7 ou seja classe B para que este possa comercializado no mercado europeu. [1]

Os limites para emissão conduzida para cada classe estão nas Figuras 6 e 7, a medidas de quase pico e media estão descritas no capítulo 4.

Frequência MHz	Potência ≤ 20 kVA		Potência > 20 kVA e menor ≤ 75 kVA		Sistemas de alta potência > 75kVA	
	Quase pico dB(μV)	Médida dB(μV)	Quase pico dB(μV)	Médida dB(μV)	Quase pico dB(μV)	Médida dB(μV)
0,15 - 0,50	79	66	100	90	130	120
0,50 - 5	73	60	86	76	125	115
5 - 30	73	60	90 Decréscimo linear 73	80 60	115	105

*Figura 6 - Limites de emissão conduzida para classe A*

Frequência MHz	Quase pico dB(μV)	Médida dB(μV)
0,15 - 0,50	66 Decréscimo linear 56	56 46
0,50 - 5	56	46
5 - 30	60	50

*Figura 7- Limites de emissão conduzida para classe B*

A CISPR 11 também traz limites para emissões radiada, sendo estes também definidos em classes A e B representados pelas tabelas nas Figuras 8 e 9. [1]

Frequencia MHz	Faixa de potência	
	≤ 20kVA	>20 kVA
	Quase pico dB (uv/m)	Quase pico dB (uv/m)
30 - 230	40	50
230 - 1000	47	50

*Figura 8 – Limites de emissão radiada classe A*

Frequência MHz	Quase pico dB (uv/m)
30 - 230	30
230 - 1000	37

*Figura 9 – Limites de emissão radiada classe B*

### 3.2 IEC 61800-3

Esta norma internacional europeia estabelece todos os níveis de EMC especificamente para inversores de frequência, sejam estas emissões conduzidas ou radiadas, imunidades conduzidas ou radiadas e ESD. Esta norma é aplicável à inversores de frequência energizados até 35 kV ac. [18]

A classes de inversores com relação aos limites nesta norma, são divididas em classes C1, C2 e C3, estas classes estão descritas no capítulo 4 deste trabalho.

Os limites para as emissões conduzidas estão apresentados nas Figuras 10 e 11, sendo os limites para emissões radiadas apresentados nas Figuras 12 e 13. [18]

Frequência MHZ	Classe C1		Classe C2	
	Quase pico dB(uV)	Média dB (uV)	Quase pico dB(uV)	Média dB (uV)
0,15 - 0,50	66	56	79	66
	Decréscimo linear	Decréscimo linear		
0,5 - 5,0	56	46	73	60
	56	46		
5,0 - 30	60	50	73	60

Figura 10 - Limites de emissão conduzida classes C1 e C2

Corrente do Inversor	Frequência MHZ	Classe C3	
		Quase pico dB(uV)	Média dB (uV)
$I \leq 100A$	0,15 - 0,50	100	90
	0,5 - 5,0	86	76
	5,0 - 30	90 Decréscimo logarítmico 73	80 Decréscimo logarítmico 60
$I > 100A$	0,15 - 0,50	130	120
	0,5 - 5,0	125	115
	5,0 - 30	115	105

Figura 11 – Limites emissão conduzida Classe C3

Frequência MHz	Quase pico	
	Classe C1	Classe C2
30 - 230	30	40
230 - 1000	37	47

Figura 12 - Limites para emissão radiada classe C1 e C2

Frequência MHz	Quase pico
	Classe C3
30 - 230	50
230 - 1000	60

*Figura 13 - Limites para emissão radiada classe C3*

### 3.3 IEC61000-4-20

Esta norma internacional europeia estabelece como devem ser os *setups* para ensaios de emissão radiada utilizando células GTEM. Todos os ensaios de emissão radiada apresentados neste trabalho foram realizados seguindo os procedimentos desta norma. A descrição detalhada de uma célula GTEM está descrita no capítulo 5.1.2 deste trabalho. [23]

### 3.4 IEC 61000-4-2

Esta norma internacional europeia rege os *setups* para ensaios com descargas eletrostáticas. Os ensaios realizados no último capítulo foram feitos seguindo os procedimentos nela contidos. Os critérios de aceitação para ensaios de ESD são definidos através de normas específicas para cada produto. Utilizando um inversor de frequência como exemplo para o ensaio de ESD, as configurações do ensaio seguirão a IEC 61000-4-2 já os requisitos para a aprovação estão descritos na norma IEC 61800-3 que é a norma específica para inversores de frequência. [2]

### 3.5 UL508C

Esta norma internacional americana traz vários procedimentos para realização de ensaios com ênfase em requisitos de segurança de inversores de frequência. Os ensaios de temperatura citados nos estudos com termopares utilizam esta norma como referência. Esta norma é utilizada para certificações de inversores de frequência que serão comercializados no mercado americano. [8]

### 3.6 Organismo certificador UL (*underwriters laboratories*)

Este é um órgão americano que audita e emite certificados de conformidade para comercialização de produtos em mercados americanos. [8]

### 3.7 FCC (Federal Communications Commission)

Comissão Federal de Comunicações, é o órgão regulador da área de telecomunicações e radiodifusão dos Estados Unidos. Esta comissão é a agência federal responsável pela implementação e aplicação das leis e regulamentos de comunicações dos Estados Unidos. [32]

#### 4. EMISSÃO CONDUZIDA.

A norma CISPR11[1] rege os setups e procedimentos de ensaios de emissão conduzida em inversores de frequência citados neste capítulo, logo os ensaios analisados em 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3 seguem esta norma.

Quando avaliado o desempenho de inversores de frequência em emissão conduzida, as categorias dos produtos e os limites para as emissões são definidos pela norma IEC 61800-3, as classes são:

- Classe C1- Uso de inversores de frequência em instalações domésticas, como residências ou edifícios comerciais, fornecidos pela rede pública.
- Classe C2 – Uso de inversores de frequência em uma área industrial alimentada por um transformador dedicado que forneça tensões, como 480V, 560V ou 690VAC. Não é necessário ser energizado através de conector, também não necessita ser móvel, não necessita ser instalado por um profissional.
- Classe C3 - Inversores também em tensões nominais abaixo de 1000 V, mas estão restritas a uso somente no segundo ambiente, e instalação por profissional capacitado.

Cada classe tem seu limite específico seja para emissão conduzida ou radiada.

Os inversores de frequência analisados em 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3, estão na categoria C2 e C3. [18]

##### 4.1 O ENSAIO.

O ensaio de emissão conduzida é realizado de acordo com a norma internacional de emissões eletromagnéticas CISPR11, este ensaio consiste em mensurar o quanto de ruído eletromagnético um equipamento emite para a rede elétrica que o energiza.

Estes ruídos se propagam através de cabos. Para realizar as medições o equipamento sob ensaio é energizado e posto em seu funcionamento normal, como seria utilizado em “campo”. [1]

Todas as configurações para a realização do ensaio apresentadas neste capítulo seguem a norma CISPR 11.[1]

A frequência em que esse ruído será monitorado está na faixa de 150kHz a 30MHz, pois o ensaio será realizado em conformidade com a norma internacional de emissões eletromagnéticas CISPR11 juntamente com a norma de produto que rege os limites para cada tipo de produto que neste caso é a norma IEC 61800-3.

A intensidade do ruído é medida na unidade de decibel microvolt (*dBuV*), que pode ser obtido da seguinte maneira:

O decibel volt (*dBuV*) é uma unidade de medida que representa a intensidade do sinal, esta pode ser convertida em Volts. Para ter o sinal representado em Volts quando utilizado uma impedância de 50Ω pode-se usar a equação:

$$V = 10^{(dbuV-120)/20} \quad (3.1)$$

Onde: V - é a tensão do sinal a ser obtido em Volts

dbuV - é o valor sinal obtido em decibel microvolt

Em um resultado de emissão conduzida existem duas linhas de limite e duas linhas de resultado, como pode ser verificado na Figura 14. As linhas vermelha e roxa indicam os limites para as emissões do produto em cada faixa de frequência. A linha de limite vermelha representa o limite para quase pico, e a linha roxa limite para média conforme Figura 6. [1][7] [18]

Ainda na Figura 14, o eixo Y contém os níveis de ruído em Decibel microvolt e o eixo X a frequência de varredura, neste caso 150kHz a 30MHz. As linhas verde e azul representam os sinais medidos de média e pico respectivamente, sendo o ponto azul uma medida de quase pico. [1] O modelo de resultado apresentado na Figura 6 apresenta linhas de limite da classe C1. O resultado estaria aprovado, pois, os valores obtidos de média estão abaixo da linha roxa (limite de média), e a medição de quase pico (ponto azul) abaixo da linha vermelha (limite quase pico). [18]

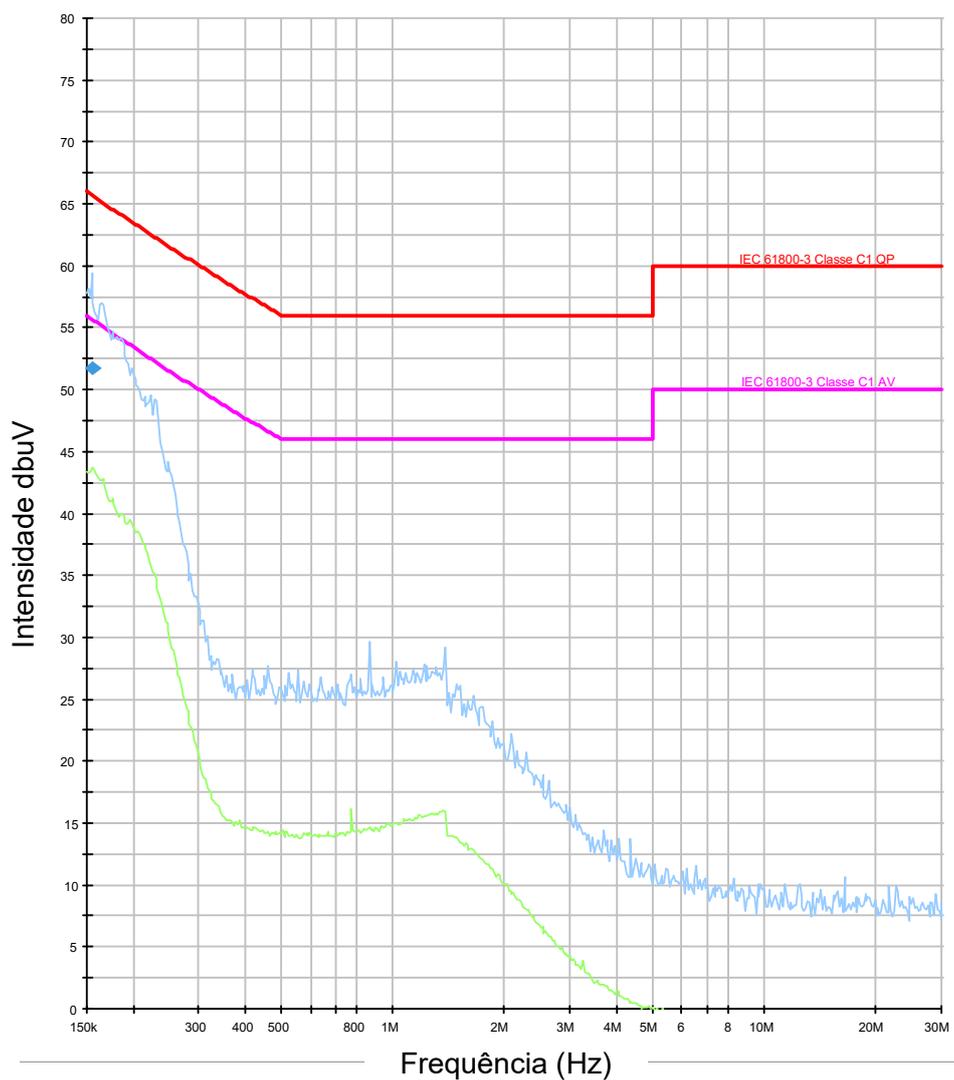


Figura 14 – Exemplo de resultado de emissão conduzida conforme IEC 61800-3

#### 4.1.1 MEDIÇÕES DE PICO, QUASE PICO E MÉDIA.

De uma maneira mais simplória as medições de pico, quase pico e média, podem ser mostradas através da Figura 15.

- As medições de pico como o próprio nome diz, são picos dos sinais obtidos pela LISN e analisador de espectro, sinais estes gerados pela amostra sob ensaio.
- O valor de quase pico pode variar com a largura de pulso do sinal, se o sinal tiver uma derivada de tensão elevada, terá um valor de quase pico também elevado.
- A média é calculada através de um filtro passa baixa, com a frequência mínima

sendo a frequência da rede.

As medições de quase pico são representadas por pontos azuis no gráfico, e também podem ser observados na Figura 6, em um resultado os níveis de quase pico devem ser sempre menores que o pico. [19] [12]

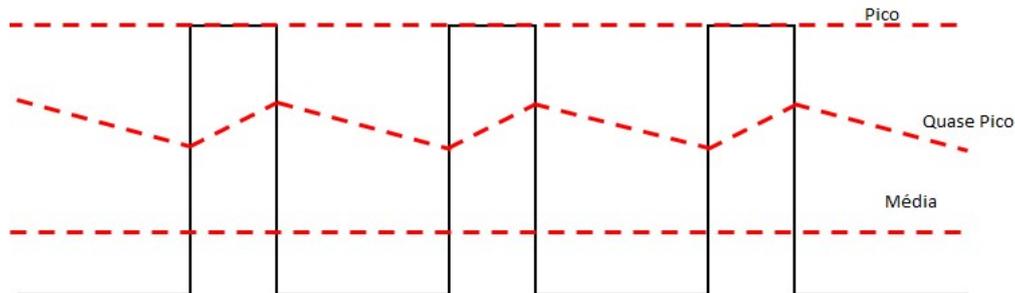


Figura 15 – Medições de pico, quase pico e média

## 4.2 EQUIPAMENTOS.

Os equipamentos utilizados nos ensaios de emissão conduzida serão apresentados nos itens 3.2.1 a 3.2.2, assim como as conexões necessárias para se realizar o ensaio.

### 4.2.1 ANALISADOR DE ESPECTRO.

O analisador de espectro também chamado de (*receiver*) apresentado na Figura 16, realiza medições de sinais no domínio da frequência. O receiver é o equipamento que fará as medições dos ruídos obtidos através da LISN, para realizar estas medidas o receiver deve ser conectado a LISN através de um cabo coaxial. Este é conectado entre a saída de 50R da LISN e a entrada 50R do receiver. O casamento das impedâncias é essencial para que não haja refrações ou perda dos sinais de alta frequência. [20]



*Figura 16 - Receiver ROHDE&SCHWARZ 9kHz-3GHz*

#### 4.2.1.1 CONEXÕES RECEIVER.

A conexão entre receiver e LISN é feita através de um cabo coaxial conforme Figura 17, em uma das pontas a conexão é feita diretamente na LISN e a outra ponta que será conectada ao receiver recebe um atenuador de sinais conforme Figura 18.

O atenuador é utilizado para proteção do receiver caso os ruídos gerados pelo equipamento sob teste sejam elevados. A conexão do atenuador está representada na Figura 19. [20]



*Figura 17- Cabo coaxial pontas para conexões*



*Figura 18 - Atenuador ESH3-Z2*

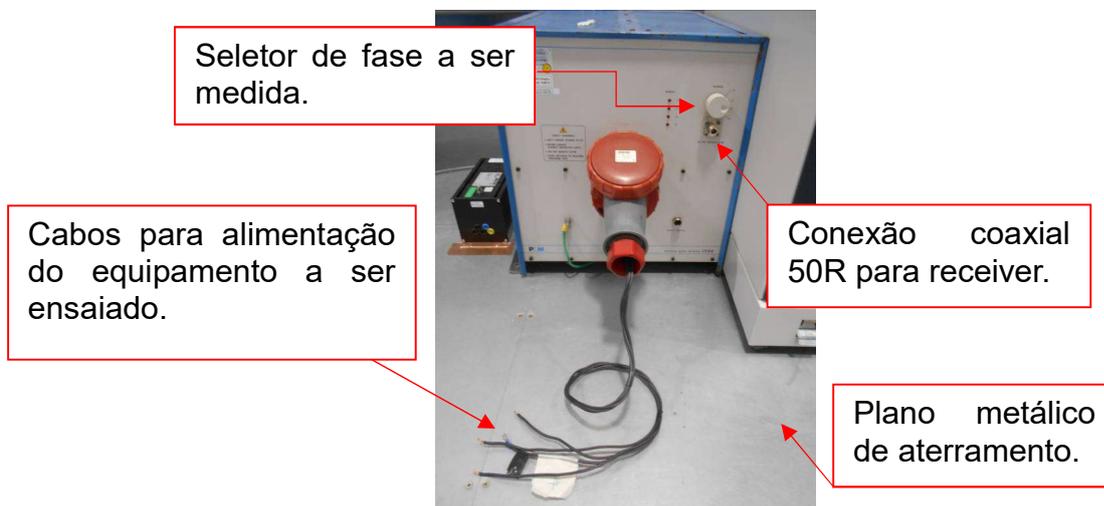


*Figura 19 - Conexão atenuador + Receiver*

#### 4.2.2 LISN.

A LISN apresentada na Figura 20 tem como objetivo filtrar ao máximo ruídos provenientes da rede elétrica de alimentação que será usada, para que sejam medidos apenas os ruídos gerados pela amostra sob ensaio. [12]

Porém se a rede elétrica utilizada tiver elevados níveis de ruídos, estes podem afetar os resultados do ensaio, por tanto ao realizar ensaios de emissão conduzida é importante que se faça a medição dos ruídos de rede.



*Figura 20 - LISN*

Para operar como um filtro passa baixa e fazer a separação dos ruídos gerados pelo equipamento sob ensaio, o circuito da LISN possui indutores, resistores e capacitores como apresentado no circuito LISN da Figura 21. [21]

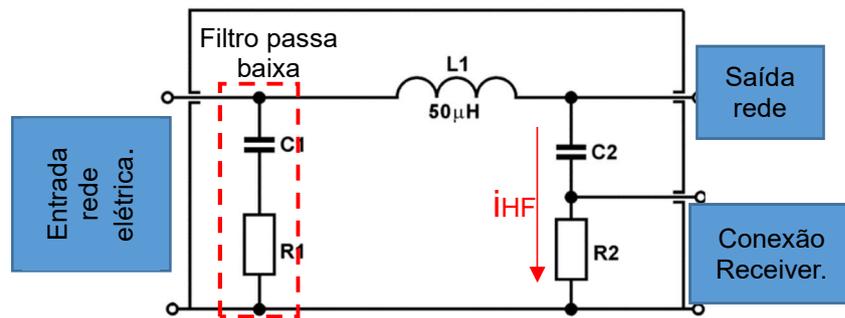


Figura 21 – LISN esquemático

No circuito LISN da Figura 21 os sinais de alta frequência provenientes da rede são dissipados no filtro de entrada. Os sinais de alta frequência gerados pelo equipamento sob ensaio, geram uma queda tensão no resistor R2, esta tensão será medida através do analisador de espectro. [12] [20]

#### 4.3 SETUP PARA ENSAIO.

Se utilizada a norma internacional de emissões eletromagnéticas CISPR11, de acordo com o item 8.2 medições de distúrbios conduzidos (*measurement of conducted disturbances*), o ensaio deve ser feito utilizando uma das seguintes opções:

A primeira opção está descrita na Figura 22 com o plano de terra a 80cm da amostra sob ensaio e uma chapa metálica lateral vertical de 2x2m a 40cm de distância da amostra. [1]

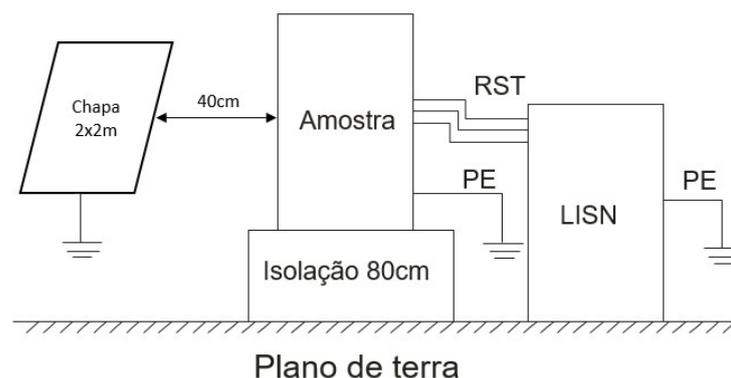


Figura 22 – Setup de ensaio emissão conduzida 01

A segunda opção para *setup* é apresentada na Figura 23 sendo um plano de aterramento a 40cm de distância da amostra sob ensaio e 80cm de distância de qualquer outra superfície metálica. [1]

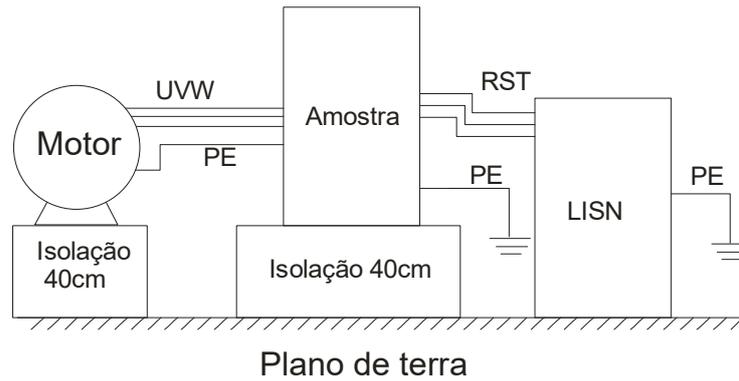


Figura 23 – Setup de ensaio emissão conduzida 02

Os resultados a serem apresentados neste capítulo de emissão conduzida, foram realizados conforme *setup* da Figura 23. A Figura 24 mostra uma visão macro do *setup* para os ensaios de emissão conduzida utilizado no laboratório de EMC da WEG.



