



**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA**  
**LUIZ GUSTAVO DE FARIAS**

**O EFEITO DA DISPOSIÇÃO DE INDUTORES EM PLACAS DE CIRCUITO  
IMPRESSO PARA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

**Palhoça**  
**2020**

**LUIZ GUSTAVO DE FARIAS**

**O EFEITO DA DISPOSIÇÃO DE INDUTORES EM PLACAS DE CIRCUITO  
IMPRESSO PARA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Fabio Ignácio da Rosa, Esp. Eng.

Palhoça  
2020

**LUIZ GUSTAVO DE FARIAS**

**O EFEITO DA DISPOSIÇÃO DE INDUTORES EM PLACAS DE CIRCUITO  
IMPRESSO PARA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 4 de dezembro de 2020

---

Prof. e orientador Fabio Ignácio da Rosa, Esp. Eng.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

---

Prof<sup>a</sup> Francielli Scarpini Barbosa Cordeiro, Me. Eng<sup>a</sup>.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

---

André Tonon, Esp. Eng.

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis da minha trajetória acadêmica. Este trabalho é dedicado a eles.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar força e perseverança para superar as dificuldades. Aos meus pais Valter João de Farias e Marilu Marlene da Silva de Farias por todo o apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações. Ao meu irmão João Luiz de Farias, minha cunhada, Aline Rachadel da Silva, e sobrinho, Joaquim da Silva de Farias, pela compreensão e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu orientador Fabio Ignácio da Rosa, pela confiança e dedicação de inúmeras horas para sanar as minhas questões e me colocar na direção correta, apesar da intensa rotina de sua vida acadêmica. Agradeço aos meus amigos e companheiros de trabalho, que sempre me lembram que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente. E por último e não menos importante, quero agradecer a Universidade do Sul de Santa Catarina UNISUL, e o seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência de ensino.

"Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim."(Nikola Tesla, S.d)

## RESUMO

A tecnologia vem se desenvolvendo de forma cada vez mais acelerada. Em consequência, o mercado de produtos eletrônicos fica cada vez mais competitivo, gerando produtos com preços cada vez menores. No entanto, estes produtos em muitos casos necessitam estar em conformidade com as normas de compatibilidade eletromagnética para que possam ser vendáveis. Desta forma, é necessário que o desenvolvedor saiba desenvolver produtos eletrônicos em conformidade com as normas e que ainda tenham preços atrativos. Diante disto, houve o interesse em realizar uma pesquisa e o experimento sobre o comportamento dos indutores, quanto a sua disposição em placas de circuito impresso, tendo em vista a interferência eletromagnética que este componente eletrônico pode causar em seu ambiente de funcionamento. Assim sendo, este trabalho aborda os conceitos a cerca da compatibilidade eletromagnética e das características de funcionamento dos indutores, bem como o design de placas de circuito impresso. O experimento realizado poderá ser tomado para o entendimento de possíveis fenômenos vistos em ensaios de compatibilidade magnética, bem como para o estudo de outros componentes comuns em produtos eletrônicos.

Palavras-chave: Compatibilidade eletromagnética. Indutores. Placa de circuito impresso.

## **ABSTRACT**

Technology has been developing ever faster. As a result, the electronics market is becoming increasingly competitive, generating products with lower prices. However, these products in many cases need to comply with electromagnetic compatibility standards in order to be salable. Thus, the developer must be able to develop standards-compliant electronics at attractive prices. Given this, there was interest in conducting research and experiment on the behavior of inductors, regarding their arrangement on printed circuit boards, in view of the electromagnetic interference that this electronic component can cause in its operating environment. Therefore, this work approaches the concepts about the electromagnetic compatibility and the operating characteristics of the inductors, as well as the design of printed circuit boards. The experiment can be used to understand the possible effects observed in magnetic compatibility tests, as well as to study other common components in electronic products.

**Key-words:** Electromagnetic compatibility. Inductors. Printed circuit board.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Câmara semi-anecoica para testes em grandes equipamentos . . . . .	23
Figura 2 – Célula GTEM . . . . .	24
Figura 3 – Campo magnético gerado por uma distribuição linear de corrente . . . . .	25
Figura 4 – Representação da regra da mão direita . . . . .	26
Figura 5 – Campo magnético gerado por uma solenoide . . . . .	26
Figura 6 – Fluxo magnético variável atravessando uma bobina . . . . .	27
Figura 7 – Direção do fluxo induzido . . . . .	29
Figura 8 – Formação da onda eletromagnética a partir de um condutor . . . . .	32
Figura 9 – Propagação da onda eletromagnética . . . . .	33
Figura 10 – Composição básica do problema relativo a EMC . . . . .	34
Figura 11 – Exemplo de interferências sofridas por um rádio . . . . .	38
Figura 12 – Placa de circuito impresso. . . . .	39
Figura 13 – (a) PCI com condutores em um lado da placa (b) PCI com condutores em dois lados da placa. . . . .	39
Figura 14 – PCI com 4 camadas. . . . .	40
Figura 15 – (a) Resistor de filme de carbono, (b) Resistor de fio, (c) Resistor SMD . . . . .	41
Figura 16 – Modelo elétrico de um componente resistivo real sem espiras. . . . .	42
Figura 17 – Gráfico do módulo da impedância variando com a frequência de um componente resistivo. . . . .	43
Figura 18 – (a) Capacitor eletrolítico, (b) Capacitor cerâmico, (c) Capacitor SMD. . . . .	43
Figura 19 – Modelo elétrico de um capacitor não ideal. . . . .	44
Figura 20 – (a) Indutor encapsulado, (b) Indutor de núcleo de ar, (c) Indutor SMD. . . . .	45
Figura 21 – Capacitâncias parasitas em um indutor. . . . .	46
Figura 22 – Modelo elétrico de um componente indutivo. . . . .	47
Figura 23 – Emissão radiada. . . . .	47
Figura 24 – Susceptibilidade irradiada. . . . .	48
Figura 25 – Emissão radiada, gerada a partir de um loop de corrente. . . . .	48
Figura 26 – Emissão conduzida. . . . .	49
Figura 27 – Susceptibilidade conduzida. . . . .	49
Figura 28 – Aplicação de blindagem para contenção de ruído. . . . .	50
Figura 29 – Aplicação de blindagem para proteção contra ruídos externos. . . . .	51
Figura 30 – Interferência conduzida por cabos através de encapsulamento blindado. . . . .	51
Figura 31 – Inserção de um filtro entre a fonte e a carga. . . . .	52
Figura 32 – Filtro passa baixa. . . . .	53
Figura 33 – Filtro passa alta. . . . .	53
Figura 34 – Filtro passa faixa. . . . .	54

Figura 35 – Esquemático de modo de acoplamento. . . . .	54
Figura 36 – Esquemático de modo de acoplamento capacitivo. . . . .	56
Figura 37 – Esquemático de modo de acoplamento indutivo. . . . .	56
Figura 38 – Esquemático de conexão de ponto único no plano de terra. . . . .	57
Figura 39 – Esquemático de conexão multiponto no plano de terra. . . . .	58
Figura 40 – Particionamento da PCI por funcionalidade. . . . .	59
Figura 41 – Campo magnético em um indutor. . . . .	60
Figura 42 – Corrente através do indutor.(a) Forma real (b) Forma com mudança abrupta. . . . .	61
Figura 43 – Curva da potência para um elemento indutivo na fase transitória . . . . .	62
Figura 44 – Aspectos construtivos do indutor. . . . .	62
Figura 45 – Diferença de componentes SMD e PTH . . . . .	64
Figura 46 – Indutor SMD de múltiplas camadas. . . . .	65
Figura 47 – Indutor SMD de filme . . . . .	65
Figura 48 – Indutor de núcleo de ar. . . . .	66
Figura 49 – Indutores encapsulados. . . . .	66
Figura 50 – Desenvolvimento do campo magnético em um toroide. . . . .	67
Figura 51 – Exemplo de toroides comercializados. . . . .	67
Figura 52 – Corrente em um choke de modo comum. . . . .	67
Figura 53 – Chokess de modo comum. . . . .	68
Figura 54 – Fluxo magnético em um transformador. . . . .	69
Figura 55 – Tipos de transformadores encontrados comercialmente. . . . .	69
Figura 56 – Formação dos indutores com diferentes estruturas. . . . .	70
Figura 57 – Placa circuito regulador de tensão com indutores embarcados. . . . .	71
Figura 58 – PCI de 4 layers sem cobre abaixo do núcleo do indutor . . . . .	72
Figura 59 – PCI de 4 layers com cobre abaixo do núcleo do indutor. . . . .	73
Figura 60 – Caminho da corrente de retorno em baixa frequência. . . . .	73
Figura 61 – Caminho da corrente de retorno em alta frequência . . . . .	74
Figura 62 – Uso da câmara semi-anecoica para testes de emissão radiada. . . . .	76
Figura 63 – Câmara semi-anecoica. . . . .	76
Figura 64 – Equipamento para medida de emissão conduzida LISN. . . . .	77
Figura 65 – Encapsulamento MP2459. . . . .	79
Figura 66 – Primeira versão de Layout de Placa 1 . . . . .	80
Figura 67 – Primeira versão de Layout de Placa 2 . . . . .	81
Figura 68 – Placas corroídas . . . . .	81
Figura 69 – Placas com circuito montado . . . . .	82
Figura 70 – GTEM utilizada nos ensaios de emissão radiada . . . . .	82
Figura 71 – Cenário de ensaios placa 1 . . . . .	83
Figura 72 – Cenário de ensaios placa 2 . . . . .	83
Figura 73 – LISN utilizada para os ensaios de emissão conduzida . . . . .	84

Figura 74 – Cenário de ensaios da placa 1 - conduzida . . . . .	84
Figura 75 – Resultados ensaios emissão Radiada . . . . .	85
Figura 76 – Resultados ensaios emissão conduzida placa 1 . . . . .	86
Figura 77 – Resultados ensaios emissão conduzida placa 2 . . . . .	87
Figura 78 – Segunda versão de layout placa 1 . . . . .	87
Figura 79 – Segunda versão de layout placa 2 . . . . .	88
Figura 80 – Segunda versão de placas montadas . . . . .	88
Figura 81 – Resultados ensaios emissão Radiada da segunda versão de placas . . . . .	89
Figura 82 – Resultados ensaios emissão conduzida segunda versão placa 1 . . . . .	90
Figura 83 – Resultados ensaios emissão conduzida segunda versão placa 2 . . . . .	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de frequência de uso para comunicação no Brasil . . . . .	36
Tabela 2 – Limites para emissão de perturbação radiada de equipamentos classe A. ANATEL (2018b) . . . . .	75
Tabela 3 – Limites para emissão de perturbação radiada de equipamentos classe B. ANATEL (2018b) . . . . .	75
Tabela 4 – Limites para emissão de perturbação conduzida de equipamentos classe A. ANATEL (2018b) . . . . .	77
Tabela 5 – Limites para emissão de perturbação conduzida de equipamentos classe B. ANATEL (2018b) . . . . .	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>EMI</b>	<i>Eletromagnetic Interference</i> .....	15
<b>EMC</b>	<i>Eletromagnetic Compatibility</i> .....	16
<b>PCI</b>	Placa de Circuito Impresso .....	16
<b>CI</b>	Circuito Integrado .....	15
<b>CPU</b>	<i>Central Processing Unit</i> .....	15
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission</i> .....	15
<b>CISPR</b>	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i> .....	15
<b>FCC</b>	<i>Federal Communications Commission</i> .....	16
<b>ANATEL</b>	Agência Nacional de Telecomunicações .....	16
<b>INMETRO</b>	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia .....	16
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i> .....	17
<b>OCD</b>	Organismo de Certificação Designado .....	22
<b>ESD</b>	<i>Electrostatic Discharge</i> .....	23
<b>GTEM</b>	<i>Gigahertz Transverse Electromagnetic</i> .....	23
<b>fem</b>	Força eletromotriz .....	27
<b>SMD</b>	<i>Surface Mounting Device</i> .....	41
<b>GND</b>	<i>Ground</i> .....	57
<b>AGND</b>	<i>Analog Ground</i> .....	57
<b>DGND</b>	<i>Digital Ground</i> .....	57
<b>ASIC</b>	<i>Application Specific Integrated Circuit</i> .....	58
<b>SCSI</b>	<i>Small Computer System Interface</i> .....	59
<b>USB</b>	<i>Universal Serial Bus</i> .....	59
<b>CC</b>	Corrente Contínua .....	61
<b>PTH</b>	<i>Pin Through Hole</i> .....	64
<b>LISN</b>	<i>Line Impedance Stabilization Network</i> .....	77
<b>MPS</b>	<i>Monolithic Power Systems</i> .....	79

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	DELIMITAÇÕES	18
1.3	OBJETIVOS	18
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>18</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>19</b>
1.4	METODOLOGIA	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
2.1	COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA	20
<b>2.1.1</b>	<b>Órgãos Regulamentadores</b>	<b>22</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Eletromagnetismo aplicado a EMC</b>	<b>24</b>
2.1.2.1	Lei de Ampère	24
2.1.2.2	Lei de Faraday	26
2.1.2.2.1	<i>Lei de Lenz</i>	28
2.1.2.3	Equações de Maxwell	29
2.1.2.4	Ondas eletromagnéticas	31
2.2	PRINCÍPIOS DO EMC	33
<b>2.2.1</b>	<b>Fontes de ruído</b>	<b>34</b>
2.2.1.1	Fontes naturais de ruído	34
2.2.1.2	Fontes Humanas de ruído	35
<b>2.2.2</b>	<b>Placa de Circuito Impresso</b>	<b>37</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Elementos de um circuito</b>	<b>40</b>
2.2.3.1	Resistores	40
2.2.3.2	Capacitores	42
2.2.3.3	Indutores	45
<b>2.2.4</b>	<b>Emissão radiada</b>	<b>47</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Emissão conduzida</b>	<b>48</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Blindagem</b>	<b>50</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Filtros</b>	<b>52</b>
<b>2.2.8</b>	<b>Caminho de acoplamento</b>	<b>54</b>
<b>2.2.9</b>	<b>Crosstalk</b>	<b>54</b>
<b>2.2.10</b>	<b>Design do plano de terra em PCI</b>	<b>56</b>
2.2.10.1	Particionamento dos circuitos na PCI	58
2.3	INDUTORES EM PROJETOS DE PCI PARA EMC	59

<b>2.3.1</b>	<b>Funcionamento dos indutores</b>	<b>60</b>
2.3.1.1	Construção do indutor	61
<b>2.3.2</b>	<b>Aplicação dos indutores</b>	<b>63</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Tipos de indutores</b>	<b>64</b>
2.3.3.1	SMD	64
2.3.3.2	PTH	65
2.3.3.3	Choke de modo comum	67
2.3.3.4	Transformadores	68
2.3.3.5	Indutores embarcados em PCI	69
<b>2.3.4</b>	<b>Influência do campo magnético gerado pelos indutores</b>	<b>70</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Indutância dos planos</b>	<b>72</b>
2.4	ENSAIOS DE EMC	74
<b>2.4.1</b>	<b>Classes de produtos</b>	<b>74</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Ensaio de emissão radiada</b>	<b>75</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Ensaio de emissão conduzida</b>	<b>77</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>79</b>
3.1	ESCOLHA DE UM CHAVEADOR	79
3.2	MONTAGEM E LAYOUT DA PLACA	80
3.3	ENSAIOS DE EMC	82
<b>3.3.1</b>	<b>Ensaio de emissão radiada</b>	<b>82</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Ensaio de emissão conduzida</b>	<b>84</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Resultado dos ensaios</b>	<b>85</b>
3.4	SEGUNDA VERSÃO DE LAYOUT E PLACAS	87
<b>3.4.1</b>	<b>Resultado dos ensaios segunda versão de placas</b>	<b>89</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>92</b>
	<b>ANEXO A – DATASHEET MP2459</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO B – ESQUEMA ELÉTRICO</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO C – BEAD ECI160808U121T</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO D – INDUTOR ILF0410K101TA1</b>	<b>100</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>103</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No último século a tecnologia vem mudando a um ritmo cada vez mais intenso. A pressão para desenvolver novos produtos, melhorar o desempenho de sistemas existentes e criar novos mercados apenas acelera esse ritmo (BOYLESTAD, 2012, p.1). Para viabilizar esta rapidez do avanço tecnológico foi necessário uma vasta quantidade de pesquisa e desenvolvimento para o aperfeiçoamento dos sistemas em geral. Dentre estes aperfeiçoamentos, pode-se citar a velocidade com que estes sistemas operam, o que foi possível em consequência da melhora de performance dos componentes eletrônicos. Como exemplo destas melhoras podemos mencionar a criação do transistor <sup>1</sup> no ano de 1948, o que permitiu mais tarde em 1958 a criação do Circuito Integrado (CI) <sup>2</sup> e que culminou na criação do microprocessador <sup>3</sup> em 1971 (PAUL, 2006). Estes componentes deram origem a diversos produtos que hoje trazem comodidade e conforto para a humanidade, como por exemplo os computadores pessoais, automóveis, celulares, televisores e entre outros. No entanto, em decorrência destes avanços e necessidade de dispositivos eletrônicos cada vez melhores, surgiram problemas a serem resolvidos. Dentre estes problemas, pode-se citar a interferência eletromagnética, do inglês, *Eletromagnetic Interference* (EMI).

A interferência eletromagnética (EMI) é o processo pelo qual uma energia eletromagnética é transmitida de um dispositivo eletrônico para o outro através do espaço livre ou por um meio conduzido, como por exemplo cabos externos, cabos de força e entre outros (MONTROSE, 2000). Segundo Williams (2001, p.11, tradução nossa) o EMI pode ser considerado uma forma crescente de poluição ambiental. Seus efeitos vão de pequenas perturbações devido a estalos na recepção de transmissões de rádio a acidentes potencialmente fatais devido a falhas em sistemas de segurança, como ilustra (LEACH, 1995, p.11, tradução nossa):

Durante os primeiros anos do ABS, uma certa marca de automóveis equipada com ABS tiveram severos problemas de frenagem ao longo de um percurso da *Autobahn* na Alemanha. Os freios eram afetados por uma transmissão de rádio local quando os motoristas o utilizavam em uma das curvas da rodovia. A solução a curto prazo, foi erguer uma tela de malha ao longo da estrada para atenuar o EMI. O que possibilitou que os freios funcionassem adequadamente quando os motoristas o utilizavam.

Devido as preocupações com o EMI, em 1933 um encontro da Comissão Eletrotécnica Internacional, do inglês *International Electrotechnical Commission* (IEC) em Paris, recomendou a formação do Comitê Especial Internacional de Radiointerferência, do francês, *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques* (CISPR) para lidar com os

<sup>1</sup> O transistor é um dispositivo semicondutor tendo como uma de suas funções a amplificação de sinais elétricos (MALVINO, 2008)

<sup>2</sup> Um Circuito Integrado é um encapsulamento que contem uma grande densidade de transistores, capacitores, resistores e outros componentes de forma miniaturizada (KHANDPUR, 2005)

<sup>3</sup> Um microprocessador ou *Central Processing Unit* (CPU) é um dispositivo de computação fabricado em um único Chip, que basicamente é um Circuito Integrado.(KHANDPUR, 2005)

crecentes problemas envolvendo EMI. Posteriormente, foram publicadas pelo CISPR diversos documentos técnicos que envolvem técnicas de medição, bem como recomendações de limites de emissões eletromagnéticas (PAUL, 2006). Outros países basearam-se nestas normas para a criação de órgãos regulamentadores, como os Estados Unidos, que seguem as regras e regulamentações da Comissão Federal de Comunicações, do inglês, *Federal Communications Commission* (FCC). Já no Brasil, pode-se citar a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Com a fiscalização dos órgãos regulamentadores nacionais e internacionais, e o receio quanto a falhas de equipamentos eletrônicos devido ao EMI, teve-se a necessidade de que os equipamentos eletrônicos fossem compatíveis eletromagneticamente com o seu ambiente de operação, ou seja, detivessem a sua compatibilidade eletromagnética, do inglês, *Eletromagnetic Compatibility* (EMC).

O EMC é a habilidade de um dispositivo eletrônico ou sistema de funcionar de forma satisfatória em seu ambiente eletromagnético com uma certa margem de segurança e sem causar a degradação de outros dispositivos em resultado do EMI (MONTROSE, 2000). Para que o EMC seja alcançado de forma efetiva é necessário que o dispositivo eletrônico seja desenvolvido, fabricado e testado conforme o seu ambiente eletromagnético de operação previsto. Todavia, é no desenvolvimento do dispositivo que estão concentrados os principais esforços que determinam o funcionamento de acordo com as normas de EMC. Um destes esforços trata-se do aperfeiçoamento do *hardware* que em sistemas digitais atuais, em sua maioria, estão relacionados ao design da Placa de Circuito Impresso (PCI).

Segundo Khandpur (2005, p.1, tradução nossa), a placa de circuito impresso provê a estrutura física para a montagem e fixação de componentes eletrônicos, bem como as interconexões elétricas entre estes componentes. Normalmente, o design da PCI mostra-se uma das abordagens com melhor custo benefício para a supressão de fontes de EMI em dispositivos eletrônicos. Segundo (MONTROSE, 2000, p.XIV-XV, tradução nossa):

Controlar a emissão tornou-se uma necessidade na concepção de dispositivos eletrônicos tanto para ambientes civis quanto militares. É melhor desenvolver um produto com supressão aplicado ao PCI do que "construir uma caixa melhor". As medidas de encapsulamento nem sempre são economicamente justificáveis e podem se degradar quando o ciclo de vida do produto é estendido além de suas especificações originais [...]. Uma técnica de *layout* de PCI apropriada, com técnicas de supressão implementadas, auxiliam nas conformidades de EMC a nível de cabos e interconexões, enquanto os métodos de blindagem e encapsulamento não.

O aumento da complexidade dos sistemas ao longo do tempo, demandou que a PCI suportasse uma maior densidade de componentes e interconexões elétricas. Esta maior densidade, tornou necessário a elaboração e aplicação de diversas técnicas para a supressão do EMI nas placas de circuito impresso. A exemplo destes sistemas, pode-se citar os computadores pessoais e telefones celulares.

As abordagens para a minimização do EMI na PCI podem variar dependendo da aplicação para o qual o sistema foi concebido. Por exemplo, dispositivos que demandam

alta velocidade de processamento, normalmente utilizam microprocessadores com uma alta frequência de operação, o que pode gerar interferência em outras partes do circuito devido a transmissão de energia de rádio frequência, do inglês *Radio Frequency* (RF) (MONTROSE, 1998). A exemplo, dentre essas abordagens, pode-se citar a utilização de filtros, minimização de descontinuidades de impedância, uso da PCI com múltiplas camadas e entre outros. No entanto, cada vez mais tem-se a necessidade da busca pela redução de gastos com matéria prima, assim, uma alternativa é trabalhar com técnicas durante o design da PCI que permita um melhor desempenho do sistema eletrônico quanto a EMI. Sendo uma delas, a disposição dos componentes eletrônicos internos ao projeto da PCI, bem como as interconexão entre esses elementos.

Componentes eletrônicos como por exemplo os indutores, possuem grande influência em outros componentes a sua volta por conta dos campos que estes criam, podendo gerar interferência internamente ao próprio circuito. A exemplo, pode-se citar o uso de indutores em série para o bloqueio de correntes de modo comum na saída do fio terra, conforme ilustra (MATTOS, 2016).

Como a corrente de modo comum circula pelo terra do equipamento, adota-se como técnica a instalação de um indutor na saída do terra do equipamento, com isto as frequências mais altas serão atenuadas[...]. Cuidado deve ser tomado com relação ao acoplamento do fluxo magnético provocado por este indutor com outros componentes do circuito.

Com base no exposto acima, este trabalho tem como objetivo o estudo da disposição dos indutores em relação aos demais componentes eletrônicos e elementos de circuito em PCI, versus, a influência que tais disposições possuem quanto a interferência eletromagnética causada internamente ao próprio sistema, e conseqüentemente, para os resultados oriundos dos ensaios de emissão radiada<sup>4</sup> e emissão conduzida<sup>5</sup> que são inerentes as normas dos órgãos regulamentadores.

---

<sup>4</sup> A emissão radiada, trata-se das componentes de energia de RF que são transmitidas através de um meio não guiado. Geralmente é transmitida através do espaço livre. (MONTROSE, 2000)

<sup>5</sup> A emissão conduzida trata-se da energia RF que é transmitida por um meio guiado, geralmente por um fio ou interconexões. (MONTROSE, 2000)

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Com o grande crescimento do mercado eletrônico tanto no âmbito nacional quanto internacional, as empresas de dispositivos eletrônicos mais do que nunca, tem a necessidade de desenvolver produtos cada vez mais competitivos. Para que estes produtos tenham competitividade no mercado, existem diversos fatores que estes devem atender, sendo que dois dos maiores fatores são preço e confiabilidade. Todavia, para que os produtos atinjam um nível de confiabilidade aceitável no mercado e sejam vendáveis, estes devem atender as normas dos órgãos regulamentadores de sua região quanto aos aspectos de compatibilidade eletromagnética e de segurança elétrica. Para que os produtos atendam estas normas, em alguns casos são aplicadas técnicas de supressão eletromagnética que geram custos ao projeto, tornando o produto mais caro e menos competitivo.

Uma das alternativa de menor custo para evitar problemas relacionados ao EMC, é aplicar técnicas de supressão ao *layout* da PCI, que podem envolver o uso de filtros, minimização de descontinuidades de impedância, PCI com múltiplas camadas e entre outros. No entanto, todas estas técnicas agregam custos ao produto final. O que nos leva ao experimento de técnicas de baixo custo que são aplicadas ao design da PCI para suprimir a emissão de EMI e que também o tornam menos susceptíveis a estas interferências, propiciando o desenvolvimento de novos produtos com menos gastos para solucionar problemas relacionados a EMC.

Assim sendo, este trabalho tem como objetivo o estudo da influência que os indutores apresentam para a interferência eletromagnética nos ensaios de emissão radiada e emissão conduzida, em decorrência de suas disposições em um design de PCI. Para tanto, este trabalho visa a experimentação em laboratório de diferentes disposições e tipos específicos de encapsulamento de indutores em PCI, apresentando os resultados oriundos de ensaios de emissão radiada e emissão conduzida, fundamentados por diferentes conteúdos disciplinares das cadeira de eletromagnetismo, ondas e antenas, circuitos e eletrônica.

## 1.2 DELIMITAÇÕES

Este trabalho limita-se ao estudo dos efeitos da disposição de indutores aplicados ao PCI em ensaios de emissão radiada e conduzida, não tendo como objetivo o estudo destes efeitos em outros ensaios eletromagnéticos previstos em normas dos órgãos regulamentadores.

## 1.3 OBJETIVOS

Visando o tema apresentado, definiu-se os seguintes objetivos:

### 1.3.1 Objetivo Geral

Efetuar o estudo e a experimentação em laboratório dos efeitos de diferentes disposições de indutores em PCI, em relação aos demais componentes eletrônicos e elementos de

um circuito, de forma a obter um melhor entendimento das influências que essas disposições possuem quanto aos resultados dos ensaios de emissão radiada e emissão conduzida.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar um estudo dos efeitos eletromagnéticos, em especial para aplicação em EMC;
- b) Desenvolvimento de PCI para os ensaios em laboratório;
- c) Ensaios em laboratório de emissão radiada e emissão conduzida;
- d) Compilar os dados obtidos durante os ensaios em laboratório.

## 1.4 METODOLOGIA

Será aplicado ao trabalho uma metodologia de pesquisa experimental, que segundo Prodanov e Freitas (2013, p.57)

Na pesquisa experimental, o pesquisador procura refazer as condições de um fato a ser estudado, para observá-lo sob controle. Para tal, ele se utiliza de local apropriado, aparelhos e instrumentos de precisão, a fim de demonstrar o modo ou as causas pelas quais um fato é produzido, proporcionando, assim, o estudo de suas causas e efeitos.

Este trabalho utilizará do embasamento em pesquisas bibliográficas que reforcem o conhecimento das variáveis presentes no experimento, servindo como base para o entendimento dos resultados obtidos em laboratório através da mensuração em equipamentos próprios para os ensaios relacionados aos aspectos de EMC.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho compreende uma estrutura de 5 capítulos. Onde o capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, com justificativa, objetivos e metodologia aplicada. O capítulo 2 traz a fundamentação teórica que serve como embasamento para o experimento realizado com indutores nos ensaios de EMC. O capítulo 3 expõe com detalhes o desenvolvimento da PCI e a definição das diferentes disposições de indutores a serem experimentados, bem como as variáveis que viabilizam o experimento. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de emissão radiada e conduzida das disposições definidas no capítulo 3. E por fim, o capítulo 5 aborda as considerações finais, compilando os resultados do capítulo 4 e satisfazendo os objetivos previamente traçados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Montrose (2000, p.xiii, tradução nossa) "O objetivo principal do engenheiro é assegurar a operação de forma correta e a performance de um produto quando este é utilizado em um ambiente eletromagnético previsto". Todavia, para que seja assegurado a operação de forma correta dos produtos nestes ambientes eletromagnéticos, é necessário que este seja projetado de forma a satisfazer as normas relativas a EMC.

Para que o engenheiro seja capaz de desenvolver os produtos de forma a garantir o correto funcionamento e a performance de forma economicamente viável, este deve ter um conhecimento em várias áreas da engenharia elétrica, como afirma (CHRISTOPOULOS, 2007, p.xiv, tradução nossa):

Em um tópico como o EMC onde a complexidade dos problemas práticos são consideráveis, nem sempre é possível prover uma resposta completa e certa baseada em modelos quantitativos. Nestes casos é imperativo que o conhecimento básico sobre a natureza elétrica dos componentes, as suas interações por meio dos campos magnéticos, e a natureza e caracterização dos sinais elétricos estejam bem estabelecidos. Estes fundamentos proveem ao engenheiro a estrutura conceitual básica e ferramentas para fazer as perguntas certas, avaliar criticamente, fazer suposições e dar suporte para a procura de soluções baseadas na sólida compreensão científica.

Com base no que foi ilustrado acima, os tópicos deste capítulo tem como objetivo apresentar a fundamentação para o entendimento básico dos fenômenos envolvendo o EMC e também dos componentes imprescindíveis a aplicação do experimento.

### 2.1 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

O EMC é um ramo da ciência e engenharia que preocupa-se com o *design* e a operação de equipamentos de maneira que sejam imunes a certa quantidade de interferência eletromagnética, enquanto ao mesmo tempo mantenham a interferência gerada por si, dentro dos limites especificados (CHRISTOPOULOS, 2007). Sendo assim, resumidamente, pode-se dizer que o EMC preocupa-se com a transmissão, geração e recepção de energia eletromagnética. Estes três aspectos formam a estrutura básica de qualquer projeto de EMC. (PAUL, 2006, p.3, tradução nossa).

A ocorrência de EMI tornou-se cada vez mais recorrente com o avanço da tecnologia. Este avanço tecnológico, fez com que o uso de sistemas digitais e processadores cada vez mais rápidos introduzissem novas práticas para que fosse possível amenizar os efeitos do EMI, o que trouxe o EMC como um dos principais fatores do desenvolvimento moderno. Três tendências tecnológicas impulsionaram estes avanços. O primeiro, é a lógica digital e o processamento de sinais, que são baseados em tensões de baixa amplitude se comparados com tecnologias antigas. O segundo, é a procura por maiores velocidades de processamento, que dependem de pulsos

com tempo de subida curtos, contribuindo com a criação de energia em frequências altas e que são capazes de se propagar através da radiação. E o terceiro é o uso de plástico no lugar de metais, o que reduz a blindagem eletromagnética dos produtos em geral (CHRISTOPOULOS, 2007). Devido a estes avanços, controlar os níveis de emissão eletromagnética e garantir o funcionamento dos equipamentos em seus ambientes eletromagnéticos desejados, tornou-se uma tarefa mais desafiadora. Principalmente, onde a competitividade do mercado requer o desenvolvimento de produtos em menor tempo e com preços mais agressivos.

As preocupações envolvendo o EMC não são recentes. Desde os primeiros anos do rádio, tanto projetistas quanto ouvintes tinham problemas com ruídos, interferências e aterramento. No entanto, os problemas envolvendo EMC não se resumem a problemas com transmissão e recepção de rádio, e por diversas vezes, contribuíram para o mal funcionamento de sistemas diversos. A exemplo, podemos citar o seguinte caso envolvendo falhas em decorrência do EMI:

Em 1967, na costa do Vietnã, um jato da marinha pousando no porta aviões U.S.S *Forrestal* experimentou a liberação não-ordenada de munições que atingiram um caça totalmente armado e abastecido no deck. O resultado disto foram explosões, a morte de 134 marinheiros e danos severos ao porta aviões. Este acidente foi causado devido a aeronave que estava pousando ter sido atingido pela portadora do radar. Esta interferência sofrida em resultado do EMI, fez com que um sinal indevido fosse mandado para o sistema de armas da aeronave. (LEACH, 1995, p.7, tradução nossa)

Falhas em decorrência do EMI, em muitos casos podem ser fatais em dispositivos que trazem riscos de segurança para seus usuários ou aqueles a sua volta. Um exemplo além do cenário automotivo e militar, é o da área médica, onde todos os equipamentos eletrônicos devem ser de altíssima confiabilidade, pois o seu mal funcionamento podem oferecer riscos a vida de seus usuários, conforme exemplo ilustrado por (LEACH, 1995, p.13 tradução nossa)

A susceptibilidade de equipamentos médicos a emissão conduzida ou radiada é uma preocupação. Neste caso, um homem de 93 anos vítima de um ataque cardíaco estava sendo levado para o hospital, enquanto o médico técnico colocava o monitor/desfibrilador no paciente. Devido ao equipamento que desligava toda vez que o técnico ligava o rádio para pedir instruções médicas, o paciente morreu. Investigações mostraram que o monitor/desfibrilador foi exposto a uma alta emissão radiada, devido ao teto da ambulância ter sido trocado de metal para fibra de vidro e equipado com uma antena de longo alcance. Reduzir a blindagem da ambulância combinado com uma forte radiação de sinais de rádio resultaram em EMI para o equipamento.

Em decorrência das preocupações em relação a quantidade de falhas crescente ocasionadas por EMI foi necessário estabelecer regulamentações que ajudassem a garantir o correto funcionamento dos equipamentos eletrônicos em seus ambientes eletromagnéticos de uso, limitando a quantidade de EMI que estes poderiam gerar, e também torna-los menos susceptíveis a interferência gerada por outros equipamentos em seu ambiente de funcionamento.

### 2.1.1 Órgãos Regulamentadores

Com a difusão dos sistemas de rádio no período de 1925 a 1950, os problemas envolvendo EMI começaram a ficar cada vez mais frequentes. Neste período as regulamentações envolvendo a emissão de EMI intencional ou não intencional eram bastante negligentes, e cada vez mais pessoas tinham acesso a equipamentos de rádio (Learn EMC , 2019). Devido a estes problemas, em 1933 em um encontro do IEC em Paris, foi recomendado a formação do CISPR, um comitê para lidar com a crescente preocupação com o EMI. A CISPR foi responsável pela criação de diversos documentos detalhando equipamentos de medição de EMI bem como as técnicas de medições e limites de emissão. Baseando-se nestas publicações outros países criaram os seus próprios órgãos regulamentadores, como os Estados Unidos que seguem as regulamentações do FCC (PAUL, 2006).

