UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

DANIEL DAGOSTIM

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: APERFEIÇOAMENTO DE *LAYOUT* DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO COM TÉCNICAS DE INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA EMBARCADOS

Palhoça

2018

DANIEL DAGOSTIM

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: APERFEIÇOAMENTO DE *LAYOUT* DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO COM TÉCNICAS DE INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA EMBARCADOS

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

Orientador: Esp. Fábio Ignácio Rosa.

Palhoça

2018

DANIEL DAGOSTIM

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:
APERFEIÇOAMENTO DE *LAYOUT* DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO COM TÉCNICAS DE INDUTORES E CAPACITORES EMBARCADOS

Palhoça, de julho de 2018.

Professor e orientador Fábio Ignácio Rosa, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Professor Thiago Felski Pereira, Msc.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Filipe Gonçalves Teixeira, Tecg.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS por tudo que tenho na minha vida.

Agradeço a meus pais, Nilson e Conceição, que nunca tiveram grandes estudos, mas sempre souberam da importância que a educação deveria ter nas vidas de seus filhos, e por isso desde muito cedo, sempre incentivaram que nos dedicássemos a fazer nosso melhor enquanto alunos. Agradeço também às minhas irmãs, Cristina, Camila, Marina e Jussara, por serem inspiração de caráter e honestidade. Agradeço à minha noiva, Amanda, por ser alguém que apenas veio para agregar na minha vida, me fazendo muito bem e me inspirando a alçar voos ainda mais altos.

Agradeço aos amigos e familiares pela compreensão por toda ausência no período de dedicação na formação acadêmica, bem como todo o apoio que foi dado quando necessário.

Agradeço também, ao meu professor orientador, que com toda a paciência soube me ouvir e guiar ao longo deste semestre para que este trabalho fosse executado com qualidade. Também aproveito para agradecer a professora Sheila, e membros da banca, pela disponibilidade sempre que solicitados.

Agradeço por fim a todas empresas onde trabalhei, e instituições onde estudei, nas pessoas, de Filipe Gonçalves Teixeira e Lucas Groposo Silveira, que para mim são exemplos vivos do que a palavra engenheiro significa, na sua mais pura essência: inteligência, habilidade e inventividade. Agradeço a eles de maneira especial pois através do exemplo me inspiraram a seguir nesse caminho, e superar tantos obstáculos.

RESUMO

O olhar na história da evolução da eletrônica mostra que com o passar dos anos o desenvolvimento avassalador da tecnologia, tem trazido avanços nos campos mais distintos, e criado ferramentas que tem contribuído muito para a evolução da humanidade. Dia após dia acompanhamos a evolução de tudo ao nosso redor, e sabemos que a eletrônica tem fundamental importância nesse processo. Nesse contexto, pode-se dizer que as placas de circuito impresso andam lado a lado seguindo a evolução da eletrônica pois ambas trabalham juntas.

Dessa forma, a ideia de realizar um estudo que abrangesse o *layout* das placas circuito impresso e as técnicas que podem impulsionar ainda mais avanços nessa área, motivou este trabalho, que tem como cerne explorar o design para *layout* de placas, ao passo que mostra o que está sendo pesquisado e desenvolvido acerca dos componentes embarcados, para poder explicar seu funcionamento e também mostrar o que pode se esperar dessa nova tecnologia ascendente.

O estudo poderá ser tomado como introdução a novas pesquisas, ao passo também que poderá mostrar quais ações poderão ser tomadas em virtude de se obter mais conhecimento nessa área, tanto dentro quanto fora do Brasil, para otimização dos circuitos e economia na produção.

Palavras-chave: Eletrônica. Placas de circuito impresso. Embarcados.

ABSTRACT

The quick look at the evolutionary history of electronics shows that the huge technological development has brought improvements in different fields, and it has created tools that have contributed to the human evolution by the years. We closely follow the evolution around us day by day and we know that electronics have a fundamental importance on this process. From this context, we are able to say that the printed circuit boards walk side by side to the electronics by following its growing, because of both of them work together.

Thus, the idea of starting to study about the layout of the printed circuit boards and their techniques that can boost even more enhancements in this area has motivated this work, which has its main core, the exploration of boards layout design, while it reveals all that has already been researched and developed about the embedded components, in order to explain how it works and also what we can expect from this ascendant technology.

Perhaps this study will be taken as an introduction for further researches, or maybe it will also be pointing out the next actions to be taken due to get more knowledge on this area, inside or outside Brazil, in behalf of optimizing circuitry and production economy.

Keywords: Electronics. Printed circuit boards. Embedded.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regra da mão direita de Ampère 24
Figura 2 – Experimento de Faraday 24
Figura 3 – Interferência entre sistemas 27
Figura 4 – Interferência intra-sistemas em PCI 28
Figura 5 – Problemas relacionados à tensão elétrica 31
Figura 6 – Comprimento de onda 32
Figura 7 – Antena dipolo meia onda 33
Figura 8 – Onda eletromagnética 35
Figura 9 – Placa de aplicação típica e caminhos de fontes de ruído 40
Figura 10 – Ruído de modo-comum (CM) e de modo-diferencial (DM) 41
Figura 11– Portadoras do sinal e referência para geração de *crosstalk* 42
Figura 12 – Linhas de campo em um capacitor 44
Figura 13 – Capacitor de placas paralelas 46
Figura 14 – Capacitor cilíndrico 48
Figura 15 – Capacitor esférico 49
Figura 16 – Linhas de campo em um Indutor 51
Figura 17 - Placa face simples (a). Face dupla (b). Placa flexível (c) 56
Figura 18 – Exemplo de placa multicamadas com 6 camadas 56
Figura 19 - Fluxograma simplificado das etapas de fabricação de uma PCI 57
Figura 20 – Impressora Plotter 57
Figura 21 – Banho em solução alcalina 58
Figura 22 – Furadeira à broca 59
Figura 23 - Máquina para deposição de cobre eletrolítica 60
Figura 24 – *Pads* já cobertos com pasta de solda (em prata), máscara de solda (em verde) e serigrafia (em branco) 61
Figura 25 – Etapas do projeto de uma PCI 65
Figura 26 – *Microstrip* balanceada (a) e não balanceada (b) 66
Figura 27 – *Stripline*. 67
Figura 28 - Formação do capacitor embarcado confeccionado na PCI. Malha de sinal (a), Malha de Terra (b), e dielétrico (transparente na imagem) entre as duas. 70
Figura 29 - Componente embarcado estrutura de montagem 71
Figura 30 – Indutor Toroidal Embarcado para alta potência 72

Figura 31- Filtro EMC embarcado em PCI (b), em comparação com indutor discreto (a).....73
Figura 32 - Gráfico de comparação para eficiência x corrente para o indutor LTCC (a), e o indutor embarcado em Núcleo de Flocos de metal (b).....74
Figura 33 - Camada superior (a) e camada do plano de Terra (b).....76
Figura 34 - Distância dos furos para a borda.....76
Figura 35 - Empilhamento de camadas com capacitor embarcado 77
Figura 36 - Comparação entre capacitor soldado (a) e capacitor embarcado (b).....78
Figura 37 - Formação dos indutores com diferentes estruturas.....79
Figura 38 - Estrutura indutor embarcado em placa de circuito Regulador de Tensão. 79
Figura 39 - Placa do circuito Regulador de Tensão com Indutores (embarcados) e capacitores comuns.....80
Figura 40 - Aplicação do capacitor embarcado em microfone MEMS da 3M.....81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de espectro de rádio frequências 34
Tabela 2 – Elementos de um ambiente EMC 38
Tabela 3 – Diferentes tipos de indutores e respectivas equações para indutância 54
Tabela 4 – Características materiais dielétricos 63
Tabela 5 - Dimensões dos componentes segundo EIA. 70
Tabela 6 - Comparativo dielétricos para capacitores embarcados 75
Tabela 7 - Comparação componente discreto e embarcado 82

SUMÁRIO

RESUMO **6**
ABSTRACT **7**
LISTA DE FIGURAS **8**
LISTA DE TABELAS **10**
1 INTRODUÇÃO **12**
1.1 JUSTIFICATIVA 16
1.2 DELIMITAÇÕES 17
1.3 OBJETIVOS 17
1.3.1 Objetivo Geral **17**
1.3.2 Objetivos Específicos **17**
1.4 METODOLOGIA 18
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO 18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **20**
2.1 ELETROMAGNETISMO, EMI E EMC 20
2.1.1 Eletromagnetismo **20**
2.1.2 EMI **26**
2.1.2.1 Fontes de EMI 27
2.1.2.2 Fatores que impactam a interferência eletromagnética 29
2.1.2.2.1 Tensão elétrica *29*
2.1.2.2.2 Frequência de sinal *31*
2.1.2.3 Outros Fatores envolvidos em circuitos eletrônicos 35
2.1.3 EMC **37**
2.1.3.1 Fontes de interferência 39
2.1.3.2 Caminhos de propagação 40
2.1.3.3 Receptor da interferência 43
2.2 CAPACITORES E INDUTORES 43
2.2.1 Capacitores **43**
2.2.1.1 Tipos de capacitores 45
2.2.1.1.1 Capacitor de placas paralelas *45*
2.2.1.1.2 Capacitor Cilíndrico *47*
2.2.1.1.3 Capacitor esférico *49*
2.2.1.2 Capacitância com dielétrico 50

2.2.2 Indutores 51
2.2.2.1 Autoindução 52
2.2.2.2 Tipos de indutores 53
2.3 PCI – O SURGIMENTO DOS COMPONENTES EMBARCADOS 55
2.3.1 Fabricação da placa de circuito impresso 55
2.3.1.1 Impressão dos filmes 57
2.3.1.2 Criação das camadas internas 58
2.3.1.3 Laminação 59
2.3.1.4 Deposição do Cobre 59
2.3.1.5 Máscara de solda 60
2.3.2 Materiais para a composição da PCI 61
***2.3.3 Layout* 64**
2.3.3.1 Altium 64
2.3.3.2 *Microstrip* 65
2.3.3.3 *Stripline* 66
2.3.3.4 Prevenção aos problemas de compatibilidade 67
2.3.3.4.1 Componentes embarcados 67
3 DESENVOLVIMENTO 69
3.1 DIFERENÇAS ENTRE COMPONENTES EMBARCADOS 69
3.1.1 Componentes embarcados dentro da placa e componentes confeccionados diretamente na placa 69
3.1.2 Componentes para alta frequência e baixa frequência 71
3.2 IMPLEMENTAÇÃO DE COMPONENTES EMBARCADOS CONFECCIONADOS NA PLACA 74
3.2.1 Capacitores 74
3.2.2 Indutores 78
3.3 COMBATE AOS PROBLEMAS DE EMC COM OS COMPONENTES EMBARCADOS 80
3.3.1 Vantagens dos Indutores 80
3.3.2 Vantagens dos capacitores 81
4 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO DESENVOLVIMENTO DOS COMPONENTES EMBARCADOS 82
4.1 A REALIDADE ATUAL DO DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES EMBARCADOS 82

5 CONCLUSÃO 84
REFERÊNCIAS 85

1 INTRODUÇÃO

No início do século XX, as montagens eletrônicas eram feitas com ligações diretas entre os componentes (pino a pino), através de fios e cabos, de maneira que os circuitos eram extremamente voláteis, e sujeitos a falhas (CONDON et al., 1948). Com o desenvolver da própria eletrônica e a necessidade de circuitos mais complexos, deu-se início a um processo natural do desenvolvimento das montagens, pois havia a demanda por uma maior robustez, e também por uma montagem mais automatizada, sendo que os principais incentivadores e patrocinadores das pesquisa nessa área, foram as indústrias de telecomunicação e rádio, que queriam um processo de montagem que economizasse trabalho braçal, e estavam dispostas a investir seu dinheiro nessa pesquisa, como afirma Eisler (1989, p.20-21, tradução nossa):

> Muito antes da primeira Guerra mundial, uma indústria de telecomunicações existia nos estados desenvolvidos da Europa e nos Estados Unidos, e circuitos bem complexos eram produzidos em massa naquela indústria. Além disso, havia uma indústria do rádio, que também tinha uma produção em massa de circuitos elétricos complexos, desde os anos 1920. Ambas indústrias, se interessariam em adotar um método de produção de circuito baseado em processo semiautomático de impressão, ao invés de ter eles interligados por trabalho manual. As duas indústrias continham muitas filiais, grandes e pequenas, todas pedindo atitudes progressivas, todas em competição com ofertas de dinheiro, presumivelmente interessadas, portanto, em tecnologias para economizar mão de obra.

As primeiras placas eram genéricas, contendo furação igual para todos os componentes, e com ligações ainda em solda, feitas à mão. Porém em 1936, com o objetivo de criar uma placa de circuito onde as trilhas de material condutor que ligassem os componentes ficassem sobrepostas à placa por impressão, o engenheiro Austríaco Paul Eisler (1907-1995), que foi um dos maiores estudiosos nessa área, montou seu primeiro rádio usando esse processo (EISLER, 1989). Processo esse, que viria a se desenvolver nos anos seguintes, entrando para as indústrias, e se disseminando nos equipamentos usados durante a segunda guerra mundial, muitos deles em instrumentação aérea onde a confiabilidade do sistema é vital, e os circuitos eletrônicos ficam gravemente expostos às intempéries como vento forte e baixas temperaturas.

As placas de circuito impresso (PCIs) exercem um importante papel dentro dos equipamentos eletrônicos. Dispostas sobre uma camada de material dielétrico, existem várias trilhas de material condutor, por onde passa uma corrente elétrica, permitindo assim a interligação dos componentes e propiciando a execução das funções as quais são designados, de tal forma que os circuitos sejam implementados. Nos mais distintos aspectos, as PCIs estão presentes ao nosso dia-a-dia: desde Celulares e computadores, até automóveis e satélites. Em

tudo observamos a presença da eletrônica e, por conseguinte, a presença das PCIs, que como outrora escrito, ainda nos primórdios dessa tecnologia: "[...]foi uma das ideias mais fascinantes para a produção em massa de dispositivos eletrônicos em muitos anos." (CONDON et al., 1948, p.1, tradução nossa).

As primeiras impressões eram realizadas com métodos derivados do *offset*, serigrafia e tipografia, que eram tradicionalmente encontrados na indústria de jornais da época (EISLER, 1989). Eram utilizados na produção da PCI, os materiais disponíveis naquele tempo tais quais, o baquelite que é um polímero isolante elétrico, e o cobre, que desde o início mostrou-se uma ótima opção para condutor, devido a sua maleabilidade, além de ser o segundo melhor condutor elétrico, e é claro, ter um baixo custo em relação a outros condutores (SANTOS, 2018).

Todavia, com o avanço das descobertas na área de materiais, e na própria indústria, novos processos de impressão e novos materiais começaram a ser utilizados. Ainda antes da segunda guerra, a disseminação da fibra de vidro como material dentro das indústrias tornou-se flagrante (S. KHAN, 2012), e nas décadas seguintes, para a confecção das PCIs, esse material tornou-se muito utilizado devido as propriedades dielétricas, uma boa resistência para processos de fabricação que permite a confecção de placas multicamadas, e por conter também um bom nível retardante às chamas[1]. Encontra-se também como alternativa de material dielétrico o fenolite, que possui menor custo em relação à fibra de vidro, porém também é menos resistente e, portanto, mais usado para placas de uma ou duas faces (WADE, 2018). As faces, são os lados da PCI que contém material condutor, podendo também ser encontradas no meio da placa entre duas camadas de dielétrico, nesse caso então, a placa é chamada de multicamadas (SATTEL, 2016). Já se tratando de material condutor, a melhor opção ainda é o cobre, devido a sua ótima relação custo benefício. Porém, aplicam-se ligas de estanho, prata, ou até mesmo ouro para os pontos onde o material fica exposto para conexão, ou para soldagem, já que o fator de oxidação desses elementos é menor que o do cobre (FOGAÇA, 2018).

O processo para produção também evoluiu muito. O que era antes totalmente manual, com o advento dos computadores tornou-se pouco a pouco, também digital. Já na década de 1980, dentro da indústria, os desenhos de esquemático dos circuitos eletrônicos

[1] "O termo retardante de chamas, do inglês *flame retardant* (FR), designa materiais que tenham propriedades de extinguir ou retardar a propagação das chamas" (WEIL e LEVCHIC, 2009, p.1, tradução nossa). Para os materiais dielétricos utilizados em PCIs, é comum utilizar a sigla FR, sendo que o fenolite (Resina fenólica com carga de papel) é mais conhecido como FR-2, e a fibra de vidro (Resina epóxi reforçada com tecido de fibra de vidro) como FR-4, referenciadas segundo a norma NBR 8188/83 (ABNT, 1983).

começaram a ser desenhados através de *softwares* especializados, que permitiam também o desenho da PCI a partir deste esquemático (ALTIUM, 2018). Logo, era gerado um arquivo de produção que era enviado para a fabricante, onde a confecção da placa passava por diferentes fases, sendo que a subtração do cobre poderia ser por processo químico, usando uma impressão *plotter*[2] por exemplo, ou ainda por extração a laser ou à fresa (PCBCART, 2018).

Como notado anteriormente, não se pode pensar em desenvolvimento de eletrônica, sem pensar em desenvolvimento das próprias PCIs, pois ambas caminham juntas. Após o incrível avanço que se deu depois da criação e difusão dos transistores, a partir de 1947, tudo evoluiu muito mais rápido, ao passo que componentes que antes eram simples e com poucos terminais, tornaram-se muito mais elaborados, menores, e com inúmeros terminais, como os circuitos integrados, que cada vez mais aumentam em capacidade, e diminuem em tamanho (WARD, 2009). Além disso, para aumentar as velocidades de processamento, hoje em dia temos circuitos que operam em frequências muito altas, que podem atingir medidas em GHz. Todos esses fatores influenciaram fortemente a maneira de se criar *layout*[3] de PCIs por parte dos desenvolvedores.

Hoje, os desenvolvedores que trabalham com *layout* de PCI, visam atingir os níveis exigidos pelas regulamentações e pelo padrão da indústria para a compatibilidade eletromagnética, do inglês *Eletromagnetic compatibility* (EMC), que vão da emissão até a susceptibilidade referentes à interferência eletromagnética (EMI), como afirma Montrose (2000, p.1, tradução nossa): “O objetivo do engenheiro é encontrar requisitos de design que satisfaçam ambas as regulações internacionais e domésticas, além de padrões voluntários da indústria.”

Contudo, dentro desse contexto atual, também há estudos para otimizar e melhorar ainda mais a performance elétrica, a confiabilidade, e ainda reduzir custos e espaço nas placas (PEIFFER, 2001). Nos últimos anos uma vertente de desenvolvimento de componentes passivos tem se fortalecido e mostrado que é possível aplicar ainda no processo de fabricação da PCI, os conhecimentos de princípios básicos de eletromagnetismo, em virtude de se obter efeitos de capacitância e indutância, sem recorrer a componentes externos.

---

[2] De acordo com a HPPLOTTER (2018), Impressão *plotter* é uma técnica de impressão assistida por computador, que permite a impressão de arquivos advindos da tecnologia de design auxiliado por computador, ou do inglês, computer aidad design (CAD). A tecnologia CAD propicia gerar arquivos a partir de desenhos como plantas, ou circuitos eletrônicos feitos em *software*, os quais as máquinas são capazes de decodificar.

[3] *Layout* de PCI, em inglês *PCB Layout*, segundo DIPTRACE (2017), é como é chamado o artifício de engenharia que permite o design de placa de circuito impresso. Para tanto, utilizam-se *softwares* de ECAD, do inglês, *electronic computer aided design*, para a elaboração dos desenhos das PCIs.

Os chamados componentes embarcados são “[...] uma técnica que cria os componentes diretamente durante o processo de fabricação da PCI [...]”, conforme descrito por Uher e Zednicek (2010, p.3, tradução nossa). Para esta nova vertente de desenvolvimento, há algumas pesquisas tanto na área de capacitores, quanto na área de indutores embarcados, com resultados muito promissores.

Para Peiffer (2001) no entanto, o desenvolvimento e qualidade desta nova tecnologia, depende muito da qualidade de produção do fabricante de PCI. Alguns estudos, por exemplo, mostram que é possível fazer simulações em *software* para cálculos de capacitância, porém esses valores só se comprovam na prática, quando características dos materiais das PCIs, como a constante dielétrica e sua tolerância, são controlados e garantidos pelo fornecedor, podendo assim serem assumidos durante os cálculos (MICROWAVEJOURNAL, 2015).

Pouco se conhece sobre essa nova técnica no Brasil. Ainda não se tornou amplamente difundida a ideia entre desenvolvedores, e consequentemente, entre os fornecedores de PCI. Neste cenário, estudos que tragam conhecimento das ferramentas, e apontem soluções eficientes, com oportunidade para otimização dos recursos e redução de custos, são amplamente favoráveis e podem auxiliar o mercado como um todo na sua adaptação a esta nova tecnologia. Esta será a área de pesquisa trabalhada, para identificar a possível viabilização da produção em larga escala de componentes embarcados, mais precisamente de capacitores e indutores, em placas de circuito impresso, por parte dos desenvolvedores e dos fornecedores, no mercado interno brasileiro.

1.1 JUSTIFICATIVA

É notória a evolução que as placas de circuito impresso tiveram nos últimos anos, no que tange não só aos diferentes tipos de materiais e processos utilizados para sua fabricação, mas também, em elementos para auxiliar na demanda por alta qualidade dos equipamentos, que também tem evoluído em grande velocidade. Neste ponto, podemos ressaltar os processadores e microcontroladores, que necessitam de *layouts* cada vez mais voltados às altas capacidades de transmissão de dados, bem como à imunidade às ondas eletromagnéticas. Junte a esse fator o elemento custo de produção e miniaturização dos dispositivos, e vamos notar que nunca a profissão dos desenvolvedores de PCI esteve tão desafiadora.

Assim criou-se o desejo de se fazer um estudo sobre este nicho de atividade, para tentar mostrar as novas alternativas propostas pelos desenvolvedores e pesquisadores ao redor do mundo, que buscam encontrar caminhos que ajudem a tornar a tarefa menos árdua, e ao mesmo tempo menos onerosa, não apenas monetariamente, mas também temporalmente.

Uma das práticas atualmente encontradas e ainda em desenvolvimento, é a de embutir na própria PCI através do *layout*, com arranjos entre dielétrico e material condutor, os efeitos de capacitância e indutância que antes vinham apenas de componentes eletrônicos externos, soldados à placa.