Figura 24 – Setup macro da emissão conduzida

#### 4.4 PROJETO DE FILTRO PARA EMISSÃO CONDUZIDA

Para que se possa projetar um filtro de alimentação para emissão conduzida são necessários alguns passos, que serão apresentados neste capítulo. O desempenho do filtro pode não ser exatamente como projetado, pois nos cálculos não são consideradas imperfeições no sistema, como as impedâncias das trilhas, ou outros planos de circuitos que possam acoplar ruídos no próprio filtro por estarem muito próximos no *layout*. [12]

- Primeiramente deve-se realizar o ensaio de emissão conduzida com o produto sem filtros de entrada. Neste ensaio deve-se separar as correntes de modo comum e diferencial geradas pelo produto sob teste. Um ensaio para cada tipo de corrente será

realizado tendo então dois resultados de emissão conduzida. As correntes de modo comum e diferencial podem ser separadas através de separadores de corrente, estes dispositivos não serão apresentados neste trabalho. [12]

- Tendo obtidos os dois resultados de emissão conduzida (para modo comum e para modo diferencial), deve-se determinar a atenuação necessária para cada um. As atenuações podem ser encontradas através das equações (3.2) e (3.3). [12] O limite ( $V_{limite}$ ) vai depender da norma utilizada para cada produto. [12]

$$(V_{r\_mc})_{dB} = (V_{mc})_{dB} - (V_{limite})_{dB} + 3dB \quad (3.2)$$

$$(V_{r\_md})_{dB} = (V_{md})_{dB} - (V_{limite})_{dB} + 3dB \quad (3.3)$$

Onde:  $(V_{mc})_{dB}$  e  $(V_{md})_{dB}$  são as tensões de modo comum e modo diferencial obtidas pelas correntes do primeiro passo e  $(V_{limite})$  é o limite estabelecido pela norma que se de ja realizar o ensaio. Os 3dB são utilizados como uma margem de erro para o filtro. [12]

- Após encontrar as atenuações devem-se determinar as frequências de corte do filtro de modo comum e diferencial a serem dimensionados. A frequência de corte para modo comum  $fr\_mc$  ou diferencial  $fr\_md$ , podem ser encontradas ao se traçar uma reta com inclinação de 40dB/década que seja tangente à curva da tensão  $(V_{r\_mc}$  ou  $V_{r\_md})_{dB}$  obtida no ensaio sem filtro. Onde a reta tocar a linha de tensão, é determinada a frequência de corte conforme Figura 25. [12] Analisando o exemplo da Figura 17 onde tem-se a tensão de modo comum, para este caso a frequência de corte do filtro será em aproximadamente 40kHz, onde há a intersecção entre a linha de 40dB/dec com o eixo das frequências. [12]

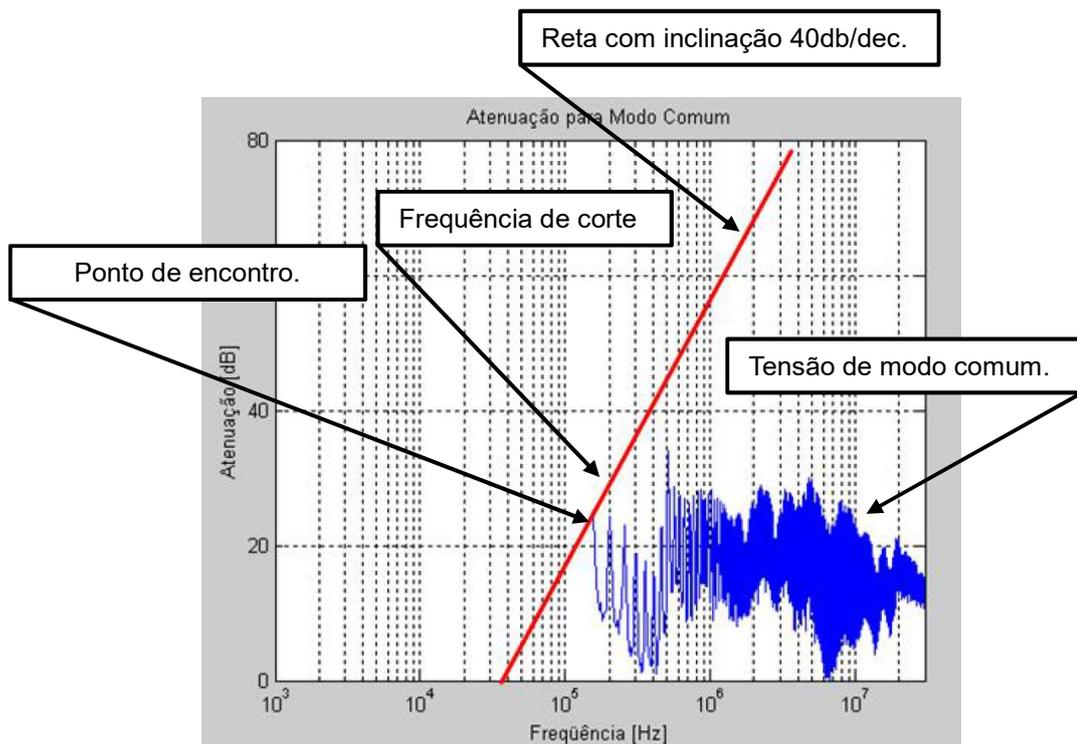


Figura 25 - Encontrando a frequência de corte

Determinar os valores dos componentes para os filtro de modo comum e diferencial:

Componentes para filtro de modo comum - Indutores de modo comum  $L_{mc}$  e capacitores tipo Y ( $C_y$ ). Os capacitores para filtro de modo comum devem ser dimensionados com cuidado pois algumas normas trazem limites para corrente de fuga a terra. O indutor de modo comum  $L_{cm}$  e os capacitores  $C_y$  em (3.4) devem ter uma frequência ressonante de modo comum dada por  $f_{r\_mc}$ , obtida na terceira etapa do dimensionamento do filtro. [12]

$$L_{mc} = \left( \frac{1}{2\pi \cdot f_{r\_mc}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot C_y} \quad (3.4)$$

Onde:

$L_{mc}$  = Indutância de modo comum

$f_{r\_mc}$  = frequência de modo comum

$C_y$  = capacitor Y

Os componentes de modo diferencial MD – Capacitores do tipo X ( $C_x$ ) possuem mesmo valor no filtro, e são relacionados com o valor da indutância

de modo diferencial Lmd através da frequência de corte de modo diferencial fr\_md: [12]

$$C_x = \left( \frac{1}{2\pi \cdot fr\_md} \right)^2 \cdot \frac{1}{Lmd} \quad (3.5)$$

Onde:

Cx = Capacitor de modo diferencia X

Fr\_md = frequência de modo diferencial

Lmd = Indutância de modo diferencial

Em (3.5), o valor da frequência (fr\_md) necessário foi encontrado na terceira etapa de dimensionamento. Os capacitores do tipo X e Indutores de modo diferencial (Lmd), são incógnitas na equação. Há uma faixa de valores para a escolha destes componentes. Quanto maior o valor do indutor Lmd, menor será o valor de Cx1 e Cx2, e vice-versa. [12]

O indutor de modo comum Lmc também pode contribuir para a redução de correntes de modo diferencial devido a indutância de dispersão, então em alguns casos o uso do Lmc pode fazer com que não seja necessário o uso do Lmd. A indutância de dispersão (Ldispersão) pode ter seu valor na faixa de 0,5-2% do valor da indutância do indutor de modo comum. [12]

## 4.5 ESTUDOS DE CASO

Nos itens 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3 serão apresentados resultados de ensaios de emissão conduzida, mostrando o desempenho dos produtos nos ensaios antes e depois de alterações em seus filtros ou circuitos. Será mostrado o que as alterações realizadas nos seus filtros impactam no resultado, e todos os resultados apresentados serão comentados.

### 4.5.1 PRIMEIRO ESTUDO DE CASO.

Neste estudo será avaliada alterações no filtro de modo comum de um inversor de frequência, e o impacto do valor da capacitância deste filtro nas emissões conduzidas.

Um inversor de frequência pode ser separado basicamente em 5 etapas conforme Figura 26.

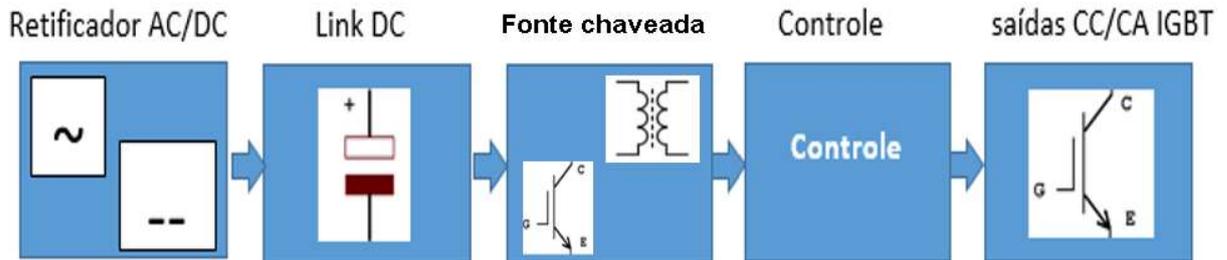


Figura 26 – Etapas inversor de frequência

O filtro onde serão feitas as alterações situa-se no bloco retificador antes do lado de corrente contínua. Conforme a Figura 27 os capacitores utilizados neste caso são chamados capacitores tipo Y, são normalmente utilizados com referencial ao aterramento. [12]

Foram realizados dois ensaios tendo então dois resultados, conforme Figuras 19 e 20. O primeiro teste teve como filtro os capacitores de poliéster C1, C2 e C3 com valores de 2,2nF e o segundo ensaio com valores de 4,7nF.

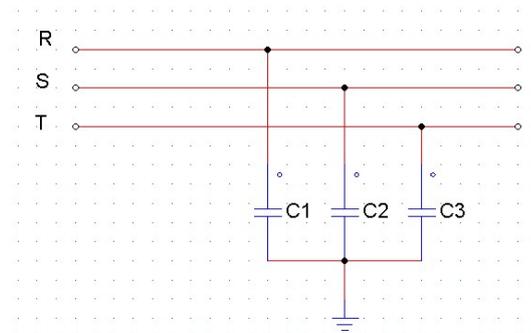


Figura 27 – Filtro de capacitores Y

Através dos resultados apresentados nas Figuras 28 e 29 pode-se notar que a diminuição do valor de capacitância do filtro de entrada, torna pior a emissão conduzida neste caso do produto em análise, mais notavelmente na faixa de 6 a 10Mhz. Isso ocorre devido a Reatância capacitiva é dada por: [12] [4]

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

(3.2)

Onde:  $X_c$  – Reatância capacitiva,  $f$  – frequência,  $C$  – Capacitância.

No caso da emissão conduzida é necessário que o filtro de entrada tenha baixa reatância capacitiva para que as correntes de frequência mais alta fiquem em um *loop* dentro do produto e, não se propaguem para a rede, neste caso apresentado o filtro trabalha nos ruídos de modo comum. [12] [4]

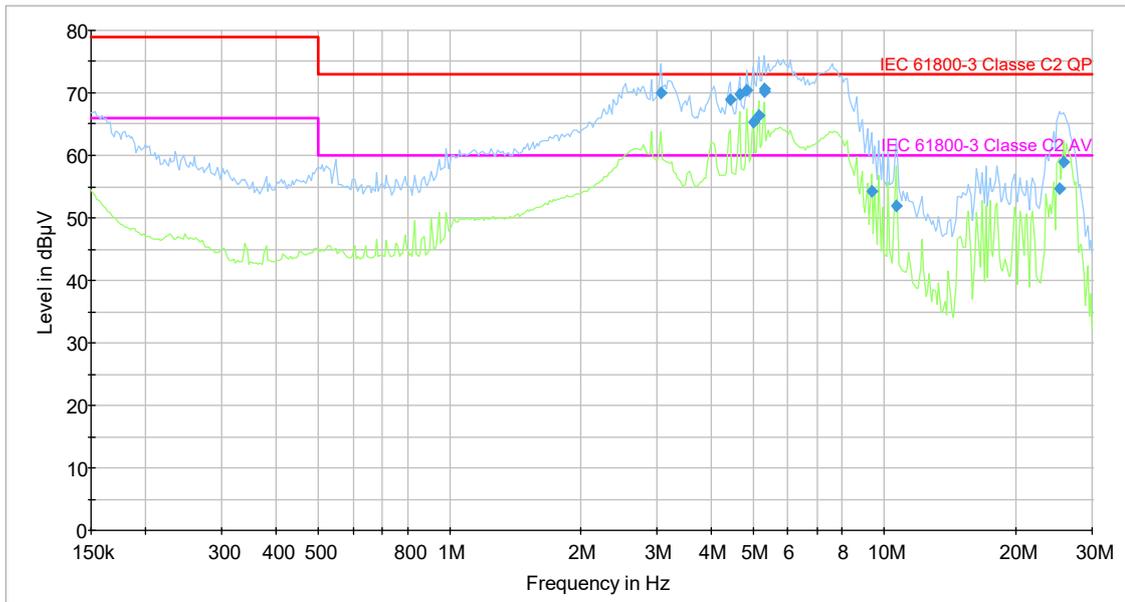


Figura 28 - Resultado da emissão conduzida com capacitores Y de 4,7nF

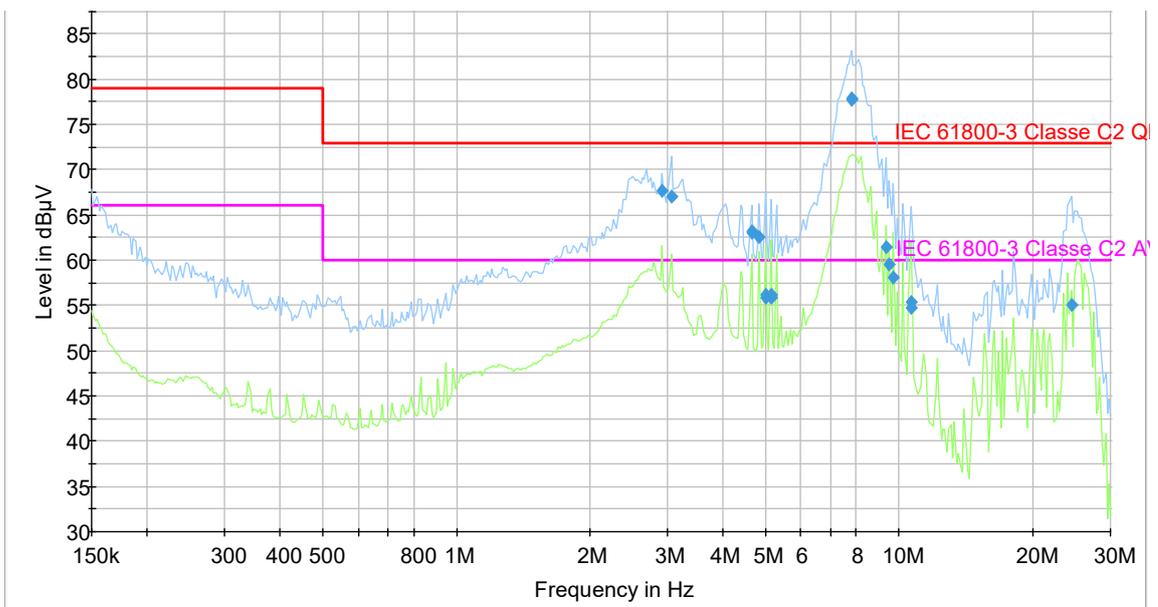


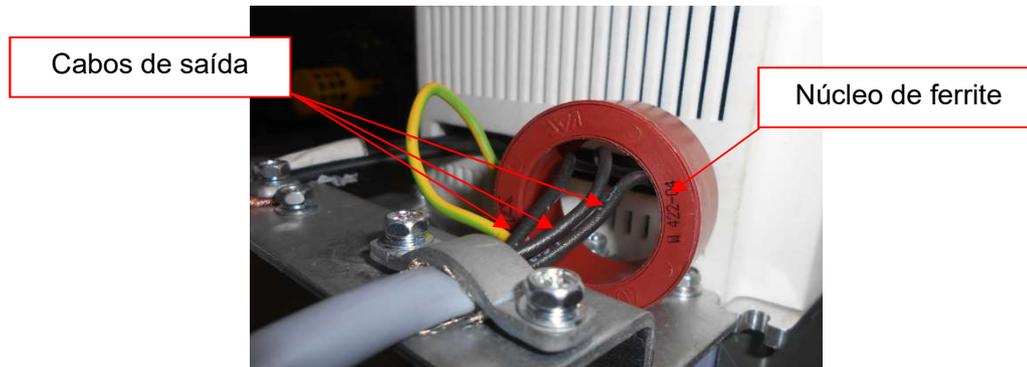
Figura 29 - Resultado da emissão conduzida com capacitores Y de 2,2nF

#### 4.5.2 SEGUNDO ESTUDO DE CASO.

Em um inversor de frequência um indutor com núcleo de ferrite nos cabos de saída para o motor com as três fases transpassando-o como apresentado na Figura 30, atenua os ruídos de modo comum, este efeito foi citado no item 2.4 deste trabalho.

Em uma situação ideal o somatório das correntes das três fases de saída é zero, porém se houver alguma fuga de corrente para o aterramento (ruído de modo comum), o somatório não será mais zero, e essa diferença nas correntes fará com que fluxo magnético que circula no ferrite também não seja mais nulo.

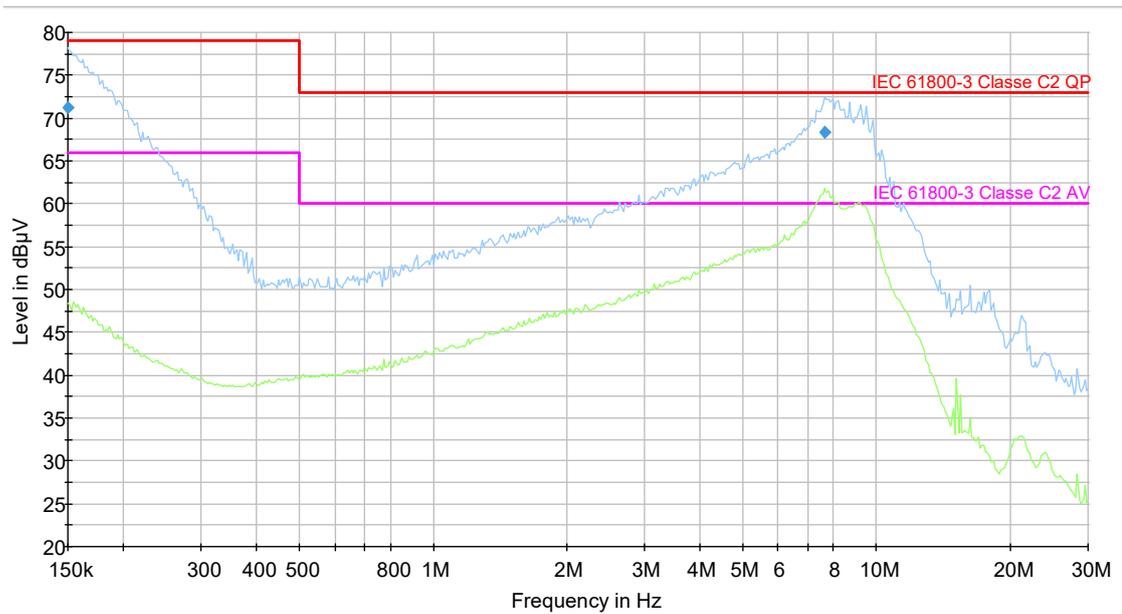
Quando há um fluxo não nulo no ferrite ocorre um aumento na indutância total do circuito, produzindo também uma corrente de sentido contrário ao campo da corrente que o gerou. [22] [12] [5]



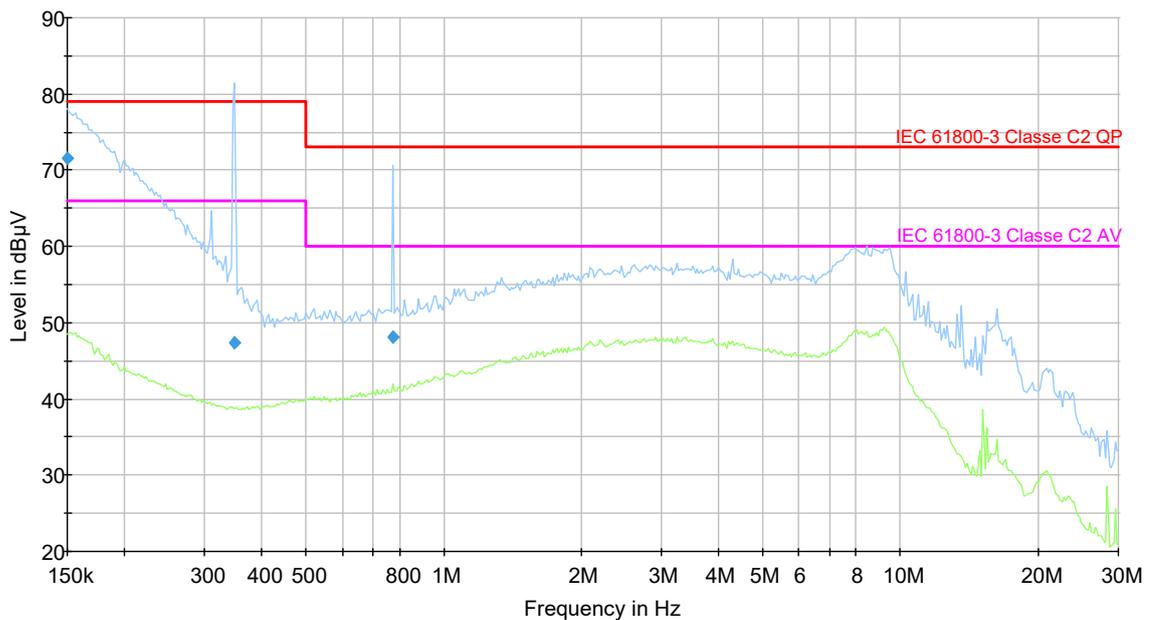
*Figura 30 - Núcleo de ferrite na saída para o motor em inversor de frequência*

A Figura 31 apresenta o resultado da emissão conduzida sem o ferrite nos cabos de saída para o motor, este resultado apresenta altos níveis de emissões na faixa de 6 a 10MHz, como dito na seção 2.1 deste trabalho, nesta faixa predominam ruídos de modo comum. [9]

A Figura 32 apresenta os resultados com a aplicação do Ferrite nos cabos de saída para o motor, neste caso o resultado apresenta uma redução muito grande nas emissões na faixa dos 6 a 10MHz.