Segundo Paul (2006, p.11, tradução nossa) "As regras do FCC foram as primeiras regulamentações para sistemas digitais nos Estados Unidos, e os limites de emissão seguem as recomendações do CISPR, adequados para o ambiente dos Estados Unidos". Neste período, órgãos militares e também algumas fábricas de produtos eletrônicos, já seguiam normas internas afim de assegurar o correto funcionamento de seus equipamentos quanto ao EMI. No entanto, com a criação das regulamentações os limites de EMI foram padronizados e criou-se uma dependência de atendimento dos produtos as normas, para que pudessem ser comercializados.

No Brasil, em 1997 com a publicação da Lei nº 9.472 denominado como a lei geral das telecomunicações, foi criada a primeira agência reguladora do país, a ANATEL (Museu das telecomunicações, 2016). Dentre um dos papéis da ANATEL está a regulamentação, fiscalização e homologação do que tange a emissão eletromagnética de equipamentos eletrônicos de telecomunicações. Segundo a ANATEL (2018a) "A certificação e homologação garantem ao consumidor a aquisição e o uso de produtos de telecomunicações que respeitam padrões de qualidade e de segurança e funcionalidades técnicas regulamentadas." A comercialização e utilização dos produtos de telecomunicações no Brasil, só é autorizado mediante a emissão de certificados de homologação emitidos pela ANATEL. Para que os produtos obtenham a sua certificação e possam ser homologados, estes devem atender os requisitos do Organismo de Certificação Designado (OCD) que conduzem os processos de avaliação da conformidade de produtos para telecomunicações efetuados pelos laboratórios de ensaios de EMC.

Para a definição dos limites de emissão, susceptibilidade e forma de testes realizadas nos laboratórios de ensaio, estes fundamentam-se nas normas exigidas pela ANATEL, que para os limites e modo de execução dos testes se baseia nas regulamentações do IEC conforme descrito no Ato nº 1120 de 18 de fevereiro de 2018 (ANATEL, 2018b). Abaixo segue algumas das regulamentações em que a ANATEL se baseia.

1. IEC 61000-4-2(2001) - *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurement Techniques. Section 2 Electrostatic discharge immunity test;*
2. IEC 61000-4-3 (2002) - *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and*

*Measurement Techniques. Section 3 Radiated electromagnetic field requirements;*

3. IEC 61000-4-4 (2004) - *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurement Techniques. Section 4 Electrical fast transient*
4. IEC 61000-4-5 (2001) - *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Test and Measurement Techniques - Section 5: Surge Immunity Test*
5. IEC 61000-4-6 (2004) - *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurement Techniques. Section 6 Immunity to conducted disturbances induced by radio-frequency fields;*

Para a realização dos ensaios de EMC os laboratórios utilizam câmaras semi-anecoicas. Segundo Dash (2005) "Uma câmara anecoica de RF é uma sala blindada onde as paredes são cobertas com um material que dispersa ou absorve tanta energia incidente que consegue simular o espaço livre". Estas câmaras são projetadas em tamanhos variados dependendo do tipo de equipamento a serem testados conforme pode ser observado na figura 1. Já durante o desenvolvimento de protótipos, é comum os ensaios com a utilização de uma célula eletromagnética transversal gigahertz do inglês *Gigahertz Transverse Electromagnetic (GTEM)*, este equipamento é utilizado para ensaios de emissão e imunidade radiada. A figura 2 apresenta uma destas células.

Figura 1 – Câmara semi-anecoica para testes em grandes equipamentos



Fonte: ELDORADO (s.d))

Além dos testes de emissão conduzida e radiada, existem outros testes que são efetuados nos produtos e exigidos pelos órgãos regulamentadores afim de garantir o EMC, como por exemplo os testes de descarga eletrostática do inglês *Electrostatic Discharge (ESD)*, testes de imunidade a surtos elétricos e entre outros que a abordagem está fora do escopo deste trabalho.

Figura 2 – Célula GTEM



Fonte: TESEQ (s.d)

## 2.1.2 Eletromagnetismo aplicado a EMC

Para que o engenheiro consiga compreender o funcionamento, e execução dos testes para a certificação dos produtos e efetuar a análise dos resultados obtidos, este deve possuir sólidos conhecimentos em como são gerados os distúrbios eletromagnéticos e como estes se comportam quando se deparam com um produto eletrônico. Para isto, o engenheiro deve ter um conhecimento consolidado dos princípios do eletromagnetismo, como ilustra (CHRISTOPOULOS, 2007, p.5, tradução nossa)

nenhum entendimento sólido do EMC pode ser obtido sem pelo menos uma compreensão física do que é o eletromagnetismo. O conhecimento analítico normalmente associado com o assunto também é necessário, para que se possa fazer previsões quantitativas de performance do EMC.

Tendo isto em vista, para o entendimento das características eletromagnéticas começaremos com a lei de Ampère, este tópico é de grande importância pois serve como um dos pilares para o entendimento dos fenômenos da emissão eletromagnética.

### 2.1.2.1 Lei de Ampère

Subsequente as descobertas de Oersted<sup>1</sup> em 1820, de que uma corrente elétrica poderia afetar uma agulha de bússola, o matemático e físico francês André-Marie Ampère descobriu por meio de suas experiências a atração e repulsão de fios percorridos por correntes elétricas. Segundo (NOTAROS, 2012, p.132)

Poucas semanas após tomar conhecimento dos resultados de Oersted, antes que findasse o mês de setembro de 1820, Ampère estava pronto para relatar à Academia de Ciências sua descoberta de forças magnéticas entre fios carregando correntes elétricas. Ele descobriu por meio de experiências que dois fios paralelos carregando correntes na mesma direção se atraíam, enquanto os fios com corrente fluindo em direções opostas se repeliam. Seus experimentos fundaram a ciência do campo magnético causado por correntes elétricas.

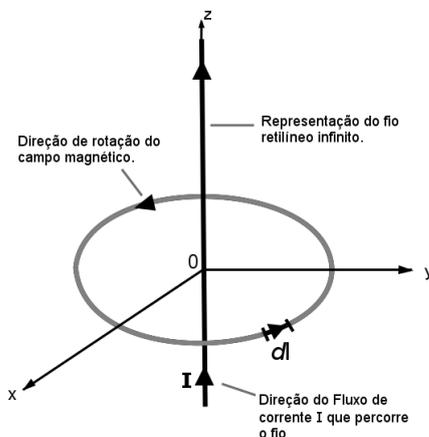
<sup>1</sup> Hans Christian Oersted foi professor de física na universidade de Copenhague na Inglaterra (JR.; BUCK, 2013)

Após o experimento realizado por Ampere, a equação 2.1 ficou conhecida como a Lei de Ampere. Esta lei nos ajuda a avaliar o campo magnético causado por distribuições de corrente simétricas no espaço livre. A equação 2.1 estabelece que o campo magnético  $\vec{B}$  em um caminho  $d\vec{l}$ , é proporcional a corrente  $I_c$  que gera este campo magnético. A variável  $\mu_0$  presente na equação, representa a permeabilidade magnética do espaço livre. A permeabilidade magnética representa a capacidade que o meio em questão tem de permitir a passagem do fluxo magnético. Este fluxo, nada mais é do que uma medida da quantidade de campo magnético que atravessa uma área específica. (FLEISCH, 2008, p.83, tradução nossa)

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_c \quad (2.1)$$

Utilizando a lei de Ampère pode-se determinar o campo magnético gerado em uma distribuição linear de corrente conforme a figura 3. Na figura, é possível observar a direção do campo magnético devido a corrente que percorre o fio infinito, no entanto, esta direção depende exclusivamente da direção da corrente. Uma maneira de determinar a direção do campo magnético, é a utilização da regra da mão direita, onde o polegar da mão direita aponta a direção da corrente enquanto os outros dedos apontam para direção do campo magnético conforme apresentado na figura 4.

Figura 3 – Campo magnético gerado por uma distribuição linear de corrente



Fonte: Adaptado de SADIKU (2004)

Com a lei de Ampère também é possível analisar o campo magnético gerado por diferentes geometrias, como é o caso de espiras e solenoides. Estas geometrias são capazes de prover um campo magnético similar ao de uma barra de ímã quando percorridos por uma corrente elétrica constante. Utilizando como base a lei de Ampere, a equação 2.2 mostra o campo gerado por uma solenoide, onde N é o número de espiras e L é comprimento da solenoide. A figura 5 apresenta o campo magnético gerado por uma solenoide ao ser percorrida por um fluxo de corrente elétrica. (HYPERPHYSICS, s.d, tradução nossa)

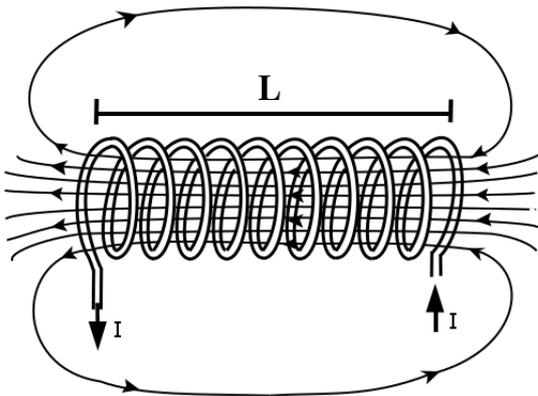
Figura 4 – Representação da regra da mão direita



Fonte: Adaptado de SADIKU (2004)

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I \quad (2.2)$$

Figura 5 – Campo magnético gerado por uma solenoide



Fonte: Adaptado de HYPHERPHYSICS (s.d)

No entanto, posteriormente a descoberta de Ampère, outros efeitos eletromagnéticos foram descobertos, como por exemplo o efeito representado pela Lei de Faraday, que será abordada no subcapítulo a seguir. Esta lei descreverá outro fenômeno importante acerca de campos magnéticos, que sucessivamente em conjunto com a Lei de Ampère servirá de base fundamental para o entendimento do eletromagnetismo e o EMC

#### 2.1.2.2 Lei de Faraday

Segundo (JR.; BUCK, 2013, p.277) "Após Oersted ter demonstrado em 1820 que uma corrente elétrica afetava uma agulha de bússola, Faraday teorizou que se uma corrente podia produzir campo magnético, então, um campo magnético poderia ser capaz de produzir corrente." Em 1831, Faraday obteve sucesso em seus experimentos demonstrando que uma

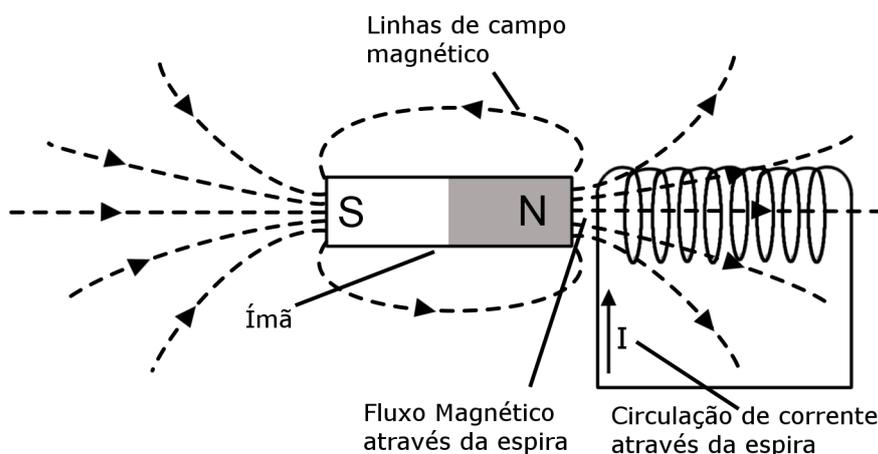
corrente elétrica pode ser induzida em um circuito, variando o fluxo magnético fechado por este circuito, como ilustra (JR.; BUCK, 2013, p.278)

Ele enrolou duas bobinas separadas em um toroide de aço e colocou um galvanômetro<sup>2</sup> em um circuito e uma bateria no outro. Quando fechava o circuito da bateria ele notava uma deflexão momentânea do galvanômetro. Uma deflexão similar, no sentido oposto, ocorria quando a bateria era desconectada. Isso, é claro, foi o primeiro experimento que ele realizou envolvendo um campo magnético variável e, em seguida, demonstrou que um campo magnético em movimento ou uma bobina em movimento poderiam também produzir uma deflexão no galvanômetro.

Com o experimento, Faraday provou a sua teoria de que um fluxo magnético variante no tempo através de uma superfície induz uma Força eletromotriz (fem) em um circuito fechado, e esta fem é capaz de induzir a circulação de corrente neste circuito. Para ilustrar esta afirmação, pode-se pensar em uma situação onde movimenta-se um ímã através de uma espira de material condutor, quando o fluxo magnético gerado pelo ímã atravessa a espira, este gera uma fem na espira fazendo com que circule corrente através da mesma.

A figura 6 ilustra este fenômeno. Este efeito da circulação de corrente através da espira mediante a imposição de um fluxo magnético através de sua superfície, ocorre apenas caso o fluxo magnético seja variável, ou seja, a sua intensidade deve variar com o tempo. No entanto, ainda com o exemplo do ímã, se segurarmos este ímã de forma estática próximo a espira, ainda teremos as suas linhas de campo magnético atravessando a superfície da espira formando um fluxo magnético, no entanto este fluxo será constante e não variável como quando acontece com o movimento do ímã. Sendo este fluxo estático, não será desenvolvido uma fem na espira e não haverá a circulação de corrente. (FLEISCH, 2008).

Figura 6 – Fluxo magnético variável atravessando uma bobina



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2019)

<sup>2</sup> Galvanômetro é um instrumento utilizado para medir correntes elétricas de baixa intensidade (BRAGA, s.da)

A equação 2.3 é conhecida como a lei de Faraday, e descreve os fenômenos da geração de uma fem através da variação temporal de um fluxo magnético que atravessa uma superfície condutora fechada.

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.3)$$

Na equação 2.3 o lado esquerdo da igualdade, representa a força eletromotriz. Esta força é medida em *Volts* e pode ser compreendida conforme exemplifica Fleisch (2008, p.68, tradução nossa):

Já que as linhas de campo, de campos elétricos induzidos formam caminhos fechados, estes campos são capazes de deslocar partículas carregadas através de um circuito contínuo. A carga deslocando-se através de um circuito é a própria definição da corrente elétrica, então o campo elétrico induzido pode agir como um gerador de corrente elétrica. Desta forma é compreensível que a circulação do campo elétrico passou a ser conhecido como uma "força eletromotriz"

Já o lado direito da igualdade da equação 2.3 segundo (FLEISCH, 2008, p.69, tradução nossa) "Envolve o fluxo magnético através de uma superfície. Mais especificamente a taxa de variação temporal deste fluxo". Tendo isto em vista, resta-nos o sinal de negativo da equação. Este sinal deve-se a lei de Lenz.

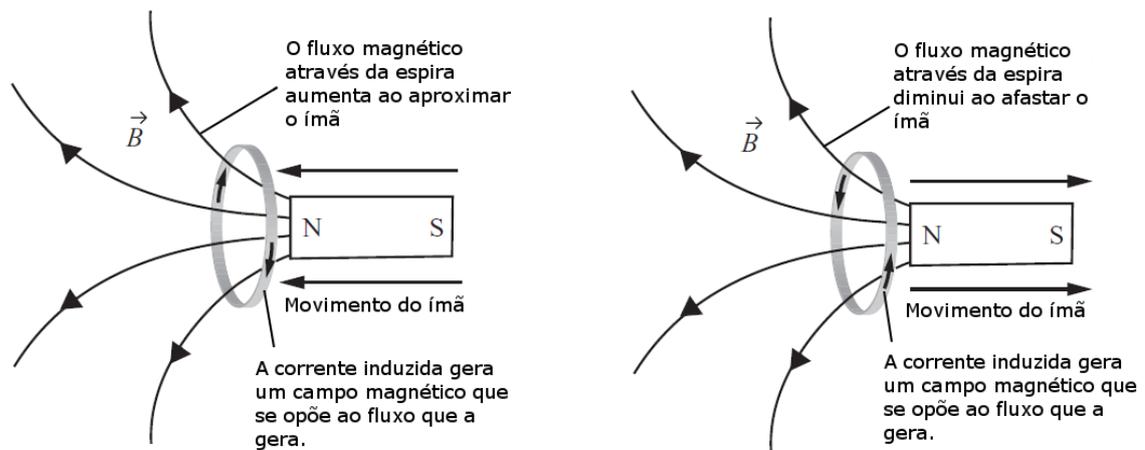
#### 2.1.2.2.1 Lei de Lenz

O sinal negativo contido na equação da lei de Faraday representado pela equação 2.3, é originado da Lei de Lenz. segundo Silva et al. (2014, p.310) esta lei pode ser definida como "A variação do fluxo magnético através de uma espira cria nela uma corrente elétrica induzida, de modo que essa corrente crie um campo que se oponha a variação do fluxo através da espira". Ou seja, a fem gerada através da variação temporal do fluxo magnético gera uma corrente que desloca-se de maneira a se opor a variação do fluxo magnético. Em outras palavras, segundo Fleisch (2008, p.71, tradução nossa) "Se o fluxo magnético através de um circuito está aumentando, a corrente induzida produz o seu próprio fluxo magnético na direção oposta, de modo a gerar uma atenuação do fluxo inicial". O mesmo ocorre para quando o fluxo através do circuito está diminuindo, a corrente induzida produz o seu próprio fluxo magnético de forma a estabilizar a variação do fluxo inicial. A figura 7 ilustra a direção do fluxo induzido segundo a lei de Lenz.

Agregando a lei de Lenz a lei de Faraday, temos a equação 2.3, em sua forma completa onde descreve que a variação temporal do fluxo magnético através de uma superfície fechada, gera uma força eletromotriz que por sua vez, provoca o deslocamento de cargas elétricas gerando um fluxo magnético que se opõe ao fluxo magnético incidente na superfície.

Posteriormente a descoberta dos fenômenos descritos pelas leis de Ampère e Faraday, houve uma nova descoberta que trouxe luz ao que conhecemos hoje como eletromagnetismo.

Figura 7 – Direção do fluxo induzido



Fonte: Adaptado de FLEISCH (2008)

Esta descoberta deve-se ao físico britânico James Clerk Maxwell, e a sua contribuição feita a Lei de Ampère, e principalmente o relacionamento entre as leis vistas nos subcapítulos anteriores. Este relacionamento das leis de Ampère, Faraday e outras leis resultou em um conjunto de equações que conhecemos hoje por equações de Maxwell.

### 2.1.2.3 Equações de Maxwell

James Clerk Maxwell é considerado o fundador da teoria eletromagnética como a conhecemos hoje, segundo (SADIKU, 2004, p.347)

O trabalho consagrado de Maxwell levou a descoberta das ondas eletromagnéticas. A partir de seu trabalho teórico de aproximadamente cinco anos (entre os seus 35 e 40 anos), Maxwell publicou a primeira teoria unificada da eletricidade e do magnetismo. A teoria compreendeu todos os resultados já conhecidos, de cunho experimental e teórico, sobre eletricidade e magnetismo. Adicionalmente, Maxwell introduziu o conceito de corrente de deslocamento e fez a previsão da existência das ondas eletromagnéticas.

Maxwell é conhecido por ter compilado as equações de Faraday, Ampere e Gauss<sup>3</sup> e fazer uma importante adição a lei de Ampere, que é a corrente de deslocamento. Com isto, Maxwell desenvolveu uma teoria compreensiva do eletromagnetismo. Segundo Fleisch (2008, p.112, tradução nossa) "Esta teoria elucidou a verdadeira natureza da luz, e abriu os olhos do mundo para o espectro completo de radiação eletromagnética". A seguir é apresentado a forma geral das equações de Maxwell, a compreensão destas equações pode levar ao entendimento de grande parte dos problemas envolvendo EMC.

<sup>3</sup> Karl Friedrich Gauss (1777-1855), foi um matemático alemão responsável pelo desenvolvimento do teorema conhecido como Teorema de Gauss. Foi o primeiro físico a medir quantidades elétricas e magnéticas em unidades absolutas. (SADIKU, 2004, p.126)

A primeira das equações a ser abordada e que compõe as equações de Maxwell, é a equação 2.4 que é conhecida como a lei de Gauss para campos elétricos. Segundo Sadiku (2004, p.126) "A lei de Gauss estabelece que o fluxo elétrico total através de qualquer superfície fechada é igual a carga total enclausurada por esta superfície". Em outras palavras, uma carga elétrica produz um campo elétrico e o fluxo deste campo passando por uma superfície fechada é proporcional a carga contida nesta superfície. Exemplificando a equação 2.4, o lado esquerdo representa o campo elétrico através de uma superfície, e o lado direito representa a razão entre a carga e a permissividade elétrica do espaço livre  $\varepsilon_0$ . (FLEISCH, 2008, p.2, tradução nossa)

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q_{enc}}{\varepsilon_0} \quad (2.4)$$

A segunda equação retratada é a equação 2.5 que também é atribuída a Gauss e é conhecida como a lei de Gauss para campos magnéticos. Esta equação é relacionada ao fluxo magnético e nos mostra que, segundo Sadiku (2004, p.261) "O fluxo total através de uma superfície fechada em um campo magnético deve ser zero". No entanto isto não significa que nenhuma linha do campo magnético penetra a superfície, e sim que para cada linha do fluxo que sai da superfície, temos uma que entra na superfície. Com esta equação também é possível deduzir que não existe uma carga magnética isolada. (SADIKU, 2004, p.261)

$$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (2.5)$$

Outra equação que compões as equações de Maxwell, é a lei de Faraday-Lenz que pode ser observada na equação 2.6. Resumidamente esta lei descreve que uma força eletromotriz é induzida em uma superfície quando um campo magnético variável no tempo atravessa esta superfície. Cada um dos termos da equação de Faraday-Lenz é explicado na subseção Lei de Faraday na página 26

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.6)$$

A ultima equação a ser abordada, é a lei de Ampere-Maxwell que é descrita pela equação 2.7. Esta equação, além de descrever o fenômeno da geração de um campo magnético devido ao deslocamento de cargas elétricas, conforme visto na subseção Lei de Ampere na página 24, agora, devido a uma contribuição de um termo feito por Maxwell, também descreve a geração de um campo magnético devido a variação temporal do campo elétrico. Desta forma, a parte direita da equação apresenta duas fontes de campo magnético, um fluxo de corrente  $I_{enc}$  e um fluxo elétrico variante através de uma superfície  $\frac{d}{dt} \int_s \vec{E} \cdot d\vec{s}$ . Esta contribuição a lei de Ampere feita por Maxwell devido a adição de um novo termo, ficou conhecida como corrente de deslocamento. (FLEISCH, 2008, p.84, tradução nossa).

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( I_{enc} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_s \vec{E} \cdot d\vec{s} \right) \quad (2.7)$$

Cada uma das equações de Maxwell desempenha um papel fundamental no entendimento da teoria dos campos eletromagnéticos, no entanto, segundo Fleisch (2008, p.112, tradução nossa) "As conquistas de Maxwell vão além da síntese destas quatro leis e a adição da corrente de deslocamento, foi considerando estas leis em conjunto que ele chegou ao seu objetivo de desenvolver uma teoria compreensiva do eletromagnetismo". Outra conquista que só foi possível através das equações de Maxwell e a corrente de deslocamento, foi a previsão da existência de ondas eletromagnética, estas que são responsáveis por grande parte dos avanços tecnológicos modernos e que também são de suma importância para o entendimento dos fenômenos do EMC.

#### 2.1.2.4 Ondas eletromagnéticas

A partir das equações de Maxwell, foi possível prever a existência de ondas eletromagnéticas, que segundo Sadiku (2004, p.371) "A existência das ondas eletromagnéticas, previstas pelas equações de Maxwell foi inicialmente investigada por Heinrich Hertz. Depois de vários experimentos, Hertz teve sucesso na geração e detecção de ondas de rádio". Algumas tecnologias presentes no nosso dia-a-dia como os sinais de rádio, de TV, de celular e até mesmo a conexão entre dispositivos sem fio como é o caso do Wi-Fi<sup>4</sup>, só são possíveis devido a existência das ondas eletromagnéticas.

Até agora todas as equações de Maxwell tem sido apresentadas em sua forma integral, no entanto para facilitar o entendimento dos fenômenos físicos acerca das ondas eletromagnéticas, será apresentado a forma local das equações de Maxwell. A forma local apresenta as equações de Maxwell do ponto de vista do cálculo vetorial, envolvendo operações com gradiente, divergente e rotacional<sup>5</sup>.

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0} \Rightarrow \text{div} \vec{E} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

$$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \Rightarrow \text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.9)$$

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \Rightarrow \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( I_{enc} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_s \vec{E} \cdot d\vec{s} \right) \Rightarrow \text{rot} \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{J} \quad (2.11)$$

Com a equação 2.12 é possível observar que um fluxo de corrente variável no tempo através de um condutor, é capaz de gerar um campo magnético também variável no tempo, como foi visto na pagina 30. Analogamente observando a equação 2.13, pode-se ver que um campo

<sup>4</sup> É a abreviação para "Wireless Fidelity", é uma tecnologia de comunicação sem fio geralmente transmitida através de ondas de rádio ou infravermelhos (SIGNIFICADOS, 2018)

<sup>5</sup> O desenvolvimento de operações de gradiente, divergente e rotacional demandam o conhecimento prévio de cálculo vetorial, o qual está fora do escopo deste trabalho

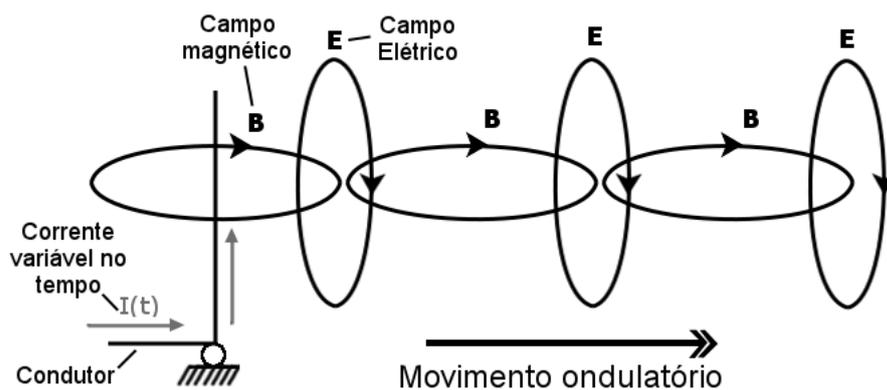
magnético variável no tempo é capaz de gerar um campo elétrico variável no tempo. Com estas equações conseguimos observar a relação entre uma equação e outra, onde um campo elétrico variável no tempo é capaz de gerar um campo magnético também variável que por sua vez é capaz de gerar um campo elétrico e assim consecutivamente, ou seja  $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \rightarrow \dots$  (NIKNEJAD, 2007, p.93, tradução nossa)

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{J} \quad (2.12)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.13)$$

A imagem 8 representa a propagação da onda eletromagnética, em consequência de um fluxo de corrente variável no tempo através de um condutor. Note que a corrente através do condutor gera um campo magnético que por sua vez induz um campo elétrico e assim consecutivamente. A imagem 8 também retrata o movimento ondulatório que é a direção de propagação da onda. Este movimento de oscilação é perpendicular a direção dos campos elétricos e magnéticos que também são perpendiculares entre si como apresentado na figura 9. A direção de oscilação do campo elétrico nas ondas eletromagnéticas é importante pois define a polarização da onda. Segundo Fleisch e Kinnaman (2015, p.175, tradução nossa) "Se o campo elétrico permanece no mesmo plano, a onda é dita como linearmente polarizada". A figura 9 também é um exemplo de onda linearmente polarizada, pois note que o campo elétrico permanece sempre no mesmo plano (x). (FLEISCH; KINNAMAN, 2015)

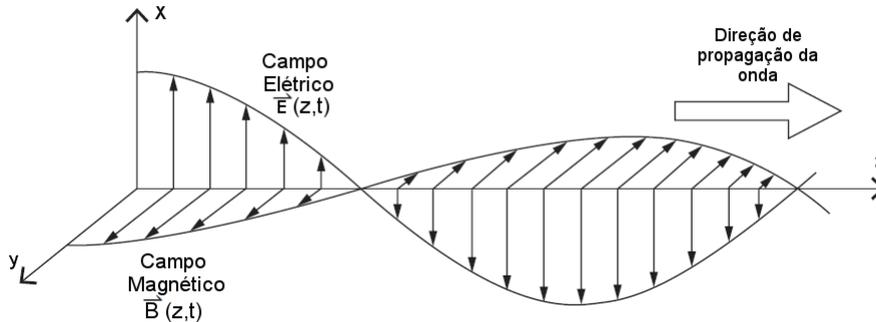
Figura 8 – Formação da onda eletromagnética a partir de um condutor



Fonte: Adaptado de NIKNEJAD (2007)

Com um entendimento básico das equações de Maxwell, os efeitos dos campos elétricos e magnéticos, e como são formadas as ondas eletromagnéticas, tem-se o necessário para obtermos um entendimento dos princípios do EMC, e os efeitos do EMI.

Figura 9 – Propagação da onda eletromagnética



Fonte: Adaptado de FLEISCH; KINNAMAN (2015)

## 2.2 PRINCÍPIOS DO EMC

Quando os problemas envolvendo EMC ocorrem, é necessário que o engenheiro aborde-os de maneira lógica. Esta abordagem pode inicialmente ser resumida em um modelo de três elementos envolvendo o EMI.(MONTROSE, 2000)

1. Deve existir uma fonte de energia eletromagnética.
2. Deve existir um equipamento receptor que é afetado por esta energia eletromagnética quando sua intensidade está acima dos limites toleráveis.
3. Deve haver um caminho de acoplamento entre a fonte e o receptor da energia eletromagnética indesejada.

Segundo Montrose (2000, p.2, tradução nossa) "Para que a interferência exista todos estes três elementos devem estar presentes. Se um destes elementos for removido, não é possível haver interferência". A figura 10 apresenta em um diagrama de blocos a composição básica de um problema relativo ao EMC, onde é mostrado os componentes básicos para que haja a interferência. No entanto, não basta dizer que um produto sofre interferência eletromagnética apenas por receber esta energia. É necessário que o produto tenha um comportamento não desejado para que seja caracterizado esta interferência, como ilustra (WILLIAMS, 2001, p.3, tradução nossa):

A interferência ocorre se a energia recebida faz com que o receptor comporte-se de maneira não desejada. A transferência da energia eletromagnética ocorre frequentemente através do acoplamento não intencional. No entanto, a transferência de energia só causa interferência se a energia recebida é de magnitude e ou é de conteúdo espectral capaz de fazer com que o receptor comporte-se de maneira não desejada. A transmissão ou recepção de energia eletromagnética não necessariamente é prejudicial; O comportamento inesperado do receptor constitui interferência, então o processamento da energia recebida pelo receptor é uma parte importante da questão se a interferência irá ocorrer ou não.

Figura 10 – Composição básica do problema relativo a EMC



Fonte: Adaptado de WILLIAMS (2001).

As fontes de interferência nem sempre são externas ao produto eletrônico, em muitas situações o próprio produto pode gerar EMI que acaba por interferir em certos componentes de seu próprio circuito. Um dos trabalhos do engenheiro em relação a esta situação é determinar a forma mais fácil de tratar do problema, no entanto quando falamos de produtos eletrônicos em muitos casos, a forma que apresenta o melhor custo-benefício para reduzir os impactos do EMI é desenvolver a PCI de forma a reduzir as fontes de RF que possam ser geradas pelo próprio circuito na placa, e conter esse RF nas áreas da PCI onde essa energia é necessária, evitando ao máximo um impacto em outras áreas do circuito (MONTROSE, 2000).

Além de preocupar-se com as interferências geradas internamente ao produto, devemos nos preocupar com os sinais de RF que são externos ao produto. Estes, caso o produto seja susceptível, também podem gerar falhas no circuito, acarretando em um comportamento inesperado do produto. Os ruídos externos geralmente são mais difíceis de prever e possuem origens distintas dependendo do ambiente eletromagnético onde o produto será utilizado, no entanto, dependendo da aplicação do produto eletrônico, apenas algumas destas fontes podem causar algum dano.

### 2.2.1 Fontes de ruído

Um grande número de fontes de ruído contribuem para o nosso ambiente eletromagnético, no entanto, nem todas representam algum risco. segundo Christopoulos (2007, p.111, tradução nossa) "É indiscutivelmente difícil de identificar as fontes de interferência, já que cada aplicação tem as suas características específicas". As fontes de ruído podem ser classificadas de diferentes formas dependendo de sua natureza, resumidamente, podemos dividi-las em fontes naturais e artificiais, ou seja, aquelas criadas pelo homem.

#### 2.2.1.1 Fontes naturais de ruído

A vida humana hoje como a conhecemos, reside sob a superfície do planeta Terra. Esta superfície é sujeita a campos eletromagnéticos que se originam de grandes distâncias. Estes campos eletromagnéticos são chamados de campos naturais (CHRISTOPOULOS, 2007). Alguns exemplos destes campos naturais são:

- Ruídos atmosféricos.
- Ruídos cósmicos.

Os ruídos atmosféricos são produzidos por descargas atmosféricas durante tempestades. Estas descargas acontecem frequentemente, e os impactos não são apenas devido a problemas de surtos elétricos em produtos eletrônicos, eles podem causar um impacto indireto através do campo eletromagnético que emanam. O campo eletromagnético de grandes tempestades podem se propagar por milhares de quilômetros através da propagação ionosférica<sup>6</sup>. Desta forma, os efeitos gerados pelas tempestades podem não ser no próprio local onde estão acontecendo, podendo atingir localidades onde não houve tempestade (WESTON, 2016). Segundo Paul (2006, p.8, tradução nossa) "Os campos eletromagnéticos destas correntes intensas podem acoplar nos dispositivos eletrônicos tanto por radiação direta, quanto por acoplamento na rede de distribuição elétrica, subsequentemente sendo conduzido ao dispositivo através de sua alimentação."

Os ruídos cósmicos segundo Weston (2016, p.6, tradução nossa) "Compreendem os ruídos de rádio [...] causado por ionização, [...] e também radiação solar". Estas radiações podem variar de intensidade com o período do dia. Outras fontes de ruído cósmicos também podem vir da Lua e de outros planetas. No entanto, o nível de radiação destes são menos significativos e geralmente estão bem abaixo dos níveis da norma em relação ao EMC. Todavia, quando trata-se de equipamentos de altíssima sensibilidade estes ruídos devem ser levados em consideração.

#### 2.2.1.2 Fontes Humanas de ruído

Com o passar dos anos a humanidade evoluiu bastante em termos tecnológicos, ao ponto de que hoje em nossas residências podem ser encontrados diversos aparelhos eletrônicos como, celulares, computadores, televisões, e eletrodomésticos diversos. Devido a esta evolução a emissão de ruídos eletromagnéticos tem virado uma forma de poluição. Algumas dessas fontes de ruído estão listadas abaixo:

- Comunicação
  - Transmissão de Rádio, TV e celular
  - Navegação
  - Radares
  - Radiocomunicadores
- Industriais.