Dessa forma, com um trabalho embasado em demonstrações teóricas, espera-se explanar o que já foi objeto de estudo e desenvolvimento de protótipos por parte dos pesquisadores, buscando entender as dificuldades da aplicação na produção em larga escala, e também discutindo o que ainda pode evoluir para que esse processo se estabeleça e seja mais conhecido pelos desenvolvedores, sobretudo no campo nacional onde se tem pouco conhecimento sobre este assunto.

Utilizando-se de diferentes conteúdos disciplinares, mas principalmente das cadeiras de eletrônica, eletromagnetismo, e ondas e antenas, tem-se como leme para este trabalho, o ensejo de conectar diferentes campos de estudo com uma mesma missão: colocar em prática o conhecimento adquirido dentro da graduação, entregando efetivamente um estudo que venha a ser útil para toda a comunidade acadêmica de engenharia elétrica e telemática, e de maneira especial aos desenvolvedores de PCIs.

1.2 DELIMITAÇÕES

Este trabalho será limitado ao estudo de viabilidade de indústria e desenvolvimento de componentes embarcados, em âmbito nacional. Além disso, o desenvolvimento será limitado apenas na análise das pesquisas já realizadas dentro da área de interesse, sem a pretensão de conceber ou desenvolver algo ainda inédito.

1.3 OBJETIVOS

Haja vista o tema previamente discutido, os seguintes objetivos foram traçados:

1.3.1 Objetivo Geral

Executar uma pesquisa na área de *layout* de PCI que traga à luz respostas para o problema levantado, embasado no conteúdo do tema geral, bem fundamentado, e com amostras de como pode ser realizado, ou porque não pode ser.

1.3.2 Objetivos Específicos

a) Mostrar através da fundamentação, qual o princípio de funcionamento dos indutores e capacitores
b) Mostrar como surgiram os capacitores e indutores embarcados, como funcionam, e quais problemas podem ser resolvidos através da sua aplicação.
c) Demonstrar alguns exemplos aplicáveis de capacitores e indutores embarcados.

1.4 METODOLOGIA

"A Pesquisa Científica visa a conhecer cientificamente um ou mais aspectos de determinado assunto. Para tanto, deve ser sistemática, metódica e crítica." (PRODANOV; DE FREITAS, 2013, p. 49).

Será aplicada uma metodologia de pesquisa exploratória com uma coleta bibliográfica, diálogo com pessoas que tem experiências com o problema, e exame e análise de alguns casos-exemplo (PRODANOV; DE FREITAS, 2013, p. 52). Além disso, essa pesquisa também será qualitativa, com uma abordagem que segundo Prodanov e De Freitas (2013, p. 70), "[...] tem o ambiente como fonte direta dos dados. O pesquisador mantém contato direto com o ambiente e o objeto de estudo em questão, necessitando de um trabalho mais intensivo de campo."

Ao longo deste trabalho será utilizado um embasamento em pesquisa bibliográfica, e também em dados primários e secundários. "Os dados, em uma pesquisa, referem-se a todas as informações das quais o pesquisador pode se servir nas diferentes etapas do trabalho" (PRODANOV; DE FREITAS, 2013, p. 102). Os dados coletados primariamente vêm de pesquisas e análise de casos práticos, além de contatos com fornecedores na área de placas de circuito impresso, enquanto que os dados secundários são coletados de livros e artigos publicados, por acadêmicos ou por engenheiros que trabalham na área.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está configurado em uma estrutura de 5 capítulos:

O capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, com justificativa, objetivos e metodologia aplicada.

O capítulo 2 mostra a fundamentação que sustenta a pesquisa, com detalhes de cálculos e teoria de eletromagnetismo, no tocante a capacitores e indutores, além de sua aplicação às PCIs.

O capítulo 3 mostra o desenvolvimento dos exemplos e estudos realizados, com capacitores e indutores embarcados.

O capítulo 4 complementa o capítulo 3 com a exposição do debate sobre o tema junto aos fornecedores, e mostra também os dados obtidos através da pesquisa do capítulo anterior.

E por fim, o capítulo 5, aborda as considerações finais. Satisfazendo o problema de pesquisa previamente levantado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ELETROMAGNETISMO, EMI E EMC

Os conceitos de compatibilidade eletromagnética, do inglês *electromagnetic compatilibility* (EMC) e interferência eletromagnética, do inglês *electromagnetic interference* (EMI), serão fundamentais para entender a origem das aplicações dos componentes embarcados. Mas para compreender um pouco melhor estes termos, deve-se começar pelo início: o Eletromagnetismo.

2.1.1 Eletromagnetismo

Segundo Mendes (2018), "eletromagnetismo é a parte da física que relaciona a eletricidade e o magnetismo". Em linhas gerais, o estudo do eletromagnetismo visa entender as interações entre esses dois domínios e estabelecer uma relação entre eles. O magnetismo é conhecido como sendo uma força natural que pode atrair ou repelir alguns tipos de materiais, sendo que os materiais conhecidos como magnéticos, geram ao seu redor, um campo magnético (ETHW, 2017). O campo elétrico por sua vez, é gerado por corpos eletricamente carregados, seja positivamente, com menos elétrons que prótons, ou negativamente, com mais elétrons que prótons, e também podem gerar uma força de atração ou repulsão em outros materiais (KASHY, E. *et al*, 2018). Dessa forma em linhas gerais, a relação existente entre magnetismo e eletricidade será que as cargas elétricas em movimento (corrente elétrica), geram um campo magnético, assim como a varação do fluxo magnético gera um campo elétrico (MENDES, 2018). Apesar dessas definições serem relativamente modernas, o estudo envolvendo o eletromagnetismo começou há muito tempo atrás, ainda na Grécia antiga, e vamos destrinchá-lo um pouco mais a partir dos próximos parágrafos, para entender como se desenvolveu, e como isso influenciou diretamente no estudo de EMC e EMI.

O magnetismo desde a era dos gregos foi fonte de estudo. Ainda 800 anos A.C., alguns antigos relatos já mostravam que os gregos notaram os efeitos que materiais como magnetita e âmbar provocavam através de forças atrativas. O uso mais antigo de aplicação do magnetismo na prática, é a ferramenta para locomoção criada para uso náutico, a bússola, também muitos anos A.C. (ROBINSON, F. N. H. *et al*, 2018). Na Europa, a primeira referência de tratado que se tem notícia, muitos anos depois já em 1269, é de um francês chamado Petrus

Peregrinus de Maricourt (1240-1269), e chamada de “Carta sobre magnetismo”, a qual discorre sobre as propriedades dos polos magnéticos, norte e sul (SPARAVIGNA, 2015). Há poucos relatos sobre os avanços no campo do eletromagnetismo, nos anos seguintes, porém ao final da era renascentista, isso começou a mudar.

Em 1600, um novo tratado, dessa vez intitulado de “Imãs, corpos magnéticos, e o grande imã, a Terra”, foi escrito por William Gilbert (1544-1603), considerado o fundador das ciências modernas em eletricidade e magnetismo (ASSIS, 2010). Nesse estudo, ele trouxe os resultados de 17 anos de pesquisas, onde notou, entre outras coisas, que a Terra é um grande imã, e pela primeira vez, utilizou o termo elétrico, para descrever o fenômeno da força de atração que havia entre dois objetos carregados por fricção, além de mostrar que este fenômeno ocorre em muitos outros objetos (ASSIS, 2010). Nestes estudos estão também os relatos da primeira diferença entre magnetismo e eletricidade que foi notada: Quando alguns objetos magnéticos são dispostos próximos uns aos outros, estes objetos possuem tendência de se alinharem, ou seja, convergirem suas linhas de campo para a mesma direção, sendo pouco afetados por outros objetos que estejam no mesmo espaço, enquanto que em objetos eletrificados, a única ação notada, é a força de atração ou repulsão entre eles, sendo que essa força é afetada por objetos próximos (ROBINSON, F. N. H. *et al*, 2018). Durante os séculos XVII e XVIII, os estudos na área elétrica foram se tornando mais abrangentes. Nessa época tivemos a concepção do primeiro gerador, a descoberta de que a eletricidade poderia fluir, e em 1729, a primeira transmissão de energia elétrica por parte de um químico britânico chamado Stephan Gray (1666-1736), como afirmam Boss e Caluzi (2010). Outras pesquisas também foram feitas nos anos seguintes, até se elaborar uma maneira de armazenar cargas elétricas.

Em 1745, a primeira noção sobre armazenamento de carga foi concebida, através da invenção da garrafa de Leyden, por um físico holandês, da cidade de Leyden. Esse cientista, arquitetou um dispositivo que era constituído de vidro, parcialmente preenchido de água, e que armazenava uma quantidade relativa de carga com um fino cabo condutor contido no recipiente, que era carregado através da fricção de uma ponta do cabo que ficava exposta pela rolha do recipiente, gerando eletricidade estática (ROBINSON, F. N. H. *et al*, 2018). Este dispositivo foi melhorado alguns anos depois, em novo experimento realizado por William Watson (1715-1787), físico inglês que melhorou a capacidade e armazenamento enrolando folhas de metal no recipiente. A partir deste dispositivo, o estudo da eletricidade foi revolucionado, e na segunda metade do século XVIII, vários cientistas começaram a trabalhar visando obter novas descobertas (JARDIM; GUERRA, 2018).

Benjamin Franklin (1706-1790), na América, foi um dos pioneiros em estudos nesta área, com o famoso experimento da chave em sua pipa, que foi conduzida eletricamente por uma nuvem carregada de uma tempestade. Por meio dessa chave, foram coletadas cargas que foram armazenadas numa garrafa de Leyden. Por este experimento, Franklin provou que os raios eram exemplos de condução elétrica, e também foi possível estabelecer um dos princípios da lei conservação da carga, assim que Franklin começou a usar a energia estocada em sua garrafa, em outros experimentos (BENJAMIN-FRANKLIN-HISTORY, 2014). Por essa lei sabe-se que em uma região isolada, a soma das cargas é sempre constante, ou seja, não há mudança na quantidade total de cargas, enquanto esta região se mantiver isolada. Além disso, Franklin também afirmava que "uma substância contendo uma larga quantidade de fluído, maior que a quantidade normal, estaria carregada positivamente, enquanto que se tivesse menos quantidade desse fluído, estaria carregada negativamente" (ROBINSON, F. N. H. *et al*, 2018, tradução nossa). Todas essas descobertas foram resumidas em uma obra de Joseph Priestley (1733-1804).

Em 1767 o livro "História e presente da eletricidade", de autoria do cientista inglês Joseph Priestley, tentou unificar as descobertas feitas nos anos anteriores, e ao refazer alguns experimentos de Franklin, chegou à conclusão de que a força entre massas diminui inversamente ao quadrado da distância entre elas (PRIESTLEY, 2013). Porém estas descobertas estavam ainda pouco palpáveis, devido ao fato de não terem sido expostas matematicamente. E então, coube ao físico francês Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) comprovar matematicamente algumas das teorias de seu predecessor, e também executar experimentos que contribuíram para algumas das leis da eletrostática, como afirmam O'Connor e Robertson (1983, p. 101-129 apud LYUBIMOV, 2000, p.3, tradução nossa): "(...) usando seu método de balança de torção ele obteve notáveis resultados: a teoria de atração e repulsão, as cargas pontuais elétricas, os polos magnéticos, e a distribuição de eletricidade em superfícies de corpos carregados.". A balança de torção foi um dispositivo inventado por Coulomb, e capaz de mensurar a aceleração gravitacional. Ele usava o dispositivo para medir, por exemplo, a força entre cargas elétricas (ROBINSON, F. N. H. *et al*, 2018). Seu trabalho foi expandido por matemáticos, e no início do século XIX, a equação de Poisson, e a lei da conservação de carga resumiam satisfatoriamente, quase todas as leis da eletrostática (ROBINSON, F. N. H. *et al*, 2018). Mas a teoria da eletrostática precisava ser finalizada.

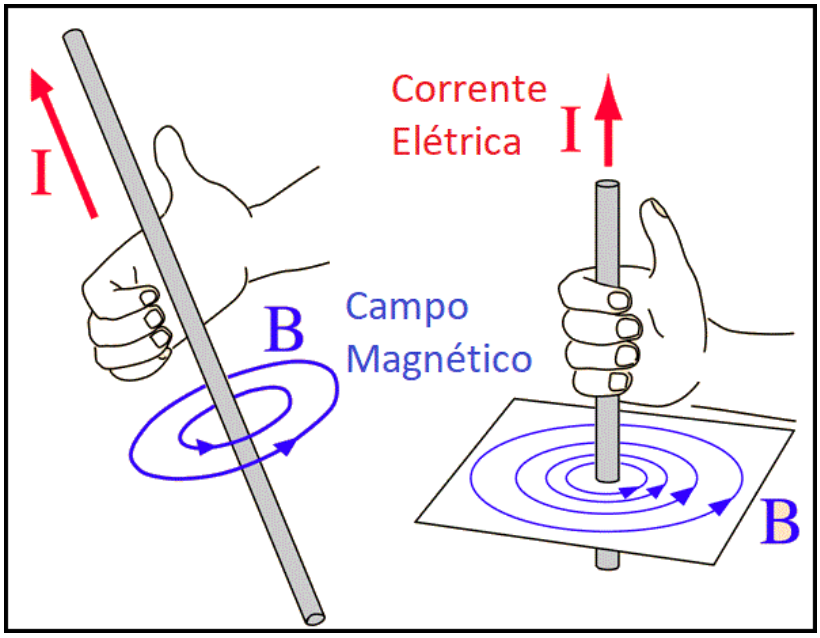
O papel de avançar os estudos sobre eletrostática coube a Michael Faraday (1791-1867), que realizou o primeiro experimento preciso com cargas elétricas, além de serem atribuídas a ele as alcunhas de termos como eletrodo, catodo e íon, ele também é o

desenvolvedor de um dos dispositivos mais conhecidos na área de eletricidade: a gaiola de Faraday[4] (BBC, 2014). Em outro de seus experimentos, Faraday concluiu que em um sistema a carga total era imutável, ou seja, não variava, mesmo separando, reagrupando ou trocando cargas entre um corpo e outro, no mesmo sistema, a quantidade total permanecia a mesma, assim enfatizando e consagrando os princípios da eletrostática elencados por seus predecessores. (ROBINSON, F. N. H. *et al*, 2018).

Para a continuação dos estudos sobre eletromagnetismo, as gerações seguintes precisavam explorar um ponto muito importante: a indução. Ainda no século XIX, o professor e cientista dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), notou ao preparar um experimento para seus alunos, que ao induzir uma corrente elétrica em um fio, a ponta da agulha de uma bússola que estava próxima, se mexia. A partir deste experimento, os estudos na área da interação entre magnetismo e eletricidade, que já existiam, foram intensificados (BELLIS, 2018). Após esse experimento, cientistas franceses foram capazes de demonstrar efeitos de campo, tanto para atração quanto repulsão, criados por fios energizados, e uma das regras mais básicas do eletromagnetismo foi criada por André Marie Ampère (1775-1836): a regra da mão direita. Essa regra diz basicamente, que uma corrente elétrica fluindo por um material, com direção do polegar da mão direita, gera um campo magnético ao seu redor no sentido dos outros quatro dedos, como mostrado na Figura 1. Outro físico, Augustin Jean Fresnel (1788-1827), fez experimentos tentando mostrar que uma barra de material magnético também era capaz de induzir corrente elétrica em um fio ao passar por ele, porém seus experimentos não conseguiram provar isso (ROBINSON, F. N. H. *et al*, 2018). Todavia, Faraday após alguns anos de experimentos, conseguiu realizar essa demonstração.

[4] Faraday reportou um experimento o qual adentrou uma gaiola de aproximadamente 3,66 metros, e mesmo a gaiola estando completamente carregada eletricamente, ele no interior da gaiola, mantia-se isolado, sem sofrer consequências. Comprovou-se assim, que uma malha ou tela metálica fechada, é capaz de bloquear descargas elétricas ou ondas eletromagnéticas. Este experimento é referência até hoje para inúmeros cientistas (CHAPMAN; HEWETT; TREFETHEN; 2015).

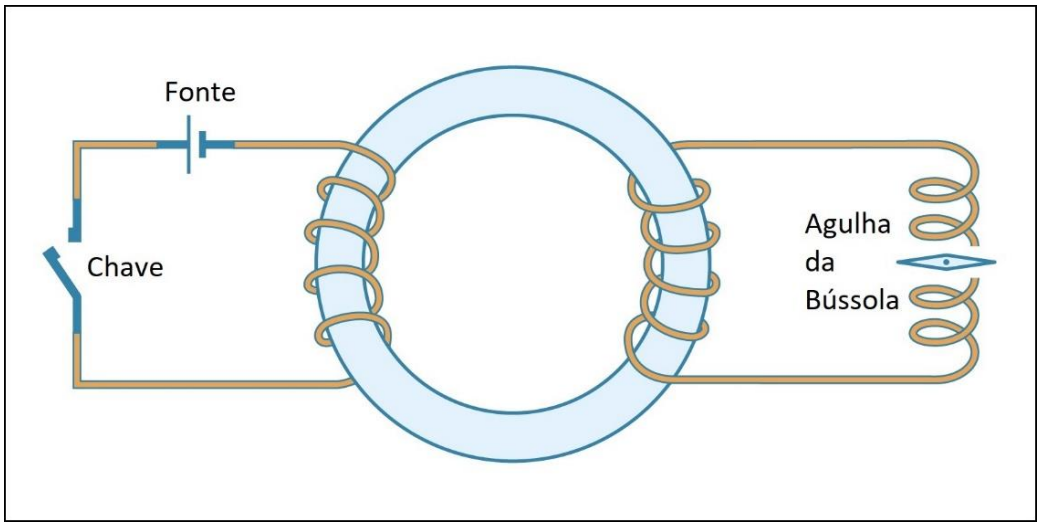
Figura 1 – Regra da mão direita de Ampère



Fonte: Alterada pelo autor. Modificado de HyperPhysics (2018)

Faraday, cujo trabalho de pesquisa apenas nessa área do magnetismo levou cerca de dez anos até sua conclusão, conseguiu realizar este experimento por meio de duas bobinas de fio, enrolados em um anel de ferro sólido. Ao energizar a primeira bobina, o disco de ferro foi magnetizado e gerou uma corrente na segunda bobina, que estava próxima à uma bússola, fazendo com que sua ponteira se mexesse assim como aconteceu no experimento de Oersted, conforme mostra a Figura 2, só que dessa vez influenciado pelo ferro magnetizado, o que recebeu o nome de indução (ETHW, 2017).

Figura 2 – Experimento de Faraday



Fonte: Alterada pelo autor. Modificado de Britannica (2018)

Muitos outros cientistas continuaram suas pesquisas envolvendo magnetismo e eletricidade ainda no século XIX, até que um deles, chamado James Clerk Maxwell (1831-1879), conseguiu formalizar todos esses estudos em uma teoria, e transformou todos as descobertas, até então existentes, em equações matemáticas. Seu papel é fundamental para se entender o eletromagnetismo, como dito por R. Paul (1992, p.87, tradução nossa):

> As equações de Maxwell formam os pilares do fenômeno eletromagnético e são, portanto, essenciais ao entendimento de como realizar o design de sistemas eletrônicos de tal maneira que esteja de acordo com os requerimentos regulatórios e de maneira que não causem ou sofram interferências. A solução das equações de Maxwell não é um processo simples, porém sua praticidade não diminui sua fundamental importância.

Maxwell apontou entre outras coisas, que a energia do campo eletromagnético está em torno dos condutores, mas também nos próprios condutores. Maxwell previu também que a luz tanto quanto as ondas de rádio, são fenômenos do eletromagnetismo. Ele conseguiu adicionar às descobertas de Faraday, que as mudanças em campos elétricos podem produzir campos magnéticos, mesmo quando não há existência de uma corrente elétrica. Ele afirmou que os distúrbios eletromagnéticos viajando no espaço, possuem linhas de campo elétrico e magnético perpendiculares entre si e que, em relação à direção da onda, ambas são perpendiculares também. Além disso, ele ainda decretou que as ondas se movem no espaço, a uma velocidade equivalente a velocidade da luz, de maneira uniforme, e que a própria luz, é uma onda eletromagnética (ROBINSON, F. N. H. *et al*, 2018). Suas descobertas influenciaram de tal forma a tecnologia da época, que grandes avanços aconteceram nos anos decorrentes.

Em 1886 o físico alemão, Heinrich Hertz (1857-1894), mostrou com seus estudos, que ondas eletromagnéticas, as ondas de rádio, viajavam também pelo ar na velocidade da luz. Anos mais tarde, em 1896, deu-se a concepção da patente de transmissão e recepção de impulsos e sinais elétricos, com a criação dos primeiros transmissores e receptores de ondas de rádio, que eram instrumentos capazes de transmitir e receber ondas eletromagnéticas transmitidas pelo ar, criado pelo italiano Guglielmo Marconi (1874-1937), conforme explicado por Corazza (1998). Esse instrumento revolucionaria a tecnologia da comunicação para sempre, mas também traria os primeiros problemas de compatibilidade eletromagnética.

Em 1901 houve a primeira transmissão transatlântica de rádio via cabos de cobre. Como os cabos separavam os dispositivos em uma grade distância, não haviam grandes problemas. Porém, ao longo dos anos essa tecnologia de transmissão foi evoluindo, e por volta

de 1920, já haviam relatos de estudos sobre interferências sofridas nas transmissões de ondas de rádio (R. PAUL, 1992). Na 2° guerra mundial, o aumento desses aparecimentos de interferência aconteceu através do uso de novos dispositivos, como de navegação e de radar. Os problemas eram tratados caso a caso para a correção do EMI, apenas mudando posição de cabos, ou ajustando as frequências de transmissão (R. PAUL, 1992). Porém os maiores problemas com EMC começaram a partir dos anos 1950, com o surgimento dos transistores, que colaborou drasticamente na miniaturização dos componentes eletrônicos, e no aumento exponencial da complexidade dos circuitos. Dessa forma, as frequências começaram a aumentar, e os espectros de transmissão de dados foram ficando mais lotados (R. PAUL, 1992). Todos esses fatores, levaram já na década de 1960, ao começo dos estudos mais aprofundados em compatibilidade eletromagnética, principalmente erguidos pelo grande desenvolvimento do processamento digital de sinais e pela computação (R. PAUL, 1992). Desde então, por eventuais regulações e requerimentos das agências que supervisionam o setor das indústrias de equipamentos elétricos e eletrônicos, foi dada maior importância ao fato de se estar de acordo com os padrões estipulados e com a interferência eletromagnética, afim de garantir a operabilidade entre dispositivos e de entregar a melhor qualidade aos usuários (MONTROSE, 2000).