*Figura 31 - Resultado sem aplicação do núcleo de ferrite*



*Figura 32 - Resultado com aplicação do núcleo de ferrite*

Os picos no gráfico azul da Figura 32 podem ter sido causados por ruídos na rede, já que as medições de quase pico (pontos azuis), apresentam valores muito abaixo do pico, o que significa que esses sinais não se repetiram durante a medição de quase pico.

Neste estudo de caso o núcleo de ferrite utilizado foi o modelo VAC 424. Para aplicações de ferrites, pode-se consultar sites de fabricante para encontrar o modelo ideal, normalmente o fabricante apresenta a curva de impedância por frequência do

ferrite, tendo esta curva sabe-se em qual faixa de frequência o ferrite apresentará maior efetividade.

#### 4.5.3 TERCEIRO ESTUDO DE CASO.

Como citado em 2.1.1 e 2.1.2, as correntes parasitas podem ser de dois tipos basicamente, modo comum ou diferencial, porém ambas podem estar presentes em um mesmo circuito como é o caso do resultado da Figura 33, neste resultado os níveis estão elevados em quase todo o espectro de ensaio. Este resultado também se trata de um inversor de frequência inicialmente sem filtro para emissões conduzidas.

A Figura 34 mostra o resultado da emissão conduzida após aplicação de um filtro de entrada.

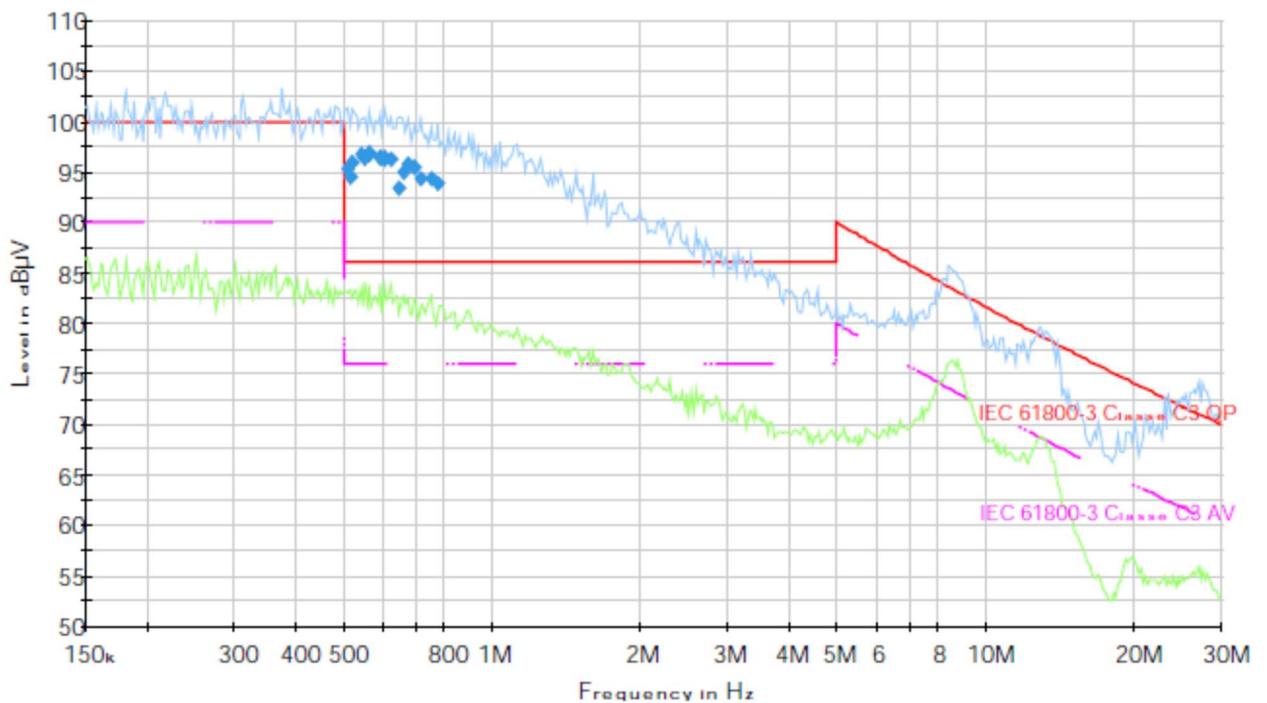


Figura 33 - Resultado inicial sem filtro para emissão conduzida

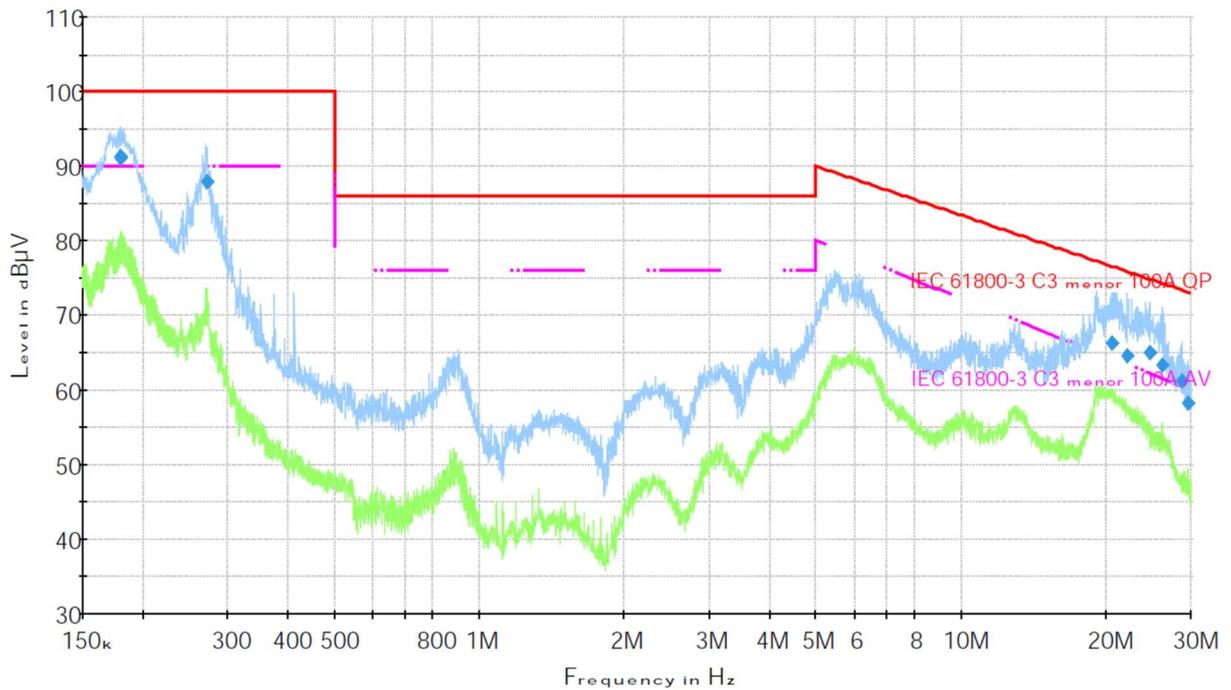


Figura 34 - Resultado com filtro de emissão conduzida

O filtro aplicado está apresentado na Figura 35, este atuou em todo o espectro de ensaio, diminuindo consideravelmente tanto os ruídos de modo comum quanto os de modo diferencial. [9]

Essa característica se deve ao fato deste filtro ter capacitores Y atuando em modo comum e, capacitores de modo diferencial juntamente com o choke atuando em correntes diferenciais e comum nas frequências de 150KHz a aproximadamente 1MHz. [9] [22] [12]

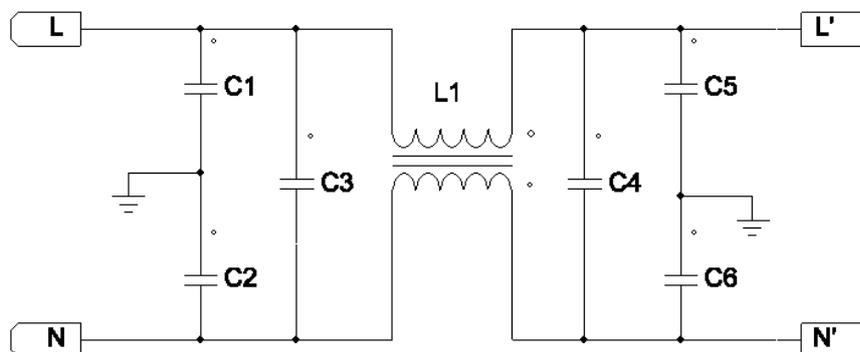


Figura 35 - Esquemático do filtro aplicado

Valores dos componentes

C1, C2, C5 e C6 – capacitores de poliéster 2,2 nF; (Filtro de modo comum)

C3 e C4 – Capacitor de 0,1μF. (Filtro de modo diferencial)

L1 – Choke de modo comum 2mH 2A. (Filtro de modo comum)

## 4.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 4

No capítulo 4 viu-se que correntes parasitas geram emissões em alta frequência, sendo que estas emissões estando na faixa de 150kHz a 30MHz são chamadas emissões conduzidas, pois utilizam cabos como meio de propagação.

Para verificar se estes ruídos, a norma CISPR11 apresenta os *setups* para realização de ensaios. Os limites de emissões conduzidas de cada produto são determinados pela IEC61800-3 para os equipamentos apresentados neste capítulo.

As emissões conduzidas podem ser reduzidas através de capacitores e indutores atuando como filtros. Sendo que para a atenuação de correntes de modo comum utiliza-se capacitores Y e indutores de modo comum, e para correntes de modo diferencial faz-se uso de capacitores X e indutores de modo diferencial.

O estudo de caso apresentado no item 3.4.3 apresentava altos níveis de emissões em todo o espectro de ensaio. Baseando-se na Figura 1, haviam as duas correntes presente neste resultado, sendo modo comum e diferencial, neste caso então o filtro apresentava etapas para modo comum e diferencial.

Foi apresentado também uma aplicação em que um núcleo de ferrite foi adicionado nos cabos de saída de um inversor de frequência, e este atenuou os níveis de emissões, comprovando a eficácia dos núcleos de ferrites na redução de ruídos de modo comum.

Um filtro para emissão conduzida pode ser dimensionado tendo as correntes de modo comum e diferencial separadas, podendo assim dimensionar os componentes do filtro de modo comum e diferencial necessários. A separação de correntes de modo comum e diferencial não foi apresentada devido a falta de dispositivos para realiza-la.

## 5. EMISSÃO RADIADA

Os ensaios de emissão radiada realizados neste capítulo foram executados em uma célula GTEM, a norma geral que rege as configurações de montagem utilizando células TEM ou GTEM é a norma IEC61800-4-20 [23].

O ensaio de emissão radiada consiste em mensurar os níveis de RF (rádio frequência), em frequências tipicamente na faixa de 30MHz - 1GHz, dependendo a norma utilizada os valores podem variar. Estes ruídos eletromagnéticos são emitidos pelo produto sob ensaio, estes utilizam o ar como meio de propagação. [3]

Um equipamento que tenha seus níveis de emissão radiada elevados pode prejudicar o funcionamento de outros equipamentos ou até mesmo o seu próprio. [12]

As células GTEM são muito utilizadas em laboratório de EMC para ensaios de desenvolvimento (*pré-compliance*) de emissão radiada. [23]

O equipamento sob ensaio é posicionado dentro da célula GTEM e então é energizado para fique em modo de operação normal. Através de uma “antena” existente na célula GTEM as RF's geradas pelo equipamento sob teste são acopladas e mensuradas através do receiver juntamente com o computador conforme Figura 36. [23][3]

A intensidade do ruído é medida na unidade de decibel microvolt por metro ( $dBuV/m$ ), por se tratar de campo elétrico a distância também aparece na unidade de medição. [23] [3]

Nos ensaios de emissão radiada há apenas uma linha limite, e esta linha representa o nível máximo que os valores de quase pico medidos podem atingir.

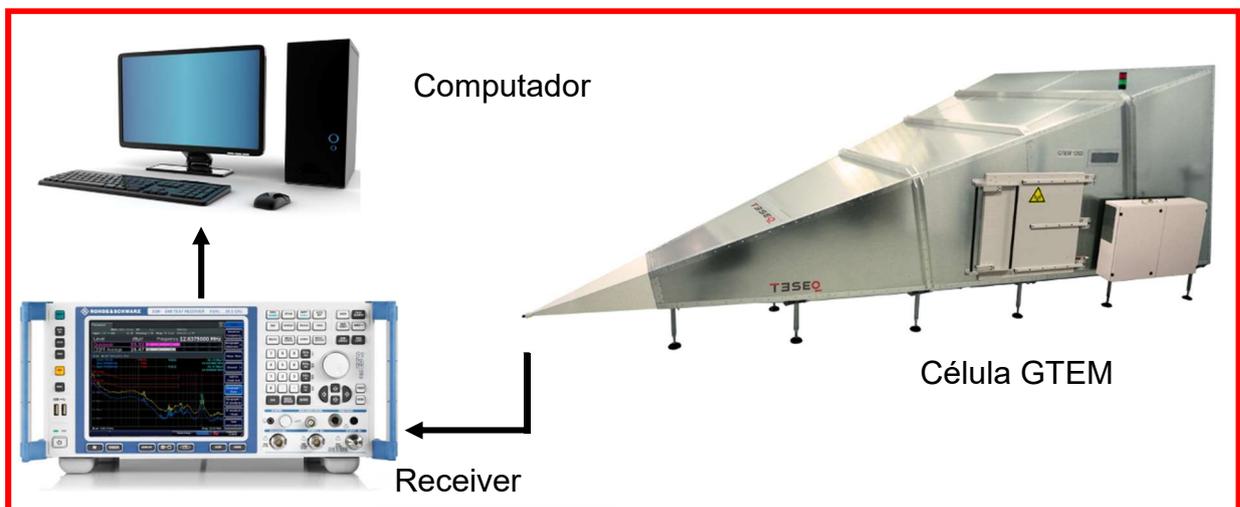


Figura 36 - Setup Macro para emissão radiada

## 5.1 EQUIPAMENTOS

Conforme item 3.2.2 deste trabalho, levantou-se a questão de ter uma rede livre de ruídos para não ter influências nos resultados, no caso da emissão radiada o Receiver fará medições até 1GHz nos ensaios deste capítulo, para estas frequências é ainda mais importante ter uma rede “limpa”, pois na GTEM os cabos de alimentação do produto ficam muito próximos da antena de medição.

Estando os cabos próximos da antena os campos eletromagnéticos gerados por RF da rede alteram os resultados [23]

### 5.1.1 ANALISADOR DE ESPECTRO

O analisador de espectro a ser utilizado na emissão radiada será o mesmo já utilizado nos ensaios de emissão conduzida conforme item 3.2 deste trabalho.

### 5.1.2 CÉLULA GTEM

A célula GTEM apresentada na Figura 37 é feita de material condutor normalmente em aço inoxidável, o que também a faz atuar como uma gaiola de Faraday. A função da célula GTEM é atuar como guia de onda ondas transverso-eletromagnéticas (TEM).

Um condutor na parte superior interna, o *septum* ou antena Figura 38, conecta-se internamente entre da ponta ao fim da célula GTEM onde se tem cargas resistivas de  $50\Omega$  para o casamento da impedância com o Receiver. Este condutor funciona como uma antena geradora e receptora de RF (rádio frequência). Para simular um campo infinito e para que não haja reflexões de ondas transverso-eletromagnéticas (TEM), na parte traseira da célula existem absorvedores de onda conforme Figura 39. [24]

O funcionamento específico e o comportamento das ondas TEM é um estudo muito detalhado que não será abordado neste trabalho.

Ao fechar a porta da célula GTEM nenhum tipo de sinal eletromagnético externo chega ao seu interior, sendo assim quando um equipamento é posicionado e posto em funcionamento no seu interior, todos os ruídos eletromagnéticos gerados serão os provenientes do próprio equipamento sob ensaios ou ruídos gerados dentro da célula, no caso do ensaio de emissão radiada.

Para o ensaio de emissão radiada a antena atua apenas como receptor de sinais, os ruídos eletromagnéticos gerados pelo equipamento serão acoplados na antena gerando uma tensão, que por sua vez será medida através do *Receiver*. [23]  
[24]



Figura 37 - Célula GTEM

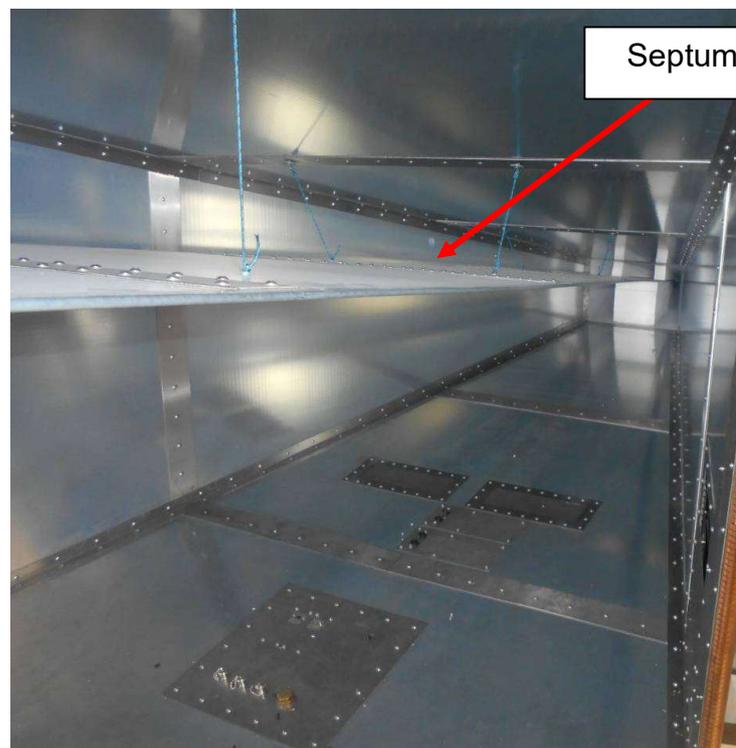
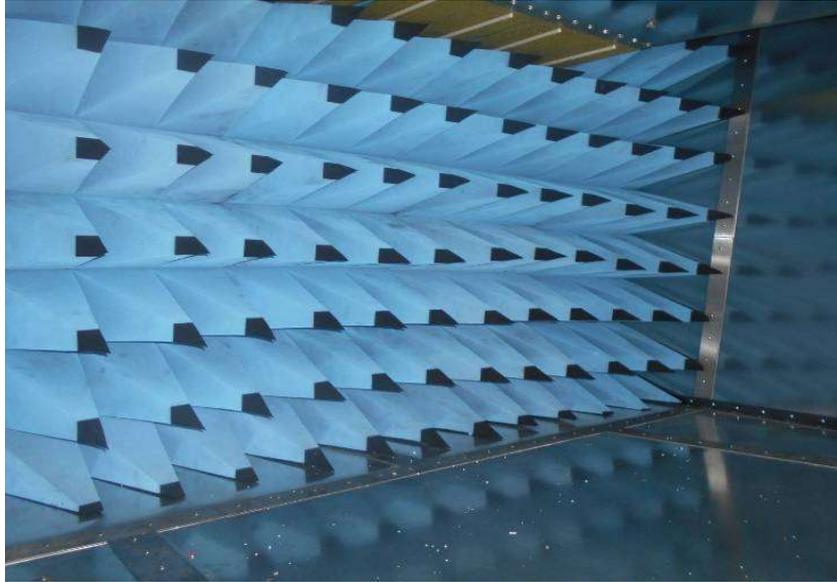