<sup>6</sup> A ionosfera é uma parte da atmosfera terrestre onde a ionização dos gases atmosféricos afetam a propagação de ondas de rádio podendo estender-las por até 50 quilômetros através da refração das ondas eletromagnéticas.(SARMENTO, S.d)

Tabela 1 – Faixas de frequência de uso para comunicação no Brasil

Faixa de frequência	Utilização
88-108 MHz	Rádio FM
174-216 MHz	TV - Canais 7 - 13
470-618 MHz	TV - Canais 14 - 36
698-960 MHz	Telefonia Celular
1.710-2.025 MHz	Telefonia Celular
2.110-2.200 MHz	Telefonia Celular
2.500-2.690 MHz	Telefonia Celular

Fonte: Adaptado de ANATEL (2014) e TELECO (2019)

- Maquinas de solda
- Aquecedores de indução
- Lâmpadas fluorescentes
- Caseiras
  - Barbeadores elétricos
  - Fornos Micro-ondas
  - Computadores
  - Liquidificadores

Transmissões de comunicação celular e TV são uma forma de radiação intencional feita pelo homem, que crescem constantemente. No entanto, cada país tem as suas regulamentações em relação a emissão de RF. A tabela 1 apresenta algumas faixas de frequência regulamentadas no Brasil. Nestas faixas de frequência é de se esperar que os sinais tenham uma maior intensidade que o comum dependendo da distância em que o equipamento está da fonte de RF, e devem ser previstos durante o desenvolvimento de produtos eletrônicos, para que possam operar de forma satisfatória em um ambiente onde há a presença destas frequências e também atingir o EMC.

Em ambientes industriais é comum o uso de equipamentos que podem emitir ruídos em diferentes faixas, como é o caso de alguns motores, equipamentos de solda e também aquecedores como ilustra (CHRISTOPOULOS, 2007, p.119, tradução nossa)

Uma forma eficiente de aquecer materiais é utilizando sinais de alta frequência. Em casos onde o material é altamente condutível, o aquecimento acontece induzindo correntes através do mesmo, enquanto materiais que não são bons condutores, o aquecimento ocorre gerando perdas no dielétrico. Tipicamente as frequências utilizadas para o aquecimento por indução vão de 1 a 100KHz, 1 MHz, enquanto a por perdas no dielétrico são selecionados de uma lista de 13,560MHz, 27,12MHz, 40,68MHz [...]. Medidas tiradas a 30 metros destes aquecedores mostraram um valor médio do campo elétrico de 100 dB uV/m.

Já em ambientes residenciais temos a presença de alguns equipamentos que também podem gerar ruído e são bastante comuns no nosso dia-a-dia. Barbeadores, liquidificadores e fornos micro-ondas são exemplos de alguns equipamentos que podem gerar algum tipo de interferência. Ainda outros exemplos são os próprios computadores e celulares, estes utilizam modernos processadores digitais de sinais e métodos de transmissão que utilizam pulsos rápidos para codificar informações. Estes pulsos rápidos caso não sejam transmitidos através de meios bem dimensionados podem emitir ruídos, acoplando em outros equipamentos como ilustra (CHRISTOPOULOS, 2007, p.119, tradução nossa)

Taxas de clock de centenas de mega hertz e tempos de transição de poucos nanosegundos são comuns. A presença de pulsos rápidos em placas de circuito impresso e a sua transferência através de cabos de comunicação podem gerar radiação e o acoplamento em circuitos adjacentes. [...] Tempos de transição rápidos, embora sejam desejáveis do ponto de vista de operação, são indesejáveis em termos de EMC pois estes contribuem significativamente para a geração de harmônicas de alta ordem.

Sintetizando o que foi visto sob a emissão de ruídos tanto naturais quanto de origem humana, a figura 11 apresenta um exemplo de diferentes tipos de ruídos que podem causar interferência em rádio em seu ambiente eletromagnético de operação.

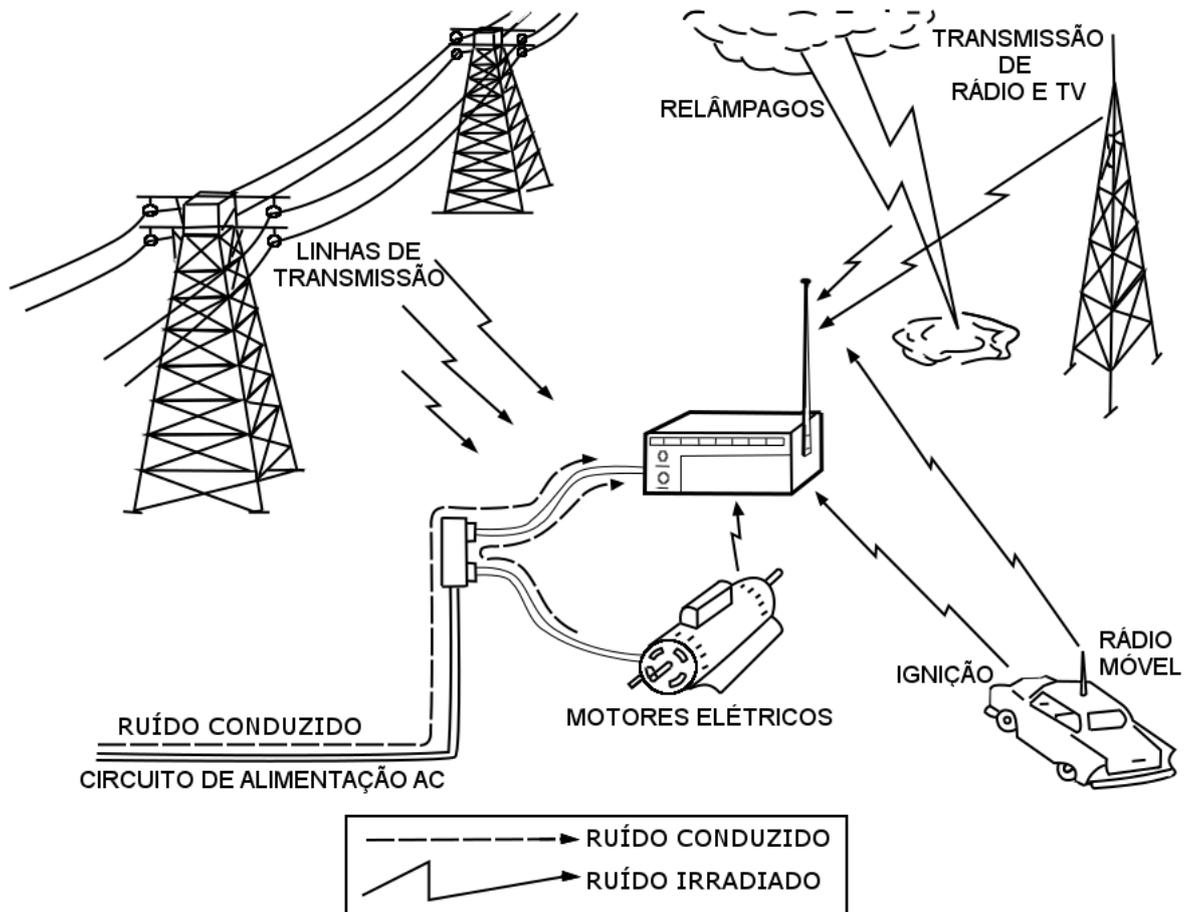
Sabendo os tipos de ruídos ao qual os produtos eletrônicos podem ser expostos em seu ambiente eletromagnético e também alguns exemplos de ruídos que podem ocorrer internamente em um circuito eletrônico, pode-se entrar mais a fundo na concepção destes circuitos, o que os compõe e também o comportamento dos componentes eletrônicos que fazem parte a grande maioria dos produtos eletrônicos.

## **2.2.2 Placa de Circuito Impresso**

Segundo Khandpur (2005, p.1, tradução nossa) "os equipamentos eletrônicos são uma combinação de componentes elétricos e eletrônicos, conectados entre si para executar uma função". Antigamente, estes componentes eram todos soldados a mão, ponto-a-ponto, descascando a parte isolante dos fios e conectando os terminais de cada componente. Este método se mostrava bastante ineficiente, pois resultava em produtos eletrônicos grandes, sendo bastante difícil atingir as regulamentações para utilização destes em diversos ambientes, como os ambientes, militares e hospitalares. Sendo assim, tornou-se necessário que os equipamentos ficassem cada vez menores, de forma a tornar mais fácil a sua utilização. Para tornar a diminuição do tamanho dos produtos eletrônicos possível, diversas áreas da eletrônica tiveram que avançar tecnologicamente como ilustra (KHANDPUR, 2005, p.1, tradução nossa)

Uma evolução natural se deu em diversas áreas. Componentes menores foram desenvolvidos e o desenvolvimento modular se tornou popular, basicamente com o intuito de diminuir o tempo entre a falha e o reparo da unidade, devido a fácil substituição. O uso da miniaturização e sub-miniaturização em projetos de equipamentos eletrônicos, deu luz a uma nova técnica de conexão e montagem popularmente conhecida como placa de circuito impresso PCI.

Figura 11 – Exemplo de interferências sofridas por um rádio

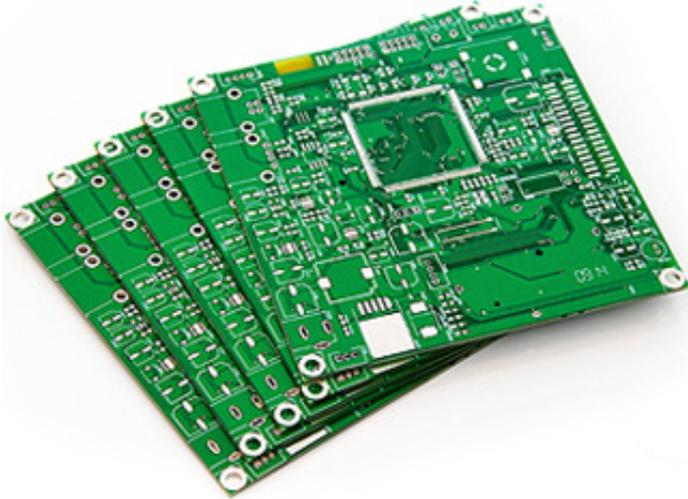


Fonte: Adaptado de OTT (1988)

A PCI segundo Khandpur (2005) "provê tanto a estrutura física para montar e segurar os componentes eletrônicos, quanto as conexões entre os componentes". A figura 12 apresenta um exemplo de PCI e suas conexões. Algumas das vantagens de sua utilização é o tamanho reduzido dos circuitos que podem ser montados, a facilidade de produção em massa de equipamentos eletrônicos a um custo mais baixo do que outras soluções, a soldagem dos componentes pode ser automatizada, a repetibilidade do circuito pode ser assegurada, mantendo as características elétricas a cada montagem, e entre outras vantagens. (KHANDPUR, 2005, p.5, tradução nossa)

Os principais componentes de uma PCI são a base, e os condutores. A base, é a placa propriamente dita, formada por um material isolante rígido ou flexível, que suporta a fixação dos componentes. Os condutores são normalmente feitos de cobre em formato de finas "faixas" de diferentes formatos fixados na base. Estes condutores fazem a conexão entre os componentes do circuito e também proveem pontos de solda para os componentes eletrônicos. Segundo Khandpur (2005) "o termo placa de circuito "impresso" tornou-se popular pois as áreas condutivas da placa

Figura 12 – Placa de circuito impresso.

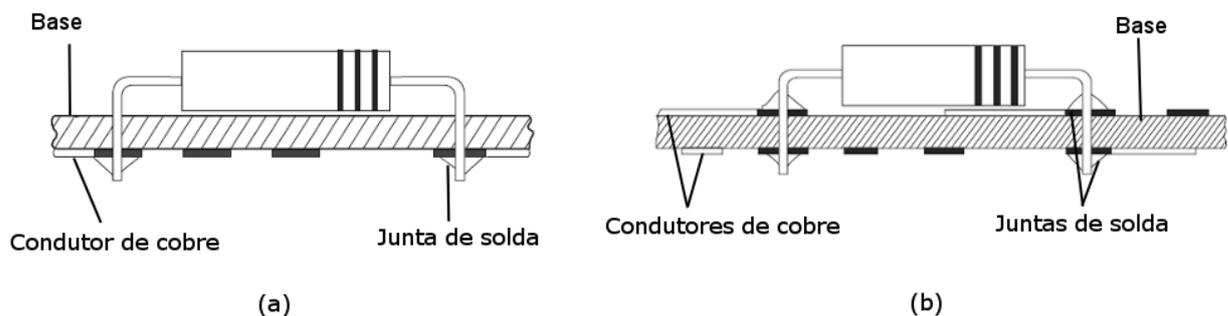


Fonte: REFINERS (2016)

são geradas através de um processo de impressão como a serigrafia, usualmente utilizada para imprimir desenhos ou inscrições".

Os condutores em uma PCI podem ser em ambas a parte de cima ou a parte de baixo da placa. A figura 13 apresenta estas duas formas de conexão. A vantagem de utilizar ambos os lados da placa, é que torna possível a criação de placas de tamanho reduzido para um mesmo circuito. No entanto devido ao aumento da complexidade dos circuitos eletrônicos, sua densidade de componentes e o uso de CIs com quantidades elevadas de conexões, foi necessário a utilização de PCIs com múltiplas camadas de condutores como mostra a figura 14 .

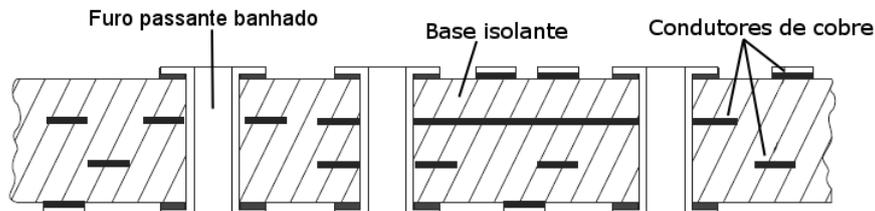
Figura 13 – (a) PCI com condutores em um lado da placa (b) PCI com condutores em dois lados da placa.



Fonte: Adaptado de KHANDPUR (2005)

Devido a grande quantidades de interconexões presentes nas PCIs de produtos eletrônicos complexos, deixar estes produtos em conformidade com as normas relativas ao EMC é uma tarefa cada vez mais difícil. Uma das razões de que a grande quantidade de interconexões torna difícil deixar o produto eletromagneticamente compatível é que segundo Montrose (2000) "cada trilha possui um valor de impedância finita. A indutância das trilhas é apenas uma das

Figura 14 – PCI com 4 camadas.



Fonte: Adaptado de KHANDPUR (2005)

rasões pelas quais a energia RF é desenvolvida dentro da PCI". No entanto não só apenas os circuitos traçados na PCI podem causar a emissão de RF de forma a causar interferência, como outros elementos do circuito também podem contribuir de maneira substancial caso o seu uso não seja bem planejado durante o desenvolvimento de um produto.

### 2.2.3 Elementos de um circuito

Os circuitos elétricos são utilizados em inúmeras aplicações do nosso dia-a-dia, e para que sejam funcionais muitos requerem em sua concepção o uso de componentes eletrônicos. Em especial os componentes passivos e lineares, que quando analisados sob as perspectivas do EMC em altas frequências, podem se mostrar não lineares, como ilustra (MATTOS, 2016, n.p)

Os componentes lineares na teoria de circuitos elétricos, tem os parâmetros constantes e são a resistência, a indutância e a capacitância. Usualmente estes componentes são considerados ideais, isto é, não são levados em consideração elementos parasitas que aparecem nos componentes reais [...]. No mundo real estes componentes são não-lineares, têm parasitas e são passivos.

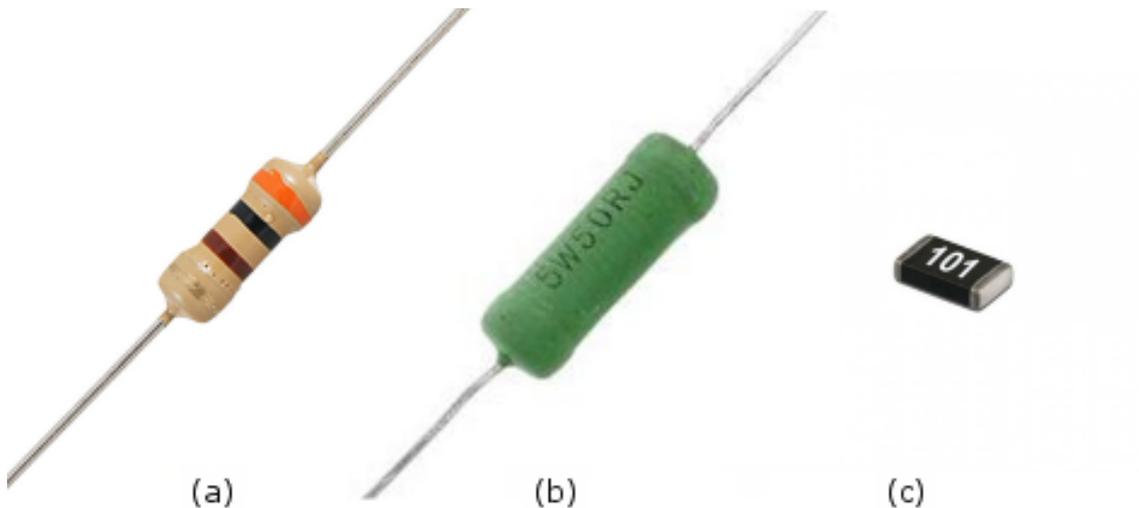
Nos próximos subcapítulos será abordado os resistores, capacitores e indutores que são componentes eletrônicos básicos que compõe uma grande parte dos produtos eletrônicos, com o objetivo de apresentar as suas características e importância mediante a abordagem do EMC.

#### 2.2.3.1 Resistores

Os resistores são componentes que tem a função de "resistir" a passagem de corrente elétrica, ou seja, a resistência se opõe a passagem de corrente. Segundo Boylestad (2012, p.51) "Essa oposição, devido fundamentalmente a colisões e fricções entre elétrons livres e outros elétrons, íons e átomos no curso do movimento, converte a energia elétrica fornecida em calor, o que aumenta a temperatura do componente elétrico e do meio circundante". Com isto pode-se dizer que o resistor tem como característica básica a transformação da energia elétrica em energia térmica, que é conhecido com efeito Joule. Esta transformação da energia elétrica em térmica pode também ser caracterizada como perda ôhmica ou perda Joule.(MATTOS, 2016)

Existem diversos tipos de resistores comerciais, e cada um destes tem formas construtivas diferentes dependendo do tipo de aplicação desejada. Alguns exemplos de resistores comerciais mais comuns, são os resistores de filme, os de fio enrolado e os do tipo montados em superfície, do inglês *Surface Mounting Device* (SMD), comumente utilizado em PCI. Todos estes tipos de resistores são comumente encontrados em produtos eletrônicos em geral, em especial os do tipo SMD devido ao seu tamanho reduzido comparado a outros tipos de resistores. A figura 15 mostra os tipos de resistores mencionados.

Figura 15 – (a) Resistor de filme de carbono, (b) Resistor de fio, (c) Resistor SMD



Fonte: Adaptado de BOYLESTAD (2012)

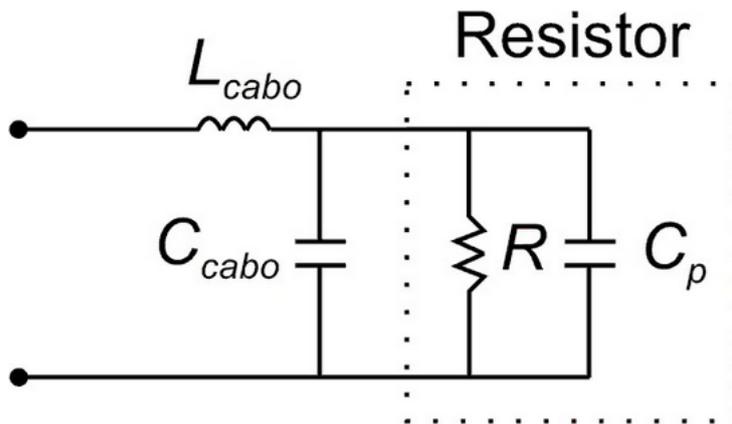
Segundo Mattos (2016) em um caso ideal o resistor é uma impedância com componente reativo igual a zero. A equação 2.14 apresenta a resistência de um resistor ideal. No entanto, quando percorridos por uma corrente em alta frequência é observado o aparecimento de uma indutância parasita. Com esta indutância parasita, quanto maior a variação da corrente no tempo, maior será a impedância do resistor, ou seja, a impedância é dependente da frequência. A equação 2.15 apresenta a impedância do resistor considerando a contribuição da indutância parasita. Todavia, quando temos resistores de alta impedância, temos a capacitância parasita, esta aparece entre os terminais do resistor. Ainda segundo MATTOS a capacitância parasita é menos significativa para valores de resistência menores e aumenta a medida que o valor da resistência aumenta. Em casos onde o frequência é muito elevada, esta capacitância pode gerar um curto-circuito entre os terminais do componente, fazendo com que este componente deixe de fazer parte do circuito. A equação 2.16 mostra a contribuição da indutância e da capacitância parasita na impedância do resistor, já a figura 16 é uma representação do modelo elétrico do resistor real também considerando indutância e capacitância parasita.

$$Z_R = R + j0 [\Omega] \quad (2.14)$$

$$Z_R(\omega) = R + jX_L [\Omega] \quad (2.15)$$

$$Z_R(\omega) = j\omega L_{cabo} + \left( \frac{1}{j\omega C_{cabo}} + \frac{1}{j\omega C_p} + \frac{1}{R} \right) [\Omega] \quad (2.16)$$

Figura 16 – Modelo elétrico de um componente resistivo real sem espiras.



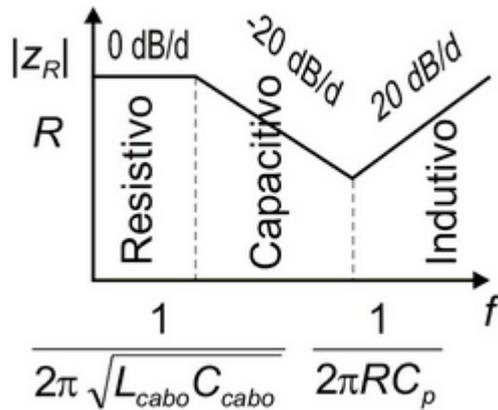
Fonte: MATTOS (2016)

Dependendo da forma construtiva dos resistores os efeitos da indutância ou capacitância parasita com o aumento da frequência são diferentes. Por exemplo, em resistores do tipo SMD segundo Mattos (2016) a indutância e a capacitância dos cabos de conexões são desprezíveis. Todavia considerando um resistor comum, com o aumento da frequência o efeito capacitivo mostra-se superior, no entanto, ao ultrapassar a frequência de ressonância do resistor, os efeitos indutivos são acentuados. Estes efeitos podem ser observados no gráfico da figura 17 que mostra variação do módulo da impedância de um componente resistivo com o aumento da frequência, e predominância dos efeitos capacitivos antes da frequência de ressonância, e os indutivos após esta frequência.

### 2.2.3.2 Capacitores

O capacitor assim como o resistor, é um componente de dois terminais bastante comum em dispositivos eletrônicos, e o seu uso é bastante amplo. No entanto suas características diferem do resistor. Segundo Boylestad (2012, p.334) "O capacitor exhibe suas verdadeiras características somente quando ocorre uma mudança na tensão ou na corrente do circuito". O capacitor ideal, é capaz de armazenar a energia que lhe é fornecida, e retorná-la para o sistema. A medida de um capacitor é efetuada através de sua capacitância que ainda segundo Boylestad (2012) pode se dizer que "A capacitância é uma medida da quantidade de carga que o capacitor pode armazenar [...], em outras palavras é a sua capacidade de armazenamento". Quanto mais

Figura 17 – Gráfico do módulo da impedância variando com a frequência de um componente resistivo.

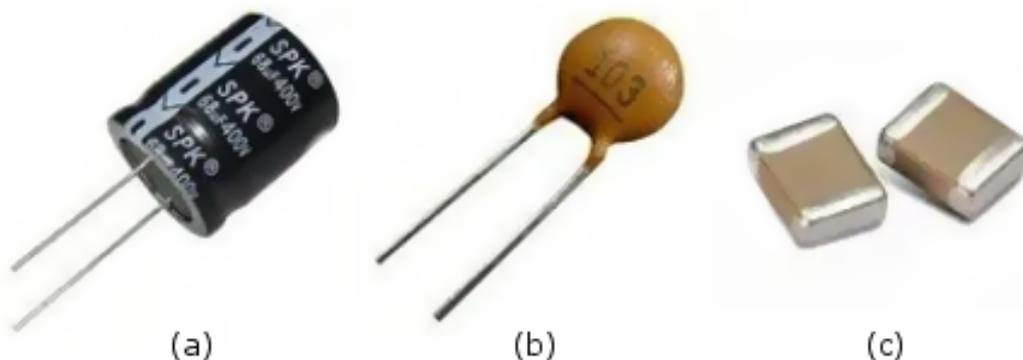


Fonte: MATTOS (2016)

alta essa capacitância, maior é a capacidade do capacitor de armazenar energia. Esta capacitância é medida em farad<sup>7</sup> (F). (BOYLESTAD, 2012)

Segundo Mattos (2016) "O capacitor tem diferentes características construtivas e diferentes materiais dielétricos usados na sua construção". Os tipos mais comuns de capacitores são os de cerâmica, eletrolítico e SMD. Cada um destes tipos de capacitores tem aplicabilidades diferentes. Por exemplo os capacitores de cerâmica são mais utilizados para circuitos de alta frequência e corrente contínua e armazenam pequenas quantidades de energia elétrica. Já os capacitores eletrolíticos são comumente utilizados em fontes de tensão onde além de tornar a fonte mais estável é capaz de filtrar ruídos que possam vir da rede elétrica. A figura 18 apresenta alguns exemplos de capacitores e o seu encapsulamento.

Figura 18 – (a) Capacitor eletrolítico, (b) Capacitor cerâmico, (c) Capacitor SMD.



Fonte: Adaptado de ELÉTRICA (S.d)

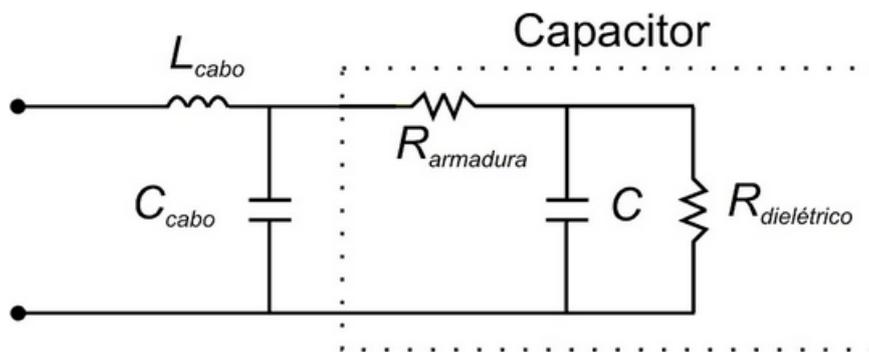
Assim como os resistores o capacitor também possui componentes parasitárias que

<sup>7</sup> A unidade farad (F) é dada em homenagem ao cientista Inglês Michael Faraday que fez grandes pesquisas nesta área e é responsável pela Lei de Faraday como visto em capítulos anteriores (BOYLESTAD, 2012)

são acentuadas com o aumento da frequência. Um dos parasitas é a indutância dos condutores e também de suas placas que o levam a ter uma frequência de ressonância. Esta indutância parasita, também chamada de indutância série equivalente, particularmente em frequências altas, pode levar a reatância capacitiva do capacitor a virar uma reatância indutiva. No entanto, as características construtivas do capacitor e também a sua dimensão influenciam fortemente na magnitude desta indutância. (DEVICES; ZUMBAHLEN, 2011)

Outro aspecto a ser considerado acerca dos capacitores além da impedância dos cabos, é a resistência do dielétrico e de armadura. A resistência do dielétrico normalmente em circunstâncias padrão, é desprezível, todavia com o aumento da frequência esta resistência torna-se relevante, pois segundo Mattos (2016) "A frequência elevada pode inverter as moléculas do dielétrico provocando perda de potência elétrica neste processo mecânico". A figura 19 representa o capacitor não ideal, levando em conta as componentes parasitárias. Já a expressão 2.17 mostra a impedância para o capacitor real com suas componentes parasitas apresentadas na figura. (MATTOS, 2016)

Figura 19 – Modelo elétrico de um capacitor não ideal.



Fonte: MATTOS (2016)

$$Z_C(\omega) = jX_{cabo} \left[ (R_{armadura} + \left( \frac{1}{R_{dieletrico}} + \frac{1}{jX_C} \right)^{-1})^{-1} + \frac{1}{jX_{cabo}} \right]^{-1} \quad (2.17)$$

Em relação ao EMC o capacitor é de bastante importância pois pode ser utilizado para o desvio de ruídos que chegam ao circuito, como ilustra (MATTOS, 2016, n.p).

Como a impedância do capacitor diminui com o aumento da frequência, as correntes de alta frequência são desviadas para o capacitor. Mesmo as correntes de baixa frequência são parcialmente desviadas para o capacitor, sendo que neste caso o desvio é mínimo. Para minimizar o ruído de alta frequência de um dispositivo coloca-se um capacitor em paralelo com este dispositivo.

Todavia da mesma forma que o capacitor pode auxiliar com o desvio de ruídos em um circuito, o seu uso de forma incorreta pode afetar os componentes a sua volta, pois segundo Mattos (2016) "Como um capacitor é um dreno de correntes de altas frequências, então é também

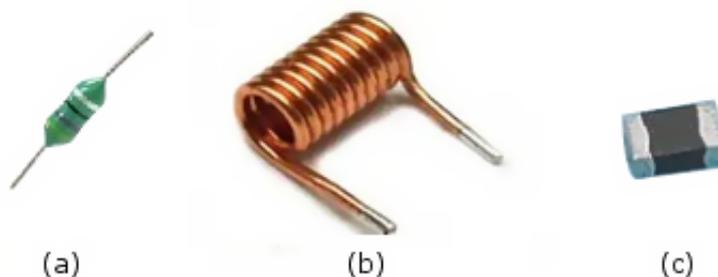
uma antena emissora eficaz. A corrente que passa pelo capacitor emite ondas eletromagnéticas, poluindo o ambiente". Sendo assim os componentes que ficam próximos ao capacitor em um circuito, podem ser influenciados por esta emissão de ondas eletromagnéticas.

### 2.2.3.3 Indutores

Os indutores são componentes eletrônicos que assim como resistores e capacitores são bastante comuns em circuitos eletrônicos em geral. Segundo Boylestad (2012, p.388) "Assim como o capacitor, o indutor exibe suas verdadeiras características apenas quando ocorre uma mudança na tensão ou na corrente do circuito". Idealmente, da mesma forma que os capacitores, os indutores são capazes de armazenar energia, no entanto diferentemente do capacitor que armazena esta energia em forma de campo elétrico, os indutores são capazes de armazenar esta energia em forma de campo magnético. A força deste campo magnético armazenado pelo indutor, é chamado de indutância, ou seja, quanto maior a indutância de um indutor, maior é a força do campo magnético. Esta indutância é mensurada em henries<sup>8</sup> (H). (BOYLESTAD, 2012)

Assim como os componentes eletrônicos vistos no subcapítulos anteriores, o indutor apresenta diversas formas construtivas diferentes dependendo de sua aplicação. A exemplo, temos o indutor de tipo encapsulado, que segundo Boylestad (2012) "é utilizado em uma grande variedade de circuitos como osciladores, filtros, filtros passa-baixa e outros". Já os indutores de núcleo de ar, são utilizados para aplicações de alta frequência, enquanto os SMD, devido ao seu tamanho reduzido, são comumente utilizados em circuitos eletrônicos que exigem componentes em miniatura para que sejam montados em PCI. A figura 20 apresenta os tipos de indutores mencionados.

Figura 20 – (a) Indutor encapsulado, (b) Indutor de núcleo de ar, (c) Indutor SMD.



Fonte: Adaptado de BOYLESTAD (2012)

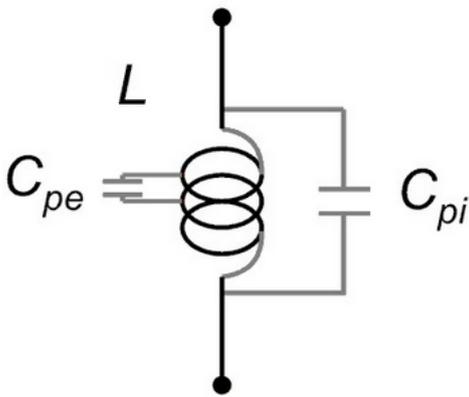
A impedância do indutor ideal é representada pela equação 2.18, onde L representa a indutância do indutor. No entanto, assim como os outros componentes vistos anteriormente, o indutor apresenta componentes parasitas quando submetido a uma alta frequência, o que

<sup>8</sup> Henries, é uma homenagem ao físico norte-americano Joseph Henry (1797-1878). Henry é conhecido por ter realizado extensas pesquisas e efetuar diversas contribuições científicas a área do eletromagnetismo (BOYLESTAD, 2012, p.394)

pode fazer com que o seu comportamento seja bastante diferente do seu comportamento ideal. Um dos componentes parasitas que aparecem no indutor, segundo Mattos (2016) "[...] são as capacitâncias parasitas que aparecem entre os terminais do indutor, e entre cada uma de suas espiras". Estas capacitâncias são apresentadas na figura 21. Além da capacitância parasita, temos a resistência parasita que é a resistência dos enrolamentos.

$$Z_L = 0 + j\omega L [\Omega] \quad (2.18)$$

Figura 21 – Capacitâncias parasitas em um indutor.



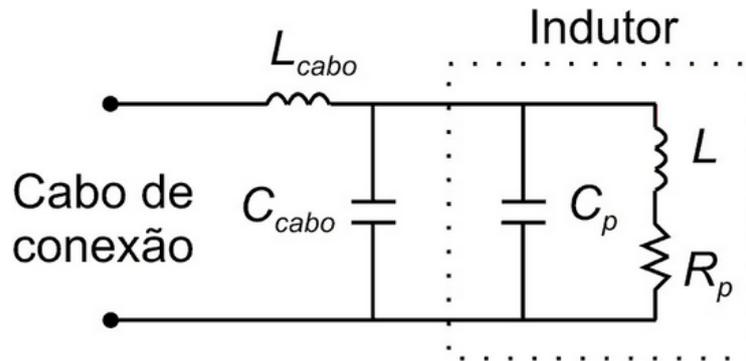
Fonte: Adaptado de MATTOS (2016)

Uma representação de um indutor mais próxima da realidade, é por meio de componentes ideais que representam os componentes parasitários. A figura 22 representa uma aproximação do indutor real. Na figura,  $C_p$  representa a capacitância parasita entre os terminais do indutor,  $C_{cabo}$ , é a capacitância das conexões do indutor,  $L_{cabo}$ , é a indutância das conexões do indutor, e  $R_p$  é a resistência dos enrolamentos do indutor e também da perda de energia por radiação. Vale ressaltar que nesta representação não consta a capacitância parasita que se desenvolve entre os enrolamentos. Outro ponto a se considerar é que essa representação não é aplicável a todos os tipos construtivos de indutores, por exemplo, nos indutores do tipo SMD não existem cabos de conexão, uma vez que estes são soldados diretamente na superfície do PCI. A expressão matemática da impedância do indutor contemplando os efeitos vistos na figura 22 pode ser vista na equação 2.19. (MATTOS, 2016)

$$Z_L(\omega) = j\omega L_{cabo} + \left( j\omega C_{cabo} + j\omega C_p + \frac{1}{R_p + j\omega L} \right)^{-1} \quad (2.19)$$

O indutor na prática é resistivo até uma certa frequência,  $\frac{R_p}{\omega L}$ , após esta frequência até a frequência de ressonância, seu comportamento é indutivo, após esta frequência de ressonância, o indutor passa a ser capacitivo. Segundo Mattos (2016) "este procedimento é explicado pelo fato de que o indutor bloqueia as altas frequências enquanto que a capacitância parasita curto-circuita as altas frequências".