Por esses motivos, é fundamental então compreender que grande parte destas complicações está relacionada à EMC. Normas internacionais e padrões de indústrias foram escritos exatamente a respeito deste assunto para que haja uma maior clareza sobre a definição desse problema, sobre onde ele é gerado e sobre como pode ser solucionado ou amenizado. A propagação e a susceptibilidade à EMI, por parte dos dispositivos e circuitos devem ser também conhecidas pois são efeitos da falta de controle do EMC nos equipamentos (MONTROSE, 2000). Logo, os próximos tópicos vão abordar esses conteúdos: EMI e EMC.

2.1.2 EMI

Segundo a norma internacional IEV 161-01-06 (IEC, 2018, tradução nossa), a definição de *eletromagnetic interferance* (EMI) é: “A degradação na performance de um equipamento ou em um canal de transmissão ou em um sistema, causado por um distúrbio eletromagnético”. É necessário compreender que dentro da definição do EMI existe a expressão distúrbio eletromagnético, ou *eletromagnetic disturbance* (EMD) que é, de acordo com a norma IEV 161-01-05 (IEC, 2018, tradução nossa): “Fenômeno eletromagnético que pode degradar a

performance de um dispositivo, equipamento ou sistema, ou afetar negativamente matéria viva ou inerte". Ou seja, ao pensar em interferência eletromagnética, deve-se atentar que ela é o efeito, enquanto que o distúrbio eletromagnético é a causa dos problemas de EMC e nunca devem ser abordadas indiscriminadamente segundo a IEV 161-01-05 (IEC, 2018).

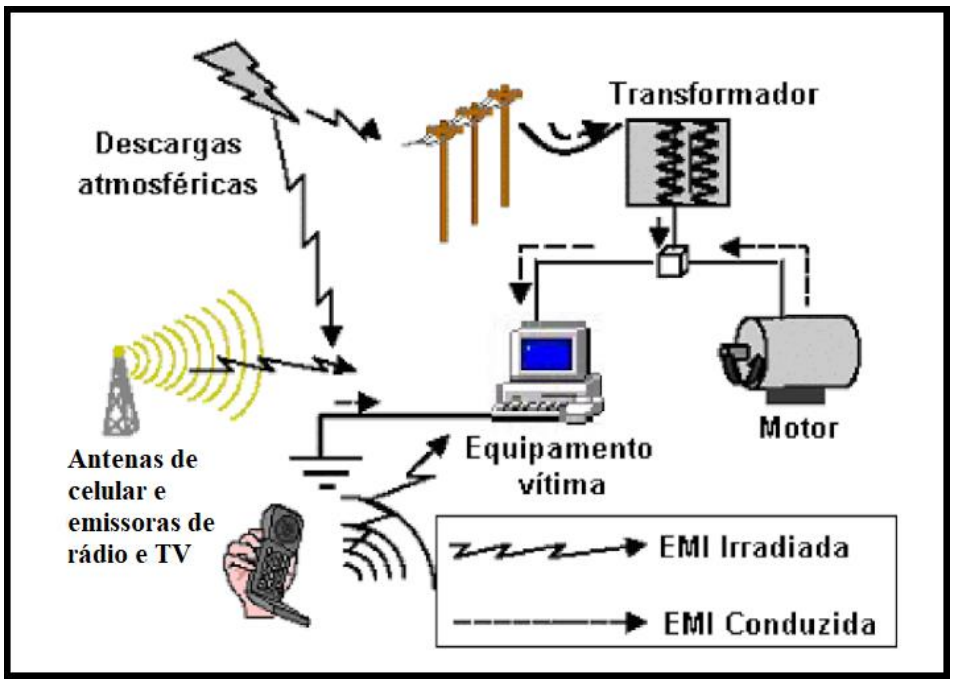
Para melhor entendimento do assunto, serão abordadas as fontes de EMI, e os fatores que levam a causa de interferência.

2.1.2.1 Fontes de EMI

As fontes de interferência eletromagnética, como será notado na abordagem sobre EMC, são numerosas. Porém de acordo com Sanches (2003), há uma classificação que pode ser feita, do ponto de vista global do problema, que é a separação: interferência entre sistemas, e intra-sistemas.

Quando há uma atuação de interferência que vem de um sistema e incide em outro, como por exemplo uma descarga atmosférica sobre uma linha de transmissão de alta-tensão, ou quando temos um telefone celular interferindo no sistema de alto-falantes de um computador, ao receber uma chamada, há então a chamada interferência entre sistemas como mostra a Figura 3 (SANCHES, 2003).

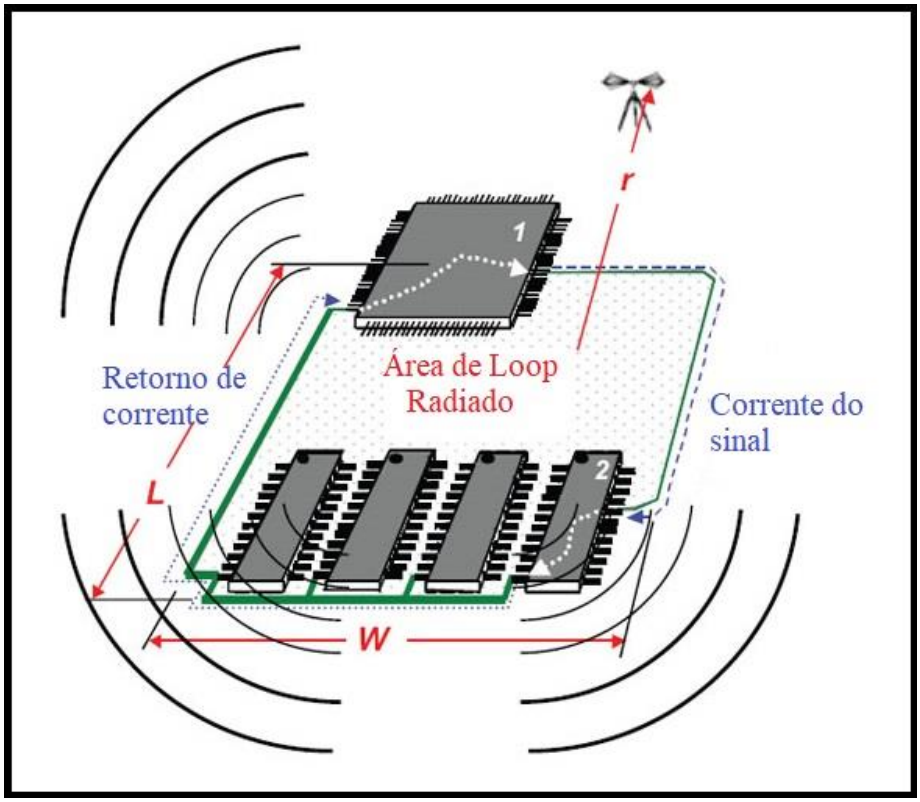
Figura 3 – Interferência entre sistemas



Fonte: Sanches (2003)

Já quando há a interferência eletromagnética dentro de um sistema, provocada por outra parte deste mesmo conjunto, então pode-se chamar de interferência intra-sistema. Nesse caso o exemplo mais clássico são os próprios componentes de uma placa eletrônica como mostra a Figura 4 (SANCHES, 2003). Analisando o objeto de estudo que é a PCI, pode-se visualizar que as principais fontes de distúrbio nesse contexto, são intra-sistema, e que essas fontes devem ter um limite máximo de emissão de ruídos que não ultrapasse o valor da susceptibilidade dos componentes ao seu redor, ou próximos a ele, da mesma forma que o conjunto das emissões dos componentes da PCI não podem ter uma emissão que supere o nível de susceptibilidade dos membros adjacentes do sistema em que está inserido (MARIDIGUIAN, 2014). Assim, será mostrado quais fatores mais impactam para que os indesejáveis efeitos do EMI apareçam nos circuitos e nas placas de circuito impresso.

Figura 4 – Interferência intra-sistemas em PCI



Fonte: Alterada pelo autor. Modificado de Swanberg (2007)

2.1.2.2 Fatores que impactam a interferência eletromagnética

A interferência eletromagnética, conforme comentado, possui diferentes fontes, porém todas elas possuem algo em comum, que pode ser uma tensão elétrica e uma frequência de sinal que contribuem para geração, propagação, ou mesmo susceptibilidade ao problema.

2.1.2.2.1 Tensão elétrica

A tensão elétrica é por definição a energia potencial elétrica por unidade de carga. Esta é a energia que está contida em um determinado ponto de um campo elétrico ou de um circuito elétrico, e também pode ser chamada de força eletromotriz quando gerada por uma força magnética ou por uma bateria (JONES, 2017). A unidade de medida para essa grandeza recebeu o nome de Volt, sendo uma referência ao criador da primeira pilha voltaica, o físico italiano Alessandro Volta (1745-1827), segundo ThoughtCo (2017). Sua fórmula mais básica é apresentada abaixo:

$$V_A - V_B = \frac{T_{AB}}{q}$$

Onde,

T_{AB} = O trabalho realizado em Joules, entre o ponto *A* e ponto *B*.

q = A carga elétrica em Coulombs.

$V_A - V_B$ = A diferença de potencial elétrico.

Por esta equação, é possível visualizar que há uma diferença dessa energia potencial elétrica entre os pontos A e B, por isso a tensão elétrica também pode receber o nome de diferença de potencial elétrico, e como analisado, tem valor igual ao trabalho que uma unidade de carga teria que fazer contra o campo elétrico, para se mover então, do ponto A ao ponto B (JONES, 2017). Como discutido anteriormente, o campo elétrico é o campo gerado por uma carga elétrica, e capaz de interagir, atraindo ou repelindo, outras cargas que estejam ao seu redor. Quanto a esse campo, pode-se encontrar o cálculo da sua intensidade, ao aplicar a fórmula de intensidade de campo elétrico, que pode ser representada genericamente, nas duas equações abaixo, sendo possível visualizar que a intensidade de campo elétrica pode ser representada em Volts por metro:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \text{ ou } \vec{E} = \frac{\mathrm{V}}{r}$$

Onde,

r = A distância da força elétrica dada em metros.

V = A Tensão elétrica.

$\vec{E}$ = A intensidade do campo elétrico.

$\vec{F}$ = A força elétrica

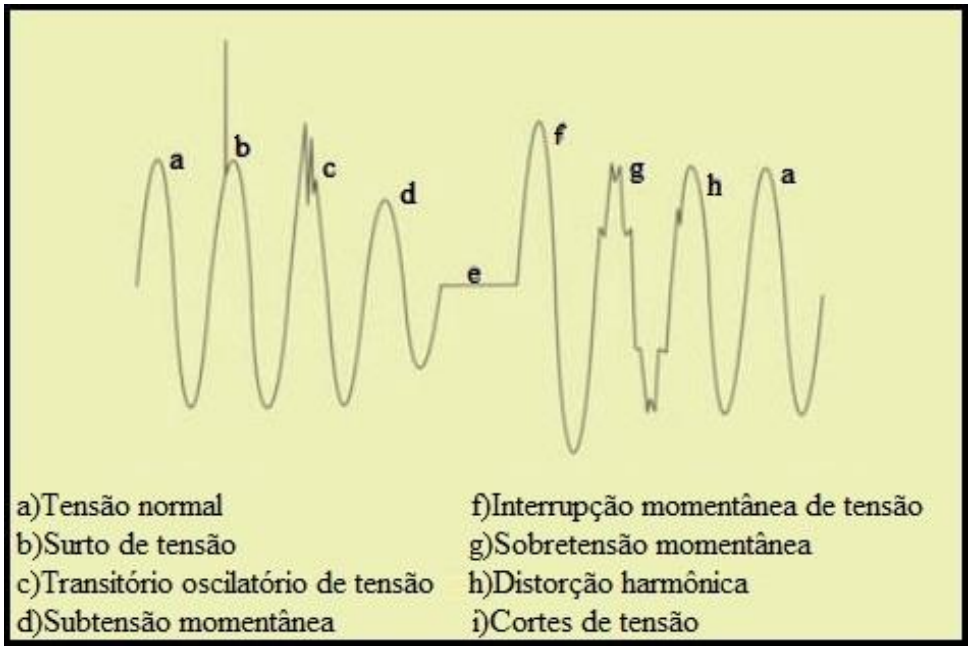
q = A carga elétrica.

Contudo, ao pensar na tensão elétrica como um fator contribuinte ao EMI, o problema relatado por Sanches (2003, p.2) é que: “Valores elevados para fontes de tensão implicarão em maiores excursões do sinal da fonte, o que levará a maiores possibilidades de emissão de campos eletromagnéticos”. Essa afirmação deve ser analisada do ponto de vista de um sistema com valor de impedância que não se altera, dessa forma só a mudança nos níveis de tensão é que vai gerar mudanças no campo.

Ao analisar a tensão muito baixa, também pode haver um problema, porém neste caso, de susceptibilidade eletromagnética. Isto acontece, pois como observado, quanto maior a tensão elétrica, maior a energia potencial dentro do campo elétrico, ao passo que se a tensão é muito baixa, seu campo também o será, e assim sua susceptibilidade aumenta (SANCHES, 2003).

Os problemas mais encontrados de EMI decorrentes desse fator, segundo Sanches (2003), são: A sobretensão (do inglês *overshoot*), a subtensão (do inglês *undershoot*), e os picos de tensão ou, tensões de surto, que se caracterizam por um comportamento anômalo da tensão elétrica, como mostrado na Figura 5. Além desses problemas, pela mesma figura é possível notar também as distorções harmônicas, além dos cortes e os transitórios de tensão que também representam uma alteração no comportamento da tensão elétrica, que prejudica o funcionamento correto do circuito afetado (SANCHES, 2003). Essas variações provocam descontinuidade da corrente na linha.

Figura 5 – Problemas relacionados à tensão elétrica



Fonte: Pinto (2014)

2.1.2.2.2 Frequência de sinal

A frequência de um sinal, é uma grandeza escalar, cuja unidade é representada pelo Hertz em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz. Dentro da física, a frequência representa quantas vezes um ciclo completo de um sinal, independentemente de ser elétrico, sonoro ou outro, vai se repetir em uma unidade de tempo. Sendo que um ciclo completo, será a onda deste sinal, fazendo a sua excursão completa até voltar ao ponto inicial e iniciar um novo ciclo (HELMENSTINE, 2017). A tensão da rede elétrica que chega em um domicílio, pode ser por exemplo, uma diferença de potencial elétrico que varia de -311 V até 311 V de pico à pico, e ao considerar que um ciclo que saia do pico negativo, até voltar a esse mesmo pico seja o seu ciclo completo, ao executar esse mesmo movimento 60 vezes a cada segundo, terá uma frequência de 60 Hz. Esse exemplo mostra uma alta tensão elétrica, porém temos também a importante participação da frequência nos circuitos com baixa tensão.

Ao refletir sobre a transmissão de sinais, deve-se atentar ao fator do comprimento de onda, que é a distância entre uma crista e outra em um sinal conforme mostra a Figura 6. Quanto maior for o comprimento de onda, menor será a frequência, pois de acordo com a equação abaixo, são inversamente proporcionais (HELMENSTINE, 2017). Esta equação se

refere ao espaço livre (vácuo), onde a velocidade de propagação é equivalente a velocidade da luz.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

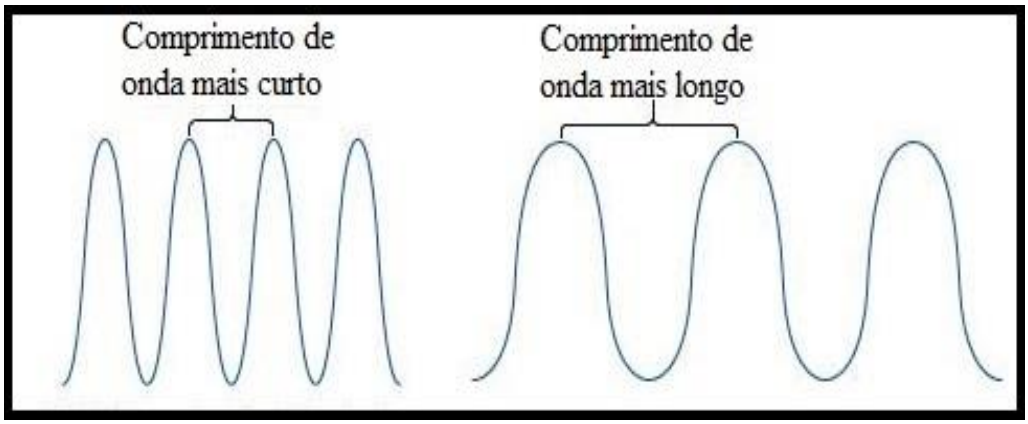
Onde,

$\lambda =$ O comprimento de onda.

$c =$ A velocidade da luz, aproximadamente 300.000.000 m/s.

$f =$ A frequência do sinal.

Figura 6 – Comprimento de onda



Fonte: Alterada pelo autor. Modificado de Britannica (2011)

Outro fator a ser respeitado para transmissão de sinais principalmente quando se trata de uma transmissão através de antenas, é a ressonância. A ressonância acontece quando a frequência da onda a ser transmitida com a antena entra em ressonância com a mesma, ou seja, quando a eficiência de recepção de energia atinge o nível mais alto, por conta da anulação das reatâncias capacitivas e indutivas, o que gera uma impedância puramente resistiva (R. PAUL, 1992). Para respeitar a condição mínima de ressonância, é estabelecido de uma maneira geral, que o comprimento de onda de um sinal deve ser de um valor múltiplo que seja ao menos duas vezes o tamanho do comprimento da antena, conforme uma simplificação para o comprimento de uma das antenas mais comuns: a antena dipolo meia onda[5] como mostrado na Figura 7 (MUBEEN *et al.*, 2017). Pode ser analisado também, que quanto menor o comprimento de

[5] Existem inúmeros tipos de antenas, que são selecionadas conforme cada tipo de aplicação. A antena dipolo meia onda é assim conhecida por ter um tamanho que é metade de seu comprimento de onda. Esta antena é comumente usada para receptores de rádio e TV, além de ser usada também como alimentadora de outros tipos de antena como a parabólica, ou a antena Yagi (ANTENNA-THEORY, 2009).

onda, menor será o tamanho da antena a transmitir esse sinal, e vice-versa. Para circuitos eletricamente pequenos, ou seja, onde aplicam-se as leis de Kirchhoff para tensão e corrente elétrica[6], a relação para respeitar essa condição de ressonância deve ser $\mathcal{L} << \lambda$. Onde um valor que seja a partir de dez vezes o comprimento de onda, é um valor assumido como suficientemente baixo para este caso (R. PAUL, 1992):

$$\lambda = 10\mathcal{L}$$

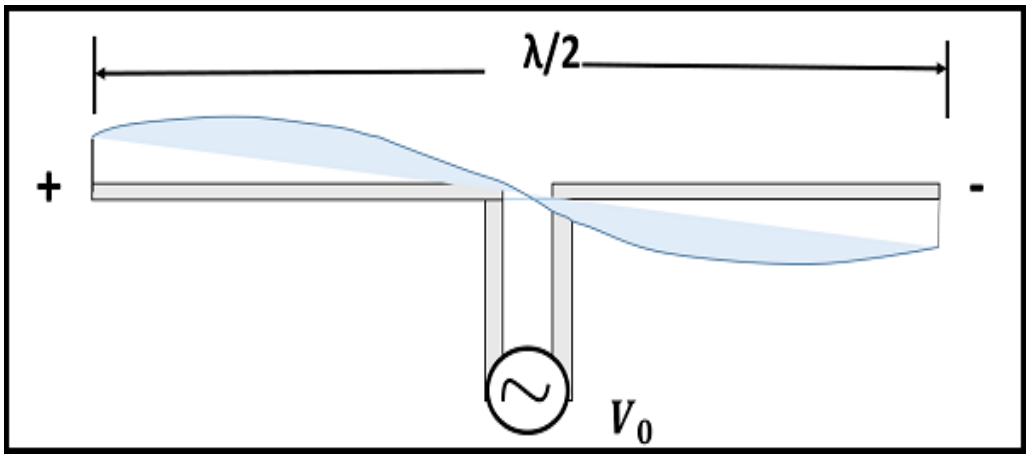
$$\frac{\lambda}{10} = \mathcal{L}$$

Onde,

$\lambda =$ O comprimento de onda.

$\mathcal{L}$ = O comprimento da antena.

Figura 7 – Antena dipolo meia onda



Fonte: Tutorialspoint (2016)

Assim, vemos que quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda, e menor também o tamanho necessário para se estabelecer uma antena. Neste cenário, altas frequências, acabam fazendo com que pequenas linhas de transmissão (como longas trilhas em PCIs), venham a se tornar antenas, irradiando um sinal que pode gerar interferência em outros circuitos (R. PAUL, 1992).

[6] Leis de Kirchhoff para tensão e corrente elétrica, são leis que permitem a realização de cálculos simplificados em circuitos ditos como eletricamente pequenos, ou seja, onde a maior dimensão encontrada será muito menor do que um comprimento de onda $\mathcal{L} << \lambda$. Caso não se assuma essas leis e trate-se do circuito como eletricamente grande, haverá então de se aplicar as leis de Maxwell para resolução de campos eletromagnéticos para cada parte do circuito, o que seria muito mais trabalhoso (R. PAUL, 1992).