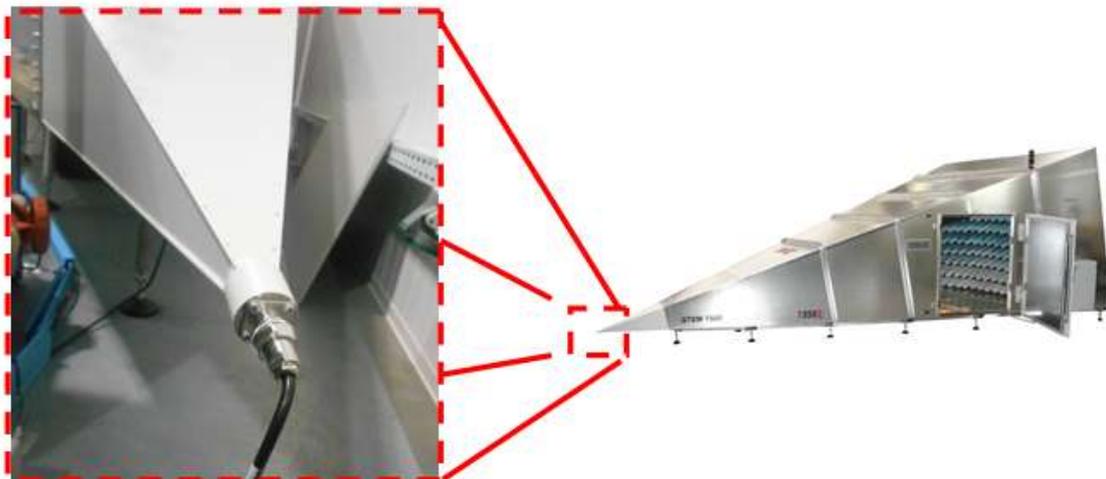
Figura 38 – Célula GTEM vista interna com destaque para o Septum



*Figura 39 - Absorvedores de campo eletromagnético*

### 5.1.3 CONEXÕES DA CÉLULA GTEM

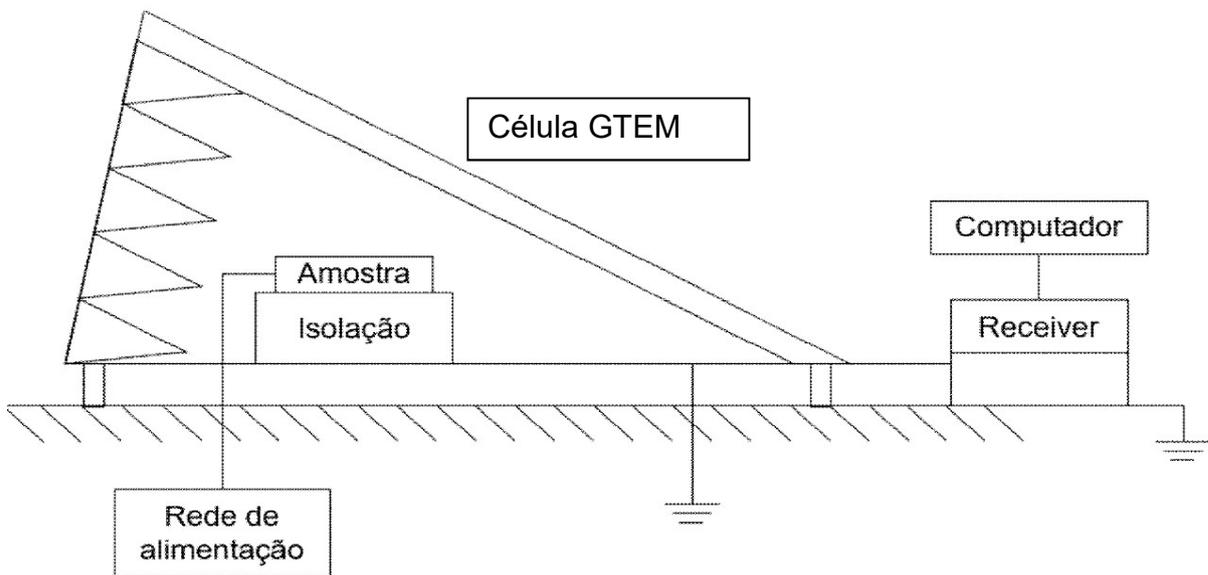
A célula GTEM possui um conector coaxial em sua ponta, este deve ser conectado, através de um cabo coaxial, ao Receiver. A Figura 40 apresenta a conexão coaxial da GTEM, a grosso modo pode-se dizer que a célula GTEM é a expansão do cabo coaxial, onde a blindagem do cabo seria a carcaça de material condutor e o Septum seria o condutor interno do cabo. [23] [24]



*Figura 40 - Conexão coaxial GTEM*

## 5.2 SETUP PARA ENSAIO

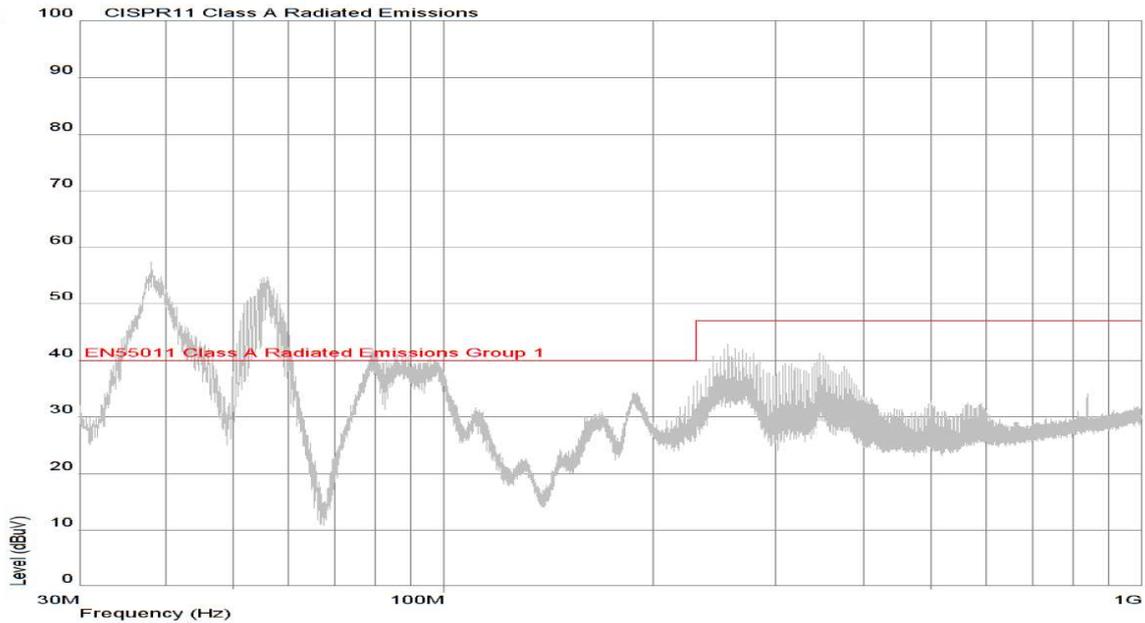
Se utilizada a IEC 61000-4-20 [23], norma internacional de emissões eletromagnéticas utilizando células GTEM e a norma IEC IEC 61800-3 [18], as medições de distúrbios radiados a serem monitorados estão na faixa de 30MHz a 1GHz e, o posicionamento dos equipamentos dentro da célula deve ser feito conforme Figura 41.



*Figura 41 – Posicionamento da amostra sob ensaio em célula GTEM*

## 5.3 PRIMEIRO ESTUDO DE CASO EMISSÃO RADIADA

Este estudo de caso refere-se a uma chave de partida eletrônica para motores elétricos (*soft-starter*), haviam elevados níveis de emissões principalmente na faixa de 30 a 100MHz, conforme a Figura 42, nesta região o limite estabelecido pela norma é de 40dbuV/m para este produto.



*Figura 42 – Resultado da emissão radiada inicial da chave de partida*

Para atenuar esta região foram feitas alterações no circuito de fonte chaveada e circuitos de comunicação. Este produto faz uso da topologia fly-back na fonte chaveada, como apresentado no item 2.1 deste trabalho um circuito fly-back pode provocar correntes parasitas de modo comum ou diferencial. [4] [12]

Uma das medidas para redução das correntes parasitas foi adicionar um capacitor entre o primário e secundário do transformador, capacitor C5 apresentado conforme a Figura 43.

A solução implantada na Figura 43 reduz o ruído de modo comum. Neste caso o ruído circula no secundário através da comutação da “chave” do circuito primário, o meio de acoplamento se faz através da capacitância dos enrolamentos (primário e secundário) do transformador devido a alta frequência de operação do MOSFET, neste caso 400kHz. [4]

A tensão nominal do capacitor Y deve ser igual ou maior que a tensão de isolamento do transformador. Neste caso foi adicionado um capacitor tântalo de 2200 pF.

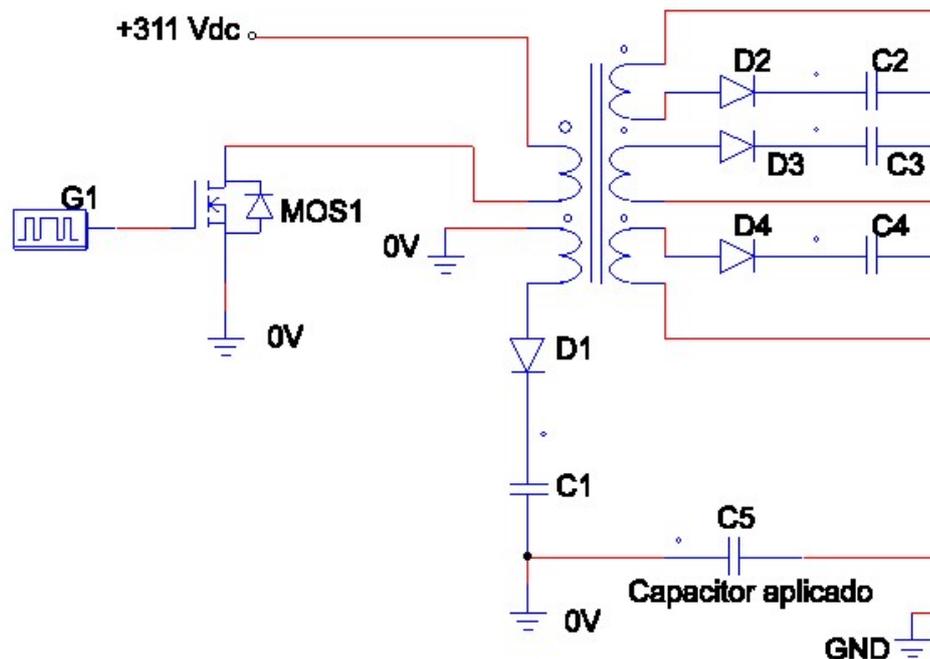


Figura 43 - Esquema da fonte chaveada e aplicação do capacitor

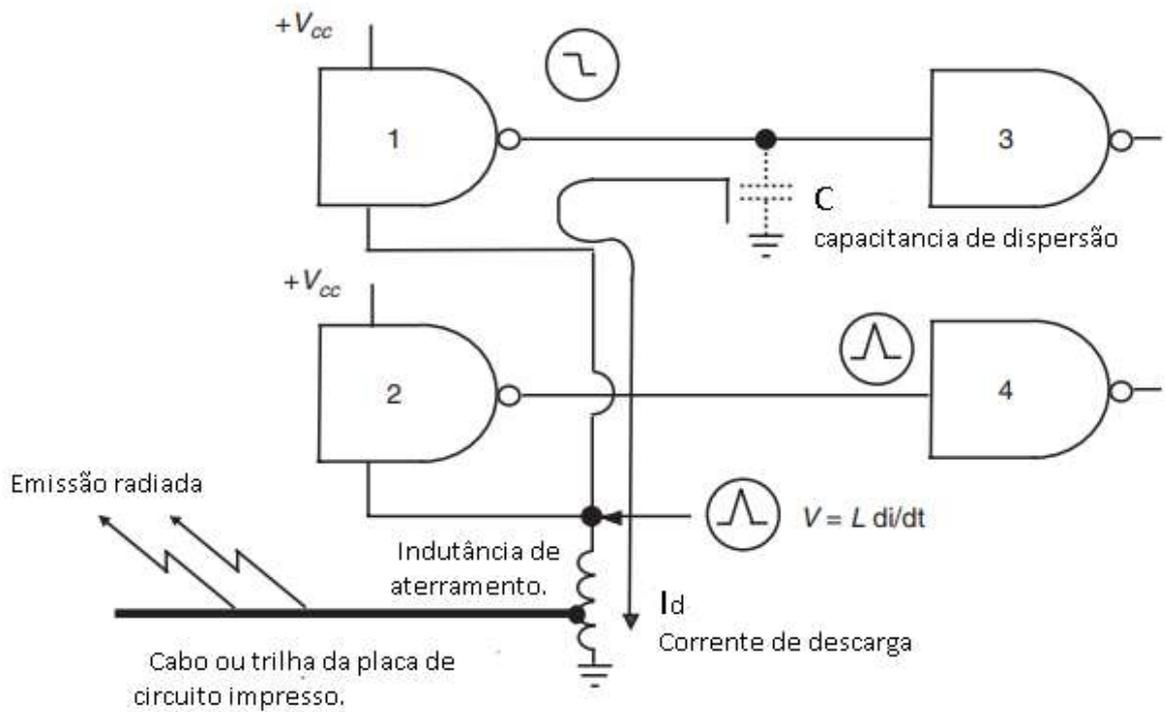
Além da alteração na fonte chaveada foram feitas alterações em um circuito digital de comunicação, circuitos de comunicação trabalham em frequências altas. [4]

Neste caso a frequência utilizada para comunicação entre os circuitos de controle é 1 MHz. Um exemplo de sistema digital simplificado com quatro portas lógicas é mostrado na Figura 44.

Observando o circuito da Figura 44 quando a saída da porta 1 muda de nível lógico alto para baixo, antes que isso ocorra existe uma alta capacitância entre as portas 1 e 2, e esta é carregada através da tensão de saída das portas.

No momento que a porta lógica 1 muda, a capacitância parasita que anteriormente foi carregada deve ser descarregada antes que o nível lógico seja transmitido para porta 3. Neste momento uma grande corrente transitória flui através do sistema de aterramento para descarregar essa capacitância gerada. [4]

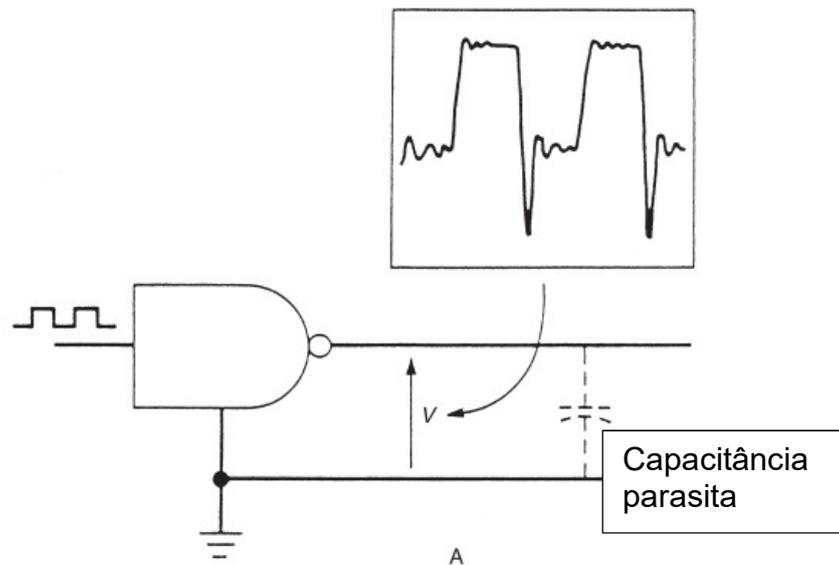
Como as trilhas apresentam indutâncias em função da frequência, a corrente produz um pulso de tensão nesta indutância de aterramento gerada pela corrente parasita. A corrente parasita de alta frequência vai fazer com que trilhas ou cabos de aterramento acabem se tornando antenas. [4]



**Figura 44 - Ruídos gerados através de circuitos digitais**

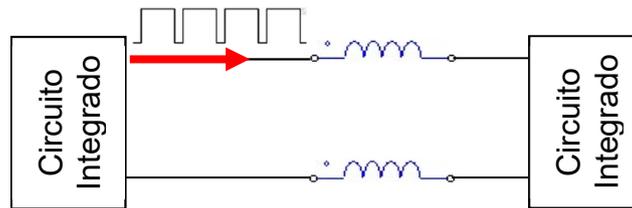
Ruídos gerados através de circuitos digitais

Devido as capacitâncias e indutâncias parasitas dos circuitos, o sinal digital que deveria ser quadrado acaba apresentando sobressinais, conforme figura 45. [4]



**Figura 45 - Ruído de alta frequência provocado por capacitâncias e trilhas em sinais de comunicação.**

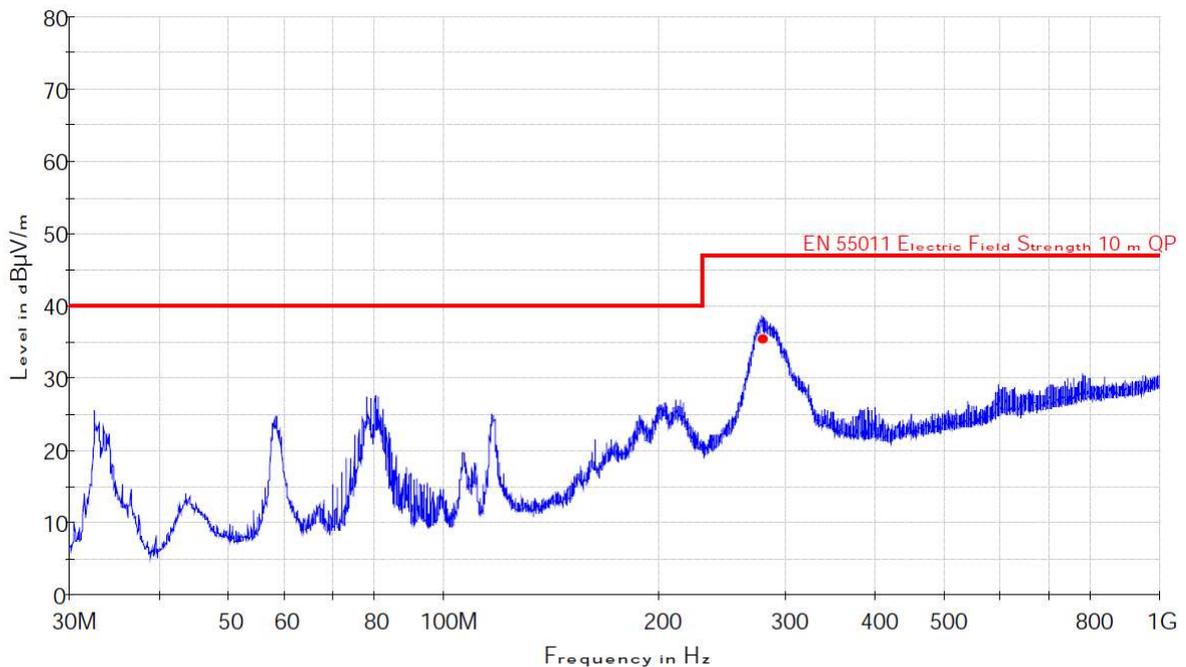
Para atenuar estes ruídos foram adicionados indutores em série entre os circuitos, conforme Figura 46.



*Figura 46 – Aplicação dos indutores no circuito de comunicação*

Com o aumento do valor de indutância as derivadas de corrente diminuem, atenuando também parte das componentes harmônicas de alta frequência. [4]

Todas as alterações citadas neste estudo de caso resultaram em níveis de emissão radiada muito menores aos iniciais como mostra o resultado final na Figura 47.



*Figura 47 - Resultado da emissão radiada da chave de partida com alterações*

Com resultado conforme Figura 42, o produto estaria reprovado, não sendo possível sua comercialização em mercados onde se faz necessário a certificação CE (comunidade europeia). Após as alterações realizadas o produto teve seu resultado no ensaio de emissão radiada aprovado. [18]

### 5.3.1 SEGUNDO ESTUDO DE CASO EMISSÃO RADIADA

O resultado da Figura 49 apresenta a emissão radiada de uma fonte chaveada com topologia tipo Fly-back. Através de uma análise inicial do gráfico da emissão radiada, nota-se que a região crítica do resultado está próxima dos 100MHz.

Com base nas características de ruídos já apresentadas na Figura 1 do capítulo 2.1 deste trabalho, é provável que o ruído esteja se propagando através dos cabos de alimentação e aterramento sendo a provável causa de emissões, as correntes de modo comum. [9]

Para avaliar se realmente se trata de propagação via cabos, um ferrite foi adicionado nos cabos de alimentação de entrada e de aterramento do produto, tendo as conexões com realizadas conforme Figura 48.

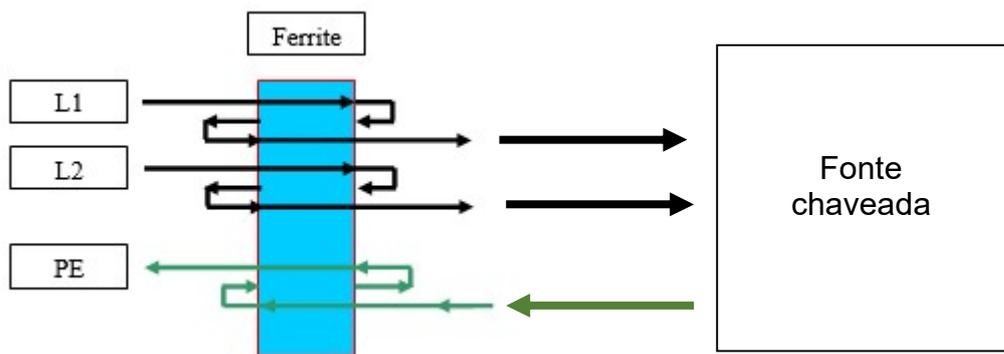


Figura 48- Modo de aplicação do ferrite nos cabos de alimentação

Sendo L1 = Fase 1, L2 = Fase 2 e PE = Cabo de aterramento (*Protective earth*)

Esta configuração irá atenuar os ruídos de modo comum caso forem estes a causa de altos níveis na região dos 100MHz, pois acrescentando o ferrite tem-se um aumento na impedância de entrada do circuito, principalmente em altas frequências. [22] [4]

Como se pode observar no resultado apresentado da Figura 50 a adição do ferrite diminuiu os níveis de emissão na faixa esperada, confirmando assim a suspeita inicial de que os ruídos estavam se propagando através dos cabos.