Figura 22 – Modelo elétrico de um componente indutivo.



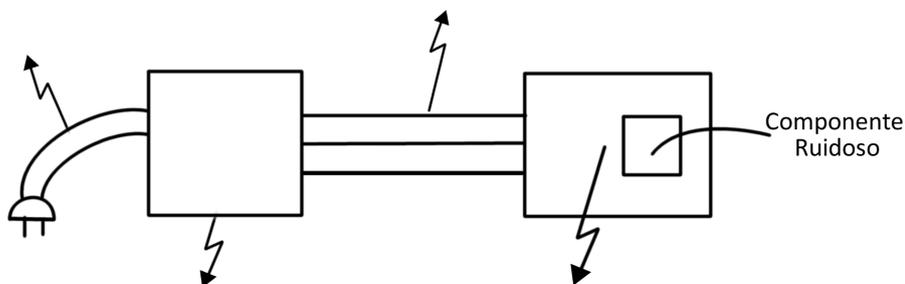
Fonte: MATTOS (2016)

Entendendo os componentes eletrônicos básicos que compõem um circuito eletrônico, seus comportamentos mediante a variação de frequência, e também como são gerados os ruídos externos que podem afetar estes componentes, temos o suficiente para entrarmos mais a fundo no estudo da emissão radiada.

#### 2.2.4 Emissão radiada

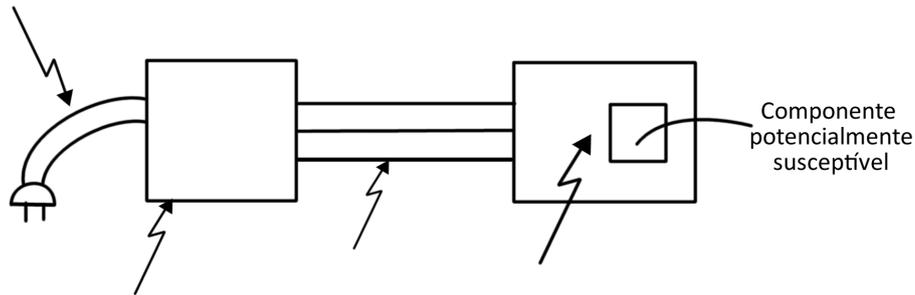
A emissão radiada, segundo Montrose (2000, p.1, tradução nossa) é definida como, "O componente de energia de RF que é transmitido através de um meio como um campo magnético. Geralmente sendo transmitido através do espaço livre". Esta situação pode ser observada na figura 23, onde um componente ruidoso em um produto eletrônico qualquer, é capaz de gerar EMI propagando-o para o espaço livre. Já a susceptibilidade irradiada, consiste do comportamento apresentado pelo receptor, ao receber o EMI irradiado através do espaço livre, ou seja se o receptor é susceptível ou não a esta interferência. Esta situação pode ser observada na figura 24, onde apresenta um produto eletrônico qualquer sendo atingido por uma energia eletromagnética vindo do espaço livre.

Figura 23 – Emissão radiada.



Fonte: Adaptado de PAUL (2006).

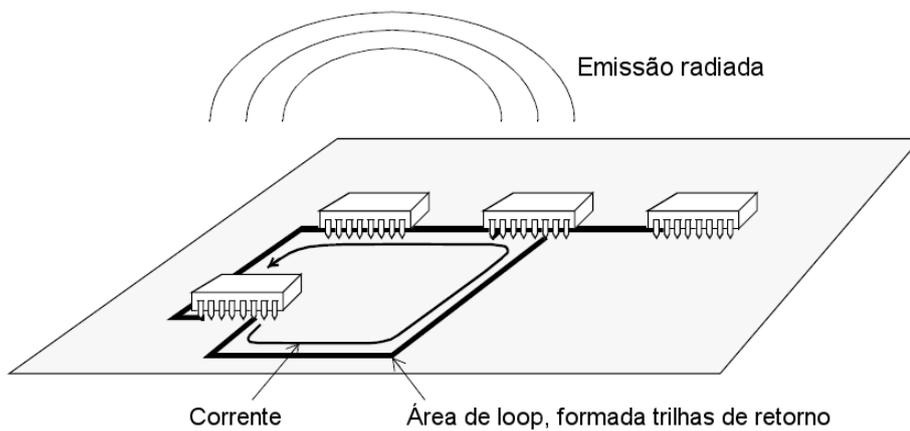
Figura 24 – Susceptibilidade irradiada.



Fonte: Adaptado de PAUL (2006).

Um exemplo prático da emissão radiada gerada por produtos eletrônicos de forma não intencional é apresentado na figura 25. A figura apresenta um tipo de radiação chamada de radiação de modo diferencial. A radiação de modo diferencial segundo Ott (1988, p.298, tradução nossa) "é o resultado de uma corrente circulando em loop formado pelos condutores do circuito. Esses loops agem como pequenas antenas radiando campos magnéticos". A formação desses loops de corrente na maioria das vezes se faz necessária para a operação dos circuitos eletrônicos, no entanto o desenvolvedor deve projetar esses loops de forma a minimizar a sua radiação. (OTT, 1988)

Figura 25 – Emissão radiada, gerada a partir de um loop de corrente.



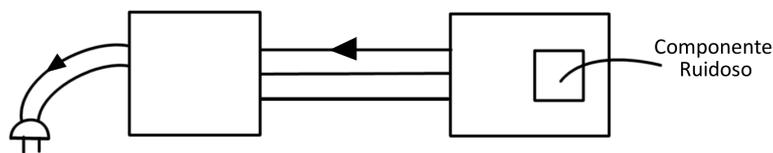
Fonte: Adaptado de WILLIAMS (2001).

### 2.2.5 Emissão conduzida

A emissão conduzida segundo Montrose (2000, p.1, tradução nossa) é definida como, "O componente de energia de RF que é transmitido através de um meio, como uma onda de propagação, geralmente através de um fio ou cabos de interconexão". Por exemplo, produtos que utilizam conexões externas como fontes de alimentação, cabos de rede, cabos de linha telefônica,

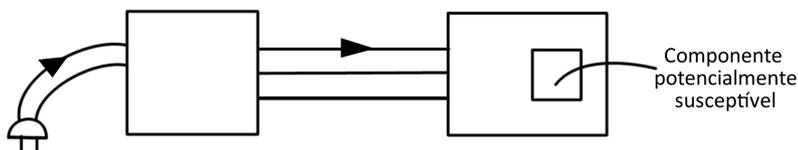
ou até mesmo interconexões internas como as de auto-falantes e cabos *flat*, são sujeitos a emissão conduzida. Esta situação pode ser observada na figura 26 onde um componente ruidoso gera EMI através de suas conexões internas e externas passando pelo seu subsistema chegando até a sua fonte de alimentação. Já a susceptibilidade conduzida trata-se do comportamento apresentado pelo receptor, ao receber o EMI conduzido através de suas conexões internas e externas, ou seja, se o receptor é susceptível ou não a interferência que é conduzida para dentro do sistema. A figura 27 apresenta um produto eletrônico qualquer, onde é conduzido uma energia eletromagnética através de sua fonte de alimentação para dentro do produto, causando o EMI.

Figura 26 – Emissão conduzida.



Fonte: Adaptado de PAUL (2006).

Figura 27 – Susceptibilidade conduzida.



Fonte: Adaptado de PAUL (2006).

Segundo Mattos (2016) "A emissão conduzida vem da rede para os equipamentos afetando o funcionamento destes". Esta emissão pode ter diversas origens. Algumas destas origens são os surtos atmosféricos, surtos de chaveamento, harmônicas, cintilação, campos eletromagnéticos externos e entre outros. Todos estas origem tem potencial para se acoplar na rede e gerar interferência sob um equipamento eletrônico. Além disso a emissão conduzida pode ser de duas formas como ilustra (MATTOS, 2016)

A primeira é a emissão conduzida de modo diferencial e a outra é a emissão conduzida de modo comum. A emissão de modo diferencial tem como trajeto o condutor de alimentação (fase ou positivo), passando pelo equipamento e de volta pelo retorno (neutro ou negativo). A emissão de modo comum flui através da fase e neutro (ou positivo e negativo) tendo como retorno o terra. Esta emissão de modo comum aparece em outros tipos de cablagem, como trilhas de circuito impresso, cabos telefônicos, condutores de medição, condutores de controle e etc. Em todos os casos o condutor de retorno é sempre o terra.

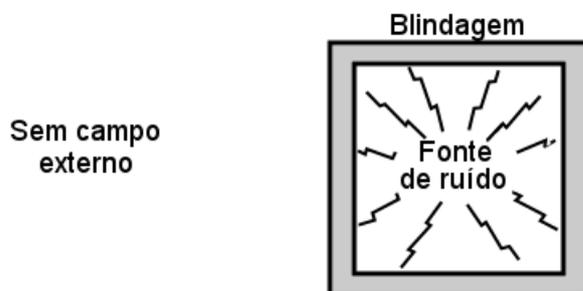
Um exemplo prático da emissão conduzida do dia-a-dia que podemos utilizar, é a interferência que costumava a aparecer em TVs quando era ligado um liquidificador ou algum equipamento dependente de motor na rede elétrica. Quando o liquidificador é ligado, o ruído gerado pelo arco nas escovas do seu motor passa pelo cabo de alimentação acoplando-se a rede elétrica da residência, sendo irradiado e captado pelas TVs gerando interferência. Esta situação ocorre pois a rede elétrica de uma residência é uma matriz de fios interconectados através das paredes, e esses fios podem ser comparados a uma antena. (PAUL, 2006, p.68 tradução nossa)

No entanto, para que os equipamentos não sejam susceptíveis a essas interferências, tanto por emissão radiada, quanto por emissão conduzida em alguns casos é utilizado a blindagem, que será apresentada no subcapítulo a seguir.

### 2.2.6 Blindagem

Uma blindagem segundo Ott (1988, p.159, tradução nossa) "é uma partição metálica colocada entre duas regiões do espaço. É utilizada para controlar a propagação de campos elétricos e magnéticos de uma das regiões para a outra". Ou seja, a blindagem pode ser utilizada tanto para conter uma fonte de ruído para que não irradie EMI para o ambiente, quanto para proteger um equipamento de um ruído incidente. Estes efeitos da blindagem podem ser observados na figura 28 onde é apresentado o seu uso para a contenção de ruído, e na figura 29 onde é mostrado a sua utilização para a proteção contra ruídos externos incidentes. Todavia, dependendo da aplicação do produto, estes nem sempre são aptos a utilização de blindagens. Por exemplo, produtos que tem a necessidade de irradiar ondas eletromagnéticas através de suas antenas, como roteadores Wi-fi, e telefones sem-fio, se forem totalmente blindados, ficam impossibilitados de exercerem a sua função, sem levar em conta o custo de uma blindagem desta extensão. Nestes casos, o desenvolvedor pode optar por blindar apenas partes, ou componentes eletrônicos susceptíveis a interferência. (OTT, 1988)

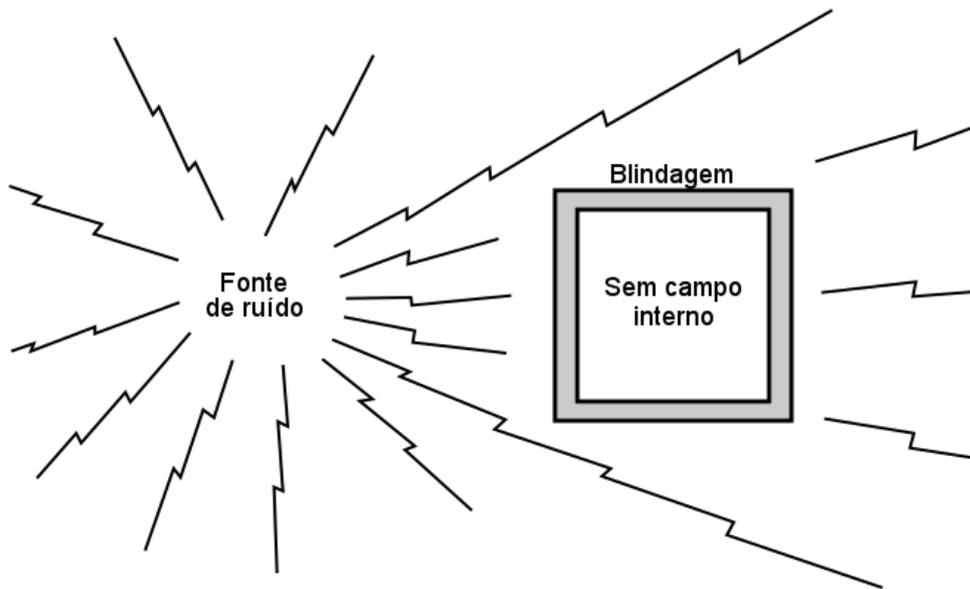
Figura 28 – Aplicação de blindagem para contenção de ruído.



Fonte: Adaptado de OTT (1988).

Segundo Learn EMC (2019, tradução nossa) "A blindagem funciona refletindo, absorvendo ou redirecionando campos elétricos e ou magnéticos". A sua efetividade pode variar dependendo da sua dimensão construtiva, a frequência incidente, a permeabilidade do

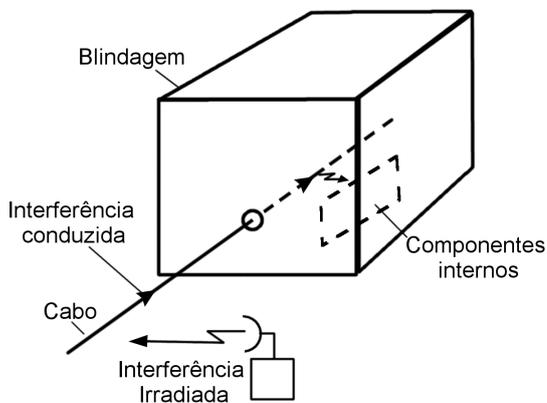
Figura 29 – Aplicação de blindagem para proteção contra ruídos externos.



Fonte: Adaptado de OTT (1988).

material utilizado, polarização da onda incidente e entre outros. Vale ressaltar que em muitas situações, caso um produto não seja projetado adequadamente a blindagem pode não ter o efeito desejado. Isto pode ocorrer quando há a entrada de energia eletromagnética através dos cabos do produto. Por exemplo, um produto blindado pode sofrer interferência através do ruído que é conduzido através do seu cabo de força ligado a rede elétrica. E o oposto também pode ocorrer, a blindagem pode ser ineficaz em conter a emissão de ruído, caso este seja conduzido para fora do produto através de um cabo e então irradiado pelo mesmo. A figura 30 ilustra esta situação. Alternativamente, para resolver ou atenuar estes ruídos conduzidos para dentro ou para fora de um produto através de cabos, podem ser utilizados os filtros, que serão apresentados a seguir.

Figura 30 – Interferência conduzida por cabos através de encapsulamento blindado.

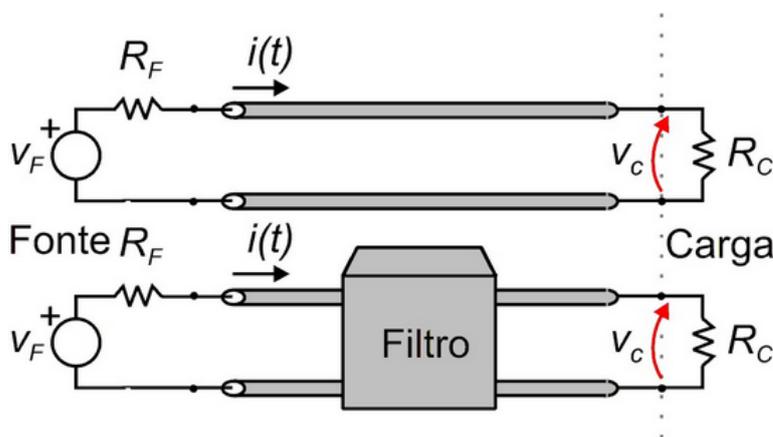


Fonte: Adaptado de PAUL (2006).

### 2.2.7 Filtros

Os ruídos que chegam conduzidos pelos cabos a um produto eletrônico podem ser barrados por filtros. De acordo com Mattos (2016) "Os filtros são equivalentes a blindagem contra ruídos vindos por ondas eletromagnéticas. No entanto, não existe um filtro que elimine completamente o ruído, e também não existe um filtro que deixe o sinal desejado passar completamente". Ou seja, ao utilizar um filtro para eliminar um ruído indesejado, em algumas situações uma parte do sinal desejado pode ser perdido. Ainda de acordo com Mattos (2016) "os filtros são caracterizados pelos coeficientes de perdas por inserção. Sempre que se insere um filtro entre uma fonte e uma carga, nem toda potência é entregue a carga, parte da potência da fonte fica na fonte". A figura 31 apresenta esta inserção do filtro entre a fonte a carga.

Figura 31 – Inserção de um filtro entre a fonte e a carga.



Fonte: MATTOS (2016).

As perdas que acontecem ao inserir um filtro é relação entre a potência de entrada no filtro  $P_f$  e a potência de saída do filtro que é  $P_c$ . Esta relação é definida pela equação 2.20.  $PI_{dB}$  é a perda por inserção<sup>9</sup> em decibel<sup>10</sup> e é adimensional. A equação indica a atenuação causada pela inserção do filtro no circuito. (MATTOS, 2016)

$$PI_{dB} = 10 \log \left( \frac{P_c}{P_f} \right) \quad (2.20)$$

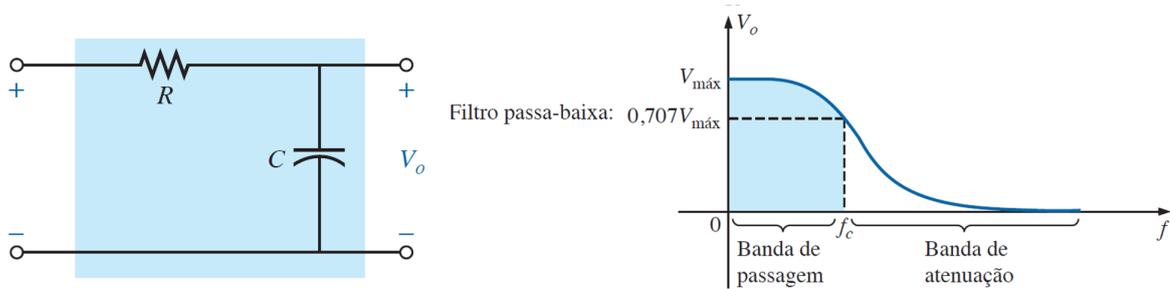
Cada tipo de filtro age de forma diferente sobre a frequência, por exemplo, o filtro passa baixa, comumente utilizado em produtos eletrônicos, permite idealmente apenas a passagem de baixas frequências. O filtro RC é um exemplo de filtro passa baixa. Segundo Boylestad (2012, p.754) "o filtro passa-baixa deve permitir a passagem de baixas frequências com uma pequena atenuação e atenuar fortemente todas as outras acima de um certo valor

<sup>9</sup> Segundo Electronics (S.d, tradução nossa) A perda de inserção é a perda do sinal quando este entra e sai através de um dado circuito ou componente

<sup>10</sup> Decibel, representado por dB é o resultado de uma relação logarítmica entre a potência que entra em um sistema e a potência que sai do mesmo. (CUNHA, 2016)

crítico." A figura 32 apresenta o filtro RC, e um gráfico apresentando a relação entre as tensões de entrada e saída com o aumento da frequência. Note que a partir da frequência de corte  $f_c$  as frequências começam a ser atenuadas.

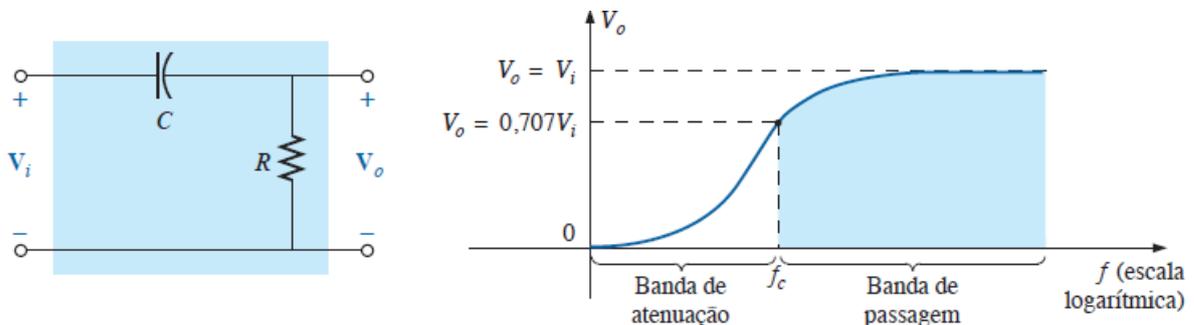
Figura 32 – Filtro passa baixa.



Fonte: BOYLESTAD (2012).

Outro tipo de filtro bastante utilizado, é o filtro passa alta, este pode ser obtido invertendo o resistor e o capacitor do filtro RC passa baixa. Este capacitor apresenta uma maior reatância capacitiva em frequências abaixo de sua frequência de corte  $f_c$ . A figura 33 apresenta o capacitor série, e o gráfico da relação entre as tensões de entrada e saída com o aumento da frequência. (BOYLESTAD, 2012)

Figura 33 – Filtro passa alta.

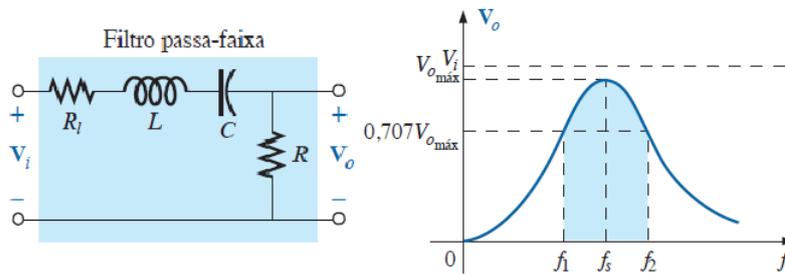


Fonte: BOYLESTAD (2012).

Quando o indutor é utilizado em conjunto com o capacitor, temos a formação de um circuito ressonante. Esse circuito forma um filtro passa faixa, ou passa banda. Enquanto o indutor filtra as frequências mais altas, o capacitor filtra as mais baixas. Desta forma apenas uma faixa seleta de frequência passa, enquanto as frequências abaixo e acima desta faixa são atenuadas. A figura 34 apresenta o indutor em série com o capacitor, bem como o gráfico para este tipo de filtro. (BOYLESTAD, 2012)

Existem outros tipos de filtros que podem ser utilizados para a minimização de ruído em produtos eletrônicos, além dos filtros apresentados. No entanto estes não fazem parte do escopo deste trabalho.

Figura 34 – Filtro passa faixa.



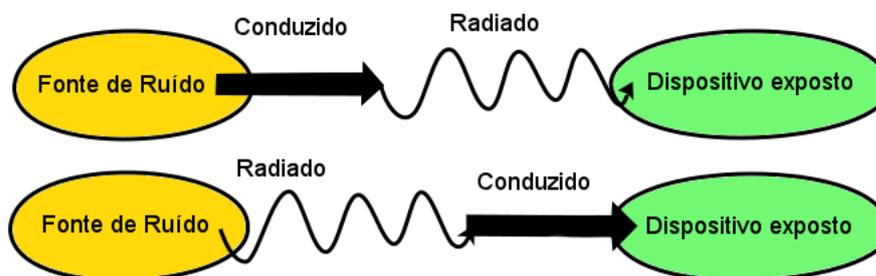
Fonte: BOYLESTAD (2012).

### 2.2.8 Caminho de acoplamento

Tendo em vista que toda corrente elétrica produz uma emissão de campo elétrico e campo magnético, qualquer condutor como fios e trilhas de placas de circuito impresso funcionam como antenas, captando e também emitindo ondas eletromagnéticas. Estas situações de emissão foram explanadas nos subcapítulos anteriores nas páginas 47 e 48 onde abordou-se a emissão radiada e emissão conduzida. No entanto, quando lidando com problemas relacionados ao EMI em produtos eletrônicos, é difícil dizer com certeza se um produto sofre apenas de emissão radiada ou emissão conduzida. Isto se dá devido ao caminho de acoplamento dos ruídos.

Por exemplo, um produto pode ter os seus cabos e conexões atingidos por emissão radiada, estes ruídos radiados acoplam-se aos cabos sendo conduzidos para o produto. Do ponto de vista do produto, o ruído chegou de forma conduzida, mas sua origem foi radiada. O inverso também pode ocorrer, quando um produto gera ruído conduzindo-o através de suas conexões, estes ruídos conduzidos quando passam por pelos condutores podem ser irradiados. A figura 35 apresenta um esquemático desses caminhos distintos de acoplamento. (MATTOS, 2016)

Figura 35 – Esquemático de modo de acoplamento.



Fonte: LECOQ (2017).

### 2.2.9 Crosstalk

Um importante aspecto acerca do desenvolvimento de produtos que estejam em conformidade com as regulamentações do EMC é o *crosstalk*. O *crosstalk* segundo Paul (2006,

p.559, tradução nossa) "refere-se ao acoplamento eletromagnético não intencional entre fios e trilhas da PCI que estão próximos um dos outros". O acoplamento eletromagnético principalmente entre trilhas da PCI são de grande preocupação durante o desenvolvimento de produtos eletrônicos pois este pode fazer com o produto interfira consigo mesmo. Ainda segundo Paul (2006, p.559, tradução nossa) "com a velocidade de *clock* e transferência de dados cada vez crescendo mais em computadores, o *crosstalk* entre trilhas em PCIs está se tornando um mecanismo significativo de interferência em sistemas digitais modernos". Este acoplamento dependendo de sua magnitude ainda pode afetar a emissão radiada e conduzida dos produtos, como ilustra (PAUL, 2006, p.559, tradução nossa)

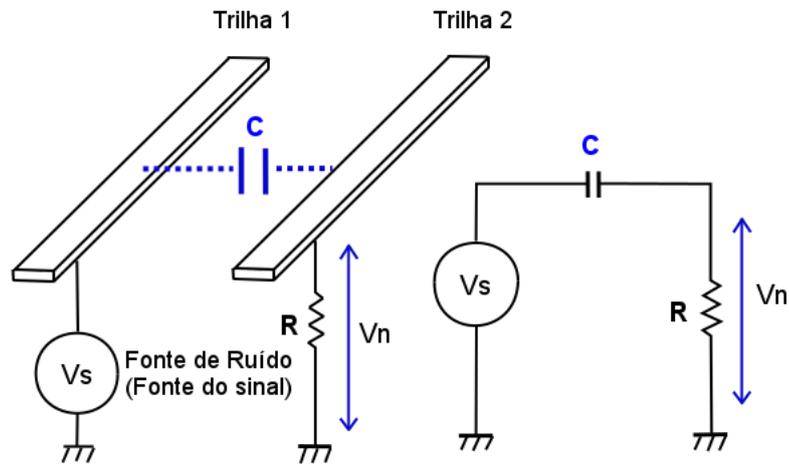
Suponha que um cabo flat interno a um produto seja colocado próximo a fios que se conectam a um cabo periférico que sai do produto. O *crosstalk* entre dois cabos pode induzir um sinal no cabo do periférico que pode radiar externamente ao produto, fazendo com que o produto esteja fora da norma em relação a emissão radiada. Se esse acoplamento ocorrer com o cabo de força do produto, o sinal acoplado pode fazer com que o produto falhe em atingir as normas regulatórias relacionadas a emissão conduzida.

O *crosstalk* pode aparecer em dois regimes diferentes de acoplamento, o capacitivo, devido a presença de uma capacitância parasita e o indutivo, devido a presença de uma indutância mútua. Apesar de que segundo Christopoulos (2007, p.208, tradução nossa) "embora uma linha divisória nítida não possa ser traçada entre esses diferentes regimes, cada um aparece dominante sob uma circunstância particular". O acoplamento capacitivo fica evidente quando existem dois circuitos de alta impedância próximos um do outro carregando sinais de baixa frequência. A figura 36 apresenta um esquemático do acoplamento capacitivo entre trilhas paralelas em uma PCI devido a presença da capacitância parasita  $C$ . O ruído ocorre na trilha 1, causando uma diferença de potencial  $V_n$  relativa ao terra na trilha 2. Já o acoplamento indutivo fica evidente quando existem dois circuitos com baixa impedância próximos um ao outro operando com sinais de baixa frequência. A figura 37 apresenta um esquemático do acoplamento indutivo devido a presença da indutância mútua entre as trilhas de uma PCI, onde  $M$  é a indutância mútua,  $R$  o componente resistivo,  $V_s$  a fonte de ruído e  $I_s$  a corrente da fonte de ruído. (WEB, 2018)

A melhor técnica para prevenir ou minimizar o *crosstalk* em projetos de PCI segundo Montrose (2000, p.134, tradução nossa) "é maximizar a separação entre as trilhas, ou deixar as trilhas próximas ao plano de referência. Estas técnicas de *layout* são preferíveis para o roteamento de trilhas com sinais longos e barramentos paralelos de alta velocidade". Outras boas praticas para evitar o *crosstalk* em PCI é agrupar os circuitos de acordo com a sua funcionalidade, mantendo a estrutura do barramento bem controlada, e também alocar os componentes longe de interconexões I/O<sup>11</sup> e outras áreas susceptíveis ao corrompimento de dados e acoplamento. Ainda outra técnica que pode ser utilizada são as trilhas de guarda ou *shunt*, que resumidamente são trilhas com potencial de 0V que são alocadas paralelamente a toda extensão de trilhas que podem causar problemas de *crosstalk*. (MONTROSE, 2000)

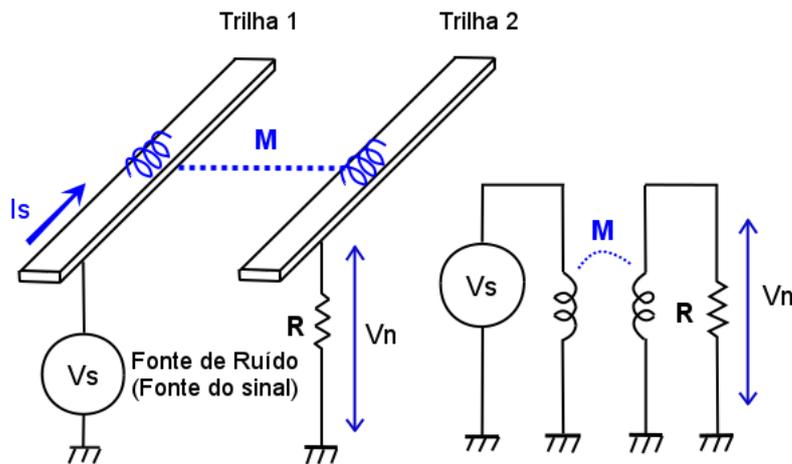
<sup>11</sup> Termo utilizado para definição de trilhas de "entrada e saída", ou seja que entrada e saída de dados (TECH-TERMS, S.d, tradução nossa)

Figura 36 – Esquemático de modo de acoplamento capacitivo.



Fonte: Adaptado de WEB (2018).

Figura 37 – Esquemático de modo de acoplamento indutivo.



Fonte: Adaptado de: WEB (2018).

Além das características expostas até o momento em relação ao EMC em produtos eletrônicos, outra característica que deve ser levado em consideração assim como o *crosstalk* e o comportamento dos componentes passivos mediante a variação da frequência, é o design do plano de terra em PCI, pois este é um aspecto de grande importância para determinar o funcionamento de forma adequada dos produtos eletrônicos mediante as normas relativas ao EMC .

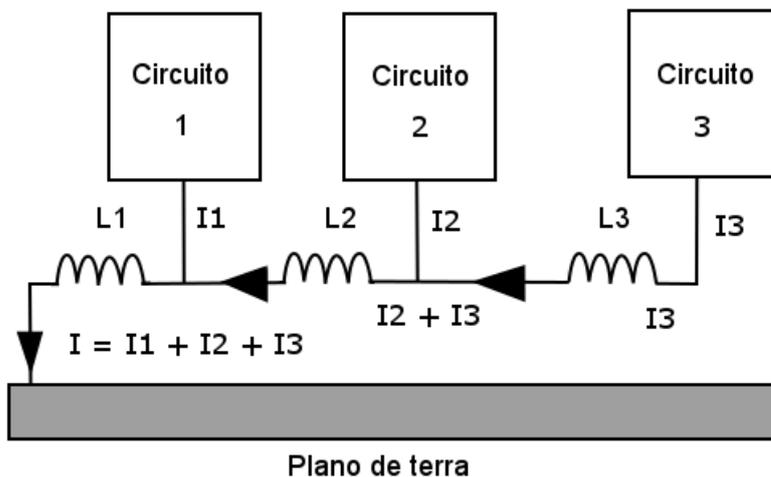
### 2.2.10 Design do plano de terra em PCI

De acordo com Lin (2014) "o plano de terra é um espaço de cobre na placa cobrindo uma grande área." O plano de terra deve conectar os terminais de terra de todos os componentes e conectores, para que a tensão de terra de toda a placa esteja no mesmo nível. Outro fato

importante sobre o plano de terra é que, segundo Sacco (2015) "um plano de Terra de baixa indutância é fundamental para minimizar problemas de EMC. Maximizar as áreas de terra de uma PCI reduz a indutância de terra em um sistema, que por sua vez reduz as emissões eletromagnéticas e o *Crosstalk*". O plano de terra normalmente é referenciado do inglês como *Ground* (GND), no entanto segundo Montrose (2000) "um adjetivo pode preceder a palavra *ground*" para distinguir o tipo de GND referenciado para uma aplicação específica". Alguns destes adjetivos para o GND são o terra analógico do inglês *Analog Ground* (AGND) e o terra digital do inglês *Digital Ground* (DGND).