Quando falamos em escalas para grandes valores de frequência é muito comum associar às siglas em inglês, como mostrado na Tabela 1:

Tabela 1 – Escala de espectro de rádio frequências

FREQUÊNCIA	DESCRIÇÃO	COMPRIMENTO DE ONDA
30 GHz - 300 GHz	***Extremely High Frequency* (EHF)**	**1 cm – 1 mm**
3 GHz - 30 GHz	***Super High Frequency* (SHF)**	**0,1 m – 1 cm**
300 MHz - 3 GHz	***Ultra High Frequency* (UHF)**	**1 m – 0,1 m**
30 MHz - 300 MHz	***Very High Frequency* (VHF)**	**10 m – 1 m**
3 MHz - 30 MHz	***High Frequency* (HF)**	**100 m – 10 m**
300 kHz - 3 MHz	***Medium Frequency* (MF)**	**1000 m – 100 m**
30 kHz - 300 kHz	***Low Frequency* (LF)**	**10 km – 1000 m**
3 kHz - 30 kHz	***Very Low Frequency* (VLF)**	**100 km – 10 km**
300 Hz - 3 kHz	***Voice Frequency***	**-**
Até 300 Hz	***Extremely Low Frequency* (ELF)**	**-**

Fonte: Alterada pelo autor. Modificado de Electronicnotes (2016)

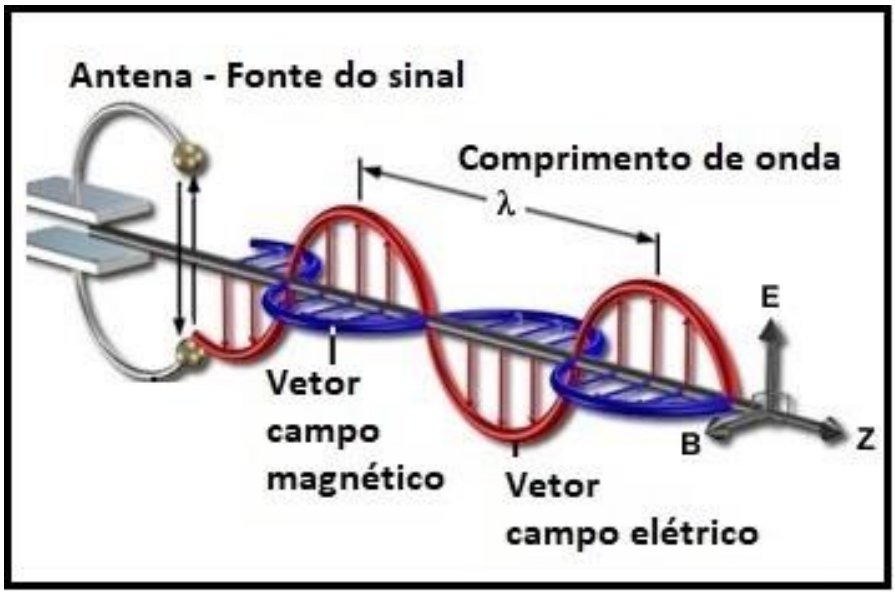
Sendo assim, Sanches (2003, p. 2) afirma que: “Quanto maior for a frequência maior será a emissão. Sinais periódicos geram mais emissão. Circuitos digitais de elevada frequência criam pulsos estreitos de grande amplitude (*spikes*) quando os transistores comutam”. O *spike* é o surto corrente ocasionado pelo chaveamento dos transistores e pode ser danoso ao sistema.

Além disso há também mais esta confirmação de Sanches (2003, p. 2): “O ruído irradiado é o ruído que chega ao circuito vítima em forma de radiação eletromagnética como pulso, e interferência de radiofrequência (ondas eletromagnéticas de aproximadamente 3 kHz à 300 GHz)”. Ou seja, ondas que vão desde as ondas consideradas de baixa frequência VLF, até as ondas consideradas de extrema alta frequência EHF.

A Figura 8 mostra como seria uma onda eletromagnética, caso fosse possível enxergá-la. Como apontado por Maxwell, esta onda tem duas componentes, uma de campo magnético B, que induz uma de campo elétrico E, sendo as duas perpendiculares entre si, com a amplitude máxima igual ao valor máximo de cada campo. A frequência e o comprimento de onda como são interdependentes, mantem-se imutáveis ao longo do eixo de propagação caso não ocorra mudanças no meio, pois são reféns da velocidade de propagação, que se altera apenas com uma mudança do meio físico de propagação. Ou seja, a velocidade vai depender do meio

em que a onda se propaga, e no vácuo por exemplo, essa velocidade terá valor equivalente a velocidade da luz (DAVDSON *et al.*, 2016).

Figura 8 – Onda eletromagnética



Fonte: Alterado pelo autor. Modificado de Spring *et al* (2018)

Neste contexto, equipamentos como forno micro-ondas ou soldadores de arco elétrico, que possuem sinais de natureza pulsante, acabam gerando ruídos de alta frequência, que podem influir em equipamentos próximos, da mesma forma que motores, ou lâmpadas fluorescentes também podem emitir frequências danosas a outros circuitos (SANCHES, 2003).

2.1.2.3 Outros Fatores envolvidos em circuitos eletrônicos

Quando se parte para o campo específico dos circuitos eletrônicos, podemos ainda citar como parte dos fatores que impactam no EMI, os desacoplamentos com fontes de alimentação, o aterramento, os componentes eletrônicos, e o projeto da PCI (SANCHES, 2003).

Dentro dos intra-sistemas, há a existência dos circuitos eletrônicos, que através de componentes e placas de circuito impresso constituem fatores contribuintes ao EMI. Os componentes eletrônicos que são soldados sobre a placa, sem atravessá-la, e que são mais conhecidos como componentes SMD (*surface mounted device*), por exemplo, possuem em geral um tamanho muito pequeno, podendo assim ser soldados mais próximos uns dos outros, o que é benéfico ao circuito ao reduzir áreas de circulação da corrente, também conhecido como

loop de corrente, que podem acoplar em outras placas ou mesmo dispositivos do próprio circuito, causando interferência (MONTROSE, 2000). Antagonicamente, componentes PTH (*plated through hole*), que são aqueles que atravessam a placa, vão aumentar áreas de circulação de corrente, aumentando a propagação. Além disso a disposição dos componentes nas placas pode também gerar problemas de susceptibilidade ou propagação de ruídos (SANCHES, 2003).

Layouts de circuito impresso por sua vez, podem também propagar efeitos indesejados. As placas multicamadas, que são as placas de mais de duas faces, podem gerar efeitos capacitivos, e indutivos que caso não controlados podem ser nocivos aos outros componentes (MONTROSE, 2000).

Além disso, a escolha do substrato (dielétrico que separa uma camada condutora da outra), e também o *layout* da placa com a redução das trilhas para não haver formação de antenas, são pontos a serem observados pelos engenheiros, quando do desenvolvimento da PCI (SANCHES, 2003). Outra observação que deve ser feita, é acerca da importância da curva não brusca para que a quantidade de rupturas na resistência elétrica da trilha seja reduzida, e assim seja evitada a formação de ondas estacionárias, ou VSWR (*voltage standing wave ratio*), que se formam devido mudança de direção em degraus de 90° (SATTEL, 2016). "Ondas estacionárias, são a combinação de duas ondas se movendo em direções opostas, cada uma com a mesma amplitude e frequência" (BRITANNICA, 2017).

Outro fato importante a ser mencionado é o aterramento das placas de circuito impresso. Pois o Terra, que também pode ser chamado de retorno, ou em inglês *ground*, é a base de referência para a tensão elétrica dentro do intra-sistema, ou seja, idealmente deveria representar uma diferença de potencial elétrica igual a zero. Na prática, dependendo dos componentes e também do *layout* aplicado, isso pode não acontecer, e ainda pior, pode causar interferência para os circuitos conectados a ele (SANCHES, 2003). Em altas frequências os terminais de aterramento dos componentes podem aumentar a indutância conduzida, o que configura um outro problema, haja vista que isso pode ocasionar uma diferença de potencial através das trilhas, que gera uma corrente de modo-comum (MONTROSE, 2000).

Por fim, há também de ser mencionado os desacoplamentos em fonte de alimentação pois segundo Sanches (2003, p. 3):

> A comutação de circuitos provoca transientes de corrente, os quais devem ser filtrados, provocando variações nas tensões das trilhas e do Terra. Valores elevados de $\frac{di}{dt}$ geram sinais de amplo espectro eletromagnético, o que provocará irradiação em estruturas e cabos. A variação da corrente em um condutor de indutância L resulta uma queda adicional de tensão de:

$V = L\frac{di}{dt}$; a qual pode ser minimizada pela redução de L ou $\frac{di}{dt}$.

Por essa equação temos,

$\frac{di}{dt}$ = A derivada da corrente elétrica em função do tempo.

L = A indutância elétrica.

V = A queda de tensão elétrica.

Com a explanação acima, compreende-se que componentes que comutam são capazes de gerar interferência, devido ao fato de gerarem grandes variações de corrente no tempo, o que leva ao aumento na queda de tensão, que nada mais é do que um aumento da tensão elétrica, propriamente dita, nas trilhas e também no Terra, prejudicando assim todo o circuito.

2.1.3 EMC

Segundo a IEV 161-01-07 (2017, tradução nossa), a definição de EMC é: “A habilidade de um equipamento ou sistema de funcionar satisfatoriamente em seu ambiente eletromagnético sem introduzir distúrbios eletromagnéticos intoleráveis a nada neste ambiente”. Em outras palavras, a compatibilidade eletromagnética, é a capacidade de dispositivos de não gerar interferência eletromagnética, e ao mesmo tempo não sofrer interferência eletromagnética de outros dispositivos ou dos meios onde estão inseridos. Ao passo que essa é uma definição simples, temos um contraponto que é a origem dessa interferência, intrinsicamente ligada às leis do eletromagnetismo.

Para melhor compreender as causas e efeitos dos problemas de EMC, é fundamental atentar para três itens chave nesse processo: A fonte da interferência, o caminho que essa interferência passa, e por fim o receptor dessa interferência, como mostrado na Tabela 2 apresentada na sequência (DELABALLE, 2001).

Hoje devido às mudanças radicais de comportamento dos circuitos, que estão fortemente miniaturizados, e ao mesmo tempo trabalhando com frequências muito altas, como UHF, SHF e EHF, por exemplo, acabam-se acentuando os distúrbios por aumento de valores em tensão e corrente, sensibilidade dos componentes, e distância entre os circuitos (DELABALLE, 2001). Assim, deve ser analisado cada um desses pontos particulares para melhor compreensão da criticidade do assunto.

Tabela 2 – Elementos de um ambiente EMC

FONTE	CAMINHO DE PROPAGAÇÃO	RECEPTOR
NATURAL	**RADIAÇÃO**	**BIOLÓGICO**
Terrestre	**Campo distante**	**Homem**
Atmosférica	Onda plana	Animais
Triboelétrica (materiais carregados por atrito)	**Campo próximo**	Plantas
Extraterrestre	*Crosstalk* capacitivo	**FEITO PELO HOMEM**
Solar	*Crosstalk* indutivo	**Comunicações**
Cósmico	*Crosstalk* de frente	Receptores de difusão
Estrelas de rádio	*Crosstalk* de trás	Receptores de navegação
FEITO PELO HOMEM	**CONDUÇÃO**	Receptores de radar
Comunicações	Distribuição de potência	Receptores duas vias
Difusão	Distribuição de sinal	**Industrial**
Navegação	*Loops* de Terra	Controladores
Radar		Amplificadores
Rádio duas vias		**Médico**
Industrial		Sensores biomédicos
Soldadores de Arco		**Artilharia**
Ultra limpadores		Dispositivo de encapsulamento e encriptação
Radiadores de indução por rádio frequência		Cápsulas dinâmicas
Luzes fluorescentes		**Dispositivos computacionais**
Médico		Receptores de linha
Scanners de tomografia		Fontes de energia
Diatermia (Método terapêutico com uso de radiação)		Unidades de disco
Doméstico		Amplificadores de vídeo
Barbeadores		
Inseticidas de alta tensão		
Micro-ondas		
Dispositivos Computacionais		
Receptores de linha		
Fontes de energia		
Unidade de disco		
Amplificadores de vídeo		

Fonte: Montrose (2000)

2.1.3.1 Fontes de interferência

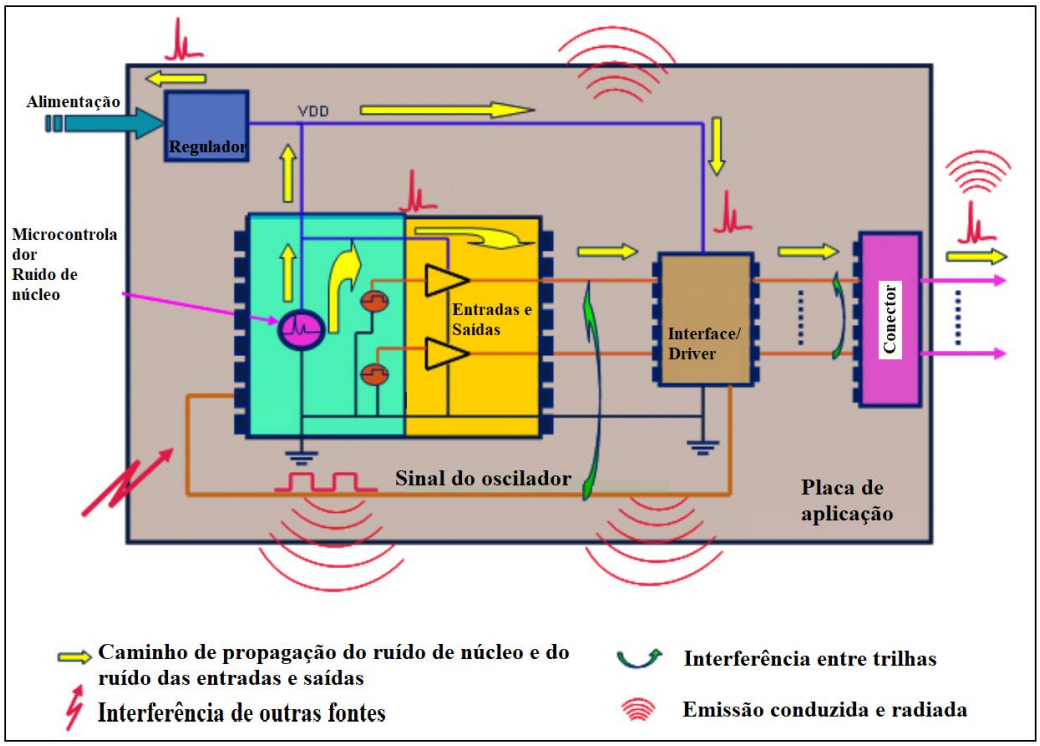
Sobre isso, Montrose (2000, p.2, tradução nossa) afirma: “A fonte de interferência é o elemento ativo produzindo a forma de onda original”. Em linhas gerais, as causas mais comuns de interferência são relâmpagos, distribuição de energia elétrica, ondas de rádio, e descargas eletrostáticas (DELABALLE, 2001). Porém se pensarmos no campo da eletrônica, veremos que são fontes de interferência principalmente os microcontroladores, os circuitos integrados, reguladores chaveados, e osciladores (INFINEON, 2016).

As razões pelas quais os relâmpagos podem causar interferência, são sua alta capacidade de corrente e tensão elétrica. Já a distribuição de energia elétrica, vem do fato de que as fontes chaveadas geram inúmeros distúrbios, tanto em baixa quanto em alta tensão, seja por altas frequências harmônicas, ou por tensões de surto. As ondas de rádio por sua vez, possuem as mais distintas origens, e geram interferências em altos valores de intensidade de campo elétrico. As descargas eletrostáticas, por fim, são originárias majoritariamente do corpo humano, onde devido ao simples caminhar sobre um tapete no tempo seco e em baixa temperatura, pode causar um carregamento de até 25 kV (DELABALLE, 2001).

Já entre os componentes eletrônicos, o maior problema encontrado vem dos chaveamentos de fontes de alimentação com seus reguladores, acionamentos de relés, operações de semicondutores de potência, e também dos núcleos de microcontroladores, além de suas portas de entradas e saídas, principalmente quando contém *drivers*, ou seja, portas de acionamento por corrente ou tensão, para outros dispositivos dentro do circuito, pois em geral, possuem grandes trilhas que acabam por se comportar como antenas, o que propaga ainda mais o sinal (INFINEON, 2016).

Na Figura 9 é possível visualizar um modelo genérico de fontes de interferência em uma PCI, como já apresentado, existem tanto interferências externas, entre sistemas, como a descarga eletrostática, quanto interferências intra-sistemas como os terminais de entrada e saída dos circuitos integrados.

Figura 9 – Placa de aplicação típica e caminhos de fontes de ruído



Fonte: Alterada pelo autor. Modificado de Infineon (2016)

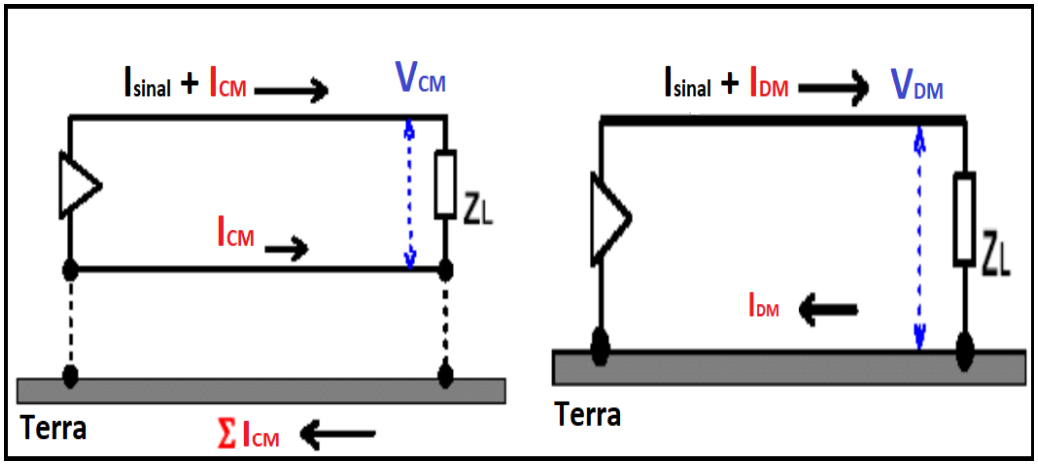
2.1.3.2 Caminhos de propagação

Os caminhos de propagação também podem ser traduzidos como caminhos de acoplamentos, ou *coupling*, e representam segundo Delaballe (2001, p. 10, tradução nossa): "O *link*, transferência ou transmissão de distúrbios eletromagnéticos de um emissor para uma vítima". Dentre os caminhos de propagação existentes nos circuitos, a primeira diferença a ser notada, é que há diferentes tipos de acoplamentos: O conduzido e o radiado. O acoplamento conduzido será por um meio físico como cabos, ou trilhas condutoras, ou seja, com um caminho definido, enquanto que o radiado será pelo ar, e a sua emissão se dará a partir de uma fonte onde sua propagação poderá ser estreita com uma angulação voltada a uma determinada direção, ou também omnidirecional, ou seja, em todas as direções (INFINEON, 2016). Em seguida, veremos importantes fatores sobre os acoplamentos, como a diferença entre acoplamento de modo-comum e modo-diferencial, e também algumas características dos caminhos de propagação, como os *loops* de corrente e de Terra, e o *crosstalk* entre trilhas. O *crosstalk*, pode ter sua origem vinda também da reflexão de ondas, que nada mais é que a fase inicial das ondas estacionárias, onde a energia do vinda da fonte do sinal não será transmitida propriamente por conta da linha que está levando esse sinal, não estar bem adaptada ao receptor,

ou seja, se não há um casamento entre linha de transmissão e o endereço onde esse sinal deve ir, o mesmo será refletido, uma parte da sua energia voltará com uma onda na mesma linha de onde está vindo. Caso esteja em fase com o sinal de origem, pode aumentar sua amplitude, a ponto de causar *crosstalk* com outros sinais em outras linhas (MONTROSE, 2000).

As interferências em tensão e correntes elétricas, também podem ser classificadas de acordo com a referência, ou pela direção do fluxo da corrente. Por exemplo, sendo uma interferência analisada em um caminho (ou uma trilha) referente ao Terra, é conhecida como interferência de modo-comum, e a direção do fluxo da corrente e do ruído, serão as mesmas como pode ser visto na Figura 10. Porém, se for uma interferência com referência a outro caminho (ou outra trilha), é conhecida então, como uma interferência de modo-diferencial e a direção do fluxo da corrente será oposta a direção do ruído (DELABALLE, 2001).

Figura 10 – Ruído de modo-comum (CM) e de modo-diferencial (DM)



Fonte: Alterado pelo autor. Modificado de Infineon (2016)

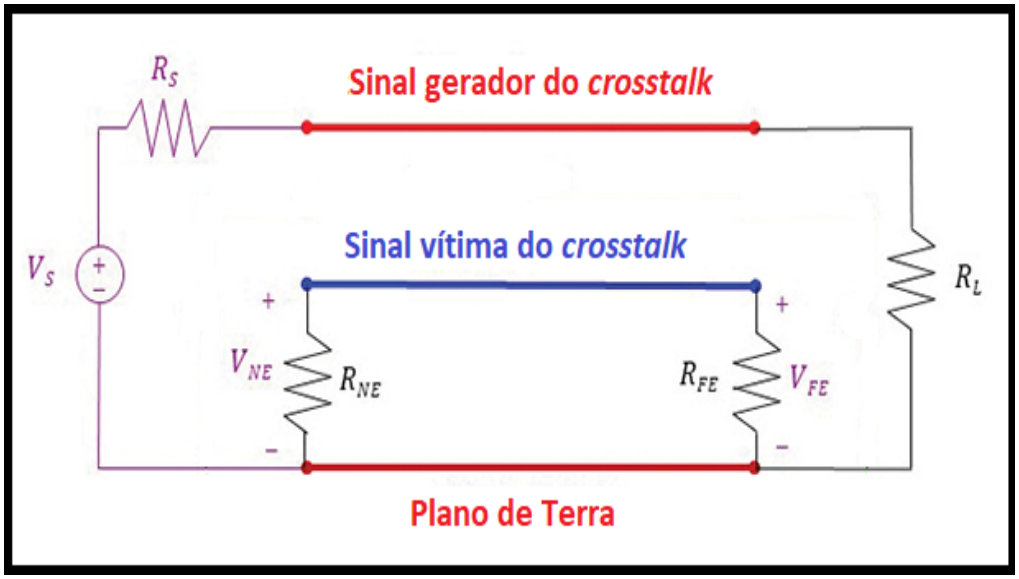
Os *Loops* de Terra ou de corrente também são importantes fatores a se observar, principalmente se tratando de PCIs. Os *Loops* de corrente, são aquelas trilhas por onde passam correntes de transição que são formadas no chaveamento de alguns sinais. Essas correntes vão por essas trilhas e acabam retornando pelo Terra, fechando assim o *loop* (INFINEON, 2016). Esses *loops* podem criar indutores como afirma Infineon (2016, p. 7, tradução nossa): "Os *loops* de corrente têm indutância significante e podem ser modeladas como uma bobina de transformador". Essa informação será muito importante mais a frente, quando tratar-se-á dos indutores embarcados.

"Os loops de Terra, são os maiores contribuintes para o desenvolvimento e propagação da energia de rádio frequência" (MONTROSE, 2000, p. 47, tradução nossa). Desta

forma, o *loop* de Terra vai gerar uma diferença de potencial elétrica, que será desigual do ponto de vista de dois circuitos que sejam diferentes, por seus Terras não possuírem a mesma referência (MONTROSE, 2000).