Com o resultado inicial conforme a Figura 49, o produto estaria reprovado, não sendo possível sua comercialização em mercados onde se faz necessário a certificação CE (comunidade europeia). Após as alterações realizadas o produto teve seu resultado no ensaio de emissão radiada aprovado. [18]

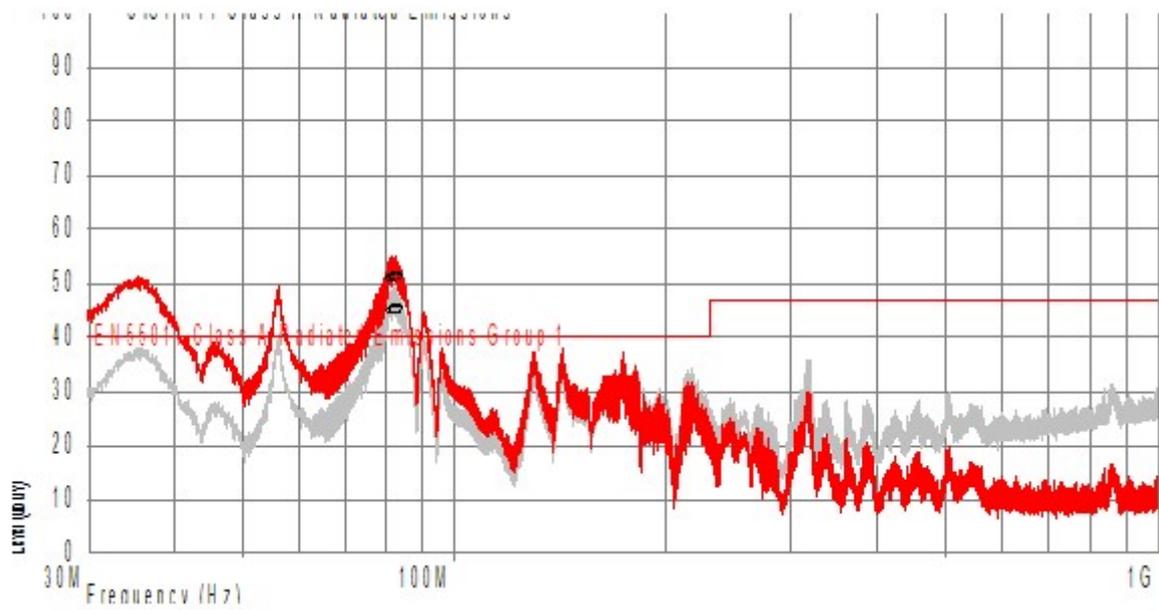


Figura 49 - Resultado inicia da emissão radiada da fonte

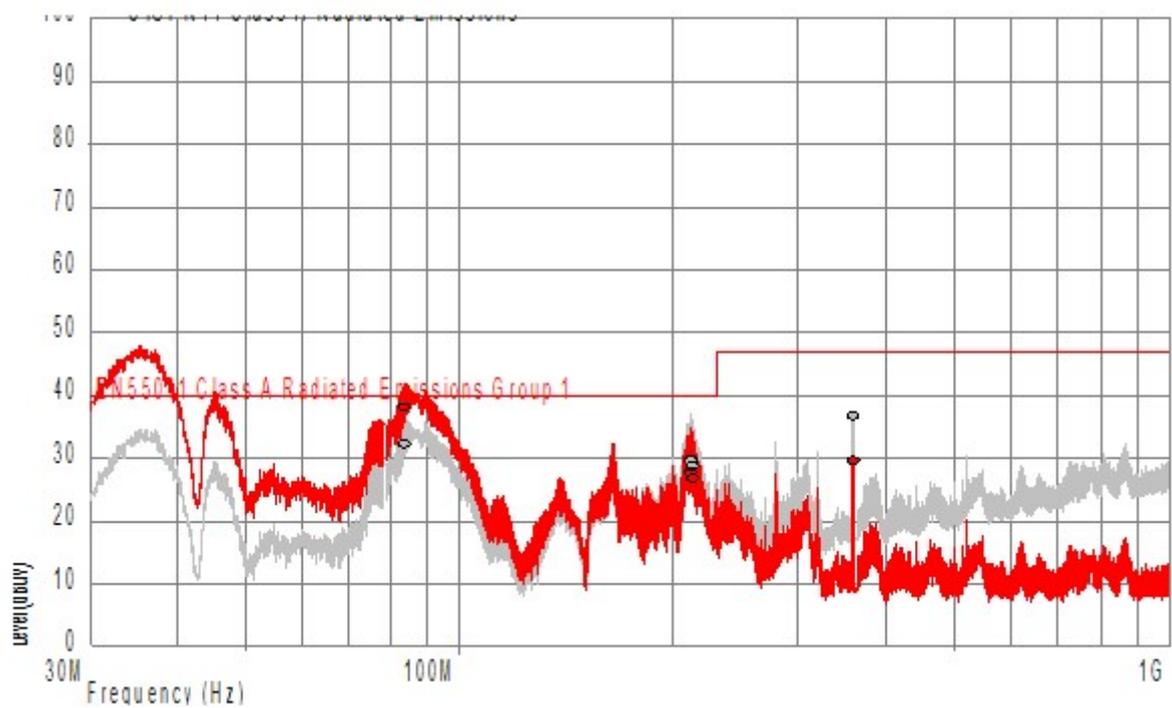


Figura 50 - Resultado com utilização do ferrite nos cabos de alimentação da fonte

## 5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 5

As emissões radiadas também são provenientes de correntes parasitas, porém estas emissões são monitoradas em uma faixa de frequência diferente do ensaio de emissão conduzida. A emissão radiada é medida na faixa de 30MHz a 1GHz para os produtos e normas mencionados neste capítulo.

A norma geral que rege as configurações de montagem utilizando células *TEM* ou *GTEM* é a norma IEC61000-4-20, os limites das emissões dos produtos citados neste capítulo são obtidos através da norma internacional IEC 61800-3 e CISPR11.

Os ensaios de emissão radiada foram realizados dentro da célula GTEM para que todo tipo de sinal eletromagnético externo não influenciasse no resultado das emissões do produto sob teste.

Circuitos digitais também são fontes de ruídos, pois quando operam na faixa dos MHz acabam gerando correntes parasitas devido as capacitâncias e indutâncias parasitas dos circuitos. O sinal digital que deveria ser quadrado acaba apresentando sobressinais de alta frequência.

Mudanças simples em um circuito digital fazem diferença nos resultados de emissão radiada, como foi o caso do estudo no item 4.3.

No estudo 4.3 a aplicação de um capacitor no transformador da fonte chaveada e o acréscimo de indutores nos circuitos de comunicação, diminuíram os níveis de emissão radiada de modo que fosse possível a aprovação no ensaio.

Através do resultado 4.3.1 pôde-se notar que um núcleo de ferrite adicionado aos cabos de alimentação atenuaram as emissões radiadas, isso ocorre se o problema for em maior parte de modo comum.

## 6. INFLUÊNCIA DE SINAIS ELETROMAGNÉTICOS SOBRE MEDIÇÕES DE TEMPERATURA.

No desenvolvimento de um produto eletrônico é importante saber se os componentes que o compõem estão operando dentro do limite de temperatura estabelecido pelo fabricante.

O sobre aquecimento não precisa ser causado necessariamente pelo ambiente em que o produto está instalado, este pode ser causado pelos próprios componentes eletrônicos. Transformadores, MOSFETS, reguladores de tensão, entre outros tendem a aquecer e transmitir calor durante seu funcionamento. [26]

Uma maneira de garantir se os componentes estão dentro dos limites de temperatura estabelecidos por norma ou fabricantes é, medindo a temperatura no próprio componente. Quando utilizadas as normas IEC 61800-5-1 ou UL508C pode-se fazer o uso de termopares para realizar estas medições. [25] [8]

Os termopares trabalham com sinais de baixa tensão na ordem de mV, portanto as medições de temperatura em componentes eletrônicos podem apresentar alguns problemas com compatibilidade eletromagnética (*EMC*) estes serão apresentados no decorrer deste capítulo. [27]

### 6.1 TERMOPAR

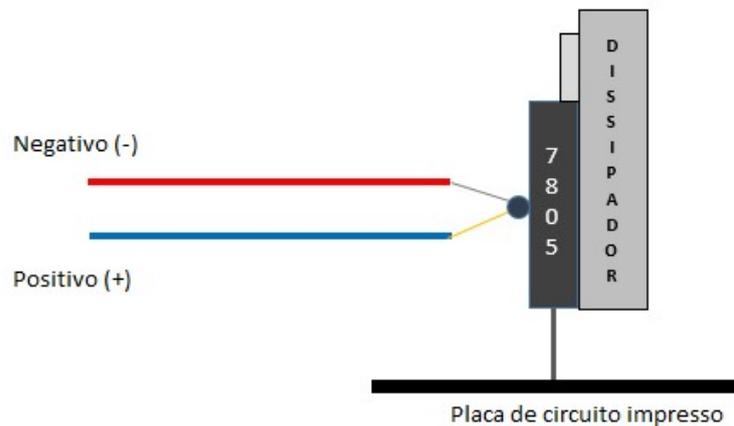
O termopar apresentado na Figura 51, é uma junção de dois materiais metálicos diferentes, estes materiais podem variar dependendo do modelo do termopar. O termopar tipo T por exemplo utiliza cobre (CU) e constantan uma liga de cobre e níquel (CU+Ni). Com a junção de dois materiais diferentes uma força eletromotriz é gerada conforme o aquecimento da junção, esta força eletromotriz ou tensão é chamada tensão de Seebeck.

A tensão gerada é variável conforme a temperatura em que está a ponta (sensor), ou seja, se a temperatura aumenta a tensão nos terminais positivo e negativo também aumentam. [27]



*Figura 51 - Termopar*

A medição da temperatura de um componente através de termopar é realizada colando a junção do termopar (sensor), na superfície do componente que se deseja obter a temperatura, conforme Figura 52 onde o componente medido é um regulador de tensão de 5V. [8] [25]



*Figura 52 - Medição de temperatura no componente*

## 6.2 REGISTRADOR DE TEMPERATURA

Como visto anteriormente no item 5.1 o termopar é utilizado para medir temperaturas através da tensão que o mesmo gera em seus terminais, para medir essa tensão e associá-la a uma escala em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), utiliza-se um registrador de temperatura, como o da Figura 53.



*Figura 53 - Registrador de temperatura YOKOGAWA MV2000*

Com o registrador de temperatura apresentado na Figura 53, vários pontos podem ser monitorados simultaneamente, pois este equipamento tem vários canais para medição de temperatura através termopares. Tendo a possibilidade de se monitorar varios pontos, pode-se medir um resistor, um regulador de tensão ou um transformador simultaneamente. [28]

### 6.3 ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

As normas IEC 61800-5-1 [25] utilizadas para o mercado europeu e UL508C [8] utilizada para o mercado americano, trazem como necessidade o ensaio de elevação de temperatura em um produto, e este deve ser realizado da seguinte maneira:

Um equipamento deve ser posto em funcionamento normal, porém este deve ser submetido às suas condições máximas, seja em corrente, tensão, ou temperatura ambiente.

Utilizando um inversor de frequência como exemplo, este deve ser energizado em sua tensão nominal, deve ter corrente nominal em sua saída e operar preferencialmente em sua máxima temperatura ambiente. O equipamento é posto nestas condições com vários termopares em seu interior medindo os mais diversos componentes.

O ensaio é considerado finalizado quando as temperaturas estão estáveis, com variação menor que 1 grau Celsius em um período de uma hora. Após finalizado o

ensaio as temperaturas obtidas são analisadas e comparadas aos limites estabelecidos por catálogo de cada componente ou normas. [25] [8]

#### 6.4 O PROBLEMAS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Como as medições são realizadas em componentes eletrônicos, estes podem estar localizados em circuitos de alta frequência, tensão ou corrente. O termopar gera uma tensão na faixa dos milivolts, uma tensão extremamente baixa podendo facilmente ser alterada por ruídos eletromagnéticos através de capacitâncias ou indutâncias parasitas. [27] [4]

#### 6.5 ENSAIOS PARA VERIFICAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS

Tendo levantado que o termopar pode ser afetado por ruídos eletromagnéticos, alguns ensaios serão realizados no decorrer deste capítulo para verificar em quais situações os sinais gerados através de termopares podem ser comprometidos.

##### 6.5.1 VERIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AO CAMPO ELETROMAGNÉTICO

Neste ensaio o objetivo é verificar se haverá comportamentos anormais nas medições de temperatura, quando o termopar é exposto a um campo eletromagnético próximo.

Podem haver casos em que os pontos de temperatura a serem medidos estão localizados em circuitos com circulação de alta corrente elétrica. Na configuração da Figura 54, as barras estão aproximadamente a 12 cm de distância entre si.

A barra em que o termopar está conectado para realizar a medição de temperatura, foi aquecida até aproximadamente 30°C, esse aquecimento foi provocado por uma corrente elétrica que circulou através da barra.

Após atingir a temperatura o circuito da fonte 2 conforme a Figura 54, foi aberto e a curva da temperatura de resfriamento da barra foi monitorada.

Durante o resfriamento da barra da fonte 2, foi aplicado uma corrente alternada de 250 A e 60Hz na barra da fonte 1 conforme Figura 54.

O resultado da curva de resfriamento é apresentado na Figura 55.

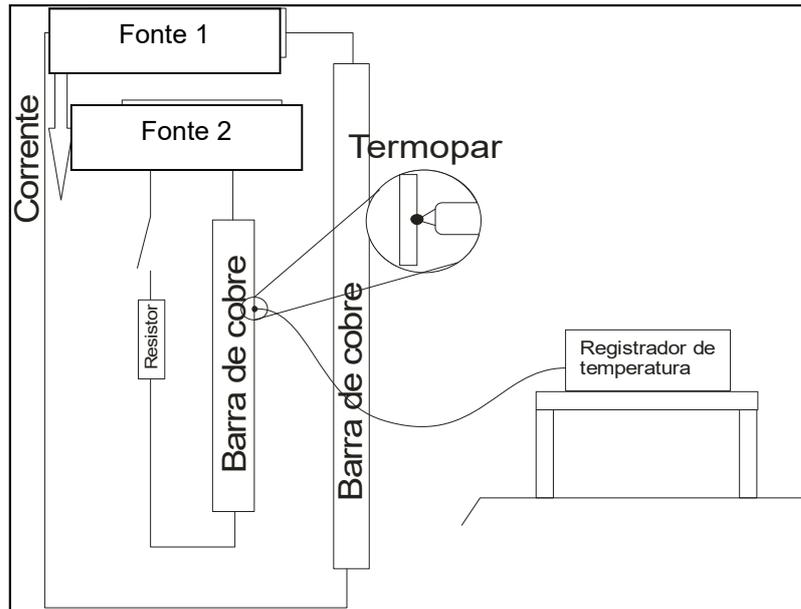


Figura 54 - Ensaio de susceptibilidade ao campo eletromagnético

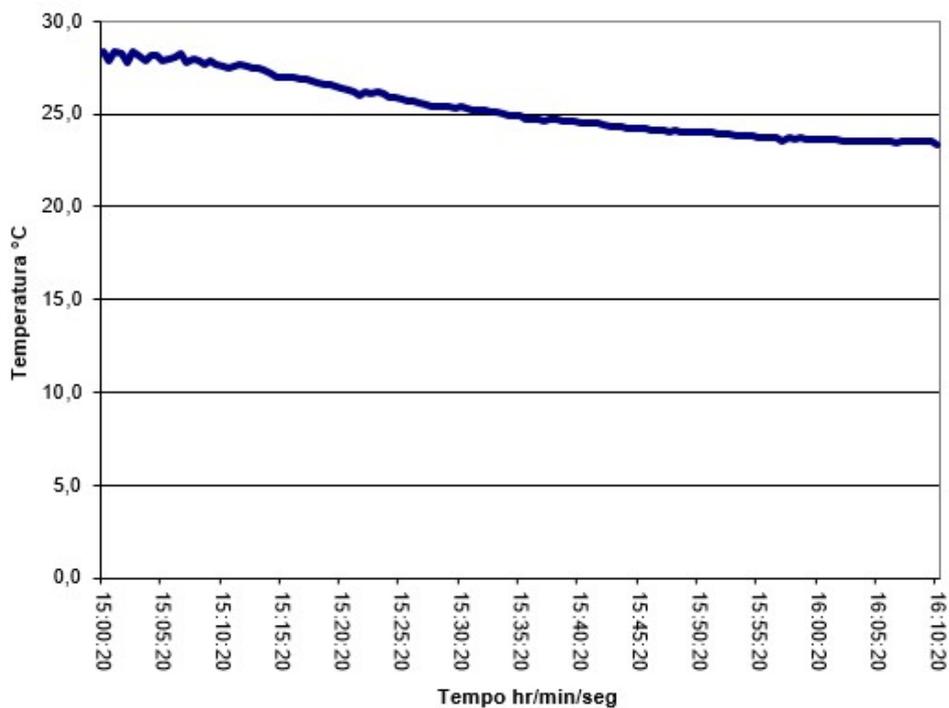
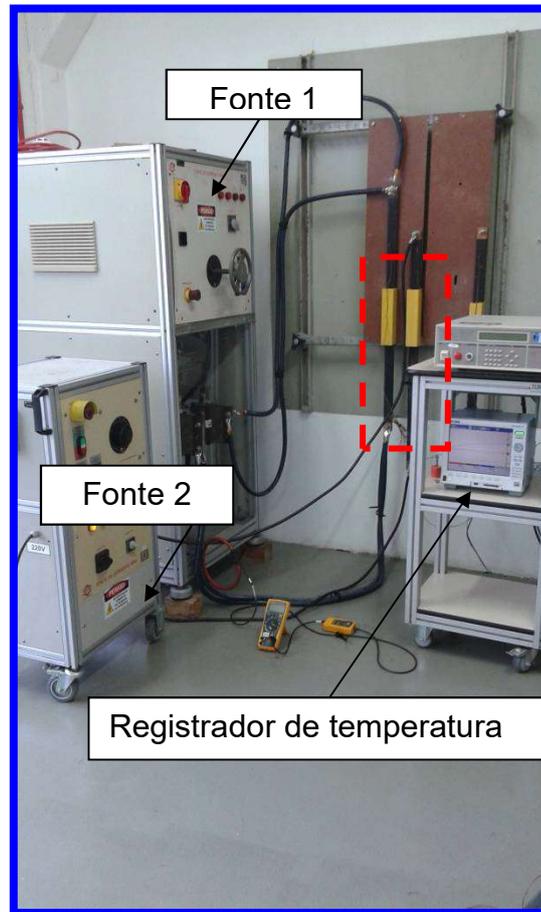


Figura 55 - Curva de resfriamento da barra

A temperatura foi monitorada por mais de uma hora durante todo o tempo havia corrente circulando através da barra da fonte 1. Observando a Figura 55 pode-se notar que não houve influência nas medições. O termopar foi enrolado na barra onde circulava corrente elétrica conforme Figuras 56 e 57, a fim de, aumentar um possível fluxo magnético pelo termopar. [5]



*Figura 56 - Foto do setup influencia campo eletromagnético*



*Figura 57 - Área ampliada da Figura 45*

### 6.5.1.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- \* Fonte 1 – Fonte de corrente capacidade de corrente 8000 A.
- \* Fonte 2 – Fonte de corrente capacidade de corrente 700 A.
- \* Registrador de temperatura – Yokogawa MV2000
- \* Multímetro – Fulke 87V.
- \* Bobina de Rogowski – Fluke I2000.

### 6.5.2 VERIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE AO CAMPO ELÉTRICO

Neste caso o objetivo é simular pontos de medição onde a corrente elétrica é baixa, porém a tensão é alta na ordem de quilovolts. O setup de ensaio permanece o mesmo da Figura 54, com a diferença que neste ensaio a fonte 1 foi substituída por uma fonte de alta tensão. Neste caso a barra monitorada estava na temperatura do ambiente, aproximadamente 22°C, a temperatura foi monitorada por mais de 20 minutos. Do início ao fim do ensaio a tensão aplicada na barra paralela subiu de 1kV até 5kV. O resultado da medição está representado na Figura 58.