A forma como os componentes são conectados ao plano de terra podem influenciar no desempenho da PCI em relação ao EMC. Uma dessas formas de conexão é a *single-point*, ou ponto único. A conexão de ponto único segundo Montrose (2000) "é melhor quando a velocidade dos componentes, circuitos, interconexões e similares estão na faixa de 1 MHz ou menos". Isto se deve pois em frequências mais altas a indutância das conexões irá aumentar a impedância da PCI. Ainda de acordo com Montrose (2000) "não somente as trilhas e os condutores de terra terão uma maior impedância, como também podem agir como antenas e radiar energia RF". Para frequências acima de 1 MHz outras abordagens são utilizadas, no entanto, existem exceções quando o engenheiro tem pleno conhecimento do projeto do produto e utiliza técnicas avançadas de aterramento que estão fora do escopo deste trabalho. A figura 38 apresenta um esquemático da conexão de ponto único no plano de terra. (MONTROSE, 2000)

Figura 38 – Esquemático de conexão de ponto único no plano de terra.

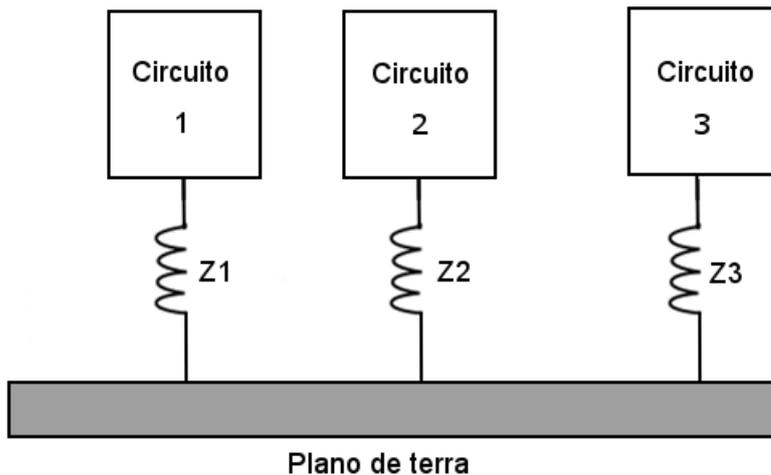


Fonte: Adaptado de MONTROSE (2000).

Outra forma de conexão dos componentes no plano de terra comumente utilizado é a conexão multiponto. Segundo Montrose (2000) "o método de aterramento multiponto minimiza a impedância de terra presente no sistema de distribuição de alimentação da PCI". Esta baixa impedância é causada pela baixa indutância do plano de terra, em comparação com as trilhas do PCI. Ainda segundo Montrose (2000) "em circuitos de frequências muito altas, os terminais de terra dos componentes devem ser mantidos o mais curto possível, para diminuir a indutância

do terminal. A indutância dos terminais permite que uma diferença de tensão se desenvolva através da trilha de conexão". Além da indutância nas trilhas, principalmente para circuitos de alta frequência, conexões longas tendem a agir como antenas irradiando energia RF o que na maioria dos casos pode prejudicar o atendimento das normas relativas ao EMC do produto. A figura 39 apresenta um esquemático da conexão multiponto no plano de terra. (MONTROSE, 2000)

Figura 39 – Esquemático de conexão multiponto no plano de terra.



Fonte: Adaptado de MONTROSE (2000).

Além dos métodos de conexão dos componentes ao plano de terra da PCI outro aspecto importante a respeito do *design* do terra, é o particionamento das áreas do circuito quanto a sua função e características funcionais.

#### 2.2.10.1 Particionamento dos circuitos na PCI

Em qualquer *layout* de PCI o particionamento da placa por funcionalidade é de grande importância para o bom desempenho funcional do produto e também para a supressão eletromagnética. Segundo Montrose (2000, p.57, tradução nossa) "agrupar as áreas funcionais do circuito minimiza o comprimento das trilhas de sinal, o roteamento e a criação de antenas. O posicionamento adequado dos componentes também torna o roteamento das trilhas mais fácil, portanto aprimorando a integridade dos sinais". Um exemplo de particionamento da PCI com base no particionamento por funcionalidade do circuito é ilustrado a seguir por (MONTROSE, 2000, p.58, tradução nossa)

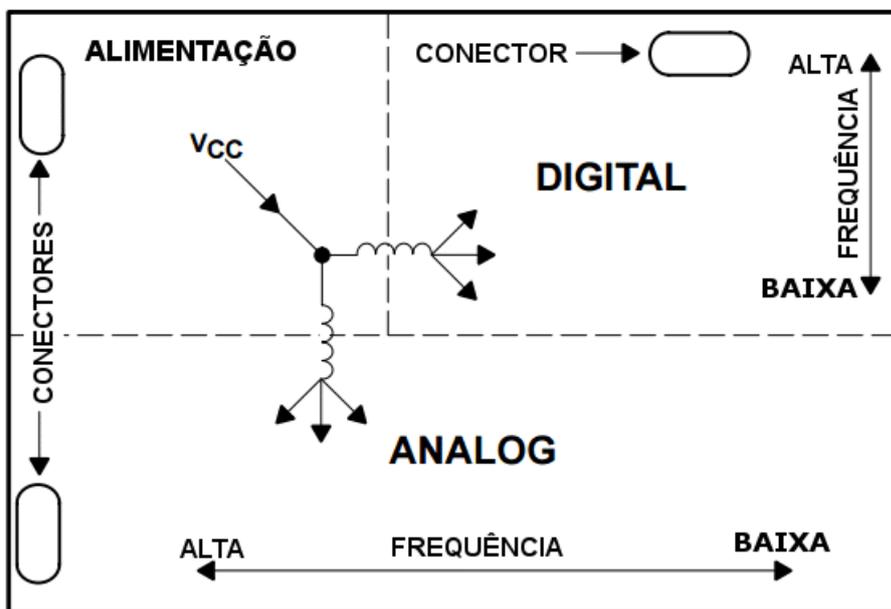
Por exemplo, um computador pessoal típico contém o seguinte: CPU, memória, ASICs<sup>12</sup>, interface de barramento, controladores de sistema, barramento

<sup>12</sup> Circuito integrado de aplicação específica, do inglês, *Application Specific Integrated Circuit* (ASIC)

SCSI<sup>13</sup>, USB<sup>14</sup>, interfaces periféricas de vídeo, áudio e outros componentes. Associado a cada uma destas áreas existem várias larguras de banda de energia RF

Para prevenir que uma parte funcional do circuito interfira na outra, o particionamento se faz necessário como apresentado na figura 40. O particionamento da PCI pode reduzir os loops de corrente, otimizando qualidade dos sinais. Outro benefício do particionamento é que este pode prevenir a interferência de um circuito em outro através de ruídos que poderiam se propagar pelo plano de terra, ou seja, os campos magnéticos associados a cada uma das seções tendem a ficar confinados nestes áreas onde são necessários. (MONTROSE, 2000)

Figura 40 – Particionamento da PCI por funcionalidade.



Fonte: Adaptado de SACCO (2015).

Com o conhecimento do funcionamento da PCI, e de algumas características de desenvolvimento da mesma para uma melhor performance quanto ao EMC, se tem o necessário para partir ao outro objeto de estudo imprescindível ao experimento, que são os indutores.

### 2.3 INDUTORES EM PROJETOS DE PCI PARA EMC

Em produtos eletrônicos em geral, são utilizados diversos componentes eletrônicos acoplados a PCI, dentre os quais pode-se citar o indutor. Como abordado no capítulo anterior, os indutores são capazes de armazenar energia em forma de campo magnético. A intensidade do campo magnético do indutor, está diretamente associado a indutância do mesmo. A seguir será abordado as características dos indutores que proporcionam o seu funcionamento.

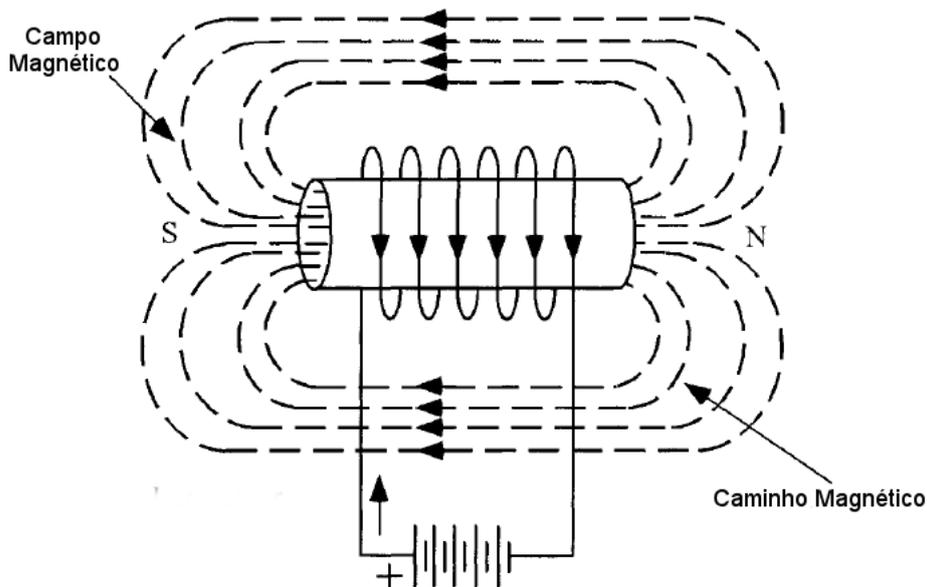
<sup>13</sup> Do inglês, *Small Computer System Interface* (SCSI) é uma tecnologia criada para permitir a comunicação entre dispositivos computacionais. É normalmente utilizado na conexão de discos rígidos. (ALECRIM, 2012)

<sup>14</sup> Do inglês *Universal Serial Bus* (USB), é uma tecnologia que permite a conexão de aparelhos periféricos em um computador. (PEREIRA, 2008)

### 2.3.1 Funcionamento dos indutores

O funcionamento dos indutores em sua essência é regido pela formação de campos magnético. O princípio da formação destes campos foi abordado na página 24 onde é discutido a Lei de Ampère. Com a Lei de Ampère tem-se o fundamento para o entendimento do funcionamento dos indutores. Com base nisto, sabe-se que uma corrente atravessando um fio é capaz de gerar um campo magnético em sua extensão. Todavia, caso este fio percorrido por uma corrente seja enrolado formando uma espira, de acordo com Boylestad (2012) "as linhas de campo resultantes terão a mesma direção e o mesmo sentido no meio das espiras". Tendo isto em vista, caso o fio seja arranjado em uma sucessão de espiras, é possível intensificar o campo magnético. Essa sucessão de espiras, também chamada de bobina, é utilizada nos indutores para que seja possível a geração de um campo magnético como apresenta a figura 41.

Figura 41 – Campo magnético em um indutor.



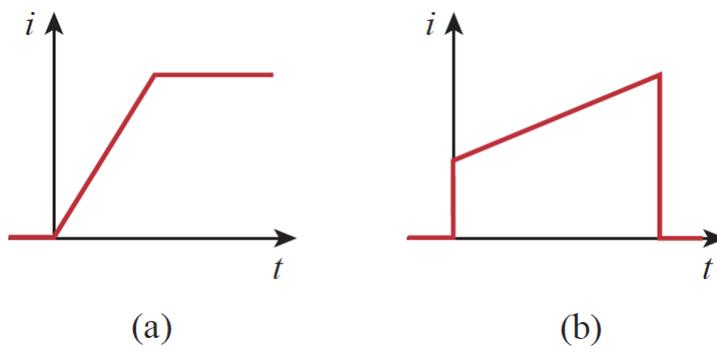
Fonte: Adaptado de MCLYMAN (2004).

A Indutância de um indutor segundo Boylestad (2012, p.393) "determina a força do campo magnético em torno da bobina por causa de uma corrente aplicada". Quanto mais alto o valor da indutância, mais forte é o campo magnético. No entanto a maioria dos indutores comerciais são encontrados na faixa de milihenry (mH) ou microhenry ( $\mu\text{H}$ ). Ainda segundo Boylestad (2012, p.393) "1 henry é o nível de indutância que estabelecerá uma tensão de 1 volt através da bobina devido a variação na corrente de 1 A/s através da bobina". Tendo isto em vista, através da equação 2.21 onde L representa a indutância e V a tensão, é possível observar que a variação da tensão através do indutor é diretamente proporcional a variação temporal da corrente.

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2.21)$$

Uma característica importante dos indutores que pode-se deduzir a partir da equação 2.21, é que, segundo Sadiku (2004, p.228, tradução nossa) "a tensão através do indutor é 0 volts quando a corrente é constante, portanto, um indutor age como um curto-circuito para Corrente Contínua (CC)". Outra característica importante que pode ser deduzida da equação 2.21 é que, ainda segundo Sadiku (2004, p.228, tradução nossa) "a corrente através de um indutor não pode mudar instantaneamente". A figura 42 (a) apresenta a forma real de mudança da corrente no indutor, já a figura 42 (b) apresenta a mudança abrupta da corrente, o que não é fisicamente possível. (SADIKU, 2004)

Figura 42 – Corrente através do indutor.(a) Forma real (b) Forma com mudança abrupta.



Fonte: SADIKU (2004).

O indutor ideal, não dissipa a energia que recebe. Segundo Boylestad (2012) "no caso do indutor ideal, essa energia é armazenada em um campo magnético". A figura 43 apresenta um gráfico com as curvas de tensão, corrente e potência de um indutor durante o período em que o campo magnético está aumentando. Neste gráfico a área sombreada representa a energia armazenada. A equação 2.22 mostra a energia  $W$  armazenada pelo indutor, esta energia é medida em *Joules* (J), e é dependente da indutância do indutor e a corrente. (BOYLESTAD, 2012)

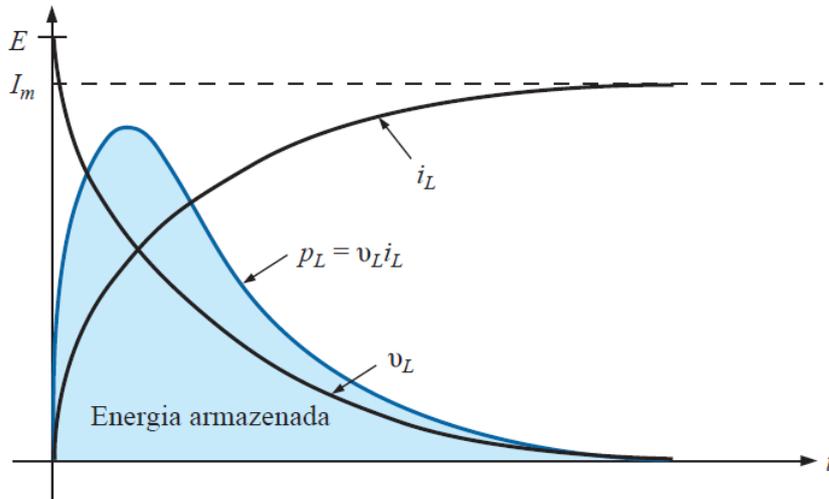
$$W = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2.22)$$

Em situações práticas, considerando o indutor de forma não ideal, este, apresenta outras características intrínsecas, como a resistência e a capacitância parasita que foram discutidas na página 45. No entanto, estas e outras características do indutor, como a sua indutância e corrente suportada, devem-se as suas características construtivas como será abordado a seguir.

### 2.3.1.1 Construção do indutor

A indutância em indutores comuns, é dependente de alguns aspectos de sua construção, como a área de sua seção transversal, o seu comprimento a permeabilidade do seu núcleo e o seu número de espiras. Todos estes aspectos contribuem para a intensificação ou a diminuição

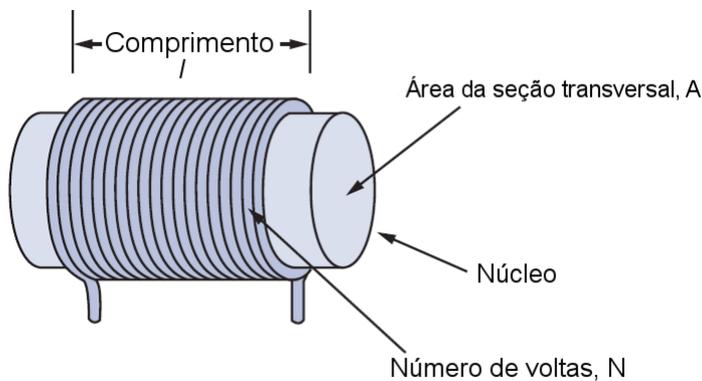
Figura 43 – Curva da potência para um elemento indutivo na fase transitória



Fonte: BOYLESTAD (2012)).

do campo magnético gerado pelo indutor quando percorrido por uma corrente. Estes aspectos podem ser observados na figura 44. (BOYLESTAD, 2012)

Figura 44 – Aspectos construtivos do indutor.



Fonte: Adaptado de SADIKU (2004).

O material utilizado no núcleo do indutor é de extrema importância, pois este pode aumentar efetivamente a intensidade da indução magnética devido a sua permeabilidade magnética  $\mu$ . Alguns dos materiais utilizados são o ferro, aço ou cobalto. Segundo Boylestad (2012) "aumentando a intensidade do campo magnético com a introdução de um núcleo, criamos um eletroímã, que além de apresentar todas as propriedades de um ímã permanente, produz um campo magnético cujas propriedades podem ser modificadas alterando-se um de seus parâmetros". Sendo que estes parâmetros são a sua área da seção transversal, número de espiras e entre outros. Vale ressaltar que diferentemente de um ímã permanente o eletroímã necessita que uma corrente circule pelo mesmo para que se crie o campo magnético. (BOYLESTAD, 2012)

Com a equação 2.23 é possível observar que a indutância depende da permeabilidade

do material do núcleo  $\mu$ , bem como o número de espiras  $N$ , a área da seção transversal  $A$  e também do comprimento  $l$ . No entanto, apesar de todos estes aspectos influenciarem na indutância, a maior influência vem das espiras que aparecem elevadas ao quadrado na equação. Todavia, deve-se ter em mente que uma quantidade maior de espiras necessita de um espaço maior, e caso seja produzido com um fio muito fino para permitir um número maior de espiras, haverá uma limitação de corrente suportada pelo indutor. Boylestad (2012)

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (2.23)$$

Apesar da equação 2.23 apresentar um valor bastante aproximado da indutância, para alguns indutores com forma construtiva diferentes do apresentado, a equação é mais complexa. Todavia, para todos os casos existe a mesma dependência das constantes apresentadas.

### 2.3.2 Aplicação dos indutores

Os indutores são utilizados em diversos equipamentos eletrônicos. Devido as suas características de funcionamento, é amplamente utilizado em circuitos que necessitam de filtros como foi visto na página 52. No entanto, suas aplicações vão além dos filtros de sinais como ilustra (BOYLESTAD, 2012, p.414)

O indutor desempenha uma importante função, tanto no circuito de acionamento da lâmpada de flash de uma câmera quanto no filtro de linha. No caso da câmera, ele representa um componente importante responsável pelo *spike* de tensão de alto valor que acontece entre os terminais da bobina de disparo, cujo valor é aumentado no secundário do autotransformador para gerar os 4.000 V necessários para disparar a lâmpada do flash [...].

Além destas aplicações, os indutores também são bastante utilizados em conjunto com capacitores para formar circuitos ressonantes. Estes circuitos segundo Braga (s.da) "são encontrados em praticamente todos os equipamentos de telecomunicações. Eles são responsáveis pela frequência do sinal que deve ser transmitido ou recebido, pela separação dos sinais em filtros, pela rejeição de interferências e ruídos e muito mais". Outra aplicação dos indutores está nos dimmers para residências como ilustra (BOYLESTAD, 2012, p.414)

O dimmer residencial típico usa um indutor para proteger os outros componentes e a carga aplicada de correntes "rápidas", correntes que aumentam com velocidades muito altas e, frequentemente, com valores excessivamente altos. Essa característica é particularmente importante para os dimmers, já que eles são bastante utilizados para controlar a intensidade luminosa de uma lâmpada incandescente. Quando o dimmer é ligado, como a resistência da lâmpada incandescente é tipicamente muito baixa, as correntes relativamente altas podem fluir por curtos períodos de tempo até que o filamento da lâmpada se aqueça.[...]

Existem diversos tipos de indutores, sendo que cada um destes é mais apropriado para um tipo de aplicação. A seguir será abordado alguns tipos comuns de indutores existentes no mercado, e suas principais características. Conhecer cada um destes tipos de indutores, é de

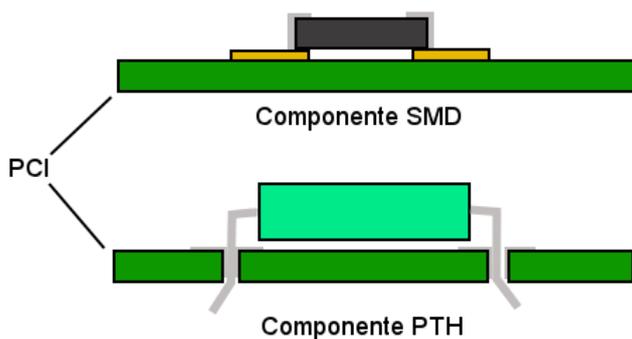
grande valia para o desenvolvimento de produtos eletrônicos, pois em muitas situações a escolha de um componente de forma correta pode trazer grandes benefícios acerca do EMC.

### 2.3.3 Tipos de indutores

#### 2.3.3.1 SMD

Indutores do tipo SMD são bastante comuns de se encontrar em dispositivos eletrônicos em geral, como computadores, celulares e etc. Isto se deve, principalmente ao seu tamanho reduzido, o que permite a fabricação de circuitos relativamente grandes em espaços reduzidos. Outro fator importante, é a sua soldagem diretamente na superfície da PCI, diferente de alguns outros tipos de indutores que necessitam que seus terminais atravessem a placa, comumente chamados de indutores do tipo PTH, do inglês *Pin Through Hole* (PTH). A figura 45, apresenta as diferenças entre componentes SMD e PTH em PCI.

Figura 45 – Diferença de componentes SMD e PTH



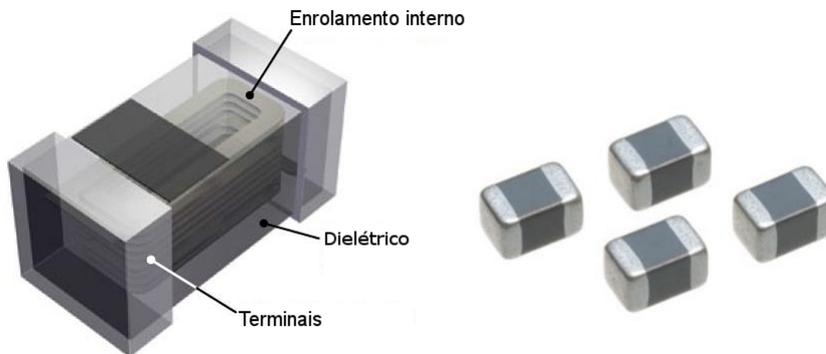
Fonte: Adaptado de BRAGA (s.db).

Existem diferentes tipos de indutores do tipo SMD dependendo do tipo de aplicação. Alguns tipos comuns de indutores SMD são os de múltiplas camadas e os de filme. Segundo TECHNOLOGY (s.d, tradução nossa) "os indutores de múltiplas camadas, possuem múltiplas camadas de trilhas condutoras em cima uma das outras, estas trilhas formam o enrolamento do indutor". Este tipo de indutor tem uma alta capacitância parasita o que reduz o seu fator de qualidade, o que faz que tenha perdas consideráveis em altas frequências. A figura 46 apresenta o formato do indutor SMD de múltiplas camadas, e a sua construção.

Os indutores de filme segundo TECHNOLOGY (s.d, tradução nossa) "são desenvolvidos sob um fino substrato de ferrita ou material magnético. Um traço condutor de cobre em forma de espiral é colocado sobre o substrato". Este tipo de indutor apresenta uma alta precisão e estabilidade. A figura 47 apresenta o indutor SMD de filme, e a sua construção.

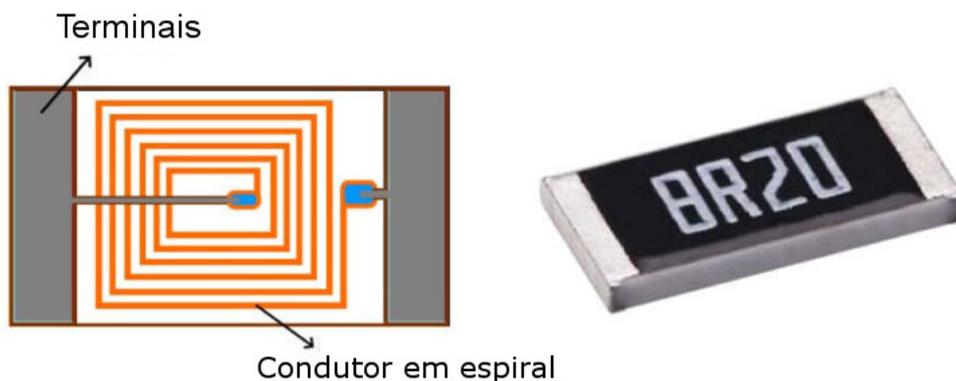
A seguir será discutido os indutores do tipo PTH, que assim como os indutores SMD são bastante comuns em produtos eletrônicos.

Figura 46 – Indutor SMD de múltiplas camadas.



Fonte: Adaptado de TDK (s.d).

Figura 47 – Indutor SMD de filme



Fonte: Adaptado de TECHNOLOGY (s.d).

### 2.3.3.2 PTH

Assim como os indutores SMD, os indutores do tipo PTH também dispõe de variados modelos dependendo de sua aplicação. A maior diferença entre os tipos de indutores PTH está no núcleo que é utilizado, seu enrolamento e seu encapsulamento. Destes indutores os mais comuns são os de núcleo de ar, os encapsulados, e os toroidais. (BOYLESTAD, 2012)

Os indutores de núcleo de ar não utilizam um material em seu núcleo. Este tipo de indutor oferece uma menor indutância, e tem bobinas maiores para que seja possível produzir uma maior densidade de fluxo magnético. São comumente utilizados em aplicações de alta frequência, televisores, transmissores e receptores de rádio. Seus valores típicos vão de 2,5 nH a 1 $\mu$ H. A figura 48 apresenta alguns exemplos de indutores de núcleo de ar.

Já os indutores encapsulados, podem possuir núcleos de ferrite, resina, plástico e entre outros. Os valores típicos deste tipo de indutor vão de 0,1 $\mu$ H a 100 mH. Segundo Boylestad (2012) "é usado em uma grande variedade de circuitos, como osciladores, filtros, filtros passa

Figura 48 – Indutor de núcleo de ar.



Fonte: MAGMATTEC (s.d).

baixa e entre outros". A figura 49 apresenta alguns tipos de indutores no formato encapsulado.

Figura 49 – Indutores encapsulados.

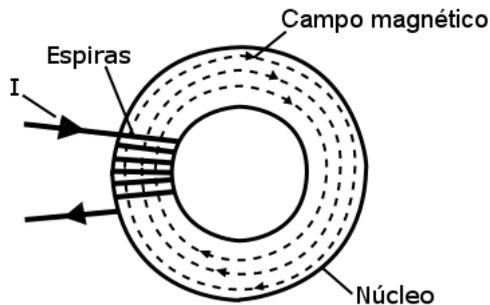


Fonte: BOYLESTAD (2012).

Outro tipo de indutor PTH é o do tipo toroidal, este difere-se de outros indutores principalmente pelo seu formato em toroide. O toroide segundo Braga (s.db) "apresenta uma elevada eficiência magnética pelo fato de não ter uma abertura de ar por onde as linhas do campo possam escapar ocorrendo perdas". A figura 50 apresenta o desenvolvimento do campo magnético em um toroide. Comercialmente, os seus valores típicos vão de  $10 \mu\text{H}$  a  $30\text{mH}$ . Assim como outros indutores o material do seu núcleo também influencia no valor de sua indutância. Ainda segundo Braga (s.db) "na prática encontramos indutores e transformadores com núcleos toroidais que vão desde pequenos indutores de alguns milímetros de diâmetros [...] até transformadores pesados de vários quilogramas usados em fontes de alimentação de alta potência". A figura 51 mostra alguns tipos de toroides usualmente encontrados em produtos eletrônicos. (BOYLESTAD, 2012)

Além dos indutores PTH apresentados, existem outros tipos de indutores de construção semelhantes como o Choque de modo comum. Este componente tem papel importante para a eliminação de ruídos, o que o torna bastante útil no desenvolvimento de produtos eletrônicos em conformidade com as normas relacionadas ao EMC.

Figura 50 – Desenvolvimento do campo magnético em um toroide.



Fonte: Adaptado de BRAGA (s.db).

Figura 51 – Exemplo de toroides comercializados.

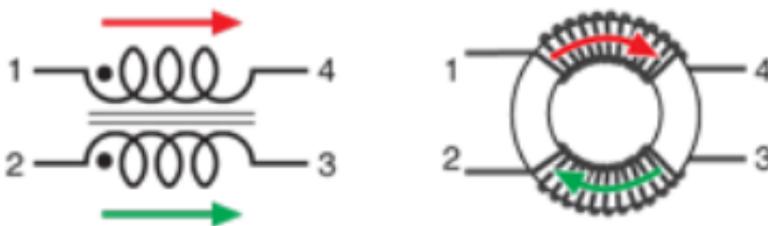


Fonte: Adaptado de BOYLESTAD (2012).

### 2.3.3.3 Choke de modo comum

O choke de modo comum é um indutor de formato toroidal comumente de núcleo de ferrite que tem segundo (ANJOS, 2019) "dois ou mais enrolamentos dispostos de tal forma que a corrente de ruído de modo comum cria um campo magnético que se opõe a qualquer aumento na corrente de modo comum". Ou seja, o choke de modo comum age como um filtro, suprimindo os ruídos de modo comum que podem se desenvolver em um circuito. A figura 52 apresenta o funcionamento do choque de modo comum. No choke, as correntes de modo comum fluem no mesmo sentido, acarretando em um maior fluxo magnético no núcleo.

Figura 52 – Corrente em um choke de modo comum.



Fonte: Adaptado de ANJOS (2019).

Existem duas classes de choke, o choke de potência e o choke de RF. Segundo

Burris (2019) "os chokes de frequência de alimentação e áudio, tipicamente tem o núcleo de ferro para aumentar a indutância e tornar-los mais efetivos". Outros tipos de choques, além de diferentes núcleos, utilizam diferentes formas de enrolamentos a fim de diminuir a capacitância parasita que aparecem entre os enrolamentos de forma que tenham um melhor desempenho em frequências mais altas. A figura 53 apresenta alguns chokess encontrados no mercado.

Figura 53 – Chokess de modo comum.



Fonte: DIGI-KEY (2016).

#### 2.3.3.4 Transformadores

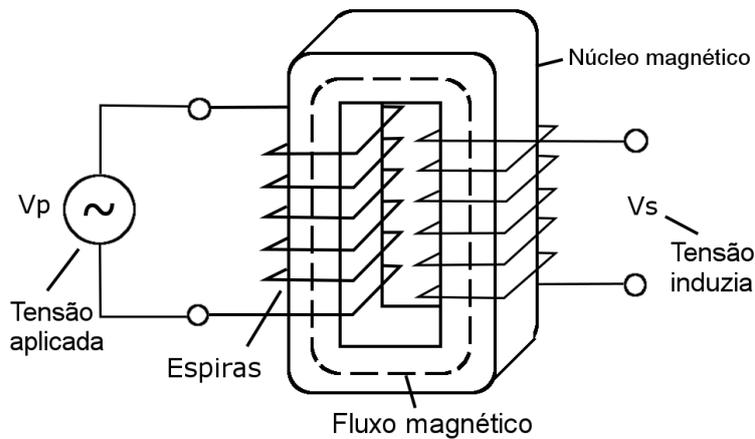
O transformador é um indutor constituído de dois enrolamentos dispostos de forma que o fluxo magnético variável produzido por um destes enrolamentos seja induzido no outro, provocando uma diferença de potencial no secundário. A figura 54 ilustra o exposto. O enrolamento que recebe a tensão é normalmente chamado de enrolamento primário, enquanto o enrolamento que é conectado a carga, é chamado de secundário. O transformador tem a capacidade de prover no secundário tensão e corrente maiores ou menores do que o aplicado no primário. Esta capacidade depende da relação da relação de voltas dos enrolamentos. A equação 2.24 apresenta a relação entre a corrente e o número de voltas no primário e secundário. (BOYLESTAD, 2012)

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad (2.24)$$

Segundo Boylestad (2012) "Este dispositivo desempenha um papel fundamental nos sistemas de distribuição de energia elétrica e também pode ser utilizado em muitos circuitos eletrônicos e instrumentos de medida". Com base nisto é possível perceber que a utilização deste componente é bastante ampla, sendo utilizado tanto na área elétrica quanto eletrônica.

Até agora, todos os indutores apresentados foram em forma de componentes discretos, que são utilizados nas mais diversas aplicações. No entanto, além destes componentes, uma nova técnica de implementação de indutores pouco difundida comercialmente, é a utilização das próprias trilhas da PCI para a formação de indutores embarcados.

Figura 54 – Fluxo magnético em um transformador.



Fonte: Adaptado de MCLYMAN (2004).

Figura 55 – Tipos de transformadores encontrados comercialmente.



Fonte: WATELECTRONICS (2019).

### 2.3.3.5 Indutores embarcados em PCI

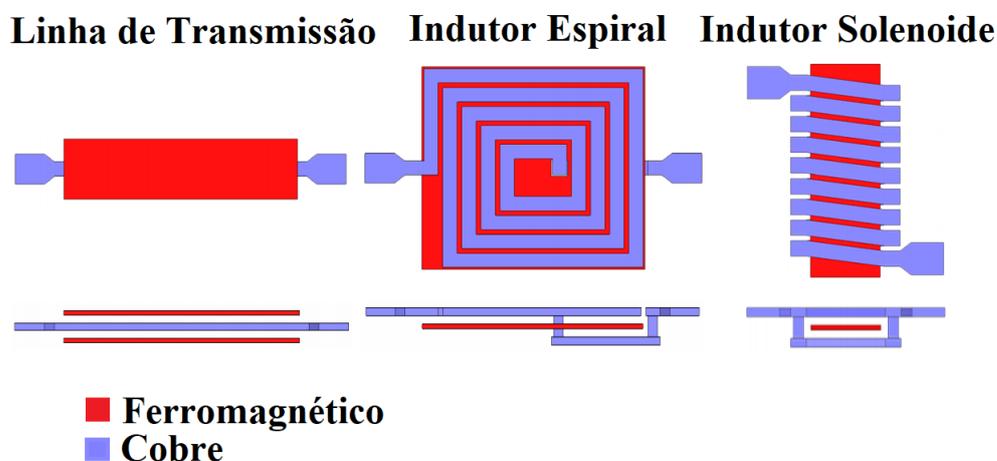
Componentes embarcados em PCI segundo Uher e Zednicek (2014, p.3, tradução nossa) "são descritos em publicações tanto como uma técnica que cria os componentes diretamente durante a produção da PCI, quanto o processo onde componentes especialmente desenvolvidos, ou componentes eletrônicos comuns são inseridos entre os *layers* da PCI". Este processo apesar de sua maior complexidade de desenvolvimento do que *layouts* de PCI comuns, oferecem alguns benefícios melhorando algumas características físicas e elétricas da placa. Destes benefícios, pode-se citar a possibilidade de encurtamento da distância entre componentes, melhor resistência ao estresse mecânico e entre outros.(UHER; ZEDNICEK, 2014)

Os indutores embarcados em PCI vão demandar, de acordo com Dagostim (2018, p.78) "uma camada dielétrica especial para a sua construção, sendo esta de material magnético para potencializar os efeitos indutivos das espiras da bobina que criará o indutor". A figura 56 mostra a formação de algumas estruturas de indutores embarcados em PCI utilizando uma

camada de material magnético. Estas estrutura ainda de acordo com Dagostim (2018, p.80) apresentam uma boa eficiência, e já são utilizados em alguns circuitos

Apesar dos indutores embarcados ainda não serem tão explorados quanto os capacitores embarcados, já é possível encontrar aplicações como no caso das placas dos microprocessadores, onde são usados porque, em comparação com os componentes comuns, reduzem custo de produção, permitem imprimir o valor exato de indutância que o desenvolvedor tem necessidade, além de atingir tamanhos que permitem explorar ainda mais as áreas já reduzidas das placas desses equipamentos [...]