Por fim, temos o efeito chamado de *crosstalk*, que talvez seja um dos mais conhecido dos desenvolvedores. C*rosstalk*, do inglês “conversa cruzada”, é a interferência gerada quando há o acoplamento entre trilhas, fios ou cabos que transmitem sinais do tipo *clock* (sinal periódico de pulsos, representando o tempo, usado principalmente para sincronismo), e também sinais de dados, e controle por exemplo (INFINEON, 2016). Para a sua ocorrência são necessários três ou mais condutores, pois um será uma linha que servirá para referência, permitindo a comunicação, e outras duas vão ser as portadoras do sinal como mostra a Figura 11 (MONTROSE, 2000).

Figura 11– Portadoras do sinal e referência para geração de *crosstalk*



Fonte: Alterada pelo autor. Modificado de Adamczyk, Aldridge (2018)

O *crosstalk* está relacionado tanto com o acoplamento capacitivo quanto com o indutivo, sendo o acoplamento capacitivo gerado por trilhas que estão paralelas umas às outras, sendo o acoplamento uma função direta da distância entre as trilhas e também a área da sobreposição das trilhas (MONTROSE, 2000). Já o acoplamento indutivo ocorre devido às trilhas estarem muito próximas fisicamente, o que resulta no efeito semelhante aos rolamentos de bobina, por efeito de campo eletromagnético (INFINEON, 2016).

2.1.3.3 Receptor da interferência

São tratados como vítimas, ou receptores de interferência, todos os dispositivos que podem sofrer interferência, vinda de uma emissão conduzida ou irradiada, e que cause problemas de mal funcionamento ao mesmo (DELABALLE, 2001). As vítimas podem ser encontradas tanto entre sistemas, quanto em intra-sistemas, e mais detalhes sobre como amenizar os efeitos das emissões sobre elas serão detalhadas no item sobre o PCI e as técnicas de componentes embarcados.

2.2 CAPACITORES E INDUTORES

No contexto de aplicabilidade dos componentes embarcados, indutores e capacitores, por serem componentes passivos e de implementação não complexa, são mais explorados, e grande parte dos estudos nessa área é referente a estes dois itens. Sendo assim, deve-se conhecer primariamente a sua estrutura, e mecanismo de funcionamento para poder então efetivamente explorar a sua composição dentro das PCIs. As considerações abaixo são feitas inicialmente, desconsiderando efeitos da frequência, afim de não introduzir os problemas de reatância e impedância nos cálculos.

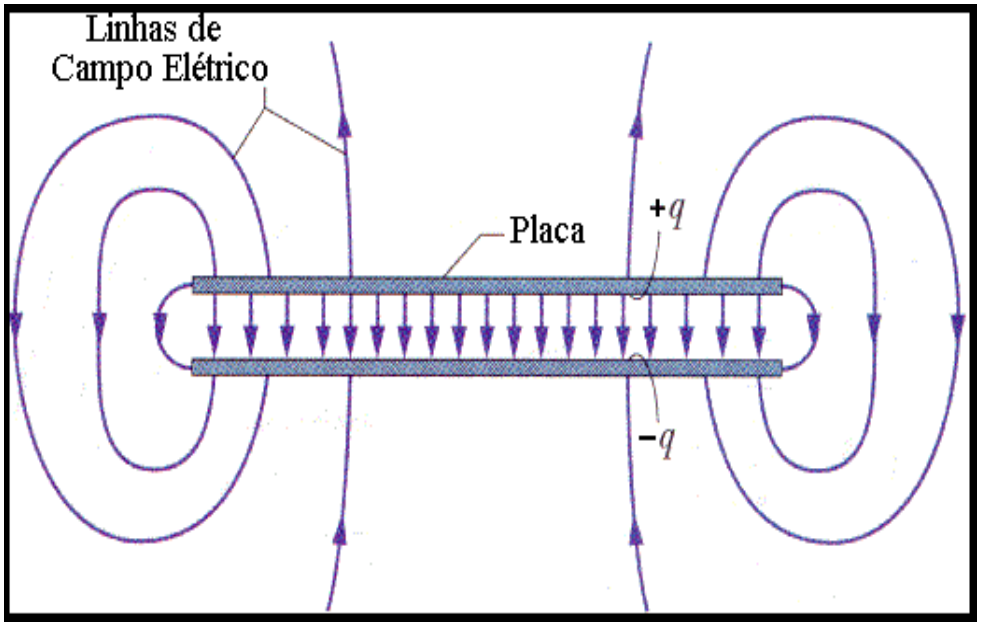
2.2.1 Capacitores

Segundo Britannica (2018, tradução nossa): “Capacitor é um dispositivo para armazenamento de energia elétrica, consistente de dois condutores próximos e isolados um do outro”. Lembrando da garrafa de Leyden, comentada previamente na introdução sobre eletromagnetismo, ainda no início deste capítulo, pode-se dizer que os capacitores são uma evolução da mesma, porém essa estocagem de energia eletrostática, deve-se ao acúmulo e armazenamento de cargas elétricas, além do efeito de campo elétrico entre as placas (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012). Quando o capacitor está plenamente carregado, a carga q será a mesma em ambas as placas, todavia, com polaridades diferentes, uma positiva e outra negativa, assim as linhas de campo que se formam serão como na Figura 12 (ASSUMPÇÃO, 2012).

Os capacitores são muito usados para armazenagem de energia, pois primariamente essa é sua maior função. Além disso, podem ser usados para desacoplamento, ou seja,

minimizar a abrupta mudança de frequência em tensões elétricas que alimentam circuitos (AUTODESK, 2016). Além disso, também são largamente utilizados em filtros, por se opor a passagem de baixas frequências (AUTODESK, 2016).

Figura 12 – Linhas de campo em um capacitor



Fonte: Halliday e Resnick e Walker (2012)

A equação inicial para os capacitores, que relaciona a carga e a tensão elétrica, é mostrada a seguir:

$$\frac{q}{V} = C$$

Onde

q = A carga elétrica.

V = A tensão elétrica.

C = A constante de proporcionalidade.

O C , constante de proporcionalidade entre carga e tensão elétrica, é na verdade a capacitância. A capacitância é a relação estabelecida, portanto, entre a quantidade de cargas acumuladas nas placas, pela diferença de potencial (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012). Sua unidade de medida é o Farad, ou Coulomb por Volt.

Para carregar um capacitor, é preciso de uma fonte que gere um movimento de cargas, e carregue suas placas, positiva e negativa. Assim, em cada placa será notado o acúmulo de carga q. Devido a constante de proporcionalidade (capacitância), se a tensão elétrica desta fonte dobrar, a carga também vai dobrar nas placas, e continuará aumentando conforme se

aumenta a tensão elétrica, até que atinja o seu limite, que é caracterizado pela ruptura do isolante (ASSUMPÇÃO, 2012). Quando o capacitor atinge o mesmo valor de tensão elétrica imposta pela fonte, os elétrons param de circular, pois, nenhuma das placas do capacitor terá diferença de potencial em relação aos polos da fonte em questão, e não haverá mais o carregamento, chegando ao chamado regime permanente do capacitor (ASSUMPÇÃO, 2012). Caso desconectado da bateria, o capacitor vai manter as cargas armazenadas pelo efeito de campo elétrico. Como há um dielétrico entre as placas, e uma está positivamente carregada, enquanto a outra está negativamente carregada, as linhas de campo se formam do positivo ao negativo como visto na Figura 12, criando assim um campo elétrico (BRITANNICA, 2018). Este campo pode assumir uma forma mais homogênea a medida que se diminui a distância entre as placas, ou aumenta-se a área das mesmas, sendo que esses fatores influenciam diretamente o valor de sua capacitância (BRITANNICA, 2018).

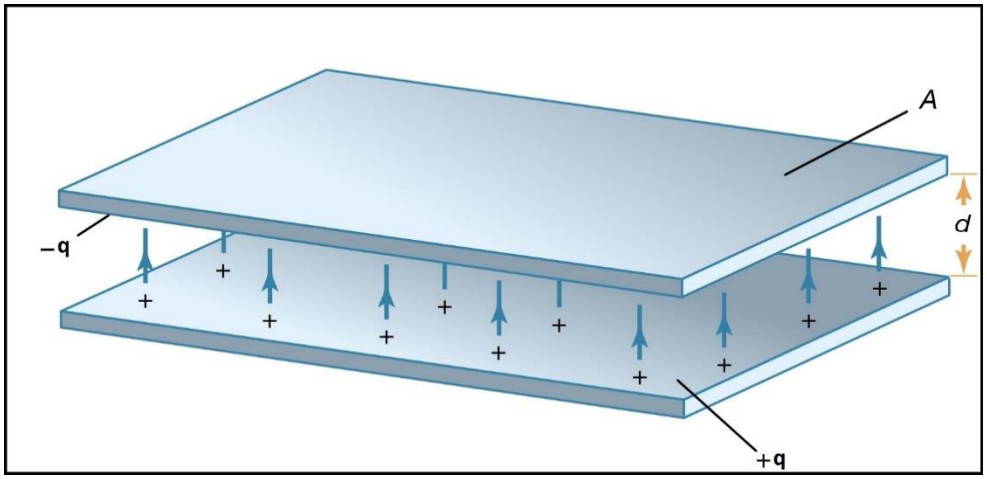
2.2.1.1 Tipos de capacitores

A seguir, será detalhado a construção de alguns tipos de capacitores. A maneira como são formatados é essencial para entender como os capacitores embarcados trabalham. Serão apresentados os capacitores de placas paralelas, o cilíndrico, e o esférico.

2.2.1.1.1 Capacitor de placas paralelas

O capacitor de placas paralelas consiste em duas placas condutoras planas, cada uma com uma área A igual a outra e posicionadas paralelamente, com uma distância d entre elas preenchida por um material dielétrico conforme Figura 13 (BRITANNICA, 2018).

Figura 13 – Capacitor de placas paralelas



Fonte: Britannica (2018)

Para o cálculo do campo elétrico, considera-se que as placas do capacitor estão carregadas, e utiliza-se a lei de Gauss:

$$\varepsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q$$

Onde,

q = A carga elétrica envolvida pela superfície Gaussiana.

$\vec{A}$ = A área das placas.

$\vec{E}$ = O campo elétrico.

ε_0 = A constante de permissividade elétrica no vácuo.

$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$ = O fluxo elétrico que atravessa a superfície Gaussiana.

A superfície atravessada pelas linhas de campo é chamada superfície Gaussiana[7]. É importante entender essa superfície atravessada pelas linhas do campo elétrico, para a compreensão da integral que toma esta área, fazendo a somatória do fluxo elétrico. Assim, ao analisarmos o campo $\vec{E}$ como constante e paralelo à área $\vec{A}$ (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012), a equação se desenvolverá assim:

$$q = \varepsilon_0 EA$$

Onde,

E = Módulo constante do campo $\vec{E}$.

[7] A lei de Gauss para a eletricidade contempla a descrição sobre o fluxo elétrico, onde diz-se que este fluxo ao atravessar uma superfície fechada, será proporcional a carga elétrica contida nesta superfície. Esta superfície atravessada pelas linhas do fluxo, é conhecida como superfície Gaussiana, mesma nomenclatura adotada pelas superfícies fechadas transpassadas por linhas de campo elétrico calculadas em outras situações onde a lei de Gauss é aplicada, como por exemplo, em capacitores (BRITANNICA, 2009).

A = Área da superfície Gaussiana (placa do capacitor), por onde passa o fluxo.

Para o cálculo da diferença de potencial elétrico em relação ao campo elétrico, temos a seguinte fórmula, de acordo com Halliday e Resnick e Walker (2012):

$$V_f - V_i = -\int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Onde,

$\overrightarrow{ds}$ = Deslocamento.

$V_f - V_i$ = Diferença de potencial entre dois pontos $i\ e\ f$.

Essa integral é calculada de uma placa à outra, seguindo as linhas de fluxo do campo da placa negativa à placa positiva, e assim invertendo o sinal da equação. A diferença de potencial será apenas V, e a equação ficará então (ASSUMPÇÃO, 2012):

$$V = \int_-^+ E\, ds$$

Onde,

$\int_-^+ E$= A trajetória de integração do campo E de – até +.

V = A diferença de potencial.

Fazendo uma suposição de que a distância entre placas é mínima, e que o tamanho da área de cada uma é grande o suficiente para desconsiderar o efeito de campo nas bordas, podemos dizer então, que $\vec{E}$ é constante (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012). Assim:

$$V = \int_-^+ E\, ds = E \int_0^d ds = Ed$$

Onde,

d = A distância d será o limite de integração.

Desta forma, sabendo que $V = Ed$, e que também para a mesma estrutura onde $\vec{E}$ é constante, o valor da carga é $q = \varepsilon_0 EA$, teremos então uma substituição em $\frac{q}{V} = C$ (ASSUMPÇÃO, 2012). Dessa forma, a equação ficará da seguinte maneira para os capacitores de placas paralelas:

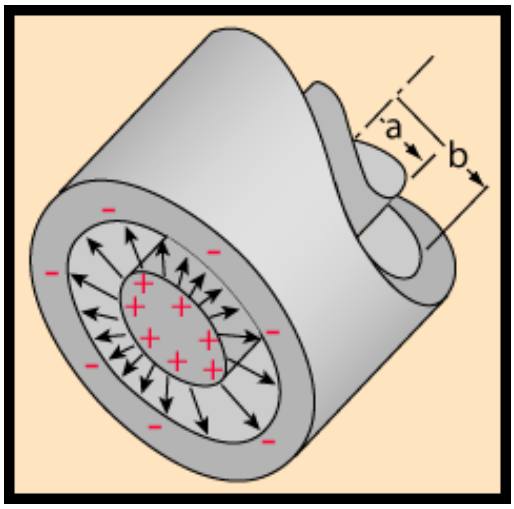
$$\frac{\varepsilon_0 A}{d} = C$$

Assim, é possível notar que idealmente, um capacitor de placas paralelas terá sua capacitância diretamente proporcional apenas à área e à permissividade elétrica do material dielétrico, enquanto que será inversamente proporcional apenas à distância entre as placas (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

2.2.1.1.2 Capacitor Cilíndrico

Diferentemente do capacitor de placas paralelas, o capacitor cilíndrico apresenta uma formação geométrica totalmente diferente, sendo que suas placas condutoras são em formato cilíndrico, uma dentro da outra. Seus raios são a e b como mostra a Figura 14. Novamente para efeitos de cálculo, vamos desconsiderar os efeitos de campo nas bordas, ao estipular que seu comprimento l, será $l \gg b$ (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Figura 14 – Capacitor cilíndrico



Fonte: Hyperphysics (2018)

Para efeitos de cálculo, substitui-se a área A pela fórmula da área cilíndrica lateral $2\pi rL$.

$$q = \varepsilon_0 EA = \varepsilon_0 E(2\pi rl)$$

Onde,

l= O comprimento do cilindro.

r = O raio da superfície gaussiana (superfície atravessada pelas linhas de campo).

Nas bases do cilindro, como desconsiderou-se o campo nas bordas, o fluxo será zero (ASSUMPÇÃO, 2012). Com base na fórmula $E = \frac{q}{\varepsilon_0 2\pi rl}$, pode-se projetar a seguinte integração para encontrar a diferença de potencial:

$$V = \int_{-}^{+} E\, ds = -\frac{q}{\varepsilon_0 2\pi l}\int_b^a \frac{dr}{r} = \frac{q}{\varepsilon_0 2\pi l}\ln(\frac{b}{a})$$

Onde,

$ds = -dr$, por conta da direção da integração de fora para dentro, ou seja, de negativo para positivo.

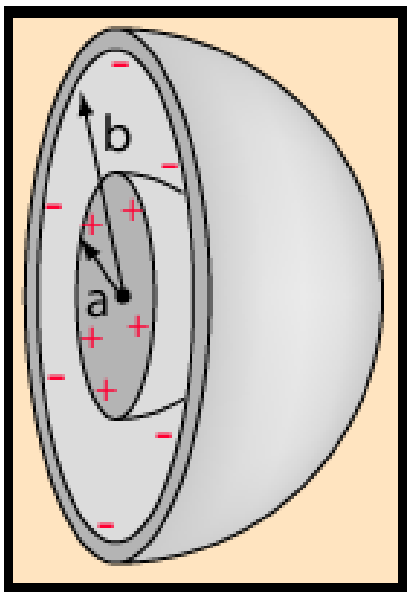
Assim, recursivamente usando $\frac{q}{V} = C$, veremos que para o capacitor cilíndrico, sua capacitância vai depender somente de fatores relacionados à sua geometria como raio, e comprimento (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012):

$$\varepsilon_0 2\pi \frac{l}{\ln(\frac{b}{a})} = C$$

2.2.1.1.3 Capacitor esférico

O capacitor esférico consiste de uma esfera condutora dentro de outra esfera condutora, como mostra a Figura 15. Para este modelo de capacitor, também será avaliada sua geometria, de uma forma que seja possível a extração da equação de seu campo, diferença de potencial, e capacitância. Para isso, serão observados os raios a e b das esferas, e sua área $4\pi r^2$ (ASSUMPÇÃO, 2012).

Figura 15 – Capacitor esférico



Fonte: Hyperphysics (2018)

Lembrando-se da equação do campo, $q = \varepsilon_0 EA$, concluímos que a nova fórmula será:

$$q = \varepsilon_0 EA = \varepsilon_0 E(4\pi r^2)$$

Onde,

r = O raio da superfície Gaussiana.

A superfície Gaussiana será concêntrica às outras duas esferas, e assim pode-se deduzir (ASSUMPÇÃO, 2012):

$$V = \int_{-}^{+} E\, ds = -\frac{q}{\varepsilon_0 4\pi}\int_b^a \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{\varepsilon_0 4\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right) = \frac{q}{\varepsilon_0 4\pi}\frac{b-a}{ab}$$

Onde,

$ds = -dr$, por conta da direção da integração de fora para dentro, ou seja, de negativo para positivo.

Por fim teremos novamente a substituição dos fatores para a fórmula da capacitância (ASSUMPÇÃO, 2012):

$$\varepsilon_0 4\pi \frac{ab}{\mathrm{b-a}} = C$$

2.2.1.2 Capacitância com dielétrico

Os exemplos levantados tomaram em consideração o meio vácuo, que possui sua permissividade relativa igual a um, e por isso é ignorado dos cálculos. Entretanto, podemos analisar também casos em que o dielétrico é diferente do vácuo. Dessa forma, a capacitância é multiplicada por um fator k, ou constante dielétrica, que também pode ser encontrada como permissividade relativa, ε_r. A constante dielétrica representa as propriedades do próprio dielétrico, e por isso seu valor será diretamente proporcional ao valor da capacitância, já que as linhas do campo elétrico atravessarão diretamente esse material. Assim, quando substituído o vácuo por um outro dielétrico, deve-se considerar o produto entre a permissividade no vácuo e a constante dielétrica, para todas as equações (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012):

$$\varepsilon_0 \oint k\vec{E} \cdot d\vec{A} = q$$

Onde,

q = A carga livre.

ε_0 = A permissividade no vácuo.

k = A constante dielétrica.

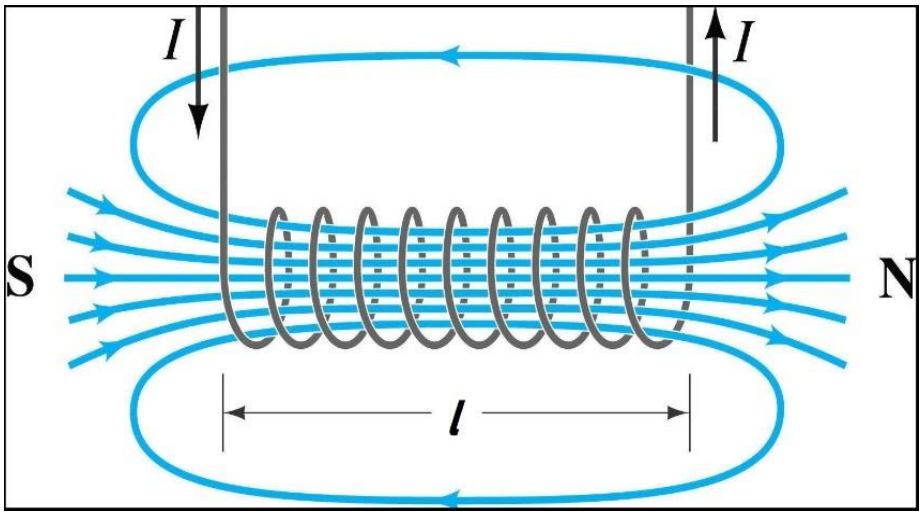
Essa equação poderá ser usada para todos os tipos de capacitores independente da forma, como explica Halliday e Resnick e Walker (2012, p. 125): “Os efeitos da presença de um dielétrico podem ser explicados nos termos da ação de um campo elétrico sobre os dipolos elétricos permanentes ou induzidos no dielétrico”.

2.2.2 Indutores

O indutor é um dispositivo, geralmente em forma de solenoide como mostra a Figura 16, que consegue armazenar energia através do campo magnético. Esse campo é estabelecido pela passagem de uma corrente em variação (BRITANNICA, 2018).

Indutores podem ser usados assim como os capacitores, em filtros, pois se opõe a variação de corrente, e às altas frequências.

Figura 16 – Linhas de campo em um Indutor



Fonte: Miniphysics (2018)

A indutância é a grandeza utilizada para relacionar o fluxo magnético com a corrente no indutor e o número de espiras do solenoide. A corrente elétrica é o fluxo de cargas em um período de tempo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

$$\frac{N\Phi_B}{I} = L$$

Onde,

L = A indutância.

N = O número de espiras.

Φ_B = O fluxo magnético.

I = A corrente elétrica.

O produto $N\Phi_B$, é mais conhecido como enlaçamento de fluxo magnético. As espiras estão como pode ser notado na Figura 16, enlaçadas pelo fluxo magnético, daí a origem desse nome. É possível perceber que quanto maior o número de espiras ou do fluxo magnético, ou seja, quanto maior o valor desse enlaçamento de fluxo, maior será a indutância. A unidade

para representar o $\frac{Tm^2}{\mathrm{A}}$ (Tesla metro quadrado por Ampère), é o Henry (H) (BRITANNICA, 2018).