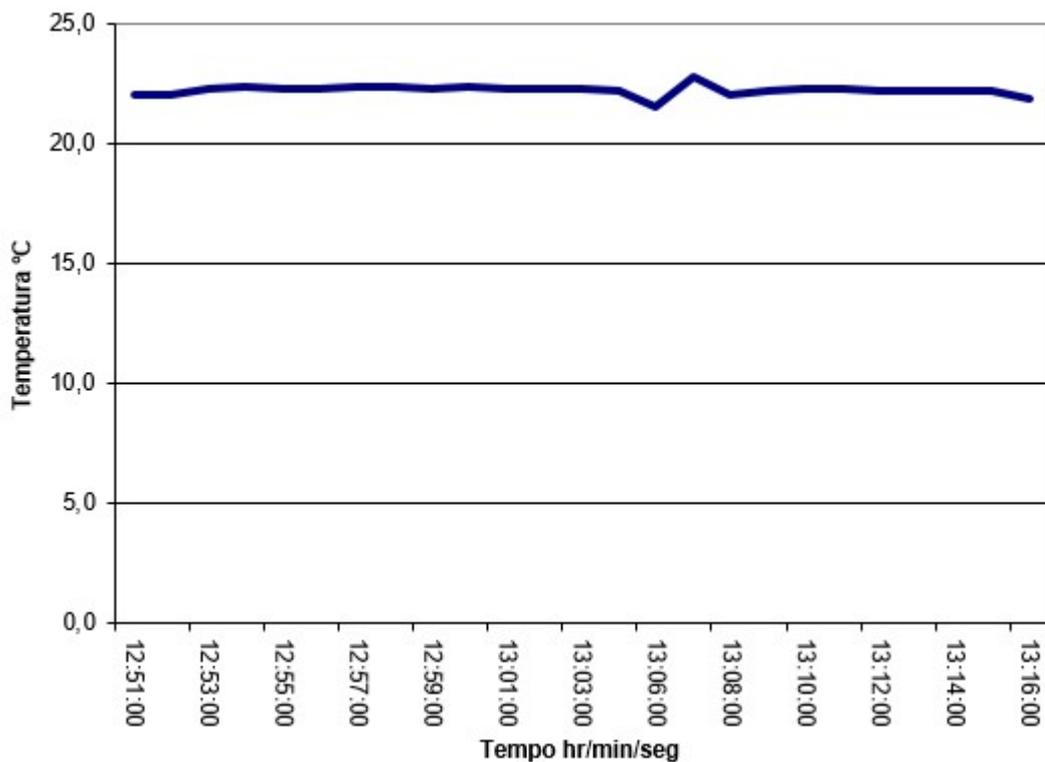


Figura 58 - Resultado de medição com campo elétrico alto

Observando o gráfico de temperatura obtido da Figura 50, pode-se concluir que não houve uma variação significativa nas medições de temperatura. A frequência da tensão produzida pela fonte é de 60 Hz.

#### 6.5.2.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- \* Fonte 1 – Fonte de alta tensão CHROMA.
- \* Fonte 2 – Fonte de corrente, capacidade de corrente 700 A.
- \* Registrador de temperatura – Yokogawa MV2000

#### 6.5.3 VERIFICAÇÃO DA SUCEPTIBILIDADE AO ACOPLAMENTO CAPACITIVO

O efeito de acoplamento capacitivo ocorre quando dois condutores paralelos estão próximos, separados por um meio dielétrico, e com diferentes potenciais elétricos. Na figura 59 tem-se duas representações onde,  $V_1$  representa a tensão aplicada ao condutor 1,  $C_{1G}$  é a capacitância do condutor 1 com relação ao aterramento,  $C_{12}$  é a capacitância parasita criada entre os dois condutores,  $C_{2G}$  é a capacitância do condutor 2 com relação ao aterramento,  $R$  é a resistência de um circuito conectado ao condutor 2 e  $V_N$  será a tensão provocada por  $V_1$  no condutor 2.

[4]

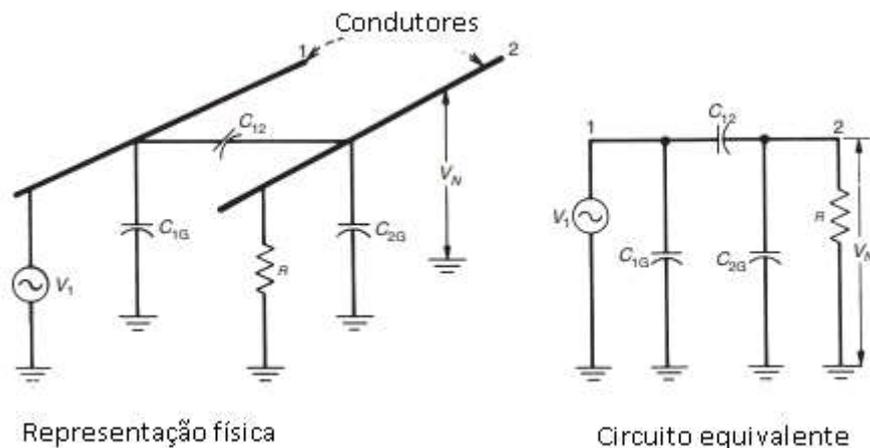


Figura 59 - Acoplamento capacitivo representação física e circuito equivalente

Considerando a resistência  $R$  um valor baixo, a tensão  $V_N$  pode ser obtida através da seguinte equação (5.1): [4]

$$V_n = j\omega * R * C_{12} * V_1$$

(5.1)

Onde:

$V_n$  = Tensão no condutor 2.

$C_{12}$  = capacitância entre condutor 1 e 2.

$V_1$  = Tensão da fonte do condutor 1.

$R$  = Carga do condutor 2.

$\omega$  = Frequência angular.

A capacitância  $C_{1g}$  foi desprezada pois não influencia no sinal em  $R$ . Uma representação simplificada para o acoplamento capacitivo é apresentada na Figura 60, onde a fonte de corrente  $I_N$  é resultado do campo elétrico do condutor 1 e a capacitância parasita entre condutores 1 e 2. [4]

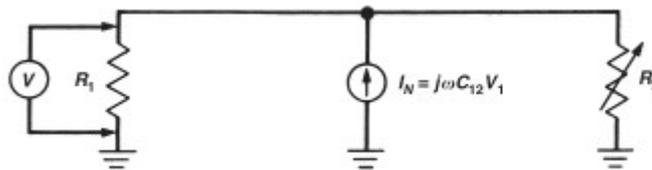


Figura 60 - Representação do acoplamento capacitivo

Trazendo esta configuração para o uso de termopares, o termopar pode ser considerado circuito do condutor 2, e este pode ser perturbado por variações de tensão do circuito do condutor 1. [4]

Para simular o acoplamento capacitivo em um termopar foi utilizado um acoplador capacitivo com um termopar no seu interior conforme Figuras 61 e 62, este acoplador é comercialmente vedado por empresas que trabalham com equipamentos para EMC. A função do acoplamento capacitivo é acoplar sinais aos cabos que o transpassam. [29]

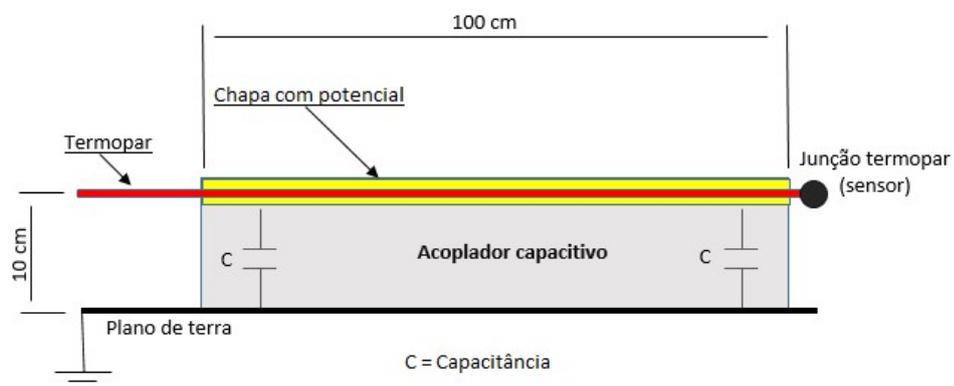


Figura 61 - Termopar no acoplamento capacitivo



*Figura 62 - Foto do acoplador capacitivo*

Após o termopar alocado no acoplador, este por sua vez é conectado a um gerador UCS 500N – apresentado na Figura 63, o gerador irá então aplicar os distúrbios. O termopar é conectado então ao registrador de temperatura conforme Figura 65.



*Figura 63 - UCS500N*

O equipamento da Figura 63, é um simulador de transientes rápidos, o sinal que será aplicado ao acoplador capacitivo, e transmitido via cabo coaxial. [30]

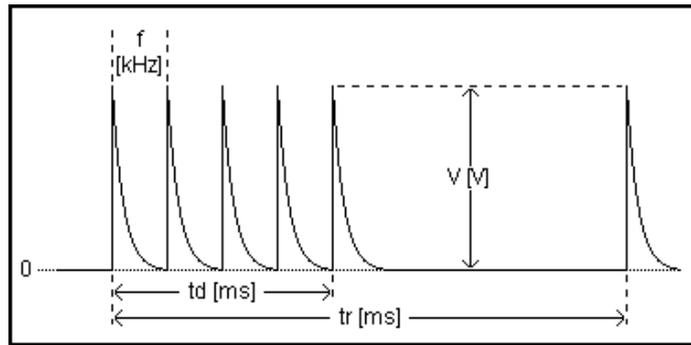


Figura 64 - Sinal enviado ao acoplador capacitivo

A forma de onda do sinal aplicado ao acoplador capacitivo é apresentada na Figura 64. As configurações de amplitude e frequência do sinal, serão apresentadas juntamente com os resultados.

A Figura 65 mostra o setup completo para melhor entender a configuração física do ensaio.

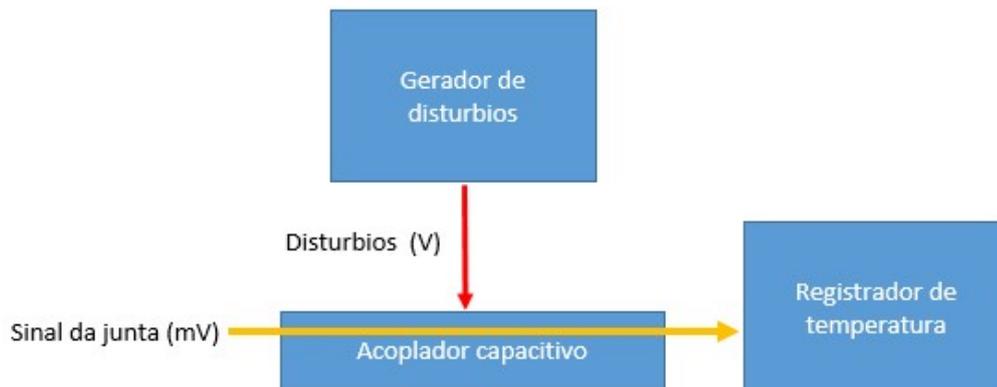


Figura 65 - Setup utilizando acoplador capacitivo

### 6.5.3.1 RESULTADOS AO ACOPLAMENTO CAPACITIVO

No termopar estava sendo medida uma temperatura ambiente próxima de 21°C.

Os primeiros picos de temperatura apresentados na Figura 66 se iniciam, aproximadamente às 13 horas 44 minutos 17 segundos, neste momento os pulsos de 10kHz e 500V foram aplicados ao acoplamento. Novamente às 14 horas 44 minutos e 47 segundos ocorrem mais variações, desta vez os ruídos são com 5kHz. Neste caso a variação mais brusca foi aproximadamente 80°C, a temperatura medida foi de 100°C quando deveria ser 21°C. Este ensaio mostra como um termopar é altamente

vulnerável ao acoplamento capacitivo em altas frequências.

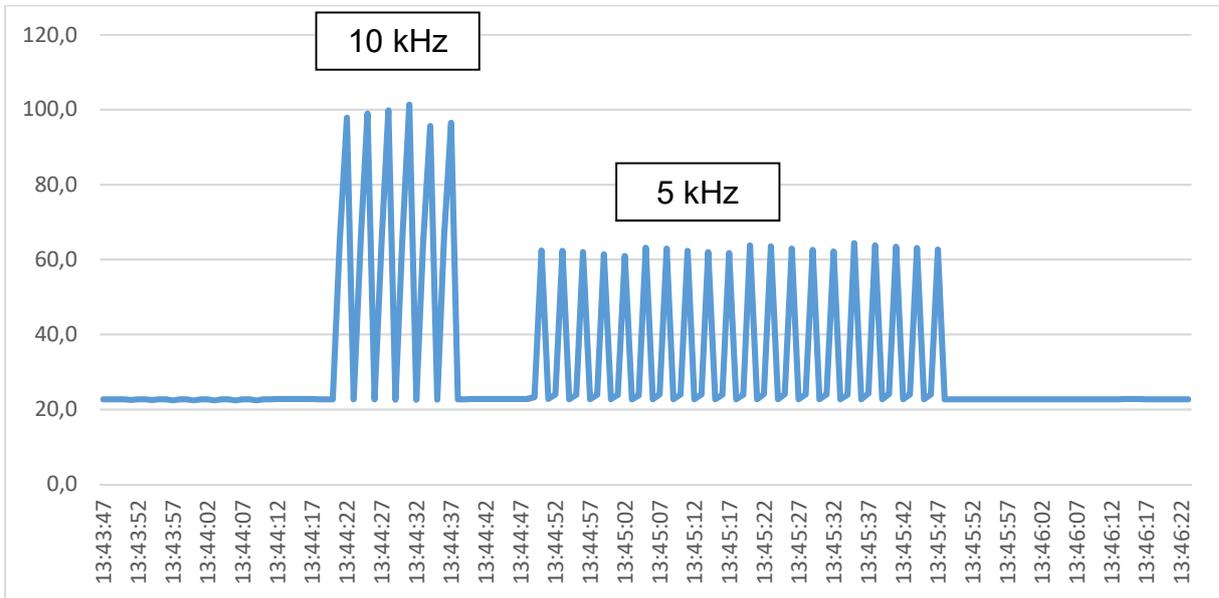


Figura 66 - Efeito capacitivo no termopar não blindado

### 6.5.3.2 TÉCNICA PARA REDUÇÃO DO ACOPLAMENTO CAPACITIVO

O uso de cabos blindados faz com que o acoplamento capacitivo seja reduzido, uma representação é apresentada na Figura 67 seguindo o mesmo modelo da Figura 48 porém com o acréscimo da blindagem sobre o condutor 2. [4]

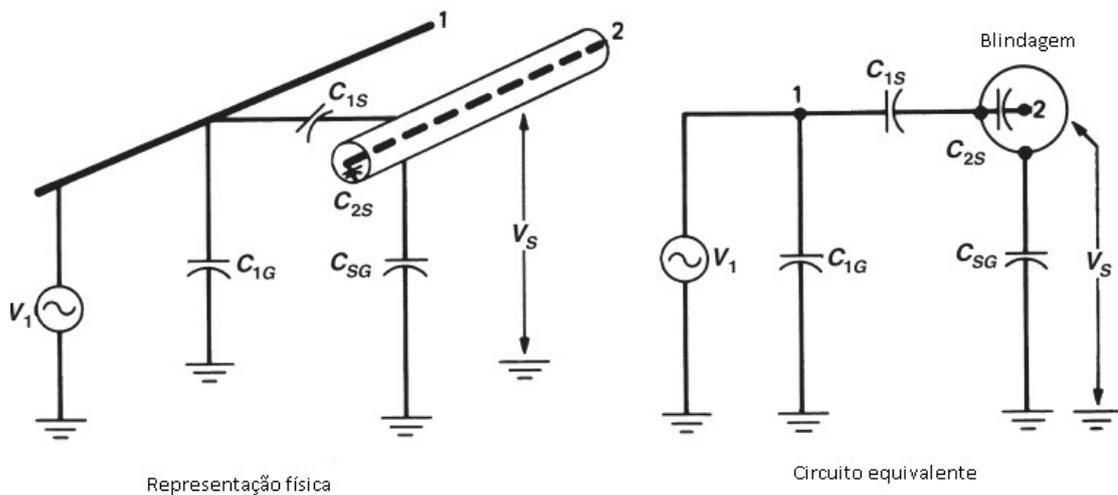


Figura 67 - Efeito da blindagem sobre o acoplamento capacitivo com representação física e circuito equivalente.

A blindagem deve envolver completamente o condutor 2 e a mesma não pode ter lacunas. A blindagem será um cabo exposto ao condutor 1 e esta não terá nenhuma conexão com o condutor 2.

A equação 5.2 pode ser usada para calcular a tensão acoplada na blindagem:

[4]

$$V_s = \left( \frac{C_{1s}}{C_{1s} + C_{sg}} \right) * V_1 \quad (5.2)$$

Onde:

$V_s$  = Tensão na blindagem.

$C_{1s}$  = Capacitância entre condutor 1 e a blindagem.

$C_{sg}$  = Capacitância entre blindagem e aterramento.

$V_1$  = Tensão da fonte do condutor 1.

Através do circuito equivalente apresentado na Figura 58, pode-se dizer, neste caso, que a única impedância conectada ao condutor 2 é a capacitância  $C_{2s}$ .

Não há nenhuma outra impedância conectada ao condutor 2, nenhuma corrente flui em na blindagem. Então, não pode haver queda de tensão entre  $C_{2s}$ , tensão no condutor 2 será : [4]

$$V_n = V_s \quad (5.3)$$

Onde:

$V_n$  = tensão no condutor 2.

Ou seja, a blindagem e o condutor 2 terão o mesmo potencial, porém ao aterrar a blindagem tem-se que  $V_s$  será igual a zero, então: [4]

$$V_n = 0 \quad (5.4)$$

Com isto sabe-se que a blindagem terá efeito de redução do acoplamento capacitivo quando esta for devidamente aterrada. [4]

Existem no mercado termopares com blindagem, conforme Figura 59. Para provar que a blindagem realmente atenua o acoplamento capacitivo, o mesmo ensaio onde

o resultado é mostrado na Figura 66 foi repetido em um termopar blindado. Os resultados da Figura 69 comparam a variação da medição de temperatura entre um termopar blindado e outro não blindado.



Figura 68 - Termopares blindados

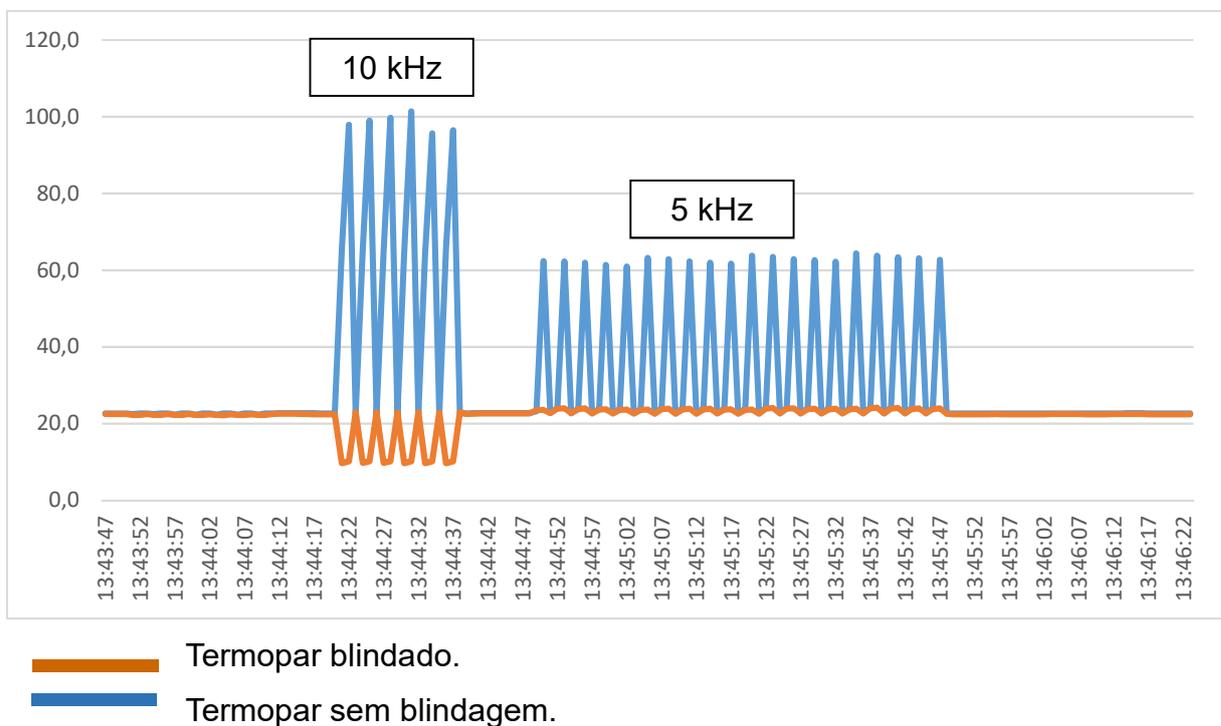


Figura 69 - Comparação termopar com e sem blindagem

Como pode-se observar na Figura 69 o termopar blindado apresenta variações menores em relação ao termopar não blindado. Durante as aplicações de 5kHz as variações são quase desprezíveis no termopar blindado, enquanto que no termopar não blindado as oscilações apresentam valores elevados. Durante as aplicações de 10kHz o termopar blindado começa a apresentar oscilações, porém, ainda bem menores em relação ao termopar não blindado.

Este ensaio mostra que o termopar blindado é mais confiável para medições de temperatura em circuitos eletrônicos onde possam haver acoplamentos capacitivos.

## 6.6 CONCLUSÃO DO CAPITULO 6

Ensaio de temperatura em equipamentos eletrônicos são necessários para saber se os componentes estão operando dentro da sua faixa de temperatura ideal, para realizar as medições de temperatura nos componentes, faz-se o uso de termopares.

Nos estudos apresentados sobre influências eletromagnéticas em medições de temperatura através do uso de termopares, notou-se que a pior interferência para um termopar é o acoplamento capacitivo.

O acoplamento de correntes parasitas no cabo de termopar faz com que as leituras de temperatura apresentem valores falsos. Estas correntes parasitas provenientes de acoplamentos capacitivos se tornam cada vez mais presentes com o aumento da frequência, como foi mostrado através da Figura 69.

Foi apresentado também uma solução que atenua os níveis de correntes parasitas provenientes de acoplamento capacitivo no termopar. A ação sugerida é adicionar uma blindagem nos termopares, diminuindo-se o efeito da capacitância parasita no mesmo. O efeito da blindagem foi apresentado na Figura 69 e como pôde-se notar o termopar com blindagem teve significativa redução nas variações de medição de temperatura se comparado ao termopar sem blindagem.