Figura 56 – Formação dos indutores com diferentes estruturas.



Fonte: adaptado de LEE; LI; WANG (2008).

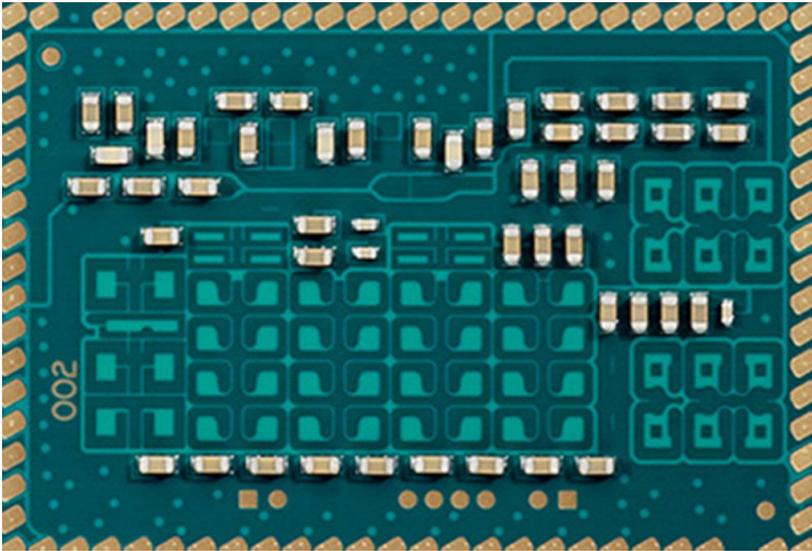
De acordo com as características construtivas expostas, a figura 57 apresenta um circuito regulador de tensão, utilizando indutores embarcados. Os indutores embarcados podem ser observados no centro da imagem. Segundo Dagostim (2018, p.80) "há o cuidado de deixar o espaço com os componentes embarcados livre de outros componentes soldados, pois os mesmos podem causar interferência". Esta interferência é em decorrência do campo magnético gerado pelo indutor embarcado.

Com base no que foi exposto sobre as características construtivas e funcionamento dos indutores, sabe-se que estes geram um campo magnético variável a sua volta quando percorridos por uma corrente elétrica também variável no tempo. Com isto será abordado a seguir a influência que estes campos magnéticos tem dentro de um circuito eletrônico.

### 2.3.4 Influência do campo magnético gerado pelos indutores

Como foi exposto anteriormente, os indutores são componentes capazes de gerar um campo magnético quando percorridos por uma corrente. Estes campos magnéticos quando variantes no tempo podem ser induzidos em outros componentes ou trilhas do circuito provocando interferência. No caso em que temos indutores próximos um dos outros estes campos magnéticos

Figura 57 – Placa circuito regulador de tensão com indutores embarcados.



Fonte: DAGOSTIM (2018).

podem interagir entre si. Este fenômeno é chamado de indutância mútua e é um dos princípios de funcionamento do transformador como foi visto anteriormente. No entanto, tendo a premissa que um indutor discreto é uma bobina de fios, pode-se dizer que ao colocar um indutor próximo um do outro, estamos criando um transformador (KEIM, 2018). Esta característica, torna o desenvolvimento de circuitos eletrônicos compactos uma tarefa mais difícil como ilustra (KEIM, 2018, tradução nossa).

Se você considerar até que ponto a corrente através do enrolamento primário de um transformador afeta as condições elétricas do enrolamento secundário, o problema rapidamente se torna aparente: indutores discretos podem ser um meio eficaz de acoplar ruído e interferência de um sinal para outro. Isso é especialmente problemático hoje em dia quando os circuitos são muito compactos.

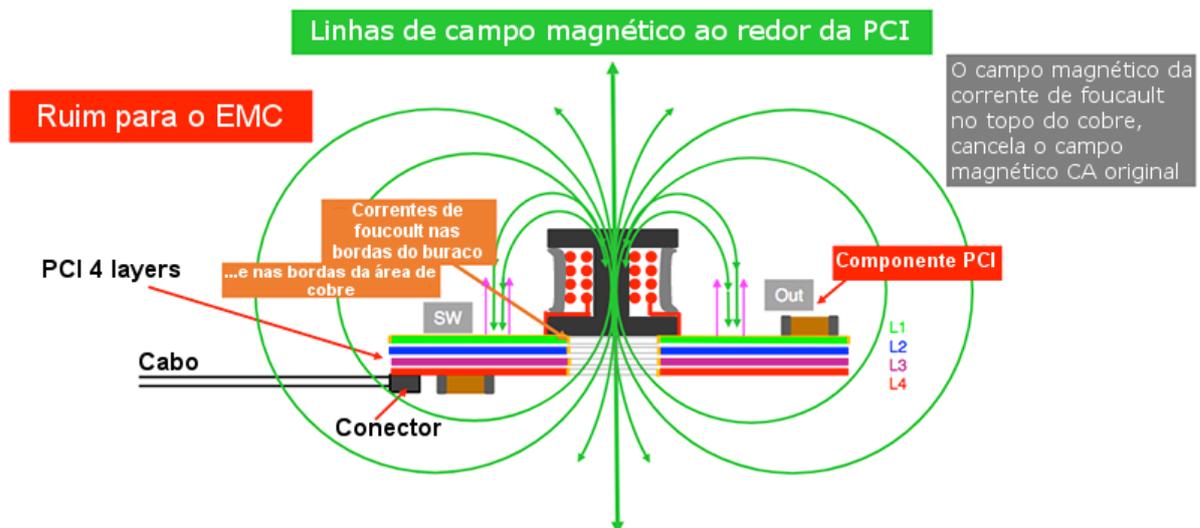
Em projetos de PCI, um bom *layout* pode mitigar a interferência gerada pelos campos magnéticos do indutor e de outros componentes do circuito. Uma técnica que pode ser utilizada para lidar com estes campos em um circuito, DC/DC<sup>15</sup> é ilustrado por (HEDRICH, S.d, tradução nossa)

Deve haver uma área de GND na camada sob o circuito DC/DC, espaçada a uma distância inferior a  $100\mu\text{m}$ . Nesta área de cobre, as correntes com alta variação temporal que fluem através dos componentes do circuito e trilhas da PCI induzem correntes de foucault. As correntes de foucault são opostas as correntes originais no lado dos componentes e o seus campos magnéticos cancelam o campo original. Isso funciona melhor se a corrente de foucault puder espelhar a alta variação de corrente do lado dos componentes com uma distância mínima. Isso reduz a radiação do campo magnético do lado dos componentes na PCI.

<sup>15</sup> Os circuitos conversores DC/DC são circuitos que recebem um nível de tensão DC na entrada e convertem esta tensão para um nível de amplitude diferente na saída. (BRAGA, S.d)

Segundo Hedrich (S.d, tradução nossa) "Algumas ferramentas de design de PCI tem uma pré configuração que não permite cobre sob o núcleo de um indutor. No entanto, as opiniões sobre este tópico variam entre permitir ou não permitir, cobre diretamente sob a bobina no lado dos componentes na PCI". A figura 58 mostra uma representação do campo magnético gerado por uma bobina em uma PCI onde não há cobre em nenhum dos 4 *layers* abaixo da bobina. Note que o campo magnético nesta situação, se espalha por toda a PCI acoplando nos cabos, conectores e outros componentes do circuito. Já a figura 59 mostra o campo magnético, quando temos cobre diretamente abaixo da bobina. O cobre abaixo da bobina, ainda segundo Hedrich (S.d) "provê uma área, para que as correntes de foucault cancelam o campo magnético já fora da PCI". É importante notar que com este método o campo magnético gerado não acopla na parte inferior da PCI, permitindo o uso de filtros nesta parte da PCI sem que sejam interferidos pelo forte campo magnético da bobina. (HEDRICH, S.d)

Figura 58 – PCI de 4 layers sem cobre abaixo do núcleo do indutor



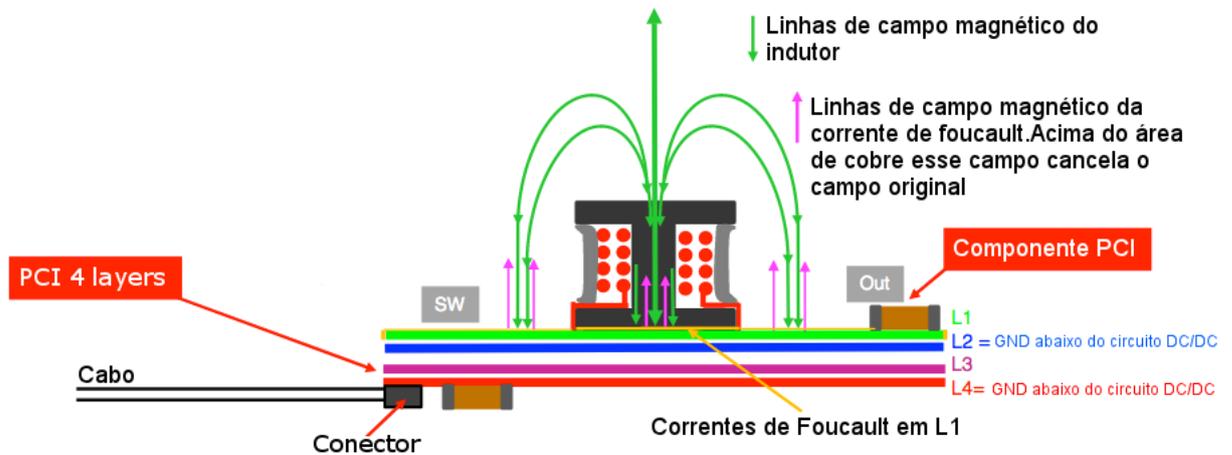
Fonte: Adaptado de HEDRICH (S.d).

Apesar do cobre abaixo da bobina reduzir a abrangência do campo magnético, e proteger algumas áreas do circuito, as correntes de foucault causam a redução da indutância da bobina, bem como algumas perdas no *layer* de GND e a formação capacitâncias parasitas do enrolamento da bobina para o GND. No entanto dependendo da aplicação do circuito, estas perdas tornam-se desprezíveis em vista da redução do acoplamento do campo magnético em grandes áreas do circuito. (HEDRICH, S.d)

### 2.3.5 Indutância dos planos

Uma característica importante do comportamento dos sinais elétricos em alta frequência em relação ao seu retorno pelo plano de terra de uma PCI, é que de acordo com Johnson e Graham (1993, p.190, tradução nossa) "em altas velocidades, a indutância de um dado caminho de corrente de retorno é muito mais significativa do que a resistência. Retornos de correntes de

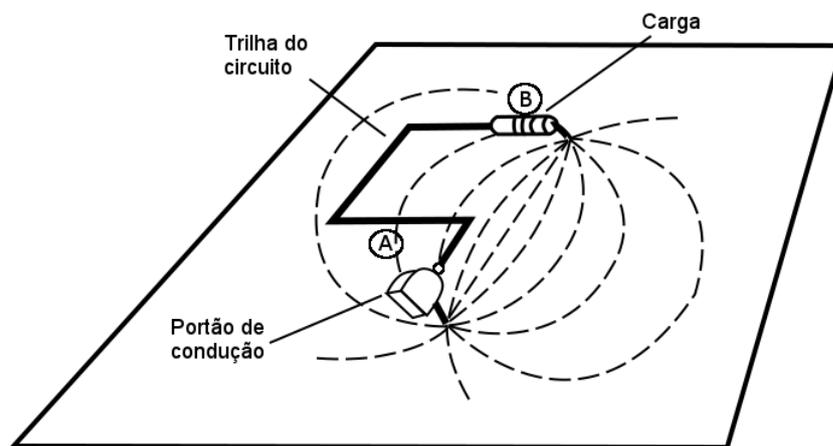
Figura 59 – PCI de 4 layers com cobre abaixo do núcleo do indutor.



Fonte: Adaptado de HEDRICH (S.d).

alta velocidade, seguem o caminho de menor indutância, não o de menor resistência". Esta característica difere-se de correntes de baixa velocidade pois estas, tendem a retornar pelo caminho que oferece menor resistência. A figura 60 exemplifica o retorno da corrente de baixa frequência transmitida de A para B, através do plano de terra de uma PCI. (JOHNSON; GRAHAM, 1993)

Figura 60 – Caminho da corrente de retorno em baixa frequência.

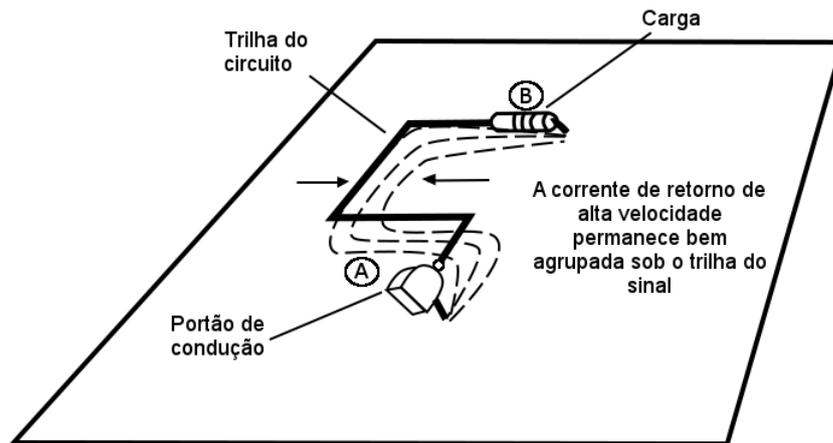


Fonte: Adaptado de JOHNSON; GRAHAM (1993).

O caminho de menor indutância em uma PCI de acordo com JOHNSON; GRAHAM "encontra-se diretamente abaixo do condutor do sinal, minimizando a área de loop entre os caminhos de saída e retorno do sinal". A figura 61 apresenta um exemplo do retorno de uma corrente em alta frequência transmitida de A para B, através do plano de terra de uma PCI. O maior pico de densidade de corrente encontra-se diretamente abaixo da trilha do sinal, no entanto esta densidade de corrente diminui a sua intensidade a medida que se distancia da trilha, como ilustra (JOHNSON; GRAHAM, 1993, p.191, tradução nossa).

A distribuição de corrente equilibra duas forças opostas. Onde a corrente é mais fortemente unida, existe uma indutância mais alta (um fio fino tem mais indutância que um fio plano e largo). Onde a corrente se afasta mais da trilha do sinal, a área total de *loop* entre os caminhos de saída e retorno do sinal aumenta, aumentando a indutância.[...] A distribuição de corrente também diminui a energia total armazenada no campo magnético envolta da trilha do sinal.

Figura 61 – Caminho da corrente de retorno em alta frequência



Fonte: Adaptado de JOHNSON; GRAHAM (1993).

Com todo o conteúdo exposto a cerca do EMI, EMC, características dos componentes mediante a variação de frequência, placas de circuito impresso, filtros, blindagens e o comportamento dos indutores, tem-se o suficiente para que possamos entrar mais a fundo no funcionamento dos testes de emissão radiada e emissão conduzida. Este que são as ferramentas principais para o experimento a ser realizado com os indutores.

## 2.4 ENSAIOS DE EMC

Como foi visto nos subcapítulos anteriores, os ensaios de compatibilidade eletromagnética são utilizados para mensurar os níveis de interferência emitidos pelos produtos eletrônicos, e garantir que estes níveis estejam em conformidade com as normas que regem os níveis aceitáveis de EMI, seja de forma radiada ou conduzida. Os tópicos a seguir abordarão alguns conceitos dos principais ensaios de EMC bem como os limites aceitáveis previsto nas normas da ANATEL

### 2.4.1 Classes de produtos

Para as normas relacionadas ao EMC os produtos eletrônicos são divididos em duas classes distintas, classe A e classe B. Os equipamentos classe A são, de acordo com ANATEL (2018b) "equipamentos com características próprias para instalação em estações de telecomunicações. Estes podem causar problemas de radiointerferência se instalados em ambientes ou áreas residenciais". Um exemplo de equipamentos classe A são as centrais telefônicas de

grande porte, que normalmente não são instaladas em ambientes ou áreas residenciais. Já os equipamentos de classe B são, segundo ANATEL (2018b) "equipamentos destinados ao uso em ambientes domésticos ou residencial com características próprias para instalação do usuário, para a instalação em redes de acesso ou para situações de local não fixo de uso". Um exemplo de produtos classe B são os telefones residenciais com ou sem fio, bem como os celulares em que a sua instalação pode ser efetuada pelo usuário podendo ou não ter um local fixo de uso.

#### 2.4.2 Ensaio de emissão radiada

De acordo com Paul (2006, p.64, tradução nossa) "Os campos elétricos irradiados [...], para os testes comerciais, devem ser medidos em um local de teste de área aberta, ou em uma câmara Semi-Anecóica". A câmara semi-Anecóica consiste de uma câmara onde suas paredes e teto são blindados, revestidos de um material capaz de absorver as energias de rádio frequência impedindo a sua reflexão. O motivo de impedir a reflexão dos sinais de radiofrequência em uma câmara semi-anecóica é simular o teste em área aberta. Dentro da câmara o equipamento sob teste permanece a uma altura de 1m do chão, enquanto a antena é colocada a uma distância de 3m ou 10m do produto sob teste dependendo do espaço disponível na câmara. A antena utilizada é um dipolo de meia onda, e a sua altura de varredura varia de 1m a 4m do chão. A antena tem a polarização horizontal e vertical, sendo capaz de cobrir uma ampla faixa de frequência nos dois planos. Conectado a antena, é posto um analisador de espectro que é capaz de apresentar de forma visual a intensidade dos campos em todo o espectro de frequência coberto nos testes. A figura 62 apresenta a estrutura da câmara semi-anecóica para os testes de emissão radiada. Já a figura 63 apresenta uma imagem real de uma câmara semi-anecoica utilizada para os testes de certificação de equipamentos eletrônicos. (PAUL, 2006)

De acordo com ANATEL (2018b) as emissões radiadas a partir do equipamento devem atender aos limites apresentados na tabela 2 para equipamentos classe A, ou na tabela 3 para equipamentos classe B.

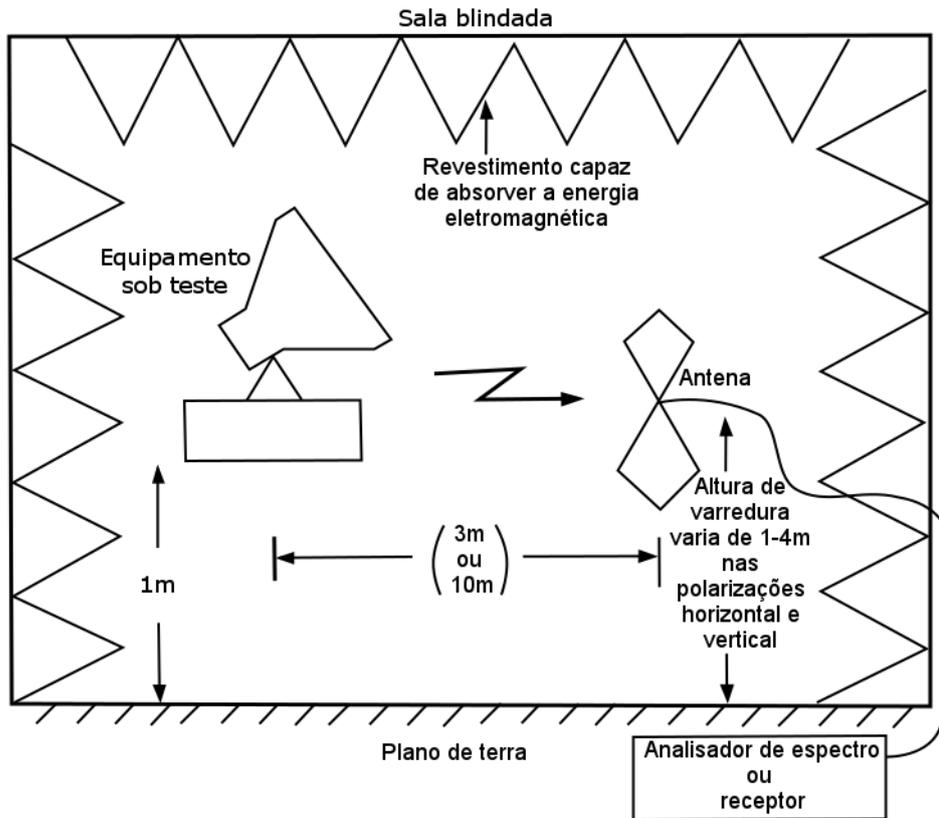
Faixa de frequência (MHz)	Limites quase-pico dB( $\mu$ V/m)
30 a 230	40
230 a 1000	47

Tabela 2 – Limites para emissão de perturbação radiada de equipamentos classe A. ANATEL (2018b)

Faixa de frequência (MHz)	Limites quase-pico dB( $\mu$ V/m)
30 a 230	30
230 a 1000	37

Tabela 3 – Limites para emissão de perturbação radiada de equipamentos classe B. ANATEL (2018b)

Figura 62 – Uso da câmara semi-aneecóica para testes de emissão radiada.



Fonte: Adaptado de: PAUL (2006).

Figura 63 – Câmara semi-aneecóica.



Fonte: ELDORADO (2019).

### 2.4.3 Ensaios de emissão conduzida

Outro ensaio necessário para garantir a conformidade de produtos eletrônicos com as normas relacionadas ao EMC são os ensaios de emissão conduzida. Conforme abordado em tópicos anteriores, a emissão conduzida trata-se das correntes de ruído que passam pelo cabo de alimentação CA do produto. Os testes de emissão conduzida são feitos através de uma rede de estabilização de impedância de linha do inglês *Line Impedance Stabilization Network* (LISN). Este equipamento age, segundo Paul (2006, p.68, tradução nossa) "como uma sala blindada de teste de emissão radiada, de forma a prevenir que um ruído externo ao teste (Na rede de alimentação CA comum) contamine o teste". Outra função importante do LISN é manter uma impedância constante para toda a faixa de frequência entre fase e terra e neutro e terra do produto, viabilizando uma medida precisa da emissão conduzida. A figura 64 mostra o equipamento LISN utilizado para os testes de emissão conduzida. (PAUL, 2006)

Figura 64 – Equipamento para medida de emissão conduzida LISN.



Fonte: COM-POWER (S.d).

Da mesma forma que para os ensaios de emissão radiada, os equipamentos devem atender certos limites impostos pela norma. De acordo com ANATEL (2018b) a tabela 4 apresenta os limites para emissão conduzida de equipamentos Classe A, enquanto a tabela 5 apresenta os limites para emissão conduzida de equipamentos classe B.

Faixa de frequência (MHz)	Limites quase-pico dB( $\mu$ V/m)	Médio dB( $\mu$ V/m)
0.15 a 50	79	66
0.50 a 30	73	60

Tabela 4 – Limites para emissão de perturbação conduzida de equipamentos classe A. ANATEL (2018b)

Faixa de frequência (MHz)	Limites quase-pico dB( $\mu$ V/m)	Médio dB( $\mu$ V/m)
0.15 a 0.50	66 a 56 (O limite decresce linearmente com o logaritmo da frequência)	56 a 46 (O limite decresce linearmente com o logaritmo da frequência)
0.50 a 5	56	46
5 a 30	60	50

Tabela 5 – Limites para emissão de perturbação conduzida de equipamentos classe B. ANATEL (2018b)

Agora que temos o suficiente para entender os ensaios de emissão radiada, emissão conduzida, os aspectos do EMC e EMI, bem como os indutores e PCI que são um dos componentes principais do estudo, temos o suficiente para entrar no tema sugerido. O efeito da disposição de indutores em placa de circuito impresso para compatibilidade eletromagnética.

### 3 DESENVOLVIMENTO

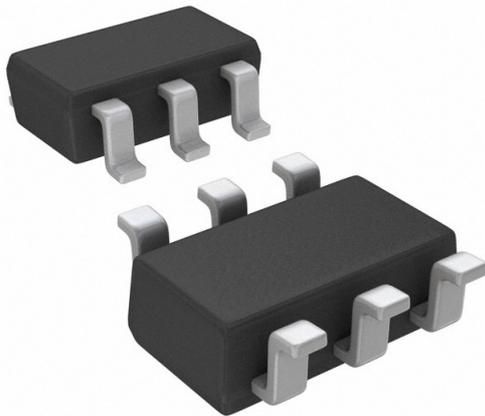
Afim de evidenciar a influência da disposição dos indutores em placas de circuito impresso, foi necessário a escolha de uma topologia de circuito que seja bastante difundido em diversos produtos eletrônicos e ainda seja sujeito a emissão eletromagnética de forma radiada e conduzida.

Com os critérios definidos, foi optado pelo desenvolvimento de um conversor DC/DC<sup>1</sup>, pois este apresenta uma emissão de ruído considerável devido ao seu chaveamento para a conversão da tensão.

#### 3.1 ESCOLHA DE UM CHAVEADOR

Para o desenvolvimento do projeto foi escolhido o chaveador MP2459, que é um conversor DC/DC abaixador de tensão do fabricante *Monolithic Power Systems* (MPS). Este componente tem como objetivo converter uma tensão contínua na entrada em outra tensão menor na saída, utilizando o menor número possível de componentes externos. O que permite o seu uso nas mais diversas aplicações, de carregadores de bateria, até medidores de energia. A figura 65 apresenta o encapsulamento do componente MP2459. (MPS, 2014)

Figura 65 – Encapsulamento MP2459.



Fonte: DIGI-KEY (S.d).

Dentre as características deste componente pode-se citar o seu suporte amplo de tensão de entrada, podendo suportar de 4,5V até 55V, e saída ajustável entre 0,81V até 0,95 vezes a sua tensão de entrada. Outra característica de extrema importância para os testes a serem realizados, é a sua frequência de chaveamento típica de 480 KHZ, no entanto, segundo

<sup>1</sup> Segundo ROHM (S.d, tradução nossa) um conversor DC/DC como o seu nome sugere, é um circuito capaz de converter uma tensão DC em outra

informações do datasheet do componente, esta frequência pode variar entre o mínimo de 380 KHZ e máximo de 580 KHZ. As demais informações de operação do componente, podem ser verificadas no datasheet do componente no Anexo A na página 93. (MPS, 2014)

### 3.2 MONTAGEM E LAYOUT DA PLACA

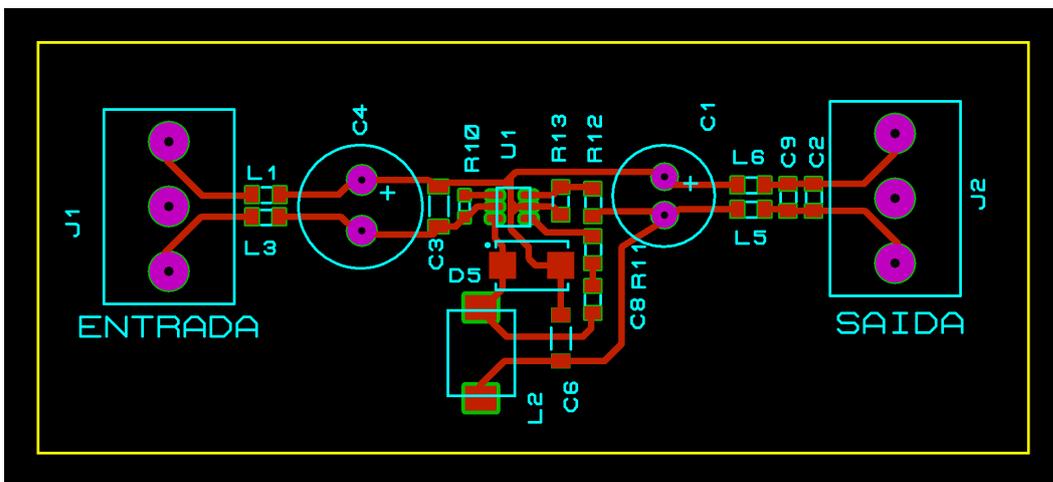
Com o chaveador selecionado, foi feito o desenvolvimento do circuito para os ensaios. Para a montagem desse circuito foi definido que a tensão de entrada será de 12V, e a saída de 5,5V. O esquema elétrico do circuito foi desenvolvido com base nas indicações contidas no datasheet do chaveador, e adicionado algumas modificações para atender a tensão de entrada e saída definidos, e também comportar os indutores utilizados para o experimento. O esquema elétrico completo pode ser conferido no Anexo B na página 98.

Para projetar os layouts das placas, assim como para o desenvolvimento do esquema elétrico, foi feito o estudo do *datasheet* do chaveador, afim de entender as suas características e desenvolver o melhor layout para os testes, objetivando os testes de EMC.

O circuito projetado apresenta indutores em sua entrada e saída agindo como filtros. Na entrada foram utilizados beads, enquanto na saída do circuito foram utilizado outros indutores. O *datasheet* do bead utilizado pode ser verificado no Anexo C na página 99, enquanto o *datasheet* do indutor pode ser visto no Anexo D na página 100.

A figura 66 apresenta o layout da primeira versão de placa, onde as trilhas de entrada são mais curtas deixando os beads L1 e L3 próximos ao CI U1 que é o chaveador. Já as trilhas de saída também foram projetadas de modo a deixar os indutores L5-L6, mais próximo ao CI U1. Este layout é a referência, ou seja a partir deste, foram feitas as modificações apresentadas no segundo layout que pode ser visto a seguir.

Figura 66 – Primeira versão de Layout de Placa 1

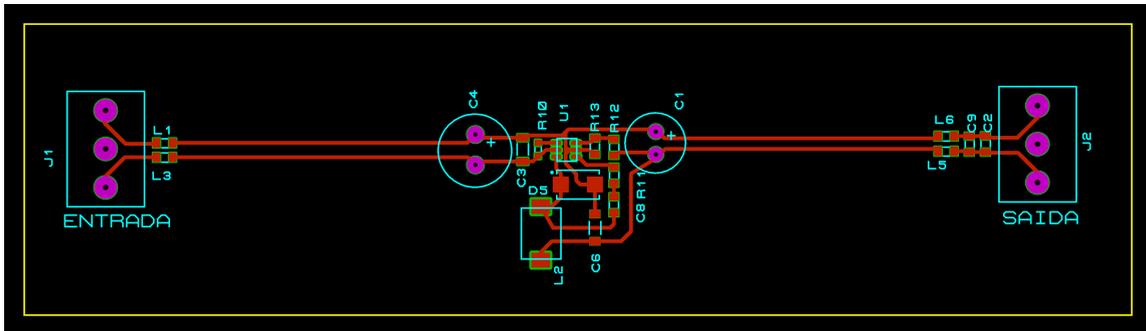


Fonte: Autor 2020

O segundo layout de placa apresentado na figura 67, foi projetado de forma a deixar os indutores de entrada e saída da placa mais afastados do chaveador para que o campo magnético

radiado pelo circuito chaveador não interfira fortemente sob os indutores posicionados.

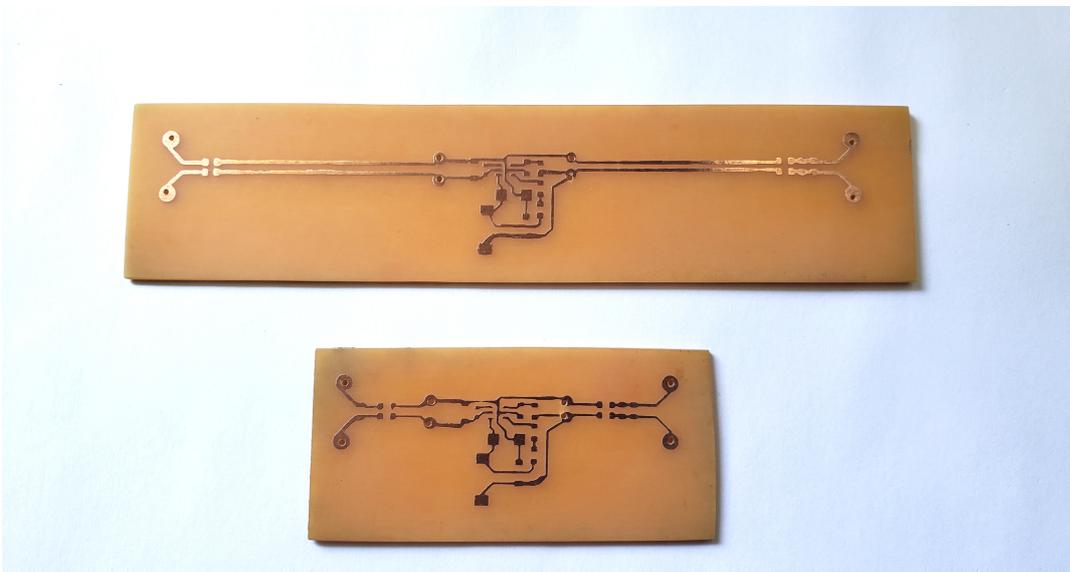
Figura 67 – Primeira versão de Layout de Placa 2



Fonte: Autor 2020

Com os layouts definidos, foi feita a sua transferência para placas de cobre o que possibilitou a sua corrosão, permitindo a montagem dos componentes e realização dos testes de compatibilidade magnética. A figura 68 apresenta as placas corroídas com as primeiras versões de layout do circuito.

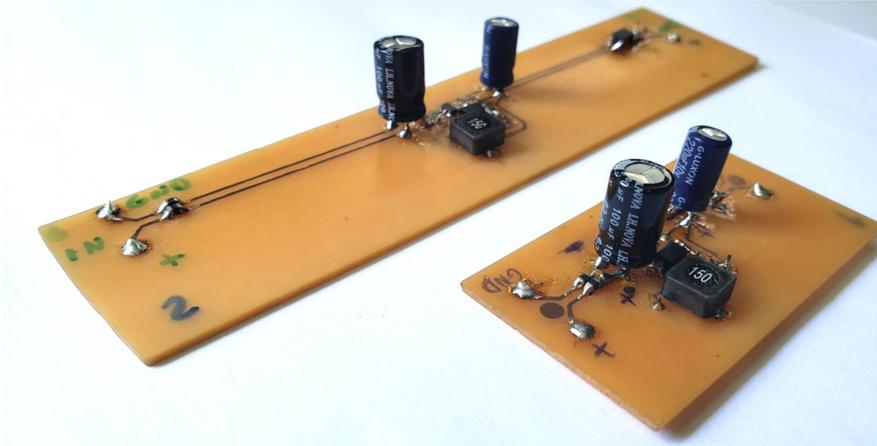
Figura 68 – Placas corroídas



Fonte: Autor 2020

A figura 69 mostra as placas após a montagem dos componentes. Com isto, foram feitos testes funcionais para verificar o funcionamento do circuito, onde foi constatado o valor de tensão na saída de 5,5V, e frequência de chaveamento de aproximadamente 480 KHz para as duas placas, conforme especificado no *datasheet* do chaveador.