Como já apontado anteriormente, campos magnéticos induzidos por correntes elétricas são mais susceptíveis à interferência, e por isso, para garantir que alguns dos cálculos básicos envolvendo a indutância sejam factuais, trabalha-se com a suposição de não haver nenhum material que gere interferência, próximo aos indutores (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

A equação para definição da indutância que foi mostrada, serve como exemplo para um condutor. Porém, para conhecer os fatores que giram em torno da indutância de um solenoide, é necessário se atentar ao enlaçamento de fluxo criado pela corrente, levando em conta a seção reta do condutor (A) e o valor do módulo do campo magnético (B) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

$$N\Phi_B = (nl)(BA)$$

Onde,

n = O número de espiras por unidade de comprimento.

l = O comprimento da seção.

A = A seção reta do condutor.

B = O módulo do campo magnético.

Como B também pode ser representado por $\mu_0 In$, sendo μ_0 a constante de permeabilidade, teremos segundo Halliday e Resnick e Walker (2012):

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} = \frac{(nl)(BA)}{I} = \frac{(nl)(\mu_0 In)(A)}{I} = n^2 \mu_0 lA$$

Onde,

μ_0 = A constante de permeabilidade.

Por esta equação, nota-se que assim como a capacitância, descrita no tópico anterior, a indutância também pode assumir seu valor com base apenas nas suas características geométricas (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

2.2.2.1 Autoindução

O efeito de reação à mudança de corrente no circuito por parte do próprio circuito, é conhecido como autoindutância. Essa autoindutância gera na bobina uma força eletromotriz auto induzida ε_L que respeita a equação (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012):

$$\varepsilon_L = -\frac{d(N\Phi_B)}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$$

Onde,

ε_L = A força eletromotriz auto induzida.

t = O tempo.

Logo, essa força será em função da indutância produto da variação da corrente no tempo, e sempre vai aparecer para se opor a variação de corrente, tanto no aumento, com a força eletromotriz na direção contrária à sua, quanto na diminuição da corrente, com a força eletromotriz na mesma direção (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012). Essa autoindução é importante a ser considerada nos cálculos de indutância.

2.2.2.2 Tipos de indutores

Os indutores podem ter diferentes construções. Porém, pode ser notada uma diferença de construção com relação ao núcleo, quando se substitui o ar por um material ferromagnético, como apontado por Newworldencyclopedia (2018, tradução nossa):

> Um indutor é normalmente construído como uma bobina de material condutor, tipicamente fio de cobre, enrolado em torno de um núcleo que pode ser tanto ar como material ferromagnético. Materiais de núcleo com uma permeabilidade mais alta que o ar aumentam o campo magnético e o confinam mais próximo do indutor, enquanto aumentam a indutância. (...)
>
> Alguns indutores podem ser diretamente gravados em uma placa de circuito impresso ao desenhar a trilha em padrão espiral. Alguns indutores como os planares usam um núcleo planar.

Para esses tipos diferentes de indutores, temos as equações para a indutância, de acordo com a Tabela 3 (NEWWORLDENCYCLOPEDIA, 2018). Essas equações assim como as equações mostradas para o cálculo de capacitância, tem origem nas equações originais dos indutores, e vão também depender diretamente da geometria de cada formato de indutor, além é claro, de sofrer influência do tipo de material escolhido para composição do núcleo.

Tabela 3 – Diferentes tipos de indutores e respectivas equações para indutância

Construção	Fórmula	Dimensões
Bobina cilíndrica	$L = \frac{N^2 \mu_0 K A}{l}$	L = A Indutância. μ_0 = A permeabilidade do espaço livre. K = O Coeficiente de Nagaoka. N = O Número de espiras. A = A área da seção. cruzada da bobina. l = O comprimento da bobina.
Condutor de fio reto	$L = l\left(ln\frac{4l}{d} - 1\right) \cdot 200 \times 10^{-9}$	L = A Indutância. l = O comprimento do condutor. d = O diâmetro do condutor.
Bobina cilíndrica curta de núcleo a ar	$L = \frac{N^2 r^2}{9r + 10l}$	L = A Indutância. r = O raio externo da bobina N = O Número de espiras. l = O comprimento da bobina.
Bobina multicamadas de núcleo a ar	$L = \frac{0{,}8 r^2 N^2}{6r + 9l + 10d}$	L = A Indutância. r = O raio médio da bobina. l = O comprimento físico do enrolamento da bobina. N = O Número de espiras. d = A profundidade da bobina (raio exterior menos o raio interior).
Bobina espiral plana de núcleo a ar	$L = \frac{r^2 N^2}{(2r + 2{,}8d) \times 10^5}$	L = A Indutância. r = O raio médio da bobina N = O Número de espiras. d = A profundidade da bobina (raio exterior menos o raio interior).
Núcleo Toroidal (seção cruzada circular)	$L = \mu_0 \mu_r \frac{r^2 N^2}{D}$	L = A Indutância. μ_0 = A Permeabilidade do espaço livre μ_r = A Permeabilidade relativa do material do núcleo r = O raio do enrolamento da bobina N = O Número de espiras. D = O diâmetro total do toroide.

Fonte: Alterada pelo autor. Modificado de Newworldencyclopedia (2018)

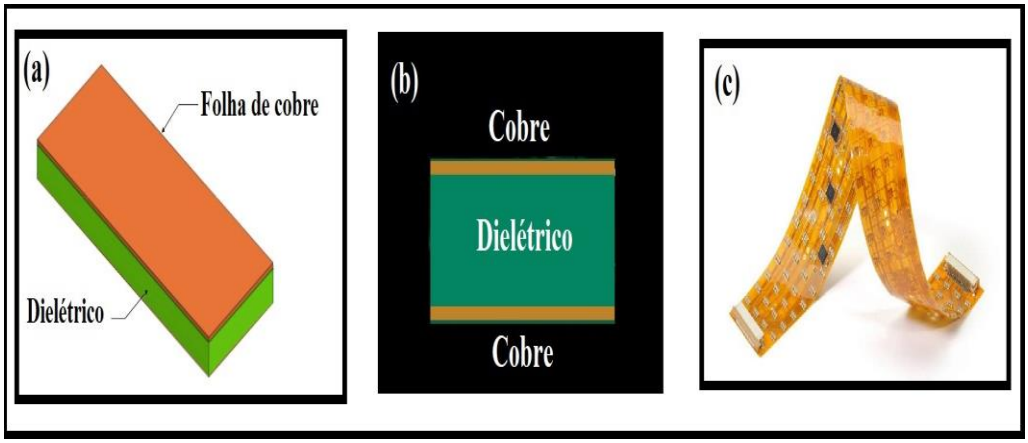
2.3 PCI – O SURGIMENTO DOS COMPONENTES EMBARCADOS

As placas de circuito impresso (PCIs), como já destacado, tem evoluído muito ao longo dos últimos anos. Materiais, componentes, ferramentas para desenvolvimento, e logicamente, os *layouts* também tem mudado largamente em escala global, e hoje nota-se que há uma estruturação das etapas mais utilizadas no processo para a manufatura das placas (PCBWAY, 2018). A confecção das PCIs deve ser explorada e conhecida pelos desenvolvedores, ao passo que se deve conhecer também os *softwares* para desenvolvimento, além de entender os tipos de materiais atualmente disponíveis, e as técnicas mais modernas de *layout* para placas eficientes e robustas, que sejam preparadas para os possíveis problemas de EMC os quais possa vir a ser eventualmente acometida (MONTROSE, 2000).

2.3.1 Fabricação da placa de circuito impresso

Inicialmente, as placas eram de face simples, ou seja, havia um material isolante como base, e sobre ele um material condutor, geralmente um revestimento de cobre, como já descrito anteriormente e mostrado na Figura 17. Com a evolução da engenharia de materiais e também dos meios de produção, surgiram as placas de face dupla, semelhantes às de face simples, porém com revestimento de cobre dos dois lados do dielétrico, e as placas multicamadas, com camadas internas de cobre (MCLPCB, 2017). Mais recentemente, tivemos ainda a criação das placas flexíveis, de uma ou duas faces, porém com um material isolante que é maleável, para aplicações onde haja necessidade de estruturas não fixas (PCBCART, 2018). Porém as placas mais utilizadas ainda são as multicamadas. Hoje em dia há placas que podem conter 10 camadas ou até mais, aumentando a complexidade dos *layouts* e impulsionando ainda mais os estudos de otimização das características dos diferentes materiais (MCLPCB, 2017). Essas camadas geralmente são em números pares, e a sua construção é mostrada na Figura 18.

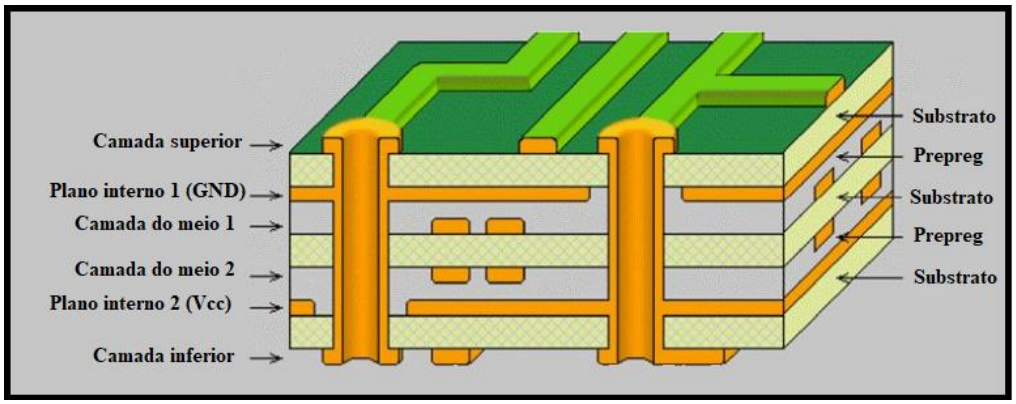
Figura 17 - Placa face simples (a). Face dupla (b). Placa flexível (c)



Fonte: Alterada Pelo Autor (2018)

Os dielétricos comportados dentro do processo de fabricação das PCIs também são conhecidos como substrato. Onde há mais de duas camadas, poderá ser aplicado um material dielétrico diferente, chamado de prepreg. O prepreg, segundo Pcbcart (2018): "(...) consiste em folhas de fibra de vidro pré-impregnadas com resina epóxi (...)", e sua camada na PCI, poderá ser menos espessa que as camadas de substrato.

Figura 18 – Exemplo de placa multicamadas com 6 camadas



Fonte: Autor (2018)

O fluxograma da Figura 19 mostra separação da produção de uma placa de circuito impresso em algumas etapas, de maneira resumida. A seguir, essas etapas serão explicadas com mais detalhe.

Figura 19 - Fluxograma simplificado das etapas de fabricação de uma PCI

Fonte: Autor (2018).

2.3.1.1 Impressão dos filmes

O primeiro passo é a impressão dos filmes, também chamados *dry-film*, através das impressoras Plotter, como mostra a Figura 20 (CANDORIND, 2018). O *dry-film* mostra os detalhes do design de cada camada, onde a cor branca representa as áreas sem condutores, e a preta as áreas condutivas, para as camadas internas, sendo que as camadas externas, superior e inferior, vão ter as cores trocadas para condutores e não condutores (MCLPCB, 2017). Além da impressão do *dry-film*, há também o processo de impressão direta na folha de cobre feita a partir de impressoras Plotter à laser que removem as áreas sem trilhas ou malhas (SATTEL, 2016).

Figura 20 – Impressora Plotter

Fonte: Frezycnc (2017)

2.3.1.2 Criação das camadas internas

Em seguida há a impregnação do substrato (geralmente Fibra de vidro FR4) por uma resina epóxi, através de spray ou do próprio mergulho do isolante dentro de um tanque de fluído (CANDORIND, 2018). Então, é iniciada a junção do *dry-film* nos laminados de cobre em ambos os lados do substrato, para criar as camadas internas. Esses três itens juntos, são cobertos por um material sensível à luz (foto resistente que manterá a parte pintada sobre o cobre intacta à remoção, sendo esse foto resistente ativo à luz ultravioleta) que servirá para obter uma forte combinação do *dry-film* com a estrutura substrato e cobre, para que haja o mínimo de disparidade possível (PCBCART, 2018). Uma solução alcalina é usada então para remover excessos de foto resistente como mostra a Figura 21, e o processo passa por um outro produto químico para a remoção do cobre que não será utilizado, mantendo apenas o cobre da parte impregnada com foto resistente. Finalmente para concluir essa etapa, uma inspeção visual e uma automática por scanner, são realizadas e também um último alinhamento é performado caso necessário (PCBWAY, 2018).

Figura 21 – Banho em solução alcalina

Fonte: Sattel (2016)

2.3.1.3 Laminação

Com as camadas internas alinhadas e inspecionadas, o próximo objetivo é laminar as camadas, ou seja, empilhar as camadas e uni-las de uma maneira que juntas formam uma única placa (MCLPCB, 2017). Para tanto, é depositada sobre a primeira camada que foi criada, uma cobertura de prepreg, e então folhas de cobre dos dois lados, tanto superior quanto inferior, caso seja uma placa de 4 camadas, esta será sua composição (SATTEL, 2016). Após esse empilhamento, haverá a união de todas as camadas, através de uma prensa mecânica, e por fim são prensados à altas temperaturas (cerca de 190 °C) com uma pressão de cerca de 275 a 400 PSI (*Pounds per square inch*, ou libras por polegada quadrada, que equivale no SI a aproximadamente 2,75 MPa), que derrete o epóxi e funde completamente todas as camadas finalizando a adesão do cobre aos substratos (PCBWAY, 2018). Agora a placa está pronta para a furação, que é feita através de uma furadeira a broca como mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Furadeira à broca

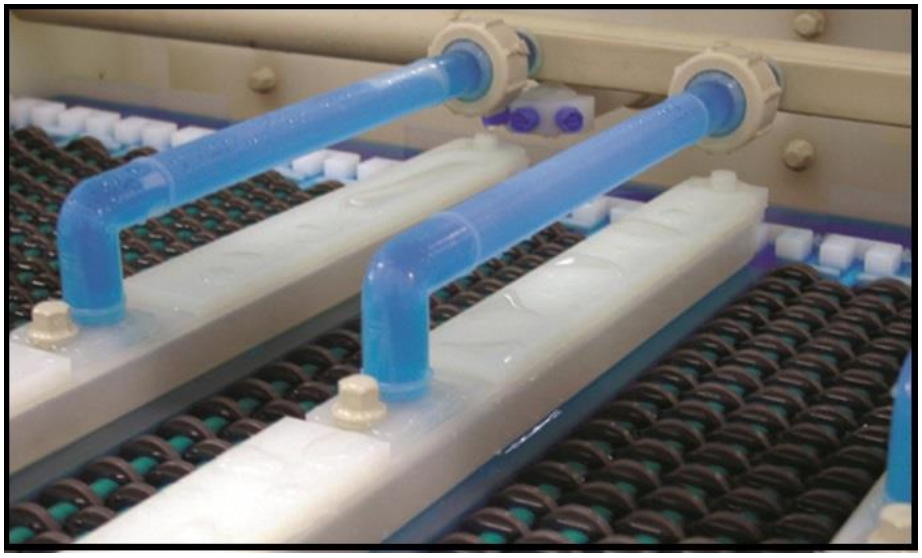
Fonte: Decispindle (2018)

2.3.1.4 Deposição do Cobre

Nesse ponto, um novo banho é dado a placa, porém dessa vez será para preencher com cobre a superfície e os furos que a furadeira criou, ou seja, uma galvanização a base de

cobre, mais conhecida como deposição de cobre eletrolítica, que é feita por uma outra máquina, como mostrado abaixo na Figura 23. Em seguida é feita a impressão das camadas de cobre externas, com um processo muito semelhante ao processo das camadas internas, porém com as cores trocadas, como já mencionado anteriormente (PCBCART, 2018). Esse processo permite adicionar mais cobre posteriormente, caso necessário. Após a exposição aos raios ultravioleta, o foto resistente é removido e então uma nova galvanização é executada com cobre, e neste momento também com uma película de estanho, que auxilia na preservação do cobre, na hora da remoção. Por fim um novo banho químico, dessa vez remove o cobre indesejado das camadas externas (CANDORIND, 2018).

Figura 23 - Máquina para deposição de cobre eletrolítica.



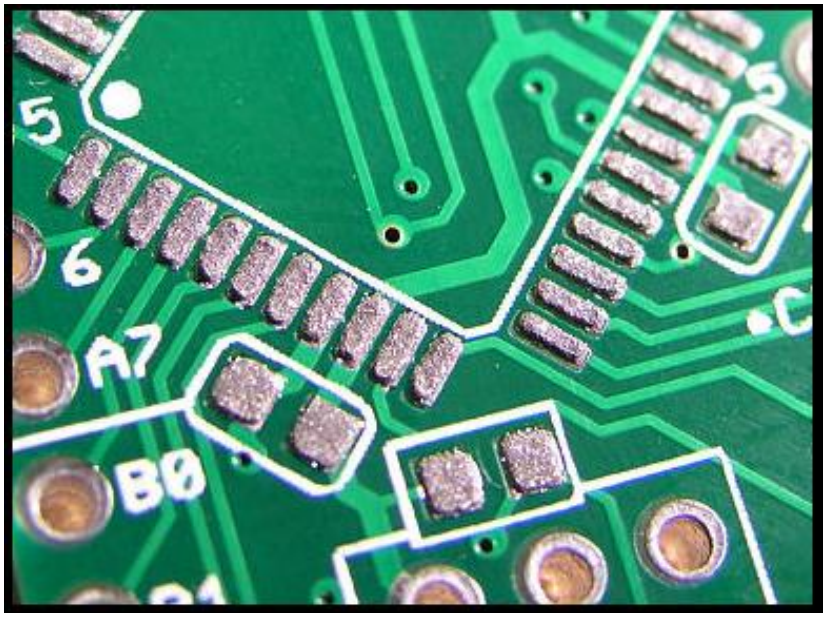
Fonte: Schmid (2017)

2.3.1.5 Máscara de solda

É aplicada então sobre a placa, a máscara de solda, que possui coloração geralmente verde, e serve para cobrir a parte condutora das trilhas e malhas onde não será feita solda. Os pontos que serão soldados, chamados de *pads*, receberão por sua vez um acabamento em compostos químicos formados com ouro, prata ou até níquel, que vão proporcionar uma fácil adesão ao processo de soldagem de componentes, além de auxiliar na prevenção à oxidação (MCLPCB, 2017). Para poder endereçar os componentes, e até trazer informações sobre a PCI, é então impressa sobre a placa, uma serigrafia com tinta colorida, para mostrar os designadores de cada componente, além do nome da placa e versão, como mostra a Figura 24.

Está finalizada a produção da placa, e liberada para última limpeza, inspeção e teste elétrico, que garante que nenhum curto foi realizado no processo (PCBWAY, 2018).

Figura 24 – *Pads* já cobertos com pasta de solda (em prata), máscara de solda (em verde) e serigrafia (em branco)



Fonte: Sattel (2016)

Esse processo descrito, representa a produção de uma placa 4 camadas, e leva em torno de cinco dias úteis dependendo da quantidade de placas a serem produzidas.

Aumentando-se o número de camadas (em números pares, conforme comentado previamente), pode-se intercalar camadas de cobre, prepreg e dielétrico, alternando a ordem de acordo com a metodologia de construção e empilhamento das camadas. Assim, agregar-se-á complexidade ao projeto, que sofrerá substancialmente, elevação no custo e no tempo de produção.

2.3.2 Materiais para a composição da PCI

Como discutido no tópico anterior, prepreg, cobre, e substrato são encontrados em maior abundância nas placas de circuito impresso, esses materiais dão estrutura para a formação da placa e garantem a condução e a isolação onde é necessário.

Prepreg é a nomenclatura aplicada aos materiais dielétricos pré-impregnados com uma resina, geralmente epóxi (ROCKWESTCOMPOSITES, 2018). Para o prepreg de PCIs, o material impregnado será a fibra de vidro, como já abordado. A escolha desse material se deve

ao fato dele facilmente se moldar quando aquecido, e após quando resfria, voltar ao estado sólido, o que garante um dielétrico encaixado e ajustado perfeitamente à placa, fazendo a união entre as camadas internas e externas (PCBWAY, 2018).

O cobre (Cu), é um dos metais cujo relatos de uso são muito antigos remetendo até 8000 anos A.C., há indícios de que ornamentos e moedas já eram utilizados nessa época. Hoje o principal uso desse material é na construção civil, e no setor de elétrica e eletrônica (DOEBRICH, 2009). A prata é o material que melhor conduz eletricidade, seguida pelo cobre e o ouro. Dentre esses materiais, o cobre é o que possui o menor valor de mercado, o que o torna o mais atraente em termos comerciais para aplicação em condutores (HELMENSTINE, 2018). Além disso, ele apresenta um estado de oxidação que na fila de reatividade dos materiais, se encontra mais reativo que prata e ouro, por exemplo, e por isso compostos e ligas baseadas em prata ou ouro são muitas vezes sobrepostas aos *Pads* onde os componentes serão soldados na PCI, pois os mesmos ficam expostos e não devem oxidar, pois caso isso ocorra prejudicará a solda e a condutividade (FOGAÇA, 2018). Um outro fator favorável ao cobre é sua maleabilidade: sua rigidez e sua resistência a tração são fracas, o que facilita a manipulação desse material (COPPERALLIANCE, 2018). O Cobre utilizado nas PCIs é mais conhecido como CCL do inglês, *Copper Clad Laminate*, que significa laminado de cobre revestido. Ainda é possível encontrar placas em alumínio, porém sua aplicação é muito menos usual (PCBCART, 2018).