As correntes de baixa frequência na ordem de 60Hz e 250 A não afetaram as medições realizadas por termopar, mesmo que os cabos por onde circulava esta corrente estivessem próximos do cabo de termopar.

Campos elétricos de tensão continua também não apresentaram influência sobre as medições com termopares.

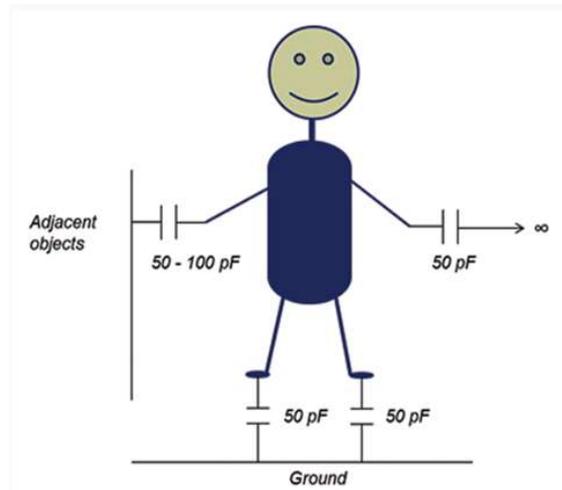
## 7. CAMPOS ELÉTRICOS GERADOS A PARTIR DE DESCARGAS HUMANAS EM CHAPAS METÁLICAS.

Tanto na indústria quanto no meio residencial é comum o uso de painéis metálicos para alocar equipamentos eletroeletrônicos, sejam disjuntores, relés, inversores de frequência, servo conversores e outros. [11]

Quando uma pessoa está eletrostaticamente carregada ao tocar um painel metálico com potencial elétrico diferente do seu, esta pessoa irá descarregar suas cargas elétricas no painel metálico, gerando campos eletromagnéticos que podem gerar ruídos em produtos eletrônicos. [2]

### 7.1 DESCARGA ELETROSTÁTICA HUMANA

O corpo humano possui naturalmente capacitâncias, e estas estão representadas na Figura 70. Esses capacitores podem ser carregados com cargas elétricas estáticas, ou seja, o corpo humano passa a ter um potencial elétrico em relação a outros objetos ou pessoas. [2]



*Figura 70 - capacitância do corpo humano*

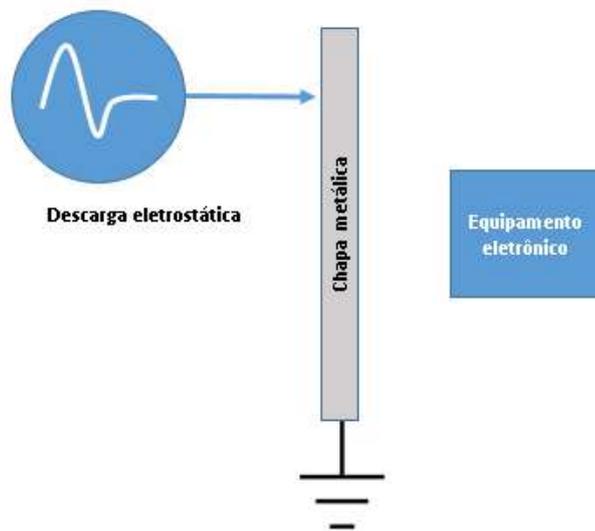
O carregamento pode ser positivo quando há falta de elétrons ou negativo quando há excesso de elétrons. A carga ou descarga destes elétrons pode ocorrer basicamente por três maneiras:

- Contato.
- Indução.
- Atrito.

Sendo que para o nosso corpo as mais comuns são o carregamento por contato e ou por atrito. [2]

### 7.1.1 DESCARGA ELETROSTÁTICA HUMANA EM EQUIPAMENTOS

Quando ocorre uma descarga eletrostática de uma pessoa para uma chapa metálica próxima de um equipamento em funcionamento, conforme figura 71, uma sequência de eventos ocorre: [2]



*Figura 71 - Descarga em chapa próxima de um equipamento*

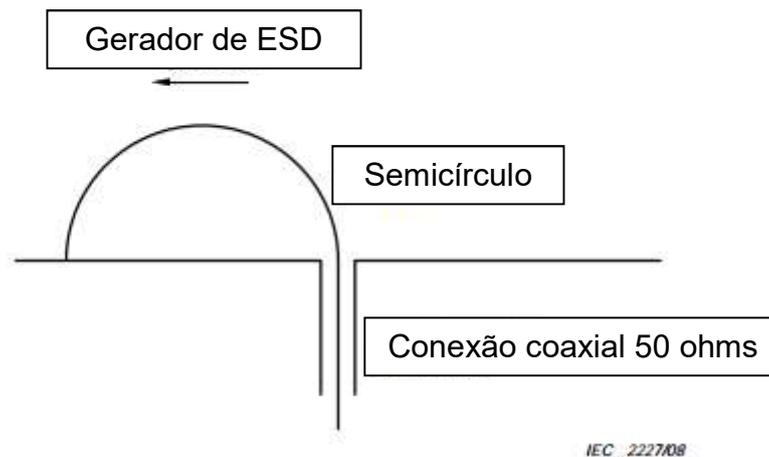
- 1 Quando uma chapa metálica está próxima de um equipamento e a pessoa descarrega sua carga eletrostática nesta chapa, antes de ocorrer a descarga da corrente, um campo elétrico é gerado e, enquanto não há corrente circulando o campo elétrico é irrelevante. [2]
- 2 Uma vez que a descarga é iniciada, entre a chapa de metal e o equipamento, um campo eletrostático se extingue entre os dois, começando de um valor inicial de onde o campo foi gerado até o valor final onde foi extinto. O intervalo de tempo deste evento é de 50ps a 5ns. O tempo de extinção do campo elétrico depende dos parâmetros de arco, tensão, etc. A

rápida extinção do campo elétrico é um dos vários fatores de eventos que causam fortes transientes de campo eletromagnético. [2]

- 3 Quando tocada por uma pessoa a corrente da descarga flui através da chapa e do equipamento, a corrente aumenta com a velocidade da luz e dentro de aproximadamente 0,8ns, atingiu o braço da pessoa. Com a corrente aumentando no equipamento e no braço da pessoa, esta terá reflexões e perdas devido à radiação e resistência, levando a um padrão complexo de densidade de corrente tanto na pessoa quanto no equipamento [2]
- 4 À medida que o processo de descarga prossegue, as componentes de frequências maiores da corrente serão atenuadas rapidamente, principalmente devido à radiação. A corrente diminui à medida que o tempo aumenta (corrente de frequência mais baixa) e finalmente o corpo alcança um novo equilíbrio electrostático com o equipamento. A carga restante no corpo, entretanto não é nula, pois o arco poderia extinguir-se antes que o corpo tivesse completamente descarregado. [2]
- 5 Variações subitas de corrente causam campos eletromagnéticos irradiados em estreita proximidade os campos são denominados pela corrente e pela carga diretamente, e em distâncias maiores a derivada do tempo corrente e da carga determinará os campos. A região de transição entre os campos de proximidade próximos (campo próximo) e os campos vistos a uma grande distância (campo distante) é mais complexa. Medições e simulações mostraram que campos temporários de ESD, pelo menos para os primeiros nanosegundos mais perturbadores, atingem condições de campo distante a uma distância de 10 cm do arco. [2]

## 7.2 CAMPOS TRANSITÓRIOS DE ESD EVENTO DE REFERÊNCIA

Os campos transitórios de ESD podem induzir tensões em trilhas nas placas de circuito impresso, provocando mal funcionamento ou gerando sinais falsos em circuitos de leitura. Uma configuração para realização da medição da tensão induzida através de um semicírculo é mostrada na Figura 72. [2]



*Figura 72 - Configuração para medição de tensão induzida em ESD*

### 7.3 ENSAIO PARA VERIFICAR A TENSÃO INDUZIDA EM UM SEMIICÍRCULO

Este ensaio é realizado conforme a norma IEC 61800-4-2 [2], esta norma rege as configurações de ensaios para ESD. Esta norma também traz estudos que possam ser realizados em laboratório para verificar os fenômenos causados por descargas eletrostáticas. Em um destes ensaios uma chapa metálica plana é posicionada próxima de um semicírculo, este irá simular trilhas de um suposto equipamento próximo a uma chapa metálica durante uma descarga eletrostática (pessoa descarregando em uma chapa metálica). Tratando-se de descargas eletrostáticas em chapas metálicas, antes de ocorrer a descarga da corrente, um campo elétrico é gerado. [2]

Uma vez que a descarga é iniciada entre a chapa de metal e o equipamento eletrônico, um campo eletrostático se extingue entre os dois.

O objetivo é tentar medir a tensão induzida no semicírculo através da descarga de ESD na chapa e os campos gerados, uma medição extra também foi adquirida a título de estudo sendo uma medição através de um loop comercial para medir campos eletromagnéticos em região de campo próximo.

#### 7.3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO:

- Medidor de umidade e temperatura novus.
- Osciloscópio Tektronix MDO4054B-3 500MHZ 2.5GS/s
- Gerador de descarga eletrostática ESD Schaffner NSG 435.

- Cabo coaxial com semiloop 50R (confeção própria).
- Ponteira de medição de campo magnético RSH 400-1.
- Trena.

### 7.3.2 SETUP PARA MEDIÇÃO DA TENSÃO INDUZIDA

Conforme indicado na Figura 73 a chapa metálica plana está posicionada na vertical e aterrada por uma resistência equivalente de  $970\text{K}\Omega$ , neste ensaio a chapa está a uma distância de 10 cm dos dois loops de medição e os mesmos estão sobre superfícies isolantes de aproximadamente 10 cm de altura, também posicionados sobre um plano de terra, os loops por sua vez estão conectados ao osciloscópio. O osciloscópio tem largura de banda de 500MHz, neste ensaio o canal em que estava conectado o semicírculo com terminação de  $50\Omega$ , foi configurado para que sua entrada também tivesse uma impedância de  $50\Omega$  a fim de haver um casamento de impedância entre os dois e evitar possíveis reflexões. As medidas adquiridas são dadas em volt/ohm, pois, trata-se de um diferencial de potencial sobre o resistor.

O gerador de ESD foi configurado para efetuar disparos de 5KV a 9KV positivo e negativo sendo que, para cada caso foram feitas as medições desejadas.

O gerador de ESD também foi posicionado de tal forma a ter o mínimo de variação de posição possível, por esse motivo está sobre um suporte.

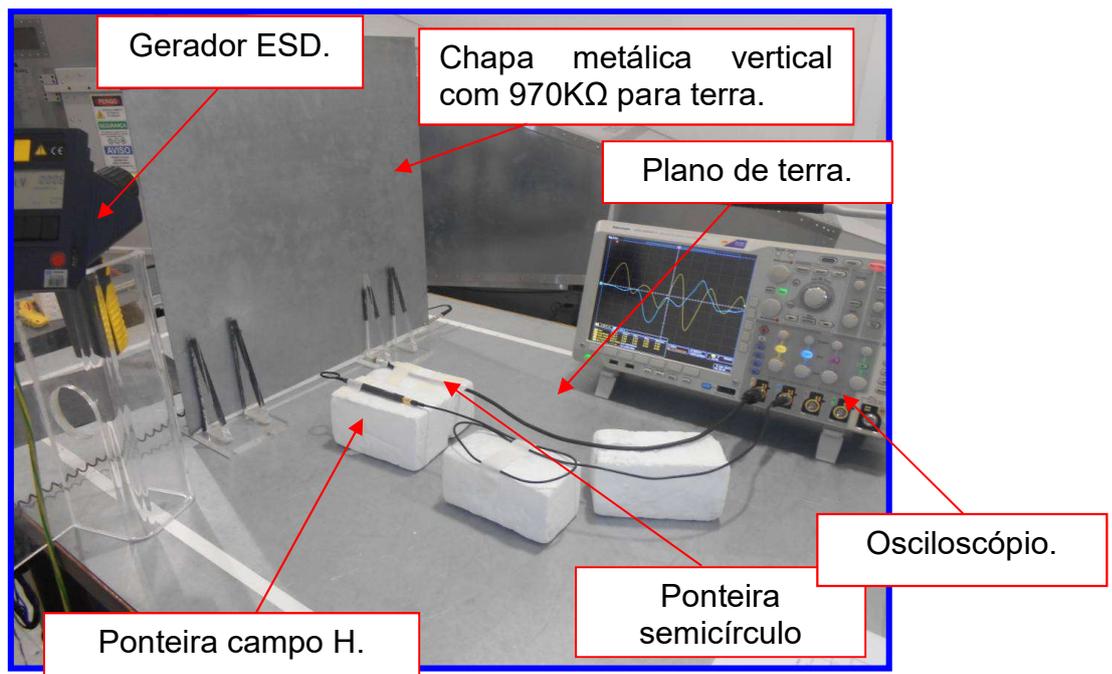
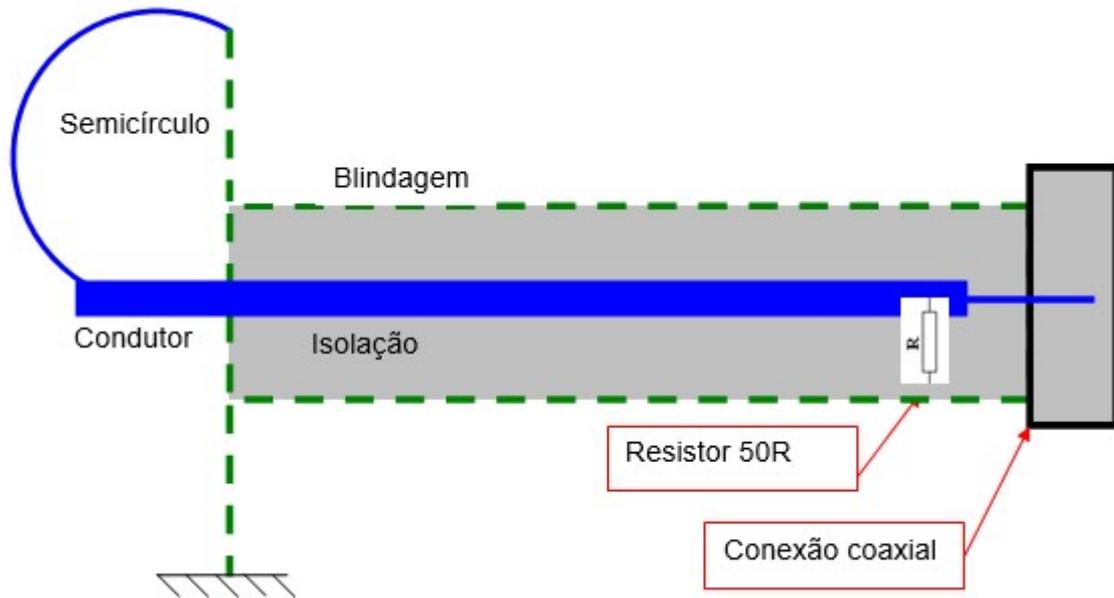


Figura 73 - Setup para ensaio de medição da tensão induzida e campo magnético

### 7.3.4 PONTEIRA SEMICÍRCULO

Para efetuar os ensaios foi confeccionado um semicírculo conforme Figura 74, com comprimento de cabo coaxial de 65cm, raio de arco (loop) 2,5 cm, comprimento do arco aproximadamente 7,5cm, resistor de 50 ohms para o casamento de impedância da conexão com o osciloscópio que também estava em 50 ohms. [2]



*Figura 74 - Cabo coaxial com semicírculo*

## 7.4 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos e suas análises.

### 7.4.1 PRIMEIRA MEDIÇÃO:

Abaixo segue a Figura 61, forma de onda da tensão induzida no semicírculo aplicando uma descarga de + 5 KV dc na chapa vertical conforme setup da Figura 75.

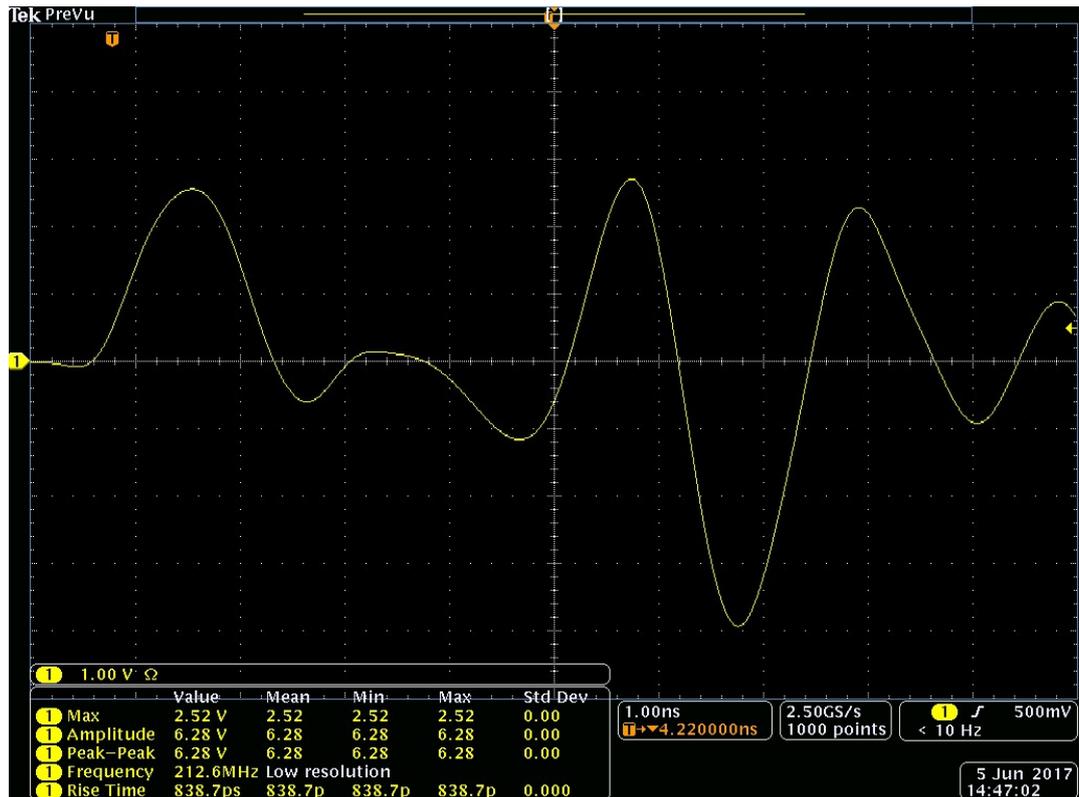


Figura 75 - Tensão induzida com descarga de +5kV

Para este teste a norma IEC 61000-4-2 [2] traz como valor tempo de subida (*rise time*) 850ps, pode-se notar que o obtido foi de 838,7ps resultado próximo ao esperado. No entanto os valores de tensão induzida ficaram abaixo, sendo o valor obtido através da norma aproximadamente 6V no primeiro pico em aproximadamente 1,5 ns, o valor obtido no primeiro pico no ensaio feito no laboratório foi 2,52V, aproximadamente 4,5V menor. Nesta norma também não há citações de qual trecho da forma de onda foi avaliado, estima-se que sejam os 7 primeiros nano segundos.

No resultado apresentado na Figura 66 pode-se notar um pico negativo de aproximadamente 4V aos 7ns de tempo. A frequência do sinal foi de 212,6MHz.

#### 7.4.2 SEGUNDA MEDIÇÃO:

O segundo resultado apresentado na Figura 76, é o resultado de uma descarga com aplicação de - 5 KV dc na chapa metálica.

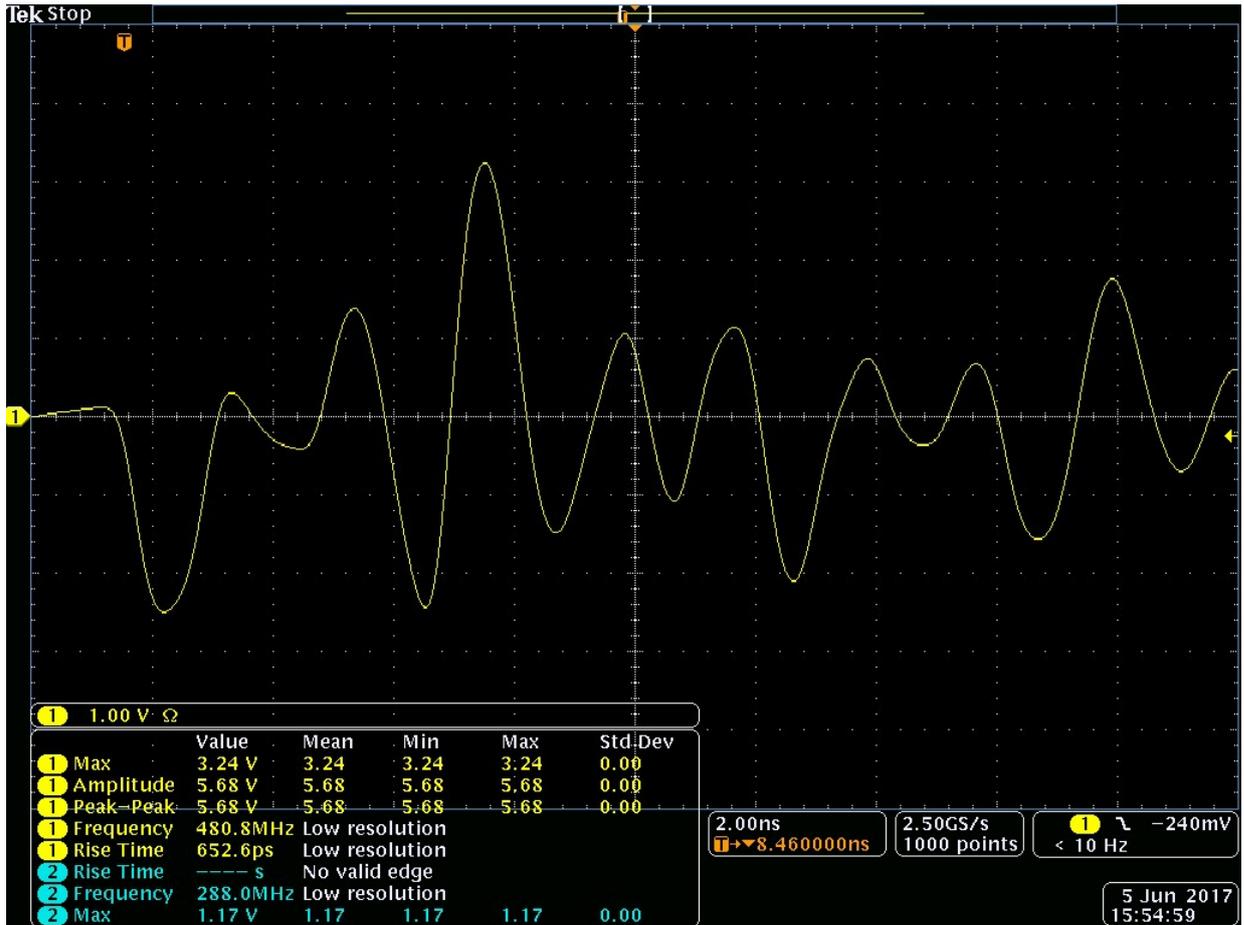


Figura 76 - Resultado da tensão induzida -5kV

Pode-se notar que o valor de *rise time* ficou abaixo do resultado anterior passou de 838,7ps, para 652,6ps. No entanto os valores de tensão induzida nos dois primeiros nano segundos ficaram muito próximos, sendo 2,52V (primeiro pico positivo) e aprox. 2,2V (primeiro pico negativo). As duas formas de onda apresentadas nas Figuras 75 e 76 tem suas formas semelhantes sendo uma o inverso da outra, devido ao fato do disparo de ESD ser positivo no primeiro ensaio e negativo no segundo.