Figura 69 – Placas com circuito montado



Fonte: Autor 2020

### 3.3 ENSAIOS DE EMC

Tendo as placas do circuito montadas e com os beads e indutores posicionados, puderam ser feitos os primeiros ensaios de EMC. Nos ensaios foram montados dois cenários de testes distintos, um para o teste de emissão radiada, e outro para emissão conduzida. A seguir é apresentado em detalhes os cenários para cada um dos testes.

#### 3.3.1 Ensaios de emissão radiada

Nos ensaios de emissão radiada, foi utilizado uma GTEM, que pode ser vista na figura 70. No interior da GTEM foi feito a montagem do cenário de testes para as placas.

Figura 70 – GTEM utilizada nos ensaios de emissão radiada



Fonte: Autor 2020

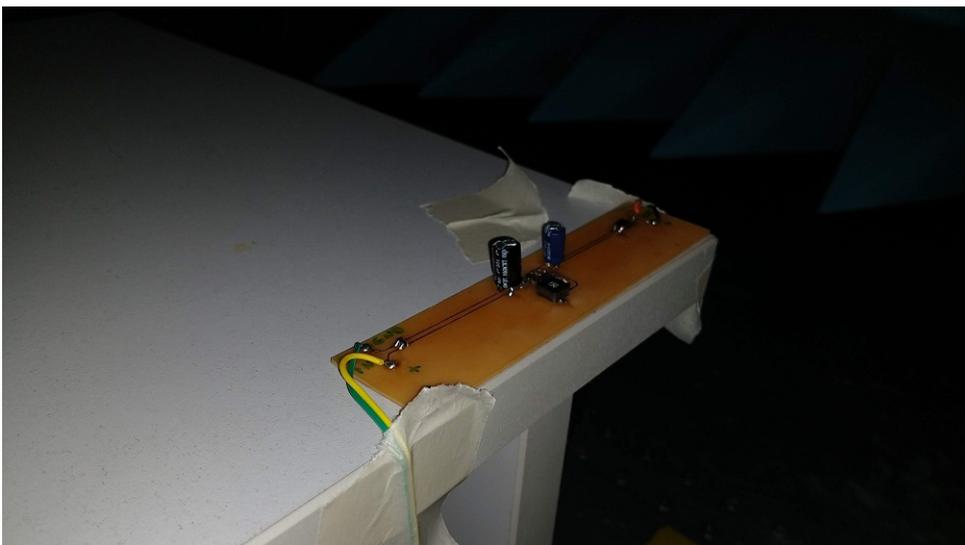
A figura 71 apresenta o cenário montado dentro da GTEM. A placa é posicionada em uma mesa no centro da GTEM. Já a alimentação da placa e a saída para a carga ficam no solo da GTEM, afim de evitar que a antena possa pegar os ruídos radiados por estes componentes do cenário. Desta forma, apenas o ruído emanado pela própria placa é recebido pela antena no interior da GTEM. A figura 72, mostra o posicionamento adotado para a segunda versão de layout de placa.

Figura 71 – Cenário de ensaios placa 1



Fonte: Autor 2020

Figura 72 – Cenário de ensaios placa 2



Fonte: Autor 2020

Foi utilizado uma carga para os circuitos desenvolvidos que obtivesse um consumo médio de corrente próximo dos 250 mA. Este consumo representa metade do consumo que o chaveador consegue prover, que é de 500 mA.

### 3.3.2 Ensaio de emissão conduzida

Para os ensaios de emissão conduzida foi utilizado o LISN. Este equipamento tem como objetivo efetuar a medição da emissão de forma conduzida, conforme apresentado no subcapítulo 2.4.3. A figura 73 mostra a LISN e o cenário utilizado nos ensaios.

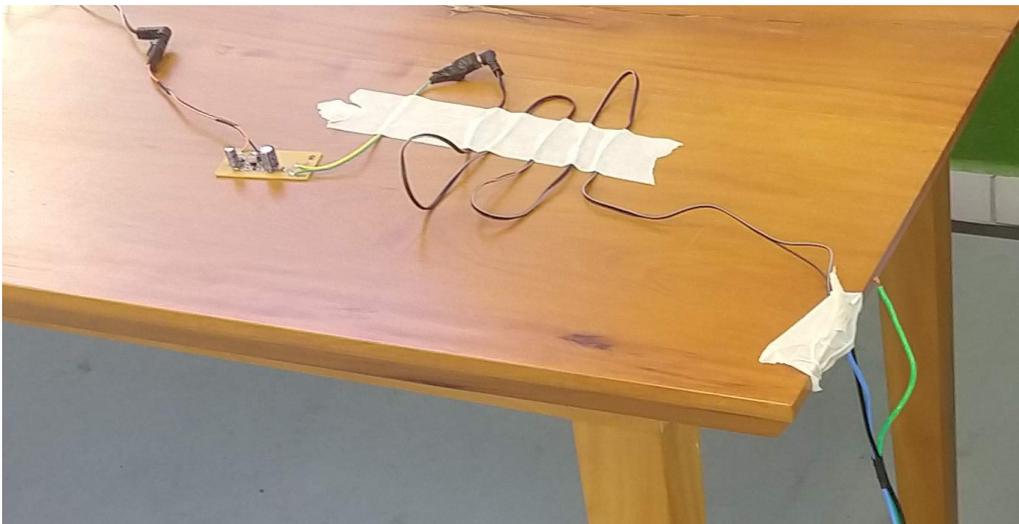
Figura 73 – LISN utilizada para os ensaios de emissão conduzida



Fonte: Autor 2020

A figura 74 mostra a placa 1 durante a execução dos testes de emissão conduzida. Para o teste a placa deve ficar posicionada sob a mesa que fica sob um tapete condutor ligado ao terra da LISN.

Figura 74 – Cenário de ensaios da placa 1 - conduzida



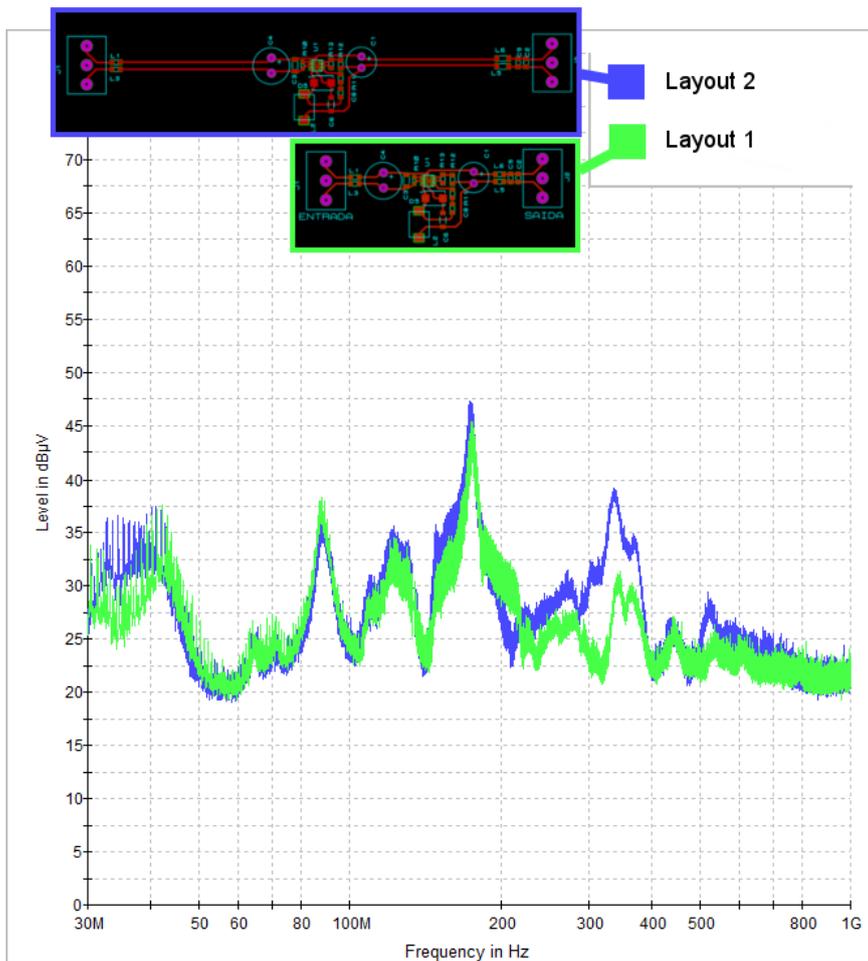
Fonte: Autor 2020

Para todos os 2 layouts de placa foi utilizado o mesmo cenário de testes, afim de manter a referência entre as mesmas.

### 3.3.3 Resultado dos ensaios

O gráfico apresentado na figura 75 mostra os resultados obtidos nos ensaios de emissão radiada para os 2 layouts diferentes de placa. A curva verde é referente a placa 1, e a curva azul a placa 2.

Figura 75 – Resultados ensaios emissão Radiada



Fonte: Autor 2020

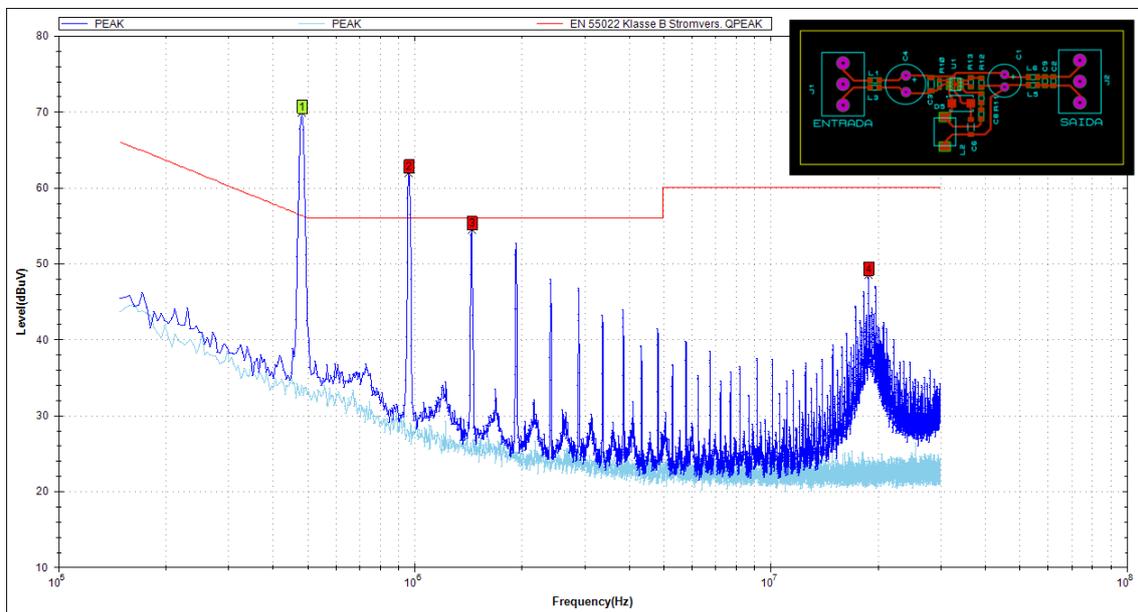
Analisando o gráfico pode-se observar um maior nível de emissão da curva azul, referente a placa 2. A faixa de frequência em que fica mais perceptível a diferença entre as duas placas encontra-se aproximadamente entre 210 MHz a 400 MHz. A placa 1 cujo na imagem é representada pela curva verde, mostrou uma melhor performance em relação a placa 2 mantendo-se com um nível de emissão menor em grande parte do gráfico.

Tendo em vista os resultados obtidos foi possível perceber que o melhor foi o da placa onde as proteções de entrada e saída ficaram mais próximas do chaveador, enquanto o pior resultado na placa onde as proteções de entrada e saída ficaram mais afastadas do chaveador.

Um fator importante a ser destacado que contribuiu para o resultado obtido é que a placa 2 com as proteções mais afastadas, tem trilhas maiores constituindo uma antena, enquanto a placa 1 possui trilhas menores, reduzindo a formação de antenas.

A figura 76 apresenta o gráfico com o resultado do ensaio de emissão conduzida da placa 1. No gráfico é possível observar que o pico com maior nível de emissão acontece na frequência de chaveamento do chaveador que é de aproximadamente 480KHz. Os picos com maior nível de emissão repetem-se em múltiplos da frequência do chaveador.

Figura 76 – Resultados ensaios emissão conduzida placa 1

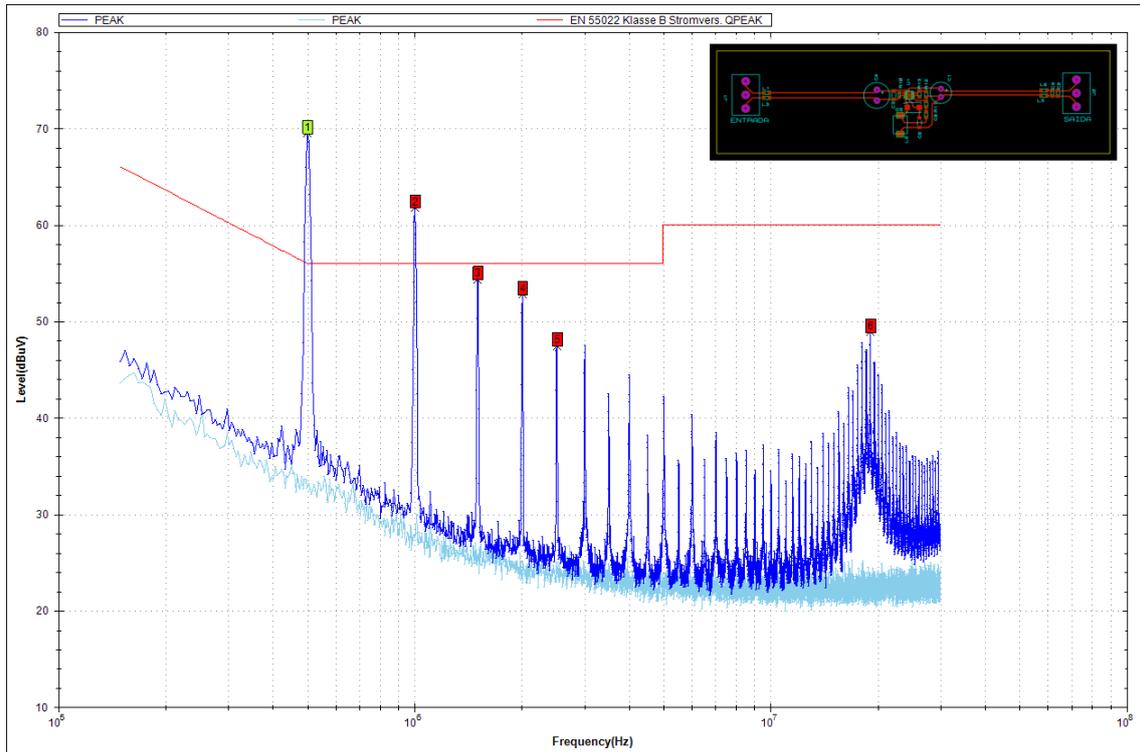


Fonte: Autor 2020

O gráfico apresentado na figura 77 mostra os resultado obtido com a placa 2, onde as proteções estão montadas mais afastadas do chaveador. Da mesma forma que o resultado da placa 1, o pico com um maior nível de emissão acontece na frequência de chaveamento, e repete-se em múltiplos desta frequência.

Comparando os resultados das placas 1 e 2, não é possível perceber diferenças significativas entre um resultado e outro. As características da curva permaneceram as mesmas para ambas as placas, havendo apenas pequenas variações em alguns picos de aproximadamente  $0,5 \text{ dB}\mu\text{V}$ , que podem ser provenientes de pequenas variações de componentes e montagens. Com base nestes resultados foi efetuado a revisão dos layouts de placa e posicionamento dos componentes, afim de confirmar e ressaltar os resultados obtidos nos ensaios.

Figura 77 – Resultados ensaios emissão conduzida placa 2

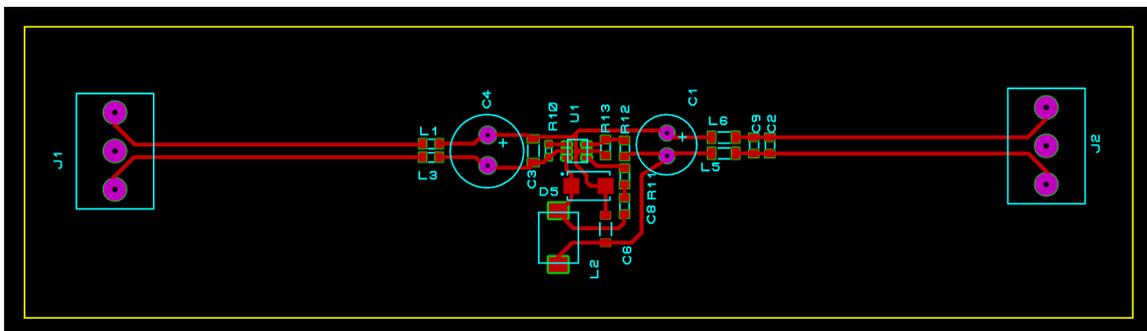


Fonte: Autor 2020

### 3.4 SEGUNDA VERSÃO DE LAYOUT E PLACAS

Mediante aos resultados obtidos nos ensaios, foram feitas modificações nos layouts afim de deixá-los com as mesmas dimensões nas trilhas de entrada e saída. Desta forma a formação de antenas será semelhante para todas as placas, com a diferença sendo apenas o posicionamento dos indutores. A figura 78 mostra o layout da placa 1, mantendo os indutores próximos do chaveador e dimensão maior de trilhas de entrada e saída.

Figura 78 – Segunda versão de layout placa 1

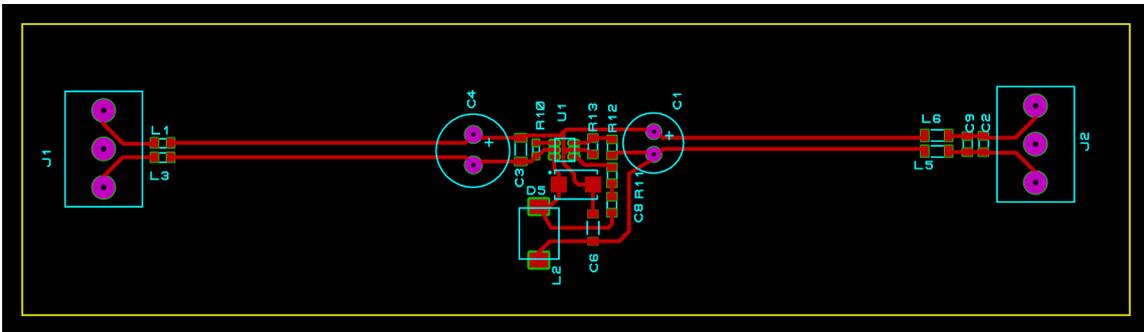


Fonte: Autor 2020

A figura 79 apresenta a segunda versão de layout da placa 2, onde os beads e indutores ficam afastados do circuito chaveador. As trilhas de entrada e saída tem as mesmas

dimensões das trilhas da placa 1.

Figura 79 – Segunda versão de layout placa 2

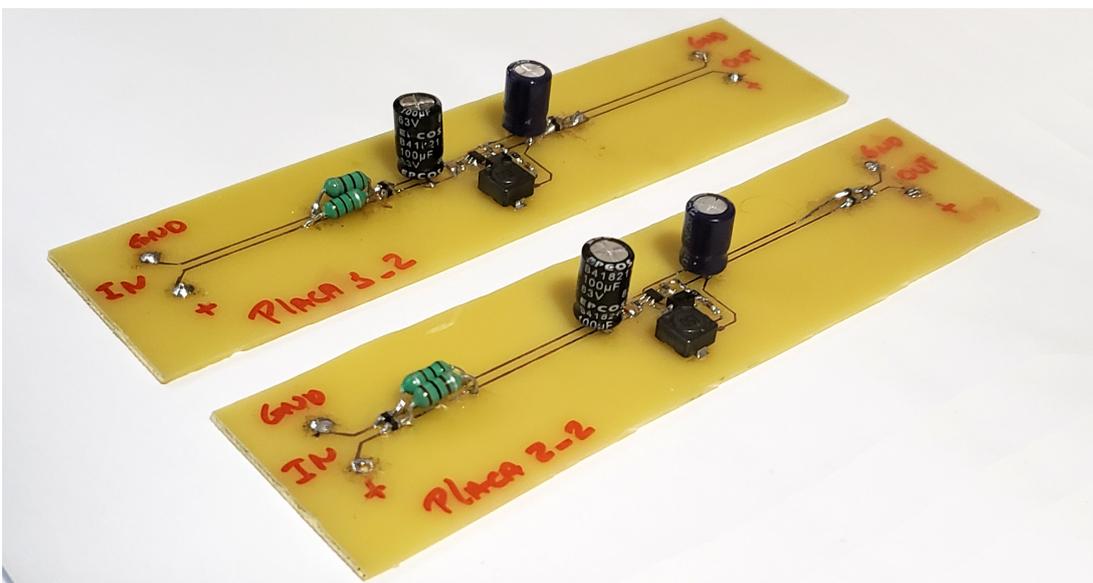


Fonte: Autor 2020

Outra diferença importante a destacar, é que na versão anterior de placas havia sido utilizado indutores na saída, no entanto após os primeiros ensaios viu-se que o seu posicionamento não estava correto, o mesmo deve ser utilizado na entrada do circuito, para que se tenha os efeitos necessários para os ensaios de emissão conduzida. Além disso foi visto que a faixa de operação do indutor estava incorreta o que contribui ainda mais para os resultados obtidos anteriormente. Desta forma foi utilizado indutores na entrada em conjunto com os beads com valores efetivos para o ensaio de emissão conduzida. Na saída da placa também permaneceram os beads.

Assim como para o primeiro ensaio, foi feita a transferência para placa de circuito impresso e corrosão de forma caseira. Posteriormente foi feita a montagem do circuito nas placas. A figura 80 apresenta as 2 placas corroídas e com os componentes montados.

Figura 80 – Segunda versão de placas montadas



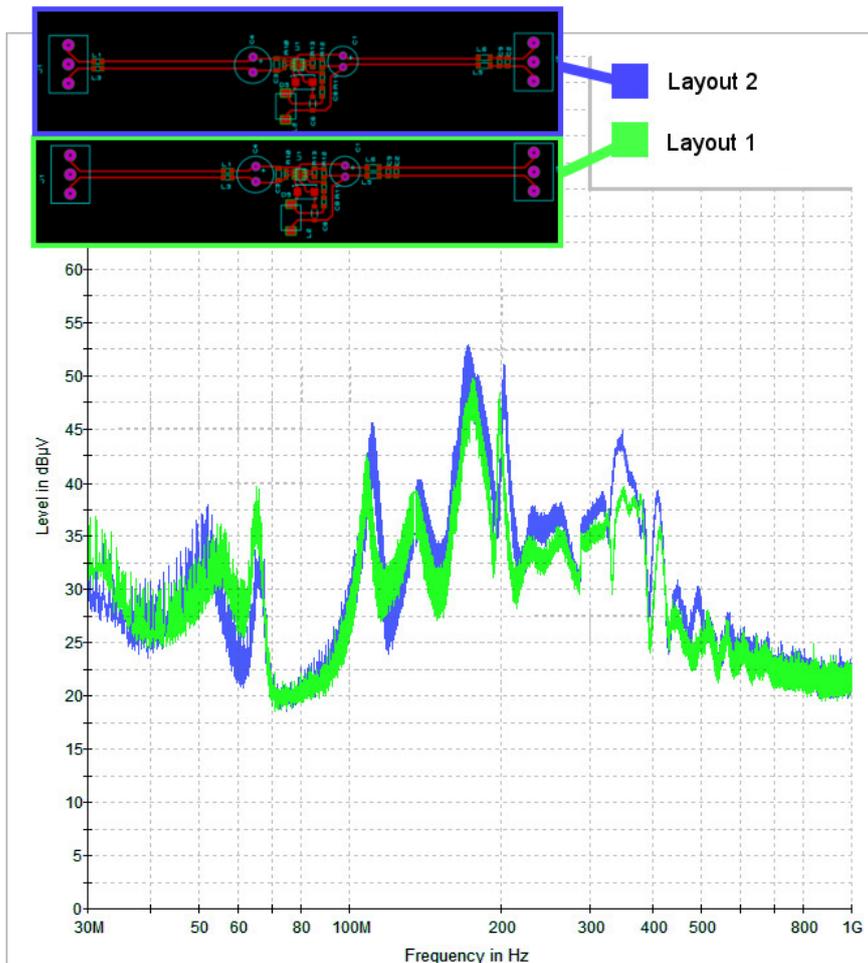
Fonte: Autor 2020

### 3.4.1 Resultado dos ensaios segunda versão de placas

Para as novas placas foram refeitos os mesmos ensaios executados anteriormente. No entanto, desta vez foi utilizado uma carga que gerasse um consumo maior de aproximadamente 450 mA, para que o circuito chaveador produzisse mais ruído, afim de obter novos resultados que comprovassem a primeira análise.

A figura 81 apresenta o resultado obtido no segundo ensaio de emissão radiada, onde a curva azul representa a placa 2 e a curva verde representa a placa 1.

Figura 81 – Resultados ensaios emissão Radiada da segunda versão de placas



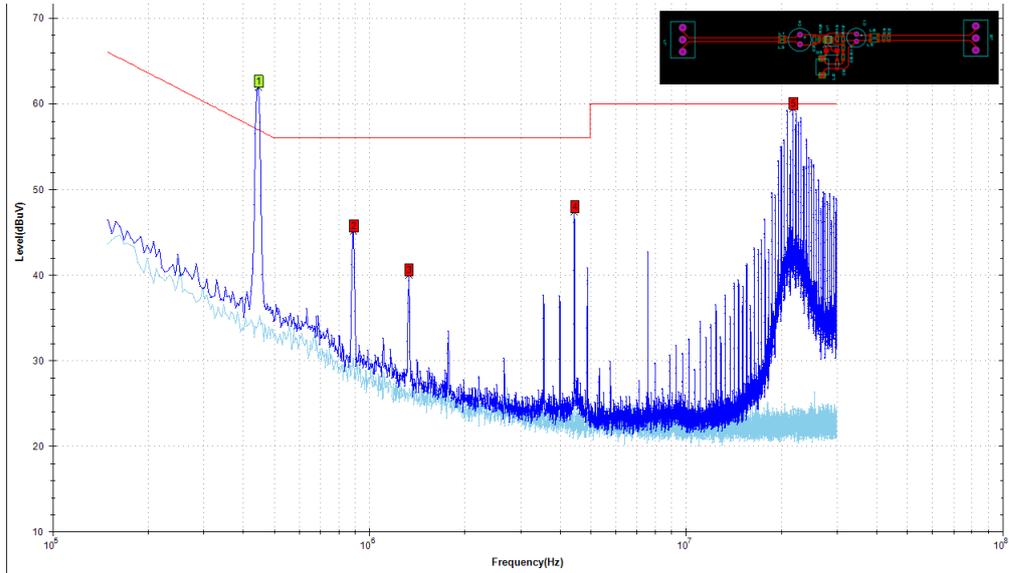
Fonte: Autor 2020

Analisando o gráfico da figura 81, pode-se observar que a curva azul apresenta um maior nível de emissão em alguns pontos da faixa de frequência. Comparando com a curva verde, apesar de apresentar um nível menor de radiação durante quase toda a faixa de frequência, esta diferença torna-se mais perceptível na faixa de 200 MHz a 400 MHz, mantendo a conformidade com o primeiro ensaio realizado.

A figura 82 mostra o resultado do ensaio de emissão conduzida para a placa 1. É

possível perceber que houve grande diferença em relação ao primeiro ensaio. Esta diferença deu-se principalmente pelo posicionamento correto das proteções para o ensaio de emissão conduzida e também corrigindo as especificações do componente para que atue na faixa de frequência correta.

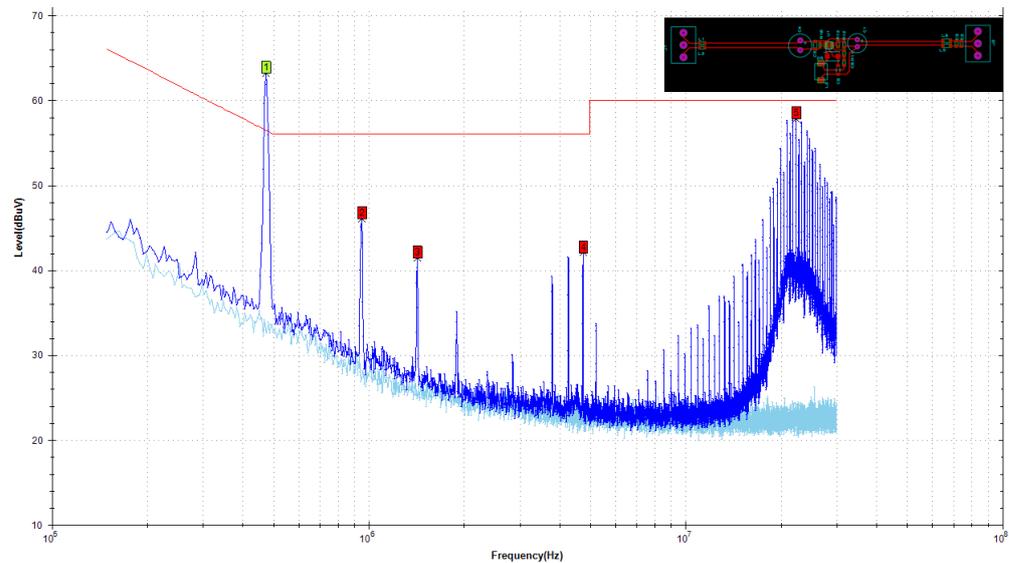
Figura 82 – Resultados ensaios emissão conduzida segunda versão placa 1



Fonte: Autor 2020

A figura 83 apresenta o resultado do ensaio de emissão conduzida para a placa 2. No resultado assim como para a placa 1 é possível perceber uma grande melhora em relação ao primeiro ensaio.

Figura 83 – Resultados ensaios emissão conduzida segunda versão placa 2



Fonte: Autor 2020

Comparando os ensaios das placas 1 e 2 apresentados na figuras 82 e 83 foi percebido uma diferença na frequência de 4,75 MHz, que na placa 2 aparece com menor intensidade que na placa 1. No entanto esta diferença pode ser resultante de alguma variação de componentes tendo em vista que não houve algo similar nos primeiros ensaios.

Com os resultados do primeiro ensaio com a primeira versão de placa, e o segundo com as melhorias, temos as observações para chegar a uma conclusão do efeito do posicionamento dos indutores em relação aos ensaios de EMC.

## 4 CONCLUSÃO

Uma das grandes dificuldades que se tem quando se está desenvolvendo um dispositivo eletrônico é a de prever o seu comportamento quanto aos ensaios de EMC, e isto se deve a grande quantidade de detalhes que deve-se levar em conta neste processo. Dentre elas podemos citar a capacidade de um componente em específico de ser susceptível ou gerar ruído no circuito, o layout da PCI, as especificações dos componentes e entre outros. E além destes pontos destacados, é visível a importância do conhecimento dos fundamentos do eletromagnetismo.

Observando os resultados obtidos nos testes de emissão radiada, em ambas as versões de placas, foi visto que aquela onde os beads estão mais próximos do circuito chaveador tem um desempenho melhor. Isto se deve pois quando os beads estão mais próximos do circuito chaveador, a parcela de trilha onde o ruído trafega também é menor, ou seja, o ruído fica enclausurado na parcela de trilha entre o bead e o chaveador. Já quando os beads estão afastados, existe uma parcela maior de trilha onde o ruído trafega até ser atenuado pelo bead, permitindo a sua radiação pela trilha.

Desta forma, quando projetado um circuito levando em consideração o ensaio de emissão radiada, em especial, em circuitos que operam em alta frequência, sugere-se colocar os filtros (beads) muito próximos ao circuito gerador do ruído, para evitar o efeito da irradiação causada pelas trilhas, como pôde ser observado nos ensaios realizados e apresentados no capítulo anterior. Porém, deve-se tomar cuidado com o efeito do campo gerado pelo indutor do chaveador, conforme apresentado no subcapítulo 2.3.4 na página 70 .

Já para os ensaios de emissão conduzida, o que se observou foi que o posicionamento do indutor mais próximo ou mais afastado do chaveador, não trouxe mudanças significativas do resultado. No entanto, mostrou a importância do seu posicionamento correto, para que seja efetivo na atenuação do ruído conduzido, que deve ser na entrada do circuito. Pois é o local onde os ruídos serão filtrados impedindo a sua propagação para a rede elétrica.

Outro fator muito importante a se destacar sobre o indutor utilizada para emissão conduzida é a sua correta especificação quanto a sua faixa de frequência de atuação e também a sua corrente máxima suportada. Pois caso o indutor especificado não trabalhe na faixa de frequência adequada, este não será efetivo nos resultados da emissão conduzida, e caso a corrente esteja muito próxima ou acima do seu limite, pode ocorrer o aquecimento do indutor, o que pode implicar na mudança das suas características influenciando severamente nos resultados.

Tendo em vista os resultados tanto de emissão radiada quanto de emissão conduzida, pôde se concluir que o melhor posicionamento para os dois, é onde os beads para emissão radiada encontram-se próximos do circuito chaveador impedindo a radiação de ruído pela trilha, e os indutores para emissão conduzida logo na entrada do circuito impedindo a saída do ruído conduzido para a rede elétrica. Além disso as especificações corretas dos componentes utilizados são de suma importância para a sua correta atuação.

## ANEXO A – DATASHEET MP2459



# MP2459

0.5A, 55V, 480kHz  
Step-Down Converter in a TSOT23-6

## DESCRIPTION

The MP2459 is a monolithic, step-down, switch-mode converter with a built-in power MOSFET. It achieves a 0.5A peak-output current over a wide input supply range with excellent load and line regulation. Current-mode operation provides a fast transient response and eases loop stabilization. Fault condition protections include cycle-by-cycle current limiting and thermal shutdown.

The MP2459 requires a minimal number of readily-available external components. The MP2459 is available in a TSOT23-6 package.