O substrato é um material que traz robustez e firmeza para a estrutura da PCI (CANDORIND, 2018). Existem em alguns casos, para placas de mais baixo custo e qualidade, e de no máximo duas camadas, o uso do fenolite que é um material mais barato, porém com o índice de retardante de chamas 2 (FR2). O material mais utilizado, para substrato é a fibra de vidro com retardante de chamas 4 (FR4). Essa fibra tem melhor resistência ao processo de fabricação e por isso é utilizada em placas multicamadas (MCLPCB, 2018). Além disso há tipos diferentes de FR4, com diferentes índices de *glass transition temperature* (*Tg*), que significa temperatura de transição do vidro, ou seja, "(...) indica o ponto a qual o material da PCI começa a se transformar. Se a temperatura de operação excede o valor de *Tg* designado, a placa começa a mudar do estado sólido para o estado líquido(...)" (PCBCART, 2018, tradução nossa). Hoje contamos com materiais chamados de *High Tg*, ou, materiais de alto *Tg*, tais quais o S1141 (*Tg* = 175 °C) e o S1000-2M (*Tg* = 180 °C), ambos FR4, mas também outros como IT180 (*Tg* = 180 °C), e o Rogers 4350B (*Tg* = 280 °C). Além disso há também de se considerar a constante dielétrica *k*, fator crucial para cálculo das capacitâncias na placa. A constante dielétrica é variável conforme a frequência, o que pode influenciar circuitos de alta velocidade já que esses

valores são inversamente proporcionais como mostra a Tabela 4, onde podemos visualizar diferentes fornecedores de diferentes materiais com valores alternativos para *Tg* e *k* (MCLPCB, 2018),

Tabela 4 – Características materiais dielétricos

FORNECEDOR	**PRODUTO**	**TIPO**	***Tg* (°C)**	**CONSTANTE DIELÉTRICA *k* (1 MHz)**	**CONSTANTE DIELÉTRICA *k* (1 GHz)**
SHENGYI	S1000	FR4 com baixo CTE	175	4.8	-
SHENGYI	S1141	FR4	140	4.5	-
SHENGYI	S2130	CEM-3	132	4.6	-
SHENGYI	S3110	CEM-1	110	4.4	-
HONG TAI	HTE-420	FR4	145	4.2-4.8	-
HONG TAI	HTE-740	FR4	175	4.2-4.8	-
ISOLA	Getek	PPO	175-185	3.6-4.2	-
ISOLA	IS-410	FR4	180	-	-
ISOLA	FR408	FR4	180	-	3.63
ISOLA	P95	Poliamida	260	4.4	4.2
ITEQ	IT180	FR4	170	4.4	-
ITEQ	IT600	FR4 com alto CTI	140	4.8	-
NAN YA	NP-180	FR4	180	-	4.36
NELCO	N4000-13	PPE	210-240	3.8	3.7
NELCO	N4000-6	FR4	170-175	4.3	4.1
NELCO	N5000	BT	185-220	3.8	3.6
NELCO	N7000-1	Poliamida	250-260	3.9	3.9
ROGERS	3003	PTFE	-	-	3
ROGERS	4350B	Cerâmica	280	-	3.48
ROGERS	TMM4	Cerâmica	>280	-	4.5
ROGERS	Ultralam 2000	PTFE	-	-	2.6
ARLON	25N	Cerâmica	260	-	3.38
ARLON	85N	Poliamida	260	4.39	-
TACONIC	TLC	PTFE	-	-	3.2
DUPONT	PYRALUX AP	Poliamida	220	3.4	-
TAIFLEX	2LPSE 1005	Poliamida	-	3.65	-

Fonte: Alterado pelo autor. Modificado de EPECTEC (2018)

2.3.3 Layout

O *layout* para os circuitos eletrônicos, como discutido previamente, tem fundamental importância para o controle dos problemas relacionados a EMC, por isso o olhar atento a este assunto é tão fundamental, como afirma R. Paul (1992, p. 720, tradução nossa):

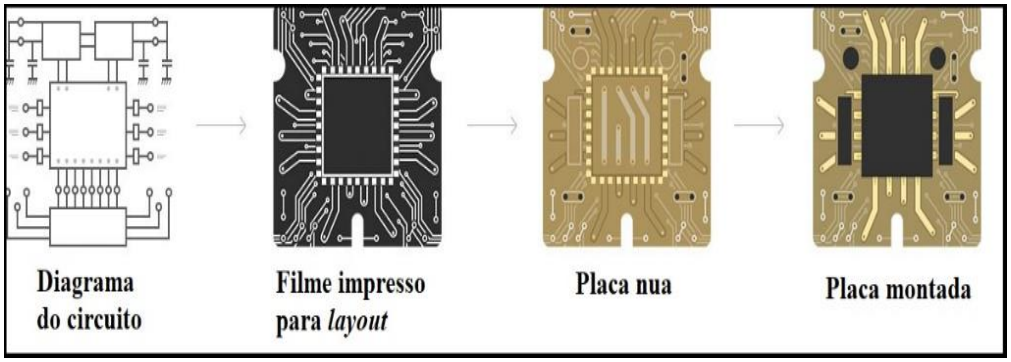
> O *layout* da PCI do sistema é provavelmente o mais importante aspecto da habilidade do produto de cumprir com os requerimentos regulatórios em emissões conduzidas e radiadas tal qual sua habilidade para funcionar de forma confiável na presença de interferência externa.

Por se tratar de um sujeito muito abrangente, serão abordados alguns tópicos separadamente, iniciando pela ferramenta de ECAD Altium, para *layout* de placas de circuito impresso, depois falando brevemente sobre alguns tipos de topologia para trilhas de PCI, e por fim sobre prevenção aos problemas de EMC que já foram elencados previamente.

2.3.3.1 Altium

Previamente ao advento da computação, o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos partia do desenho em papel do diagrama deste circuito a ser implementado. Após esse advento, evoluiu para a diagramação por software (SOFTEQ, 2018). Entretanto, para a produção das placas, demandava-se uma comunicação com o maquinário de fabricação, que não compreendia este desenho de esquemático, mas sim um arquivo com o desenho de trilhas e pontos de solda, e por isso havia a necessidade de se converter o primeiro esboço de desenho esquemático, em um outro arquivo que permitiria que as máquinas compreendessem e executassem a fabricação das PCIs. Os *softwares* que permitiram esse desenvolvimento são hoje conhecidos como ECAD (*electronic computer aided design*) e permitem então, a criação do *layout* das placas de circuito impresso (AUTODESK, 2018). Dentre os mais utilizados destaca-se o *software* Altium Designer, que permite passar por todas as etapas de desenvolvimento de um projeto para uma PCI, começando pelo esquemático, passando pelo *layout*, teste, e por fim gerando os arquivos para confecção da placa, como mostra a Figura 25 (ALTIUM, 2018).

Figura 25 – Etapas do projeto de uma PCI



Fonte: Alterado pelo autor. Modificado de Altium (2018).

2.3.3.2 *Microstrip*

Microstrip é uma topologia usado no *layout* de placas de circuito impresso onde as trilhas da PCI podem atuar para suprimir uma parcela mínima da energia de rádio frequência criada na própria placa (MONTROSE, 2000). As trilhas *microstrip* podem trabalhar como filtros e também para controle de impedâncias. São trilhas longas com efeitos de linhas de transmissão que ficam nas camadas externas, separadas do plano de terra, por uma camada de substrato (FRENZEL JR., 2009). Sua impedância pode ser calculada pela equação abaixo e a Figura 26 apresenta a *microstrip* balanceada (uma única trilha) e não balanceada (duas trilhas):

$$Z = \frac{87}{\sqrt{k+1,41}} ln \frac{5,98h}{o,8w+t}$$

Onde,

Z = A impedância característica da trilha.

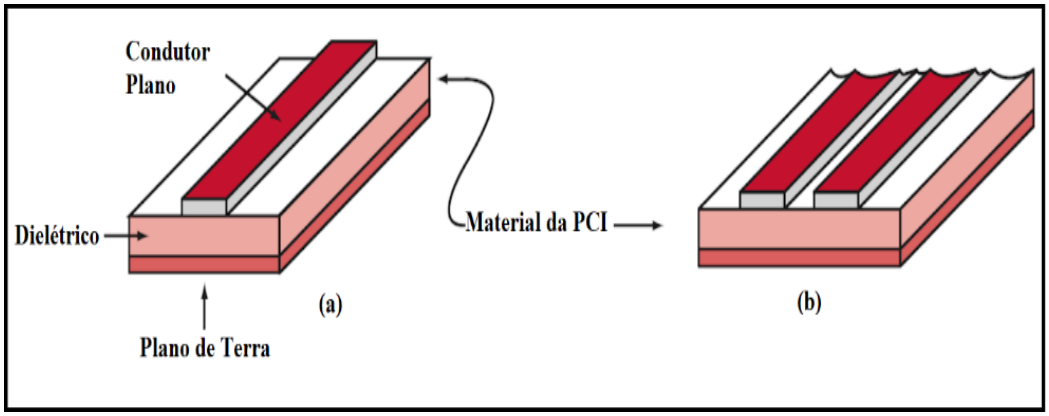
w = A largura da trilha.

k = A constante dielétrica.

t = A espessura da trilha.

h = A distância entre a trilha e o plano de terra

Figura 26 – *Microstrip* balanceada (a) e não balanceada (b)



Fonte: Frenzel Jr. (2009).

2.3.3.3 *Stripline*

Stripline é outra topologia para *layout* de PCI abrangendo as trilhas de condutores das camadas internas entre os planos de terra ou de tensão. "*Stripline* fornece imunidade de ruído aprimorada contra a propagação de emissão de rádio frequência radiada, e em contrapartida desacelera a velocidade de propagação" (MONTROSE, 2000, p. 19, tradução nossa). Essas trilhas tem a vantagem de estarem entre planos que não permitem a emissão radiada para fora da placa, diferentemente da *microstrip* (FRENZEL JR., 2009). A impedância característica da *stripline* é mostrada abaixo, e a Figura 27 apresenta uma placa com ambas *microstrip* e *stripline*:

$$Z = \frac{60}{k} ln \frac{4d}{o,67\pi w(0,8+t/h)}$$

Onde,

Z = A impedância característica da trilha.

w = A largua da trilha.

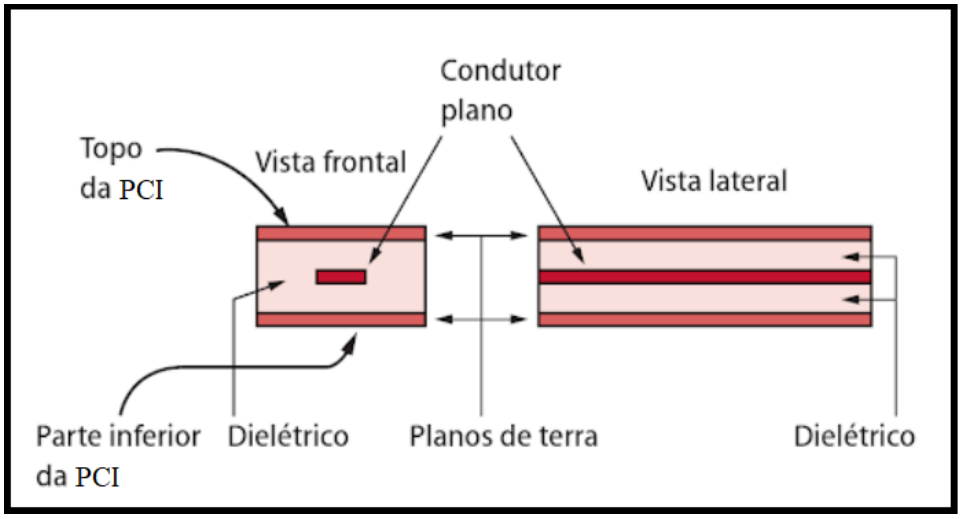
k = A constante dielétrica.

t = A espessura da trilha.

h = A distância entre a trilha e o plano de terra

d = A espessura do meio em que a trilha está

Figura 27 – *Stripline*.



Fonte: Frenzel Jr. (2009).

2.3.3.4 Prevenção aos problemas de compatibilidade

Para alguns estudiosos, a maneira mais eficiente de se tratar problemas de ordem de EMC, é através do design e *layout* das placas de circuito impresso, pois uma placa bem desenvolvida garante menos geração de ruídos, menos ou nenhuma probabilidade de propagação dos ruídos gerados, e baixa susceptibilidade, mesmo por parte dos circuitos mais frágeis (R. PAUL, 1992).

Ao relacionar a compatibilidade com a PCI, podemos citar como alguns fatores que neutralizam emissões indesejáveis, a separação de trilhas de diferentes frequências, como *clocks* e sinais periódicos, a boa disposição dos componentes na placa, o aterramento, a redução de *loops* e também o uso de componentes embarcados, podem muito contribuir neste aspecto (R. PAUL, 1992). Sob esta ótica, abaixo segue uma breve introdução acerca dos capacitores e indutores embarcados em placas de circuito impresso.

2.3.3.4.1 Componentes embarcados

Componentes embarcados são aqueles criados diretamente na PCI, geralmente localizados nas camadas internas (UHER; ZEDNICEK, 2010). As razões para se iniciar o desenvolvimento dos componentes embarcados foram principalmente redução de custo, e miniaturização para reduzir tamanho de placa. Porém como afirma Clemons (2014, tradução

nossa), pode-se dizer que os componentes embarcados têm uma forte atuação contra os efeitos de EMI nos projetos de PCI:

> Diminuir comprimentos de trilhas elétricas para reduzir efeitos parasitas é crítico quando se lida com circuitos de alta frequência. Reduzindo o comprimento do fio de componentes passivos para um circuito integrado pode-se diminuir a indutância e a capacitância parasitas, reduzindo as flutuações de carga e ruído com o sistema. Ao embarcar componentes passivos, é possível posicioná-los diretamente por baixo do pino do circuito integrado, minimizando o potencial dos efeitos negativos, incluindo indutância de via.

Assim, não é raro se associar a criação, ou começo da utilização dessa técnica para se combater os efeitos indesejados de EMI, e dessa forma hoje esse é o principal uso para esta tecnologia: auxiliar na busca por uma conformidade às normas de controle de EMC (CLEMONS, 2014). Portanto, o estudo e desenvolvimento dessa técnica é tão importante, e alguns estudos sobre ela já estão avançados fora do Brasil. Deve-se portanto, conhecer melhor esses estudos, como veremos no próximo capítulo, e se possível descobrir porque ainda não exploramos esse mercado internamente em nosso país, e como fazer para difundir essa tecnologia entre os engenheiros e entusiastas da área.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 DIFERENÇAS ENTRE COMPONENTES EMBARCADOS

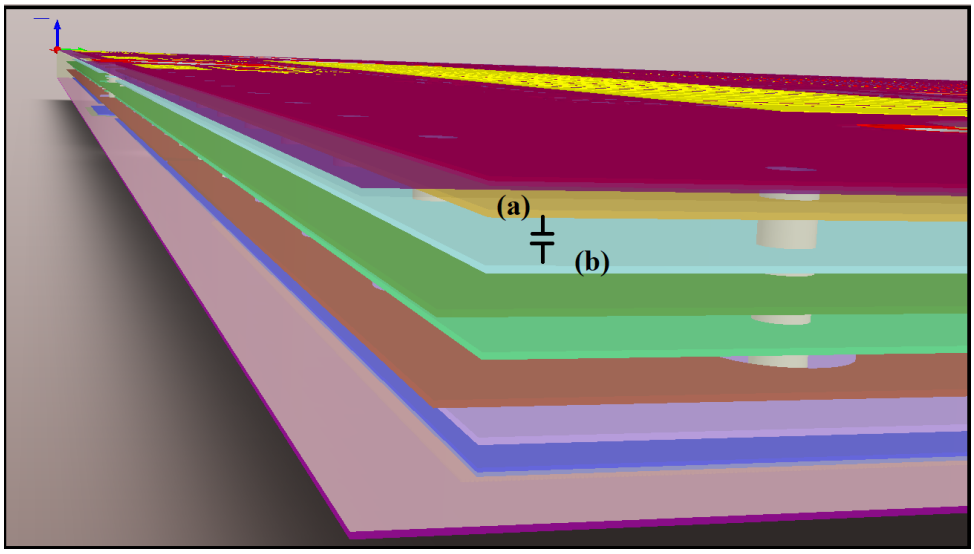
Os componentes embarcados levam esse nome por serem fabricados junto a PCI, porém há uma diferença chave entre esses componentes, que está na distinção entre aqueles que são confeccionados diretamente na placa, através de um desenho mais rebuscado das trilhas e planos, e aqueles que são fabricados e inseridos nas camadas internas da placa, ainda no processo produtivo. A seguir esse processo será melhor explicado.

3.1.1 Componentes embarcados dentro da placa e componentes confeccionados diretamente na placa

Os componentes embarcados, de maneira mais específica, podem ser classificados como passivos embarcados, e este termo é compartilhado por componentes que são alocados no interior da placa, e também por aqueles confeccionados pelo próprio *layout* da PCI (CLEMONS, 2014).

Os embarcados que são confeccionados diretamente na placa, nascem da formação da própria PCI. Como já descrito anteriormente, sua concepção acontece na estrutura da placa, que possui trilhas de cobre e camadas de dielétrico. Características como a constante dielétrica do material usado, bem como sua tolerância, além de espessura e comprimento das trilhas condutoras são levadas em consideração para sua confecção (UHER; ZEDNICEK, 2010). No caso de um capacitor embarcado, essa capacitância pode ser atrelada aos valores encontrados pela sobreposição de uma malha de sinal sobre outra de Terra, sendo separadas por um dielétrico, como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Formação do capacitor embarcado confeccionado na PCI. Malha de sinal (a), Malha de Terra (b), e dielétrico (transparente na imagem) entre as duas.



Fonte: Autor (2018).

Os componentes embarcados inseridos diretamente nas camadas internas, são extremamente pequenos, com tamanhos que variam de 0201 até 01005, como mostra a Tabela 5, definida pela EIA[8] (*Electronic Industries Alliance*) e adotada globalmente pelos fabricantes de placas de circuito impresso (CLEMONS, 2014). Esses componentes são soldados em seus *pads* ainda no processo de fabricação da PCI, como mostra a Figura 29. Dessa forma, ficam entre diferentes camadas internas, não interferindo nos componentes soldados na camada superior e inferior.

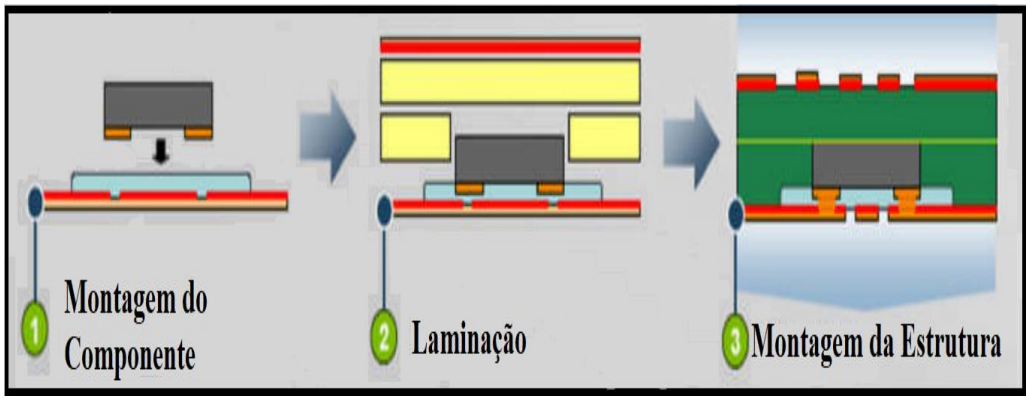
Tabela 5 - Dimensões dos componentes segundo EIA.

NOMENCLATURA EIA	NOMENCLATURA IEC	DIMENSÕES MÉTRICAS
0805	2012	2,0 mm x 1,25 mm
0603	1608	1,6 mm x 0,8 mm
0402	1005	1,0 mm x 0,5 mm
0201	0603	0,6 mm x 0,3 mm
01005	0402	0,4 mm x 0,2 mm

Fonte: Alterada pelo Autor. Modificado de Poole (2018).

[8] A EIA é uma associação de diferentes organizações que chegam em consenso para definir normas e padrões da indústria. Dentre esses padrões está a definição da nomenclatura para componentes SMD, com base nas suas dimensões em polegadas, e por isso o nome difere das dimensões métricas encontradas na Tabela 5 (ROUSE, 2011).

Figura 29 - Componente embarcado estrutura de montagem



Fonte: Alterada Pelo Autor, Modificado de Uher e Zednicek (2010).

Os componentes inseridos nas camadas internas das placas, são mais explorados comercialmente pois hoje já há um grande domínio sobre esta tecnologia, que é mais simples, e ao mesmo tempo não demanda por materiais dielétricos específicos, diferentemente dos componentes embarcados fabricados na confecção da PCI.

Serão abordados, como já comentado anteriormente, os componentes embarcados confeccionados na própria PCI, que é um mercado ainda novo e em desenvolvimento, que merece uma maior atenção na tentativa de decifrar sua formação, seu comportamento, e onde serão aplicados afim de contribuir principalmente para economia de gasto produtivo e melhoria de eficiência.

3.1.2 Componentes para alta frequência e baixa frequência

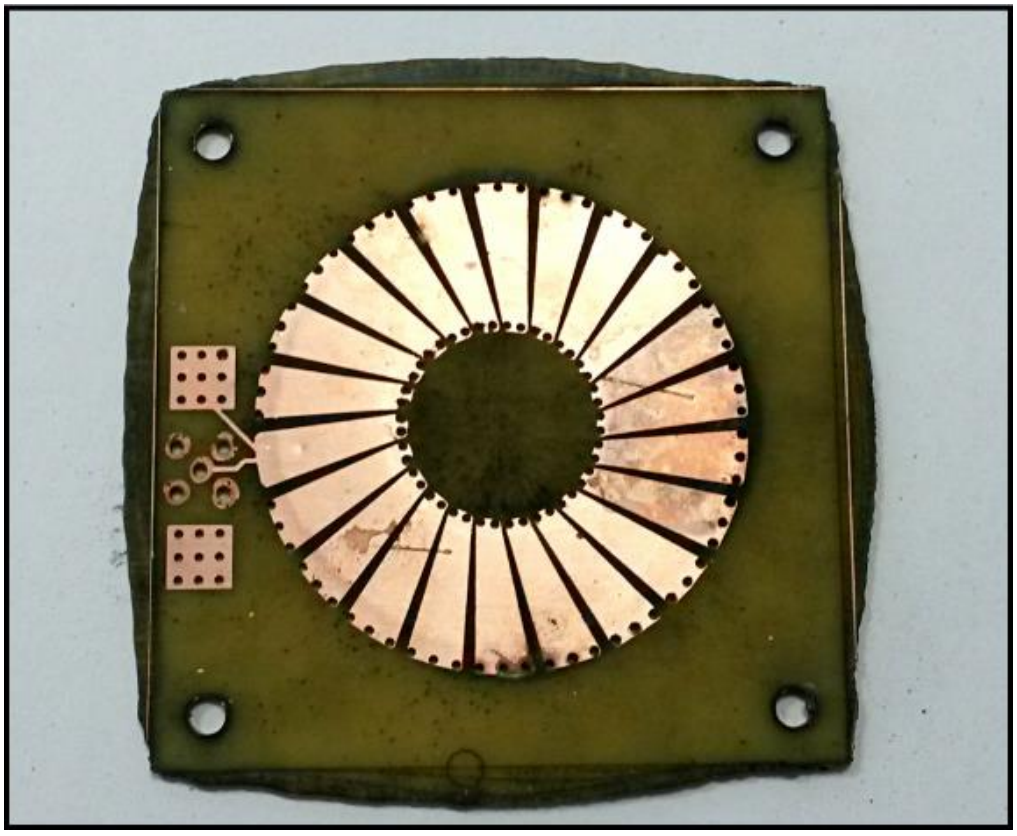
Existem estudos, alguns ainda em fase experimental, sobre a aplicação de capacitores e indutores em diferentes circuitos. Alguns deles são apresentados a seguir.