#### 7.4.3 TERCEIRA MEDIÇÃO

Abaixo segue a Figura 77, com resultado da terceira medição, aplicando uma descarga na chapa vertical de - 9 KV dc.

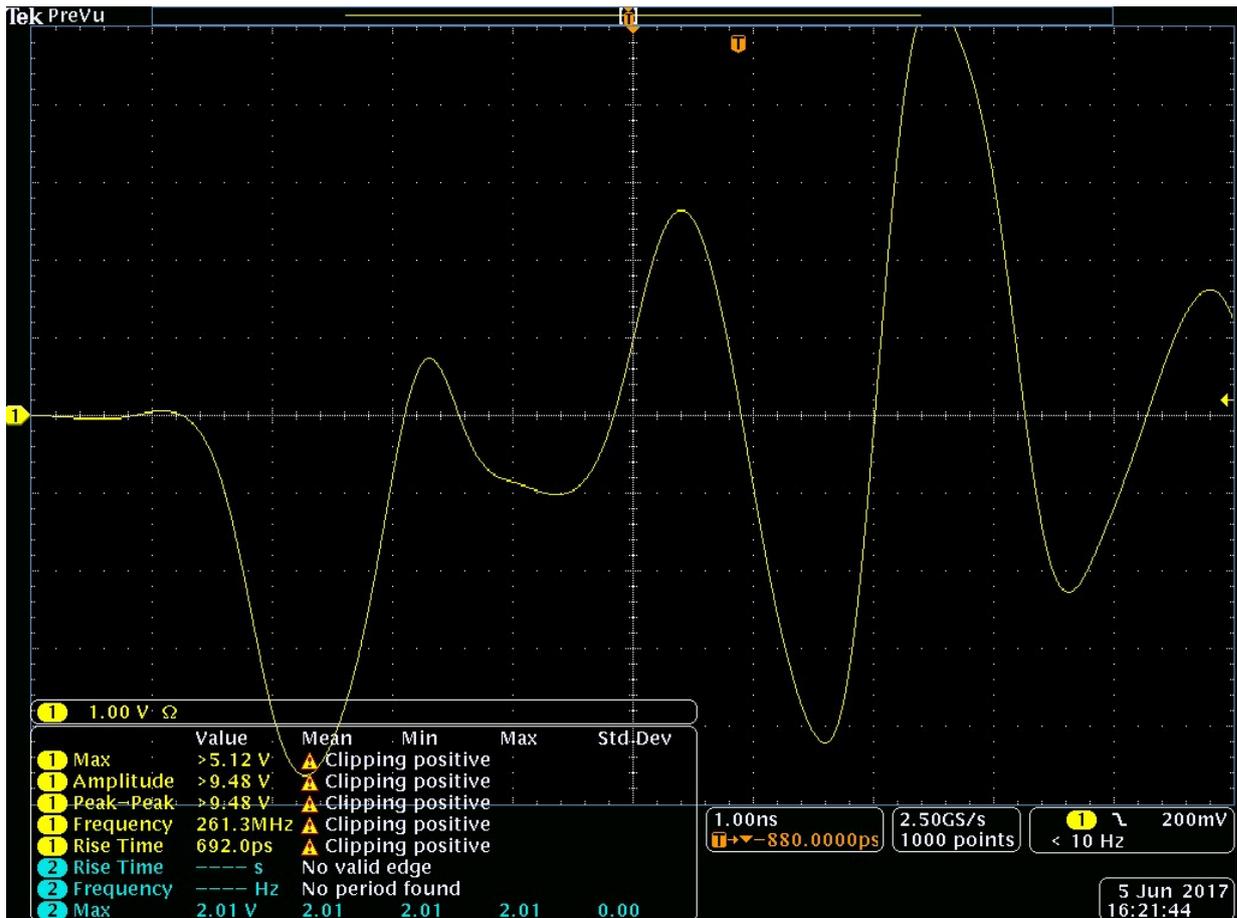


Figura 77 - Resultado da tensão induzida -9kV

Como visto nos dois primeiros resultados o disparo sendo positivo ou negativo apresentam valores próximos, porém inversos, a intenção deste ensaio foi verificar qual o aumento da tensão induzida no loop com o aumento da tensão de disparo de ESD, pode-se notar na Figura 77 que a forma de onda da tensão induzida segue a mesma do ensaio anterior tendo alterações apenas em suas amplitudes, passando neste caso de 3,24 V de tensão máxima positiva para uma tensão máxima positiva maior que 5V aos 8 nano segundos. Neste caso o aumento em 3KV (37,5%) na tensão de ESD resultou em um aumento da tensão induzida de aproximadamente 36%.

#### 7.4.4 QUARTA MEDIÇÃO:

Abaixo segue a Figura 78, este resultado representa a quarta medição, aplicando uma descarga na chapa vertical de + 9 KV dc



Figura 78 - Resultado da tensão induzida +9kV

Esta forma de onda pode ser comparada à Figura 77, analisando percebe-se que o padrão se mantém ambas tem mesmo formato, porém inversas.

#### 7.4.5 QUINTA MEDIÇÃO:

Neste ensaio será realizado um comparativo entre a tensão induzida no Loop e o campo magnético medido através de ponta comercial de campo magnético, o resultado é apresentado na Figura 79.

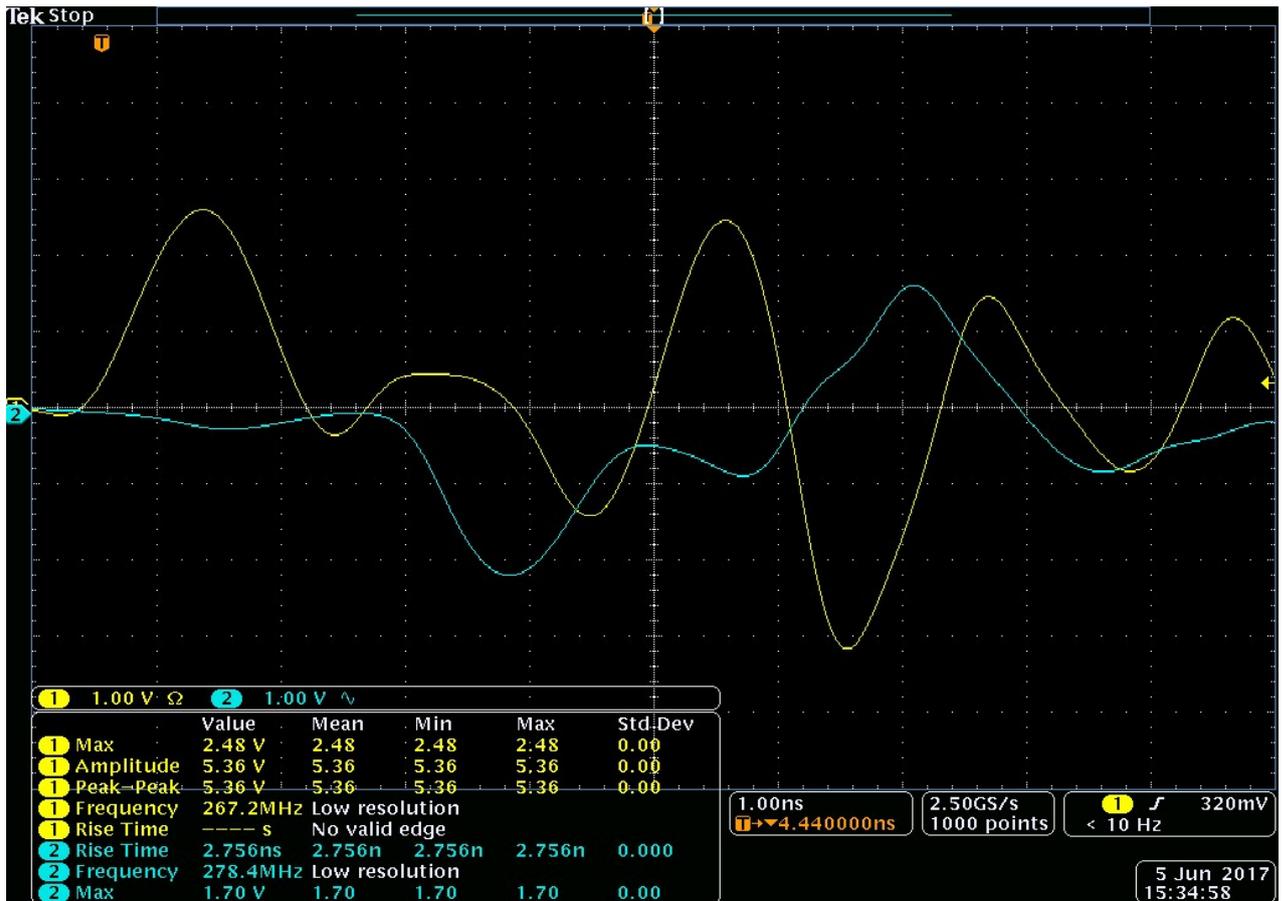


Figura 79 - Medição de tensão induzida e campo magnético

Neste caso foi usada uma ponteira de campo magnético em paralelo com a ponteira de semicírculo conforme Figura 73. A ponteira de campo magnético tem uma tensão em sua saída quando as linhas de campo magnético atravessam seu arco.

Através da lei de Faraday é possível calcular o campo magnético para este caso da Figura 61. [5]

Sendo:

$$V = 2 * \pi * f * B * A$$

(6.1)

Onde: f = frequência (Hz), B= campo magnético (Vs / m<sup>2</sup>), A= Área do loop (m<sup>2</sup>)

$$B = \frac{V}{(2 * \pi * f * A)}$$

$$B = \frac{1,70}{(2 * \pi * 278,4 * 10^6 (\pi * 0,125^2))}$$

$$\mathbf{B = 1,97 \text{ nT ou [ Vs/m}^2 \text{ ]}}$$

(6.1)

Este ensaio foi realizado apenas para conhecimento, para saber qual o comportamento do sinal medido com uma ponteira de campo magnético, neste resultado o campo magnético medido parece estar adiantado em relação a tensão medida pelo semicírculo, possivelmente tratando-se de um sinal em região de campo próximo. [4]

#### 7.5 FATORES QUE PODEM CONTRIBUIR PARA RESULTADOS DIFERENCIADOS NAS MEDIDAS DE ESD:

Como os resultados obtidos não foram exatamente iguais aos encontrados na norma, foram levantadas algumas hipóteses que podem contribuir na diferença de aquisições dos sinais:

- 1 – A norma não especifica um comprimento exato de cabo coaxial para o semi loop, isso pode acarretar em mudanças de impedâncias do cabo coaxial. [4]
- 2 – O resistor utilizado no cabo coaxial foi um resistor de 50 ohms THT, alguns componentes THT como o resistor podem apresentar indutâncias e capacitâncias quando utilizados em alta frequência devido a sua forma construtiva, a norma não traz referências do modelo de resistor ou precisão do mesmo a ser utilizado. [4]
- 3 – O ensaio não foi realizado em uma câmara blindada, também não há citações na norma sobre este ensaio ter sido feito ou não em uma sala blindada, sabe-se que quando se faz de medições de campos elétricos ou magnéticos de alta frequência, alguns sinais (como rádio, TV, WI-FI, celular, etc) podem modificar as medições. [4]
- 4 – O osciloscópio utilizado nos ensaios do laboratório de EMC tem largura de banda de 500MHz, o ideal seria usar um com largura de banda maior que 1GHz, pois o recomendado é que o osciloscópio tenha pelo menos duas vezes maior que a componente frequência do sinal medido.

## 7.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 7

Neste capítulo viu-se que o corpo humano também possui capacitâncias, e estas podem armazenar cargas elétricas. Os métodos mais comuns para o carregamento destas cargas no corpo humano são através de atrito ou contato.

A descarga eletrostática ESD, ocorre quando um corpo toca outro corpo com níveis de cargas elétricas diferentes, neste momento então uma corrente elétrica circula entre os dois corpos. A corrente elétrica gerada é de alta frequência e gera assim campos eletromagnéticos que podem afetar o funcionamento de produtos eletrônicos.

Nos ensaios de ESD apresentados, foi possível ter uma melhor compreensão para o entendimento do que ocorre em um equipamento quando uma ESD ocorre.

Observando as tensões induzidas no semicírculo através dos campos gerados em uma ESD pôde-se pensar como seria o comportamento de trilhas em produtos eletrônicos induzindo estas tensões. As tensões induzidas através de ESD podem facilmente produzir comportamentos indesejados nos circuitos, pois, através dos resultados obtidos viu-se que a tensão gerada na ponteira de medição chegou a aproximadamente 9V de pico. Componentes CMOS ou TTL poderiam facilmente ser danificados com os níveis de tensão gerados por uma descarga eletrostática.

Estas tensões geradas por ESD também fazem com que sinais de baixa tensão sejam afetados e gerando assim falhas em comunicação ou em circuitos de leitura.

## 8. CONCLUSÃO

O entendimento a respeito de compatibilidade eletromagnética se tornou um conhecimento indispensável principalmente nas indústrias de desenvolvimento de produtos eletrônicos, como é o caso da empresa WEG, que possui laboratórios específicos para estes fins já pensando neste tema tão importante.

O ideal é sempre fazer todos os ensaios possíveis em protótipos de produtos eletrônicos, para que caso seja necessário realizar alterações nos seus componentes ou *layouts*, o custo de tal alteração não será exorbitante. Quando um produto já está totalmente finalizado com vários lotes, fica difícil fazer alterações em componentes ou *layouts*, pois o custo será muito mais alto para a empresa.

Não basta que um produto eletrônico apenas funcione, é necessário que ele não “atrapalhe” o funcionamento de outros no seu ambiente, por isso então se faz importante a realização dos ensaios de emissões radiada e conduzida.

## REFERÊNCIAS

- [1] CISPR 11: Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement. 6 ed. Geneva, 2015. 192 p.
- [2] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC)- PART 4-2 : TESTING AND MEASUREMENT TECHNIQUES - ELECTROSTATIC DISCHARGE IMMUNITY TEST. IEC61800-4-2 Geneva: 2008. 134 p.
- [3] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC)- PART 4-6 : TESTING AND MEASUREMENT TECHNIQUES - IMMUNITY TO CONDUCTED DISTURBANCES, INDUCED BY RADIO-FREQUENCY FIELDS. IEC 61800-4-6 ed.Geneva: 2013. 173 p.
- [4] OTT, H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering, New Jersey, John Wiley & Sons, 2009,3º Ed.
- [5] PEDRO ASSUMPÇÃO BASTOS, João . Eletromagnetismo para engenharia : Estática e quase estática. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 2004. 380 p. v. 1.
- [6] PAUL, C.R. Introduction to Electromagnetic Compatibility, New Jersey, Wiley-Interscience, 2006,2º Ed.
- [7] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. N/A. Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-4 : Testing and measurement techniques Electrical fast transient/burst immunity test. Geneva: IEC 61800-4-4, 2012. 92 p.
- [8] UNDERWRITERS LABORATORIES - UL. n/a. 508 - standart for safety : industrial control equipment. : UL, 2018. 297 p.
- [9] EPCOS - TDK. N/A. Epcos data book : EMC filters. [S.l.: s.n.], 2014. 523 p.
- [10] MEHL, Ewaldo L. M.. Fontes Chaveadas: Fontes Chaveadas. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/fonteschaveadas.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- [11] BRASIL. Ministério da Industria, Comércio e Serviços. Governo Federal. Agenda industria 4.0: O Brasil preparado para os desafios do futuro. 2017. Disponível em: <<http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

- [12] LIZ, Muriel Bittencourt de. CONTRIBUIÇÃO PARA A REDUÇÃO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM FONTES CHAVEADAS. 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85025/195653.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 10 jan. 2019.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Vocabulário eletrotécnico internacional – Capítulo 161: Compatibilidade Eletromagnética. Projeto 03:077.01-001, Rio de Janeiro, 1997.
- [16] MEDIANO, Arturo. Avoid Critical Signals in Edges of the PCB. 2018. Disponível em: <<https://incompliancemag.com/article/avoid-critical-signals-in-edges-of-the-pcb/>>. Acesso em: 13 jan. 2018.
- [17] ARMSTRONG, Keith. Skin Effect and Surface Currents. 2018. Disponível em: <<https://incompliancemag.com/article/skin-effect-and-surface-currents/>>. Acesso em: 13 jan. 2018.
- [18] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61800-3: Adjustable speed electrical power drive systems - Part 3: EMC requirements and specific test methods. 3 ed. Geneva, 2017. 250 p.
- [19] CISPR16 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. SPECIFICATION FOR RADIO DISTURBANCE AND IMMUNITY MEASURING APPARATUS METHODS: Radio disturbance and immunity measuring apparatus. 3 ed. Geneva, 1999. 227 p.
- [20] ROHDE&SCHWARZ (Germany). R&S ESPI EMI Test Receiver Operating Manual. 2009. Disponível em: <[https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_manuals/gb\\_1/e/espi\\_1/ESPI\\_Operating\\_Manual\\_en\\_FW442.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/e/espi_1/ESPI_Operating_Manual_en_FW442.pdf)>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- [21] NARDA (Germany). Users manual: PMM L3 64. 2007. Disponível em: <<http://www.gruppompb.com/public/upload/MANUALE-V-70206-L-3-32.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- [22] FLÁVIO, Camila Cançado. Projeto de Filtros para Atenuação de Correntes de Modo Comum e de Sobretensões em Acionamentos de Motores Elétricos Utilizando Inversores PWM. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Cap. 2.

- [23] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC)- PART 4-20 : TESTING AND MEASUREMENT TECHNIQUES – EMISSION AND IMMUNITY TESTING IN TRANSVERSE ELECTROMAGNETIC (TEM) WAVEGUIDES IEC61800-4-20 Geneva: 2007. 127 p.
- [24] TSEQ (Germany). GTEM CELL 1250: GTEM CELL FOR EMISSIONS AND IMMUNITY TESTING. 2017. Disponível em: <<http://www.teseq.com/products/GTEM-1250.php>>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- [25] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMITTEE. IEC 61800-5-1: ADJUSTABLE SPEED ELECTRICAL POWER DRIVE SYSTEMS. 5-1 ed. Geneva, 2016. 503 p.
- [26] BRAGA, Newton C. Geração de calor e efeito joule: Geração de calor no circuito eletrônico. 2015. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/home/52-artigos-tecnicos/artigos-diversos/15190-geracao-de-calor-nos-circuitos-eletronicos-e-a-lei-de-joule-art3984>>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- [27] OMEGA ENGINEERING (Brasil). Manual de referência técnica de temperatura. Campinas: Copyright, 2014. 230 p.
- [28] YOKOGAWA (Japão). MV1000 / MV2000: MV2000 User's manual. 2010. Disponível em: <[https://web-material3.yokogawa.com/IMMV1000-01E\\_020.pdf](https://web-material3.yokogawa.com/IMMV1000-01E_020.pdf)>. Acesso em: 22 jan. 2019.
- [29] EM TEST (Eua). CAPACITIVE COUPLING CLAMP: Capacitive CLAMP. 2017. Disponível em: <<http://www.emtest.com/products/product/135120100000013972.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2019.
- [30] EM TEST (Eua). UCS500N: MULTIFUNCTIONAL TRANSIENT SIMULATOR. 2017. Disponível em: <<http://www.emtest.com/products/product/135120100000012155.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2019.
- [31] PRETI, Jeferson. Painel elétrico de comando e montagem de painéis: Painel Elétrico de Comando e Montagem de Painéis. 2011. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/painel-eletrico-comando-montagem/>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

[32] ESTADOS UNIDOS DA AMERICA. FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. Federal Communications Commission: FCC. Disponível em: <<https://www.fcc.gov/>>. Acesso em: 15 mar. 2019