## FEATURES

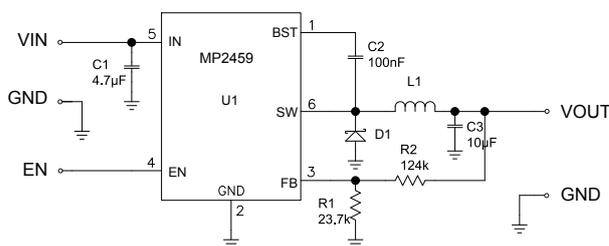
- 0.5A Peak Output Current
- 1 $\Omega$  Internal Power MOSFET
- Stable with Low-ESR Ceramic Output Capacitors
- Up to 90% Efficiency
- 0.1 $\mu$ A Shutdown Mode
- Fixed 480kHz Frequency
- Thermal Shutdown
- Cycle-by-Cycle Over-Current Protection
- Wide 4.5V-to-55V Operating Input Range
- Output Adjustable from 0.81V to 0.95\* $V_{IN}$
- Available in a TSOT23-6 Package

## APPLICATIONS

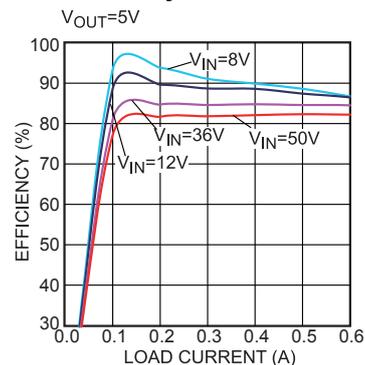
- Power Meters
- Distributed Power Systems
- Battery Chargers
- Pre-Regulator for Linear Regulators
- WLED Drivers

All MPS parts are lead-free and adhere to the RoHS directive. For MPS green status, please visit MPS website under Products, Quality Assurance page. "MPS" and "The Future of Analog IC Technology" are registered trademarks of Monolithic Power Systems, Inc.

## TYPICAL APPLICATION



### Efficiency vs. Load Current

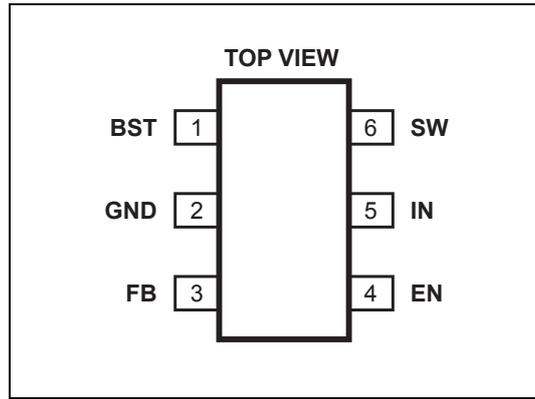


**ORDERING INFORMATION**

Part Number*	Package	Top Marking
MP2459GJ	TSOT23-6	AEQ

\* For Tape & Reel, add suffix -Z (eg. M2459GJ-Z);

**PACKAGE REFERENCE**



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS <sup>(1)</sup>**

Supply Voltage $V_{IN}$ .....	-0.3V to 60V
$V_{SW}$ .....	-0.3V to $V_{IN}+0.3V$
$V_{BS}$ .....	$V_{SW} + 6V$
All Other Pins .....	-0.3V to +6V
Continuous Power Dissipation ( $T_A = +25^{\circ}C$ ) <sup>(2)</sup>	
TSOT23-6 .....	0.568W
Junction Temperature .....	150°C
Lead Temperature .....	260°C
Storage Temperature .....	-65°C to +150°C

**Recommended Operating Conditions <sup>(3)</sup>**

Supply Voltage $V_{IN}$ .....	4.5V to 55V
Output Voltage $V_{OUT}$ .....	0.81V to $0.95 \times V_{IN}$
Operating Junction Temp .....	-40°C to +125°C

<b>Thermal Resistance <sup>(4)</sup></b>	$\theta_{JA}$	$\theta_{JC}$
TSOT23-6 .....	220	110 °C/W

**Notes:**

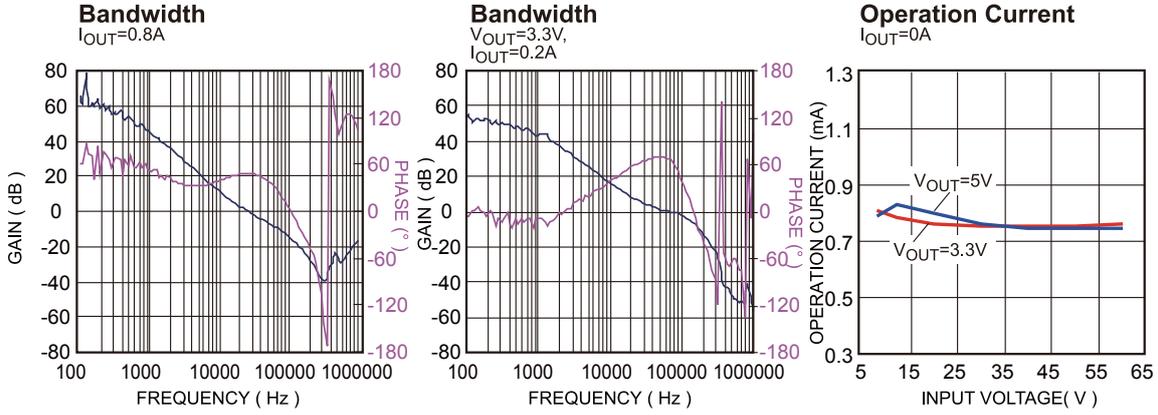
- 1) Exceeding these ratings may damage the device.
- 2) The maximum allowable power dissipation is a function of the maximum junction temperature  $T_j(MAX)$ , the junction-to-ambient thermal resistance  $\theta_{JA}$ , and the ambient temperature  $T_A$ . The maximum allowable continuous power dissipation at any ambient temperature is calculated by  $P_D(MAX) = (T_j(MAX) - T_A) / \theta_{JA}$ . Exceeding the maximum allowable power dissipation will cause excessive die temperature, and the regulator will go into thermal shutdown. Internal thermal shutdown circuitry protects the device from permanent damage.
- 3) The device function is not guaranteed outside of the recommended operating conditions.
- 4) Measured on JESD51-7, 4-layer PCB..

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**
 **$V_{IN} = 12V$ ,  $T_A = +25^{\circ}C$ , unless otherwise noted.**

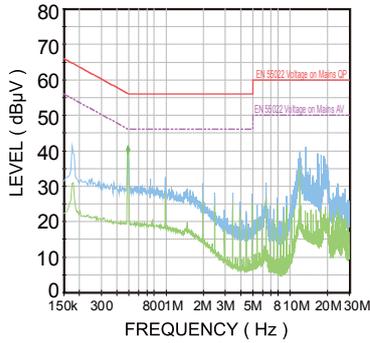
Parameters	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Feedback Voltage	$V_{FB}$	$4.5V \leq V_{IN} \leq 55V$	0.792	0.812	0.832	V
Feedback Current	$I_{FB}$	$V_{FB} = 0.85V$			0.1	$\mu A$
Switch-On Resistance	$R_{DS(ON)}$			1		$\Omega$
Switch Leakage	$I_{SW\_LKG}$	$V_{EN} = 0V, V_{SW} = 0V$			1	$\mu A$
Current Limit	$I_{LIM}$		1.0	1.25	1.5	A
Oscillator Frequency	$f_{SW}$	$V_{FB} = 0.6V$	380	480	580	kHz
Foldback Frequency	$f_{SW\_F}$	$V_{FB} = 0V$		150		kHz
Maximum Duty Cycle	$D_{MAX}$	$V_{FB} = 0.6V$	90	93.5		%
Minimum ON-Time	$t_{ON}$			100		ns
Under-Voltage Lockout Threshold, Rising	$V_{UVLO\_R}$		2.9	3.3	3.7	V
Under-Voltage Lockout Threshold, Falling	$V_{UVLO\_F}$		2.65	3.05	3.45	V
Under-Voltage Lockout Threshold, Hysteresis	$V_{UVLO\_HYS}$			250		mV
EN Threshold, Rising	$V_{EN\_R}$			1.35		V
EN Threshold, Falling	$V_{EN\_F}$			1.17		V
EN Threshold, Hysteresis	$V_{EN\_HYS}$			180		mV
EN Input Current	$I_{EN}$	$V_{EN} = 2V$		3.1		$\mu A$
		$V_{EN} = 0V$		0.1		
Supply Current (Shutdown)	$I_S$	$V_{EN} = 0V$		0.1	1.0	$\mu A$
Supply Current (Quiescent)	$I_Q$	$V_{EN} = 2V, V_{FB} = 1V$		0.73	0.85	mA
Thermal Shutdown	$T_{SD}$			165		$^{\circ}C$
Thermal Shutdown Hysteresis	$T_{SD\_HYS}$			20		$^{\circ}C$

### TYPICAL CHARACTERISTICS

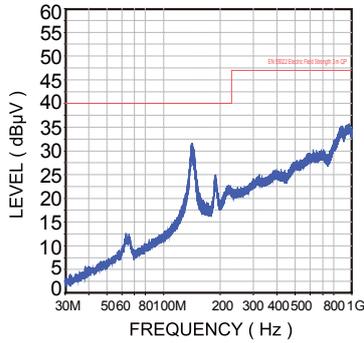
$V_{IN}=12V$ ,  $V_{OUT}=5V$ ,  $I_{OUT}=0.5A$ ,  $L=15\mu H$ ,  $T_A=25^\circ C$ , unless otherwise noted.

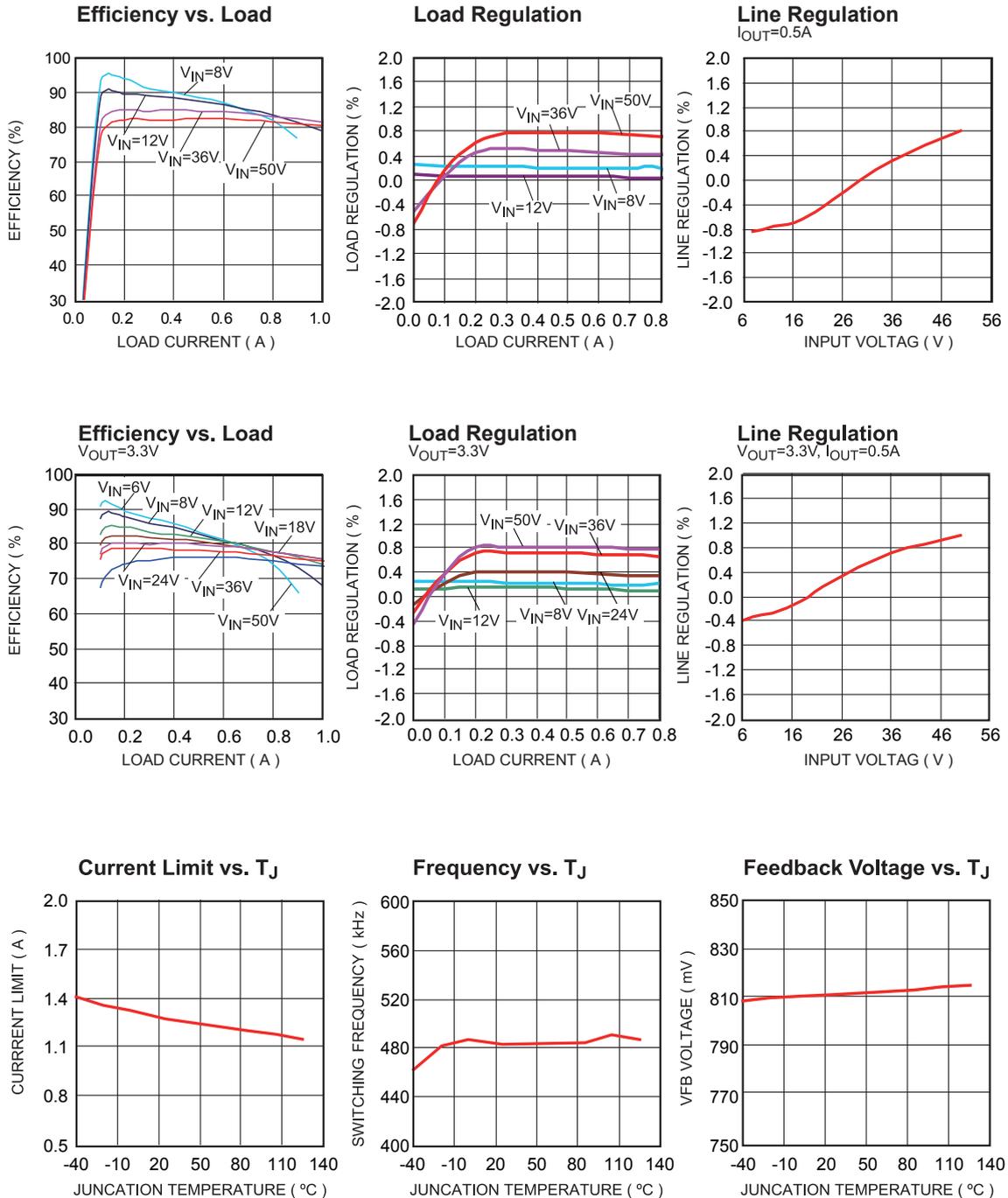


### Conduction EMI

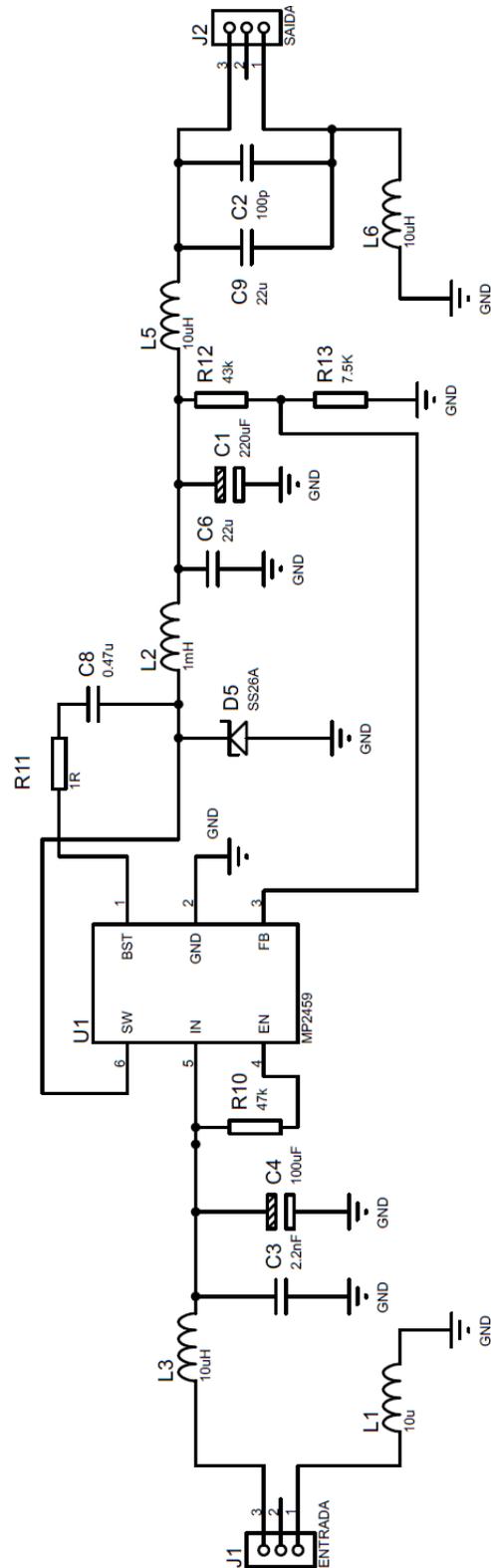


### Radiation EMI

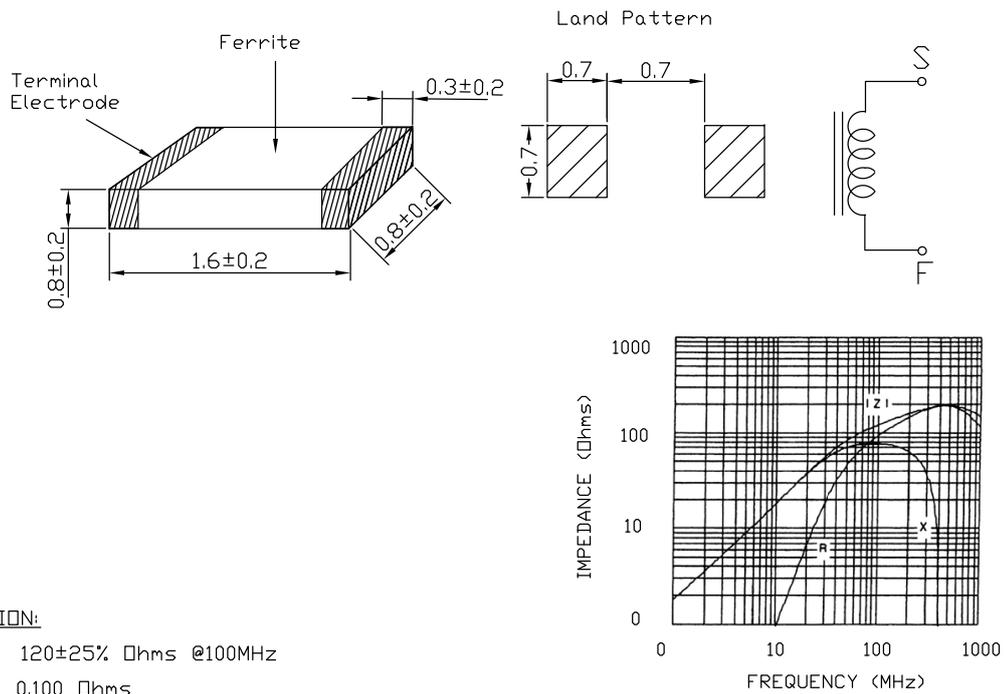


**TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS**
 $V_{IN}=12V$ ,  $V_{OUT}=5V$ ,  $L=22\mu H$ ,  $T_A=25^\circ C$ , unless otherwise noted.


## ANEXO B - ESQUEMA ELÉTRICO



ANEXO C – BEAD ECI160808U121T



**SPECIFICATION:**

Impedance: 120±25% Ohms @100MHz

DCR(max): 0.100 Ohms

IDC(max): 2.0 A

NOTES:  
-This Product is RoHS Compliant.

GENERAL TOLERANCES (UNLESS SPECIFIED)				TITLE: MULTILAYER CHIP BEADS			PART NO: ECI160808U121T				
.X = ±0.40mm	A.2	02-08-2012	ES		APPROVED BY	CHECKED BY	DRAWN BY	UNIT	MM	SCALE	NONE
.XX = ±0.25mm	A.1	05-02-2006	GFS		YKC	JL	GFS	SHEET	1	OF	1
.XXX = ±0.10mm	A	04-12-2006	GFS								
ANGULAR ±3°	REV	DATE	SIGN		TRIGON COMPONENTS, INC. www.trigoncomponents.com						

## ANEXO D – INDUTOR ILF0410K101TA1



DATE: 2015.06.23

## SPECIFICATION FOR APPROVAL

DESCRIPTION : Fixed Inductors \_\_\_\_\_  
 CUSTOMER P/N : \_\_\_\_\_  
 TRIGON PT/NO : ILF0410K101TA1 \_\_\_\_\_  
 TRG SAMPLE NO : \_\_\_\_\_  
 CUSTOMER : \_\_\_\_\_

## SPECIFICATION ACCEPTED BY:

COMPONENT ENGINEER	
ELECTRICAL ENGINEER	
MECHANICAL ENGINEER	
SAFETY	
APPROVED	

**Trigon USA**

939 Mariner St.Brea  
 CA 92821 USA  
 Phone:+1-714-990-1367  
 Fax:+1-714-990-1459

**Trigon China Factory**

No.551.Ju Jin Road,Zhangpu,Kunshan,China  
 Phone:+86-0512-5517-3688  
 Fax:+86-0512-5517-3788

**Trigon Taiwan**

5F,No.37,lane221,Gang Qian Road  
 Nei-Hu,Taipei,Taiwan Area Code 114  
 Phone:+886-2-2657-6216  
 Fax:+886-2-2657-5296

**Trigon Dongguan**

No.9-10  
 Leyuan Road , Sukang,Changping  
 Dongguan, guangdong, China  
 Phone:+86-0769-81188289  
 Fax:+86-0769-81188799

**Trigon Shanghai**

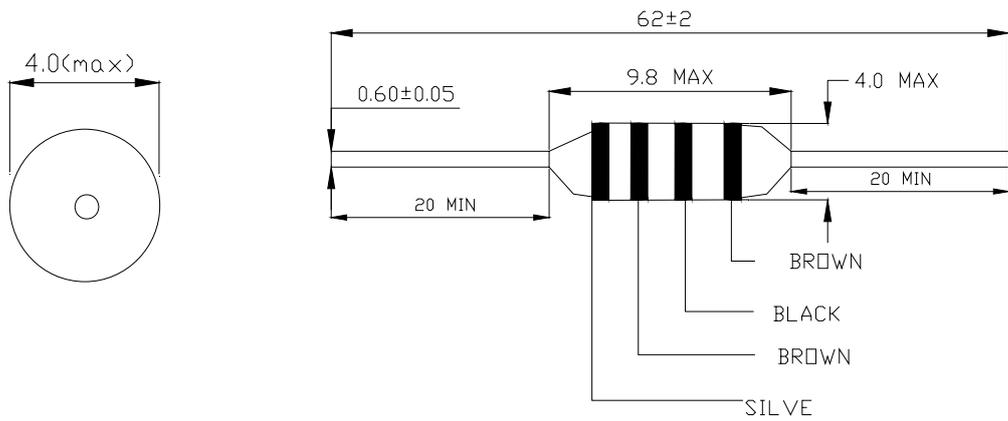
Room 101, No.169, Block A, Tai Gu Road  
 Waigaoqiao Free Trade Zone,Shanghai,China  
 Phone:+86-021- 52372201

DRAWN BY:	CHECKED BY:
Jacky	Louis

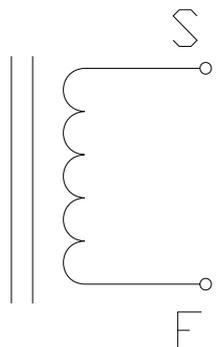
# SPECIFICATION FOR APPROVAL

TRG PT/NO: ILF0410K101TA1

## 1. CONFIGURATION & DIMENSIONS (mm):



## 2. SCHEMATIC:





## REFERÊNCIAS

ALECRIM, E. **Tecnologia SCSI**. 2012. Disponível em: <<https://www.infowester.com/scsi.php#scsi>>. Acesso em: 15 de setembro de 2019.

ANATEL. **Atribuição de faixas de frequências no Brasil**. 2014. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=314474&assuntoPublicacao=null&caminhoRel=null&filtro=1&documentoPath=314474.pdf>>. Acesso em: 25 de agosto de 2019.

ANATEL. **Apresentação**. 2018. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/setorregulado/apresentacao-certificacao>>. Acesso em: 11 de maio de 2019.

ANATEL. **Ato nº 1120, de 19 de fevereiro de 2018**. 2018. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/es/atos-de-requisitos-tecnicos-de-certificacao/2018/1181-ato-1120#item2.1.3>>. Acesso em: 11 de maio de 2019.

ANJOS, A. F. dos. **Ruídos e filtros de modos comum e diferencial**. 2019. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/ruidos-e-filtros-de-modos-comum-e-diferencial/>>. Acesso em: 6 de outubro de 2019.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução a Análise de circuitos**. 12. ed. [S.l.]: Pearson, 2012. ISBN 978-85-64574-20-5.

BRAGA, I. N. C. **Como funcionam os Circuitos Ressonantes**. s.d. Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/telecom/6297-tel095>>. Acesso em: 1 de outubro de 2019.

BRAGA, I. N. C. **Como funcionam os toroides**. s.d. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/4097-art560>>. Acesso em: 5 de outubro de 2019.

BRAGA, I. N. C. **Conversores DC/DCs**. S.d. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/electronica/52-artigos-diversos/9987-conversores-dc-dc-art1169a>>. Acesso em: 10 de outubro de 2019.

BRAGA, I. N. C. **Galvanômetro experimental**. s.d. Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/blog/projetos-educacionais/4023-art546.html>>. Acesso em: 13 de maio de 2019.

BRAGA, I. N. C. **O que você precisa saber sobre Montagens SMD**. s.d. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/astrofisica-e-astronomia/52-artigos-tecnicos/artigos-diversos/4114-art561>>. Acesso em: 1 de outubro de 2019.

BURRIS, M. **Inductors - Types of Inductors**. 2019. Disponível em: <<https://www.lifewire.com/types-of-inductors-818826>>. Acesso em: 6 de outubro de 2019.

CHRISTOPOULOS, C. **Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2007. ISBN 978-0-8493-7035-9.

COM-POWER. **LISN 20 Amps for CISPR 16 e ANSI C63.4**. S.d. Disponível em: <[https://www.com-power.com/LIN-120A\\_lisn.html](https://www.com-power.com/LIN-120A_lisn.html)>. Acesso em: 20 de outubro de 2019.

CUNHA, A. **O que é Decibel**. 2016. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/o-que-e-decibel/>>. Acesso em: 07 de setembro de 2019.

DAGOSTIM, D. **APERFEIÇOAMENTO DE LAYOUT DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO COM TÉCNICAS DE INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA EMBARCADOS**. [S.l.]: UNISUL, 2018.

DASH, G. **How RF Anechoic Chambers Work**. [S.l.], 2005. Disponível em: <[www.glendash.com/Dash\\_of\\_EMCAnechoic\\_Chambers/Anechoic\\_Chambers.pdf](http://www.glendash.com/Dash_of_EMCAnechoic_Chambers/Anechoic_Chambers.pdf)>. Acesso em: 11 de maio de 2019.

DEVICES, A.; ZUMBAHLEN, H. **Linear Circuit Design Handbook**. 1. ed. [S.l.]: Newnes, 2011. ISBN 978-0-7506-8703-4.

DIGI-KEY. **Common Mode Power-Line Chokes**. 2016. Disponível em: <<https://www.digikey.com/en/product-highlight/w/wurth-electronics/common-mode-power-line-chokes>>. Acesso em: 6 de outubro de 2019.

DIGI-KEY. **MP2459GJ-P**. S.d. Disponível em: <<https://www.digikey.com/product-detail/en/monolithic-power-systems-inc/MP2459GJ-P/1589-1121-1-ND/5298208>>. Acesso em: 26 de Setembro de 2020.

ELDORADO. **Câmara Semi Anecoica**. 2019. Disponível em: <[https://www.eldorado.org.br/dt\\_gallery/eldorado/attachment/camara-semiaecoica-2/](https://www.eldorado.org.br/dt_gallery/eldorado/attachment/camara-semiaecoica-2/)>. Acesso em: 18 de outubro de 2019.

ELDORADO. **EMC - Compatibilidade Eletromagnética**. s.d. Disponível em: <<https://www.eldorado.org.br/laboratorios/area-atuacao/emc/>>. Acesso em: 11 de maio de 2019.

ELECTRONICS, S. **What is insertion loss?** S.d. Disponível em: <<https://standexelectronics.com/resources/faq/insertion-loss/>>. Acesso em: 20 de Setembro de 2020.

ELÉTRICA, M. **Tipos de capacitores**. S.d. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/tipos-de-capacitores/>>. Acesso em: 15 de novembro de 2019.

FLEISCH, D. **A Student's Guide to Maxwell's Equations**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-511-39308-2.

FLEISCH, D.; KINNAMAN, L. **A student's Guide to Waves**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015. ISBN 9781107643260.

HEDRICH, J. **PCB design for low-EMI DC/DC converters**. S.d. Disponível em: <<https://www.monolithicpower.com/en/pcb-design-for-low-emi-dc-dc-converters>>. Acesso em: 10 de outubro de 2019.

HYPHERPHYSICS. **Solenoid**. s.d. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html>>. Acesso em: 16 de julho de 2019.

JOHNSON, H.; GRAHAM, M. **High Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic**. 1. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1993. ISBN 978-0133957242.

JR., W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. [S.l.]: AMGH, 2013. ISBN 978-85-8055-154-9.

- KEIM, R. **What Is Mutual Inductance? A Guide for Circuit Designers**. 2018. Disponível em: <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-circuit-designers-guide-to-mutual-inductance/>>. Acesso em: 9 de outubro de 2019.
- KHANDPUR, R. S. **Printed Circuit Boards: Design, Fabrication and Assembly**. 1. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2005. ISBN 978-0-071-46420-8.
- LEACH, M. A. **Electronic systems failures and anomalies attributed to electromagnetic interference**. Washington, United States, 1995. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19960009442>>.
- Learn EMC . **Introduction to EMC**. 2019. Disponível em: <<https://learnemc.com/introduction-to-emc>>. Acesso em: 11 de maio de 2019.
- LECOQ, X. **EMI/EMC and Co-existence simulation methodology for high performance digital, mixed signal and RF wireless product**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.ansys.com/resource-library/application-brief/emi-emc-co-existence-sim-methodology-hpc>>. Acesso em: 14 de setembro de 2019.
- LEE, D. W.; LI, L.; WANG, S. X. **Embedded Integrated Inductors With A Single Layer Magnetic Core: A realistic option**. PWR SOC, 2008. Disponível em: <<https://docplayer.net/21424348-Embedded-integrated-inductors-with-a-single-layer-magnetic-core-a-realistic-option.html>>. Acesso em: 20 de Setembro de 2020.
- LIN, K. **PCB Grounding Techniques**. 2014. Disponível em: <[https://www.pcbway.com/blog/Engineering\\_Technical/PCB\\_Grounding\\_Techniques.html](https://www.pcbway.com/blog/Engineering_Technical/PCB_Grounding_Techniques.html)>. Acesso em: 15 de setembro de 2019.
- MAGMATTEC. **Indutores**. s.d. Disponível em: <<https://www.magmattec.com.br/indutores>>. Acesso em: 1 de outubro de 2019.
- MALVINO, D. J. B. A. **Eletrônica**. 7. ed. [S.l.]: AMGH, 2008. ISBN 978-85-8055-003-0.
- MATTOS, M. A. **Introdução a Compatibilidade Eletromagnética**. Edição do kindle. [S.l.]: SpdaTerra, 2016.
- MCLYMAN, C. **Transformer and Inductor Design Handbook**. 3. ed. [S.l.]: Taylor & Francis, 2004. (Electrical Engineering and Electronics Series). ISBN 9780824751159.
- MONTROSE, M. I. **EMC and the Printed Circuit Board: Desing, Theory and Layout Made Simple**. 1. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 1998. ISBN 978-0780347038.
- MONTROSE, M. I. **Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance**. 2. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2000. ISBN 978-0-780-35376-3.
- MPS. **MP2459**: Step-down converter in a tsot23-6. 2014. Disponível em: <[https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document\\_type/Datasheet/lang/en/sku/MP2459/](https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP2459/)>. Acesso em: 26 de Setembro de 2020.
- Museu das telecomunicações. **História das Telecomunicações**. 2016. Disponível em: <<http://museudastelecomunicacoes.org.br/historia-das-telecomunicacoes>>. Acesso em: 11 de maio de 2019.

NIKNEJAD, A. M. **Electromagnetics for High-Speed Analog and Digital Communication Circuits**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-85350-7.

NOTAROS, B. M. **Eletromagnetismo**. 1. ed. [S.l.]: Pearson, 2012. ISBN 978-85-64574-26-7.

OLIVEIRA, N. A. de. **Eletromagnetismo: Teoria e aplicação**. 1. ed. [S.l.]: LTC, 2019. ISBN 978-85-216-3575-8.

OTT, H. W. **Noise Reduction Techniques In Electronic Systems**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 1988. ISBN 0-471-85068-3.

PAUL, C. R. **Introduction to Eletromagnétic Compatibility**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 2006. ISBN 978-0-471-75500-5.

PEREIRA, A. P. **O que é USB?** 2008. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/usb/211-o-que-e-usb-.htm>>. Acesso em: 16 de setembro de 2019.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2 e-book. ed. Feevale, 2013. Disponível em: <<https://www.feevale.br/institucional/editora-feevale/metodologia-do-trabalho-cientifico---2-edicao>>. Acesso em: 02 de Abril de 2019.

REFINERS, A. **History Of The Printed Circuit Board**. 2016. Disponível em: <<http://www.awarefiners.co.uk/news/news-and-information/history-of-the-printed-circuit-board>>. Acesso em: 10 de setembro de 2019.

ROHM. **What is a DC-DC Converter?** S.d. Disponível em: <<https://www.rohm.com/electronics-basics/dc-dc-converters/what-is-dc-dc-converter>>. Acesso em: 24 de Setembro de 2020.

SACCO, F. **10 mandamentos da PCB**. 2015. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/10-mandamentos-da-pcb/>>. Acesso em: 15 de setembro de 2019.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3. ed. [S.l.]: Bookman, 2004. ISBN 8536302755.

SARMENTO. **Propagação Ionosférica**. S.d. Disponível em: <<http://www.sarmiento.eng.br/Propagacao.htm>>. Acesso em: 23 de julho de 2019.

SIGNIFICADOS. **O que é Wi-Fi**. 2018. Disponível em: <<https://www.significados.com.br/wi-fi/>>. Acesso em: 18 de julho de 2019.

SILVA, C. E. D. et al. **Eletromagnetismo: Fundamentos e simulações**. 1. ed. [S.l.]: Pearson, 2014. ISBN 978-85-430-0111-1.

TDK. **Influence of Distributed Capacitance on Inductors for High-frequency Applications**. s.d. Disponível em: <[https://product.tdk.com/info/en/techlibrary/archives/techjournal/vol04\\_mlg/contents06.html](https://product.tdk.com/info/en/techlibrary/archives/techjournal/vol04_mlg/contents06.html)>. Acesso em: 1 de outubro de 2019.

TECHNOLOGY, E. **Types of Inductors and Their Applications**. s.d. Disponível em: <<https://www.electricaltechnology.org/2019/07/types-of-inductors.html>>. Acesso em: 1 de outubro de 2019.

TECHTERMS. **I/O Definition**. S.d. Disponível em: <<https://techterms.com/definition/io>>. Acesso em: 15 de setembro de 2019.

TELECO. **Frequências para celular no Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://www.teleco.com.br/areasc.asp>>. Acesso em: 25 de agosto de 2019.

TESEQ. **GTEM 1500 - GTEM Cell for Emissions and Immunity Testing**. s.d. Disponível em: <<https://www.teseq.com/products/GTEM-1500.php/>>. Acesso em: 11 de maio de 2019.

UHER, R.; ZEDNICEK, T. **Ultrathin Discrete Capacitors for Emerging Embedded Technology**. AVX, 2014. Disponível em: <[https://www.avx.com/docs/techinfo/Ultrathin\\_Discrete\\_Capacitors\\_for\\_Emerging\\_Embedded\\_Technology.pdf](https://www.avx.com/docs/techinfo/Ultrathin_Discrete_Capacitors_for_Emerging_Embedded_Technology.pdf)>. Acesso em: 13 de outubro de 2019.

WATELECTRONICS. **Electrical and Electronic Components in Electronics and Electrical Projects**. 2019. Disponível em: <<https://www.watelectronics.com/major-electrical-electronic-components/>>. Acesso em: 8 de outubro de 2019.

WEB, T. **Basics of EMC: What is crosstalk?** 2018. Disponível em: <<https://micro.rohm.com/en/techweb/knowledge/emc/s-emc/01-s-emc/6943>>. Acesso em: 15 de setembro de 2019.

WESTON, D. A. **Electromagnetic Compatibility: Methods, analysis, circuits, and measurement**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2016. ISBN 978-1482299502.

WILLIAMS, T. **EMC for Product Designers**. 3. ed. [S.l.]: Newnes, 2001. ISBN 0750649305.