Ainda em 2001, a 3M lançou uma produção de uma placa com capacitor embarcado para analisar o processo produtivo, o material e também as características elétricas e mecânicas da placa (PEIFFER, 2001). Os resultados foram satisfatórios, mostrando que os estudos poderiam ir além. Os estudos apontaram sobretudo, que “Placas feitas com materiais muito finos para capacitor embarcado que tem alta capacitância e baixa indutância, tem mostrado melhorar a integridade do sinal, reduzir a potência do ruído de barramento e reduz EMI. Isto é especialmente verdade em altas frequências onde capacitores discretos perdem sua eficiência (acima de 500 MHz)” (PEIFFER, 2001, p. 1, tradução nossa). Como notado, os capacitores

embarcados terão maior aplicabilidade em circuitos de alta frequência, porém, em se tratando de indutores, podemos encontrar exemplos um pouco diferentes.

Já se conta com estudos de algumas empresas em parcerias com universidades, que apontam soluções em indutores embarcados para circuitos de potência, como é o caso de um estudo para embarcar um indutor toroidal, usando um núcleo a pó de ferrite nas camadas internas, visando melhorias para o controle de temperatura, e também redução das indutâncias parasitas. Esse dispositivo, alcançou cerca de 2 μH numa faixa de 10 kHz até 10 MHz, e sua estrutura é mostrada na Figura 30 (CAILLAUD et al., 2017). Infelizmente o autor só aponta a potência de um outro estudo, que serviu de bibliografia para esse, onde o toroide implementado foi de 30 W. Para o seu próprio estudo não aponta a potência máxima de trabalho que o indutor atingiu.

Figura 30 – Indutor Toroidal Embarcado para alta potência

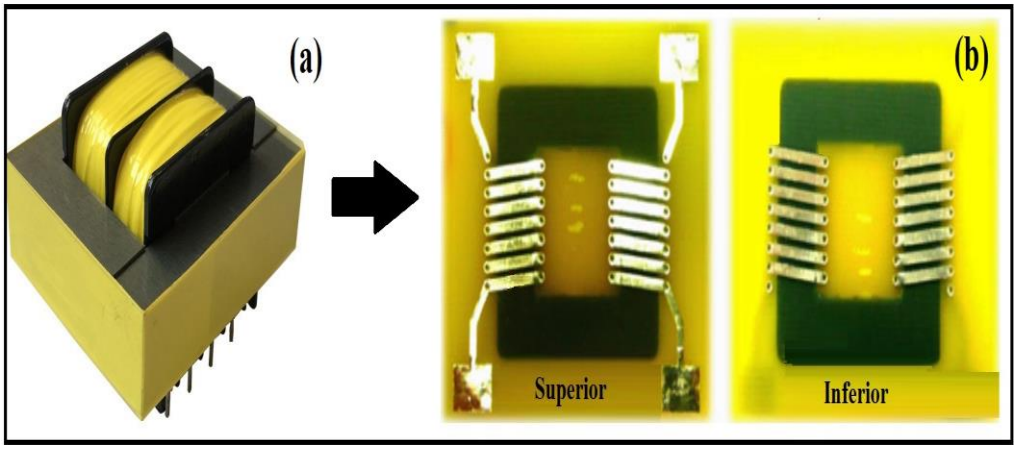


Fonte: Caillaud *et al*. (2017).

Um outro estudo aponta para um caminho de combate a efeitos indesejados de EMI nas placas. Um filtro EMC para um conversor DC-DC de potência. Para conversores, como estudado previamente no tópico sobre EMC, há uma forte tendência de emissões geradoras a partir do chaveamento de alguns componentes, especialmente em altas frequências, o que

acarreta num problema, que exige uma solução como esta, apontada no estudo, tanto para modo comum quanto diferencial de ruídos. Este filtro, foi considerado superior ao seu indutor discreto equivalente, por apresentar acima das frequências de 10 MHz, melhor combate às indutâncias e capacitâncias parasitas, além de ocupar menor volume na placa, e ser protegido por uma blindagem de malhas de Terra em ambos os lados. Uma simples comparação da diferença de volume, pode ser vista na Figura 31 (ALI *et al.*, 2012).

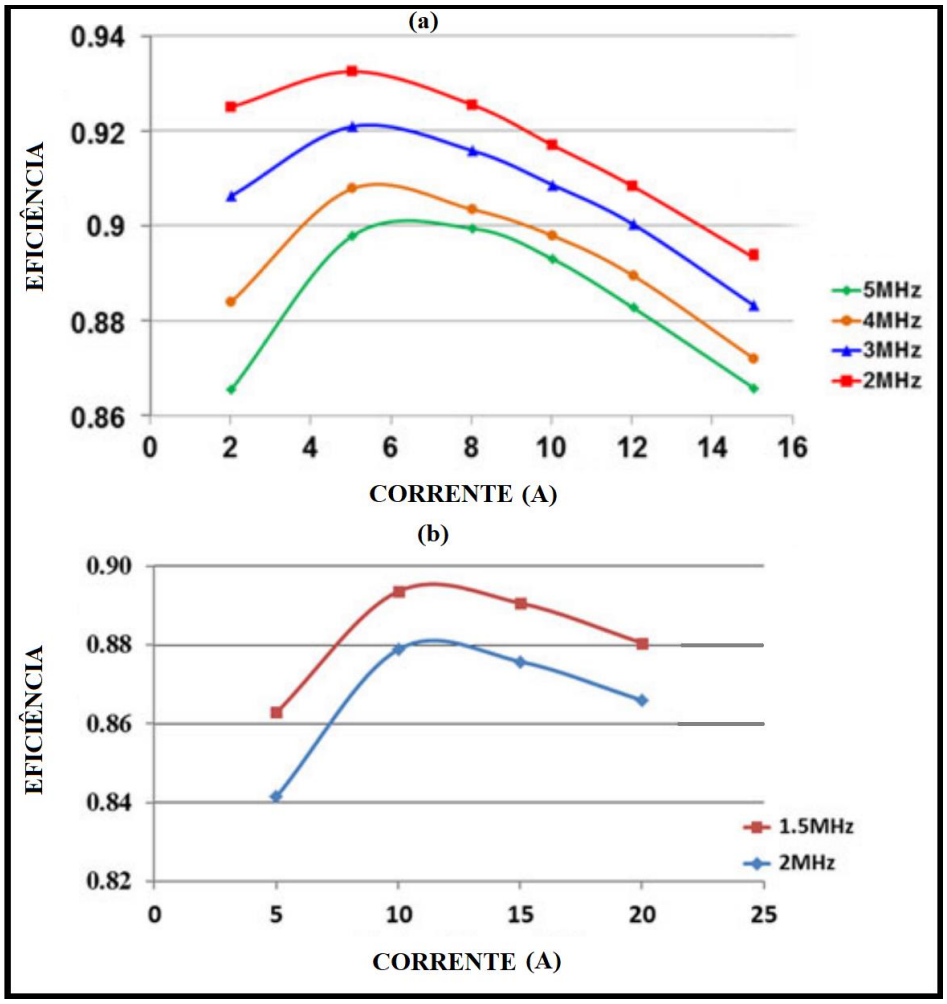
Figura 31- Filtro EMC embarcado em PCI (b), em comparação com indutor discreto (a).



Fonte: Alterada Pelo Autor, Modificado de ALI *et al.* (2012).

No campo dos indutores POL (*Point-of-load*, ou ponto de carga), que são aplicados a circuitos de alta corrente, variando de 15 a 20 A, há um estudo com indutores embarcados, com núcleo de flocos de metal, trabalhando com frequências na faixa dos 1,5 até 5 MHz (ZHANG *et al.*, 2015). Como pode ser notado no gráfico da Figura 32 a eficiência desse modelo para altas correntes, é muito boa, cerca de 86% para uma frequência de 2 MHz. Além de operar melhor em correntes a partir de 15 A que o indutor LTCC (*Low Temperature Co-fired Ceramic*) desenvolvido na mesma pesquisa, como mostrado na comparação, onde pode ser visto que a partir dessa faixa, a redução de eficiência é mais drástica para o indutor LTCC. Além disso, segundo Zhang *et al.* (2015), essas características apresentadas são muito semelhantes com as apresentadas pelos componentes disponíveis no mercado.

Figura 32 - Gráfico de comparação para eficiência x corrente para o indutor LTCC (a), e o indutor embarcado em Núcleo de Flocos de metal (b).



Fonte: Alterada Pelo Autor. Modificado de ZHANG *et al.* (2015).

As aplicações mais usuais mesmo para indutores, continuam sendo em alta frequência, sendo que sua estrutura e confecção na placa, será um pouco melhor explorada a seguir.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DE COMPONENTES EMBARCADOS CONFECCIONADOS NA PLACA

3.2.1 Capacitores

Talvez o item mais importante a ser considerado no processo de produção de um capacitor embarcado seja o próprio dielétrico. A constante dielétrica, ou permissividade relativa, que como dito no tópico sobre capacitores, ainda na fundamentação, é diretamente

proporcional a capacitância, poderá apresentar valores que variam próximos da faixa do mais tradicional material, que é o valor do FR4, k = 4,8. Porém, por serem materiais especiais, são especialmente produzidos para não perder esta característica em altas frequências, ou seja, ter uma baixa tolerância para que não haja variação da capacitância. Bons valores ficam entre 0,02 e 0,05 para mais ou para menos (MICROWAVEJOURNAL, 2015). Esses materiais devem também ser de espessura fina, para que as placas do capacitor fiquem próximas, pois como visto anteriormente, quanto menor a distância entre as placas, maior a capacitância. A Tabela 6 traz alguns materiais de diferentes fornecedores, mostrando seus valores de constante dielétrica.

Tabela 6 - Comparativo dielétricos para capacitores embarcados

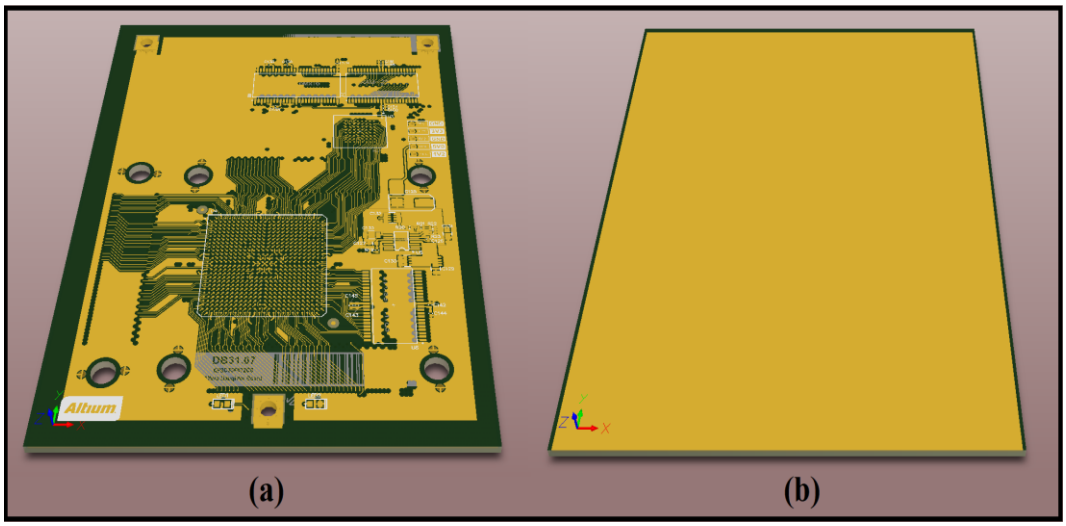
FORNECEDOR	**NOMENCLATURA**	**MATERIAL**	**CONSTANTE DIELÉTRICA**	**TOLERÂNCIA**
3M	C0614	Resina Epóxi Titanato de Bário	16 (1 KHz)	-
DuPont	Interra HK04J2518E	Núcleo Poliamida	3,5 (1 MHz)	-
Rogers	RO3003	Hidro carbono a vidro reforçado	3,00 (10 GHz)	$\pm$ 0,04
Oak-Mitsui	FaradFlex MC24M	Filme polímero de alta performance	3,5 (1 GHz)	-

Fonte: Autor (2018).

Como visto, as placas que formam os capacitores embarcados são os próprios planos de alimentação e Terra. Uma delas deverá se estender até as bordas da PCI, para que no momento da fabricação seja isolada eletricamente das áreas ativas da placa (áreas com circuito), através de um corte sobre o cobre como mostra a Figura 33 (PEIFFER, 2001). Esse corte será recomendado através de uma tabela de parâmetros solicitados junto à fabricante, sendo que haverá nos arquivos de projeto, uma marcação especial indicando o corte. O cobre que se estenderá até as bordas, terá papel fundamental na estrutura, pois durante o processo de

fabricação ele dará a sustentação necessária, já que o dielétrico será muito fino e não terá esse suporte que a placa demanda para se manter firme e homogênea durante sua manufatura.

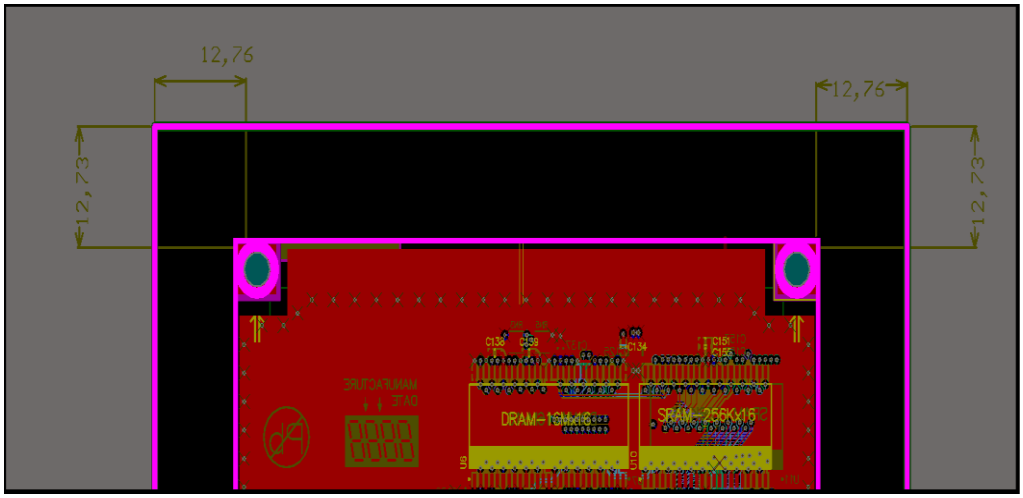
Figura 33 - Camada superior (a) e camada do plano de Terra (b)



Fonte: Autor (2018).

Este dielétrico precisa ser amparado por um *layout* que contenha camadas de substrato que sejam firmes e sobrepostas de maneira a manter a robustez mecânica da placa, com o mínimo de incisões possíveis. Porém caso furos como os de vias, ou de componentes PTH, precisem ser abertos para atravessar as áreas de cobre, então deve ser respeitada uma distância de segurança em relação às margens das bordas da placa, de cerca de 0,5 polegadas, equivalente a 12,7 mm, conforme Figura 34 (PEIFFER, 2001).

Figura 34 - Distância dos furos para a borda

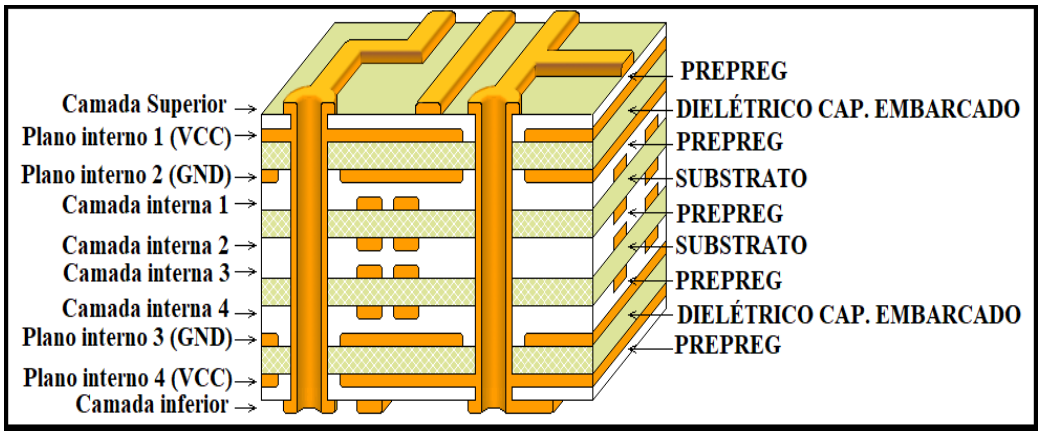


Fonte: Autor (2018).

Essas exigências só serão necessárias para processos onde não se há controle na laminação, discutida no tópico sobre fabricação de PCI, ou seja, sem um padrão de orientação de que lado começar a laminar. Caso haja mais de um capacitor embarcado em camadas internas, é recomendável uma distribuição para não ficarem próximos uns aos outros. O dielétrico para a camada do capacitor embarcado, como dito, é mais fino e tem um maior controle de sua constante dielétrica, porém o substrato da placa, será o mesmo utilizado normalmente para que se preserve a rigidez da PCI.

As outras etapas de produção são mantidas iguais para o restante do processo. Um modelo de empilhamento de camadas pode ser observado na Figura 35, onde é possível notar que há 10 camadas, sendo que no núcleo foi usado substrato (em FR4), para garantir a robustez mecânica necessária. Esses dielétricos específicos para os capacitores embarcados, são muito trabalhados para um bom nível de constante dielétrica, mas principalmente um controle na tolerância desse valor, pois sua variação, como visto, vai fazer com que o valor da capacitância varie. Alguns desses materiais foram apresentados na Tabela 6.

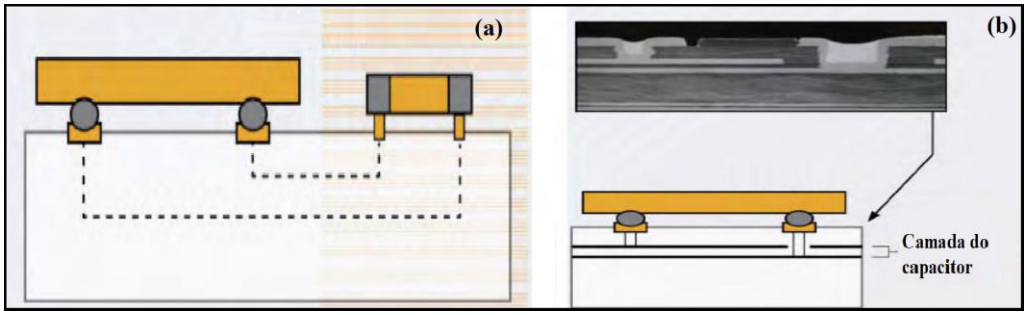
Figura 35 - Empilhamento de camadas com capacitor embarcado



Fonte: Autor (2018).

Uma mudança fortemente notada ao assumir o capacitor embarcado, será a redução de espaço como visto na Figura 36. Considerando por exemplo, um capacitor 0402, usado 50 vezes em um circuito, teremos uma redução de área de 25 mm², e caso seja um capacitor 0603, esse ganho de espaço já aumenta para 64 mm² de área.

Figura 36 - Comparação entre capacitor soldado (a) e capacitor embarcado (b)



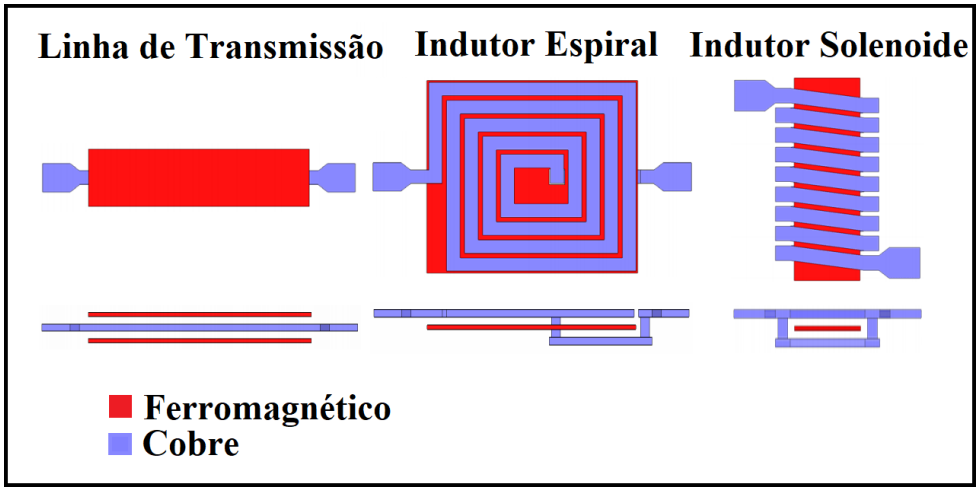
Fonte: Alterada pelo autor. Modificado de Ward (2018).

3.2.2 Indutores

Em comparação com os capacitores embarcados, os indutores, em sua ampla maioria, vão demandar uma camada dielétrica especial para sua construção, sendo esta de material magnético para potencializar os efeitos indutivos das espiras na bobina que criará o indutor. Esses materiais variam e podem ser CoTaZr, CoFeHfO, ferrite em pó, NiFe, entre outros (LEE, LI, WANG, 2008).

A Figura 37 mostra a formação de alguns modelos de indutores, utilizando núcleo magnético. Todos possuem uma estrutura complexa, se comparada com a formação do capacitor embarcado analisado anteriormente, porém apresentam boa eficiência, além de uma aplicação que já é feita em projetos como em circuitos reguladores de tensão para microprocessadores de computador, onde as demandas de frequência são altíssimas e a resposta desses componentes são melhores que as dos indutores comuns como será mostrado no próximo tópico, com a Tabela 7 que compara esses indutores (LAMBERT, 2014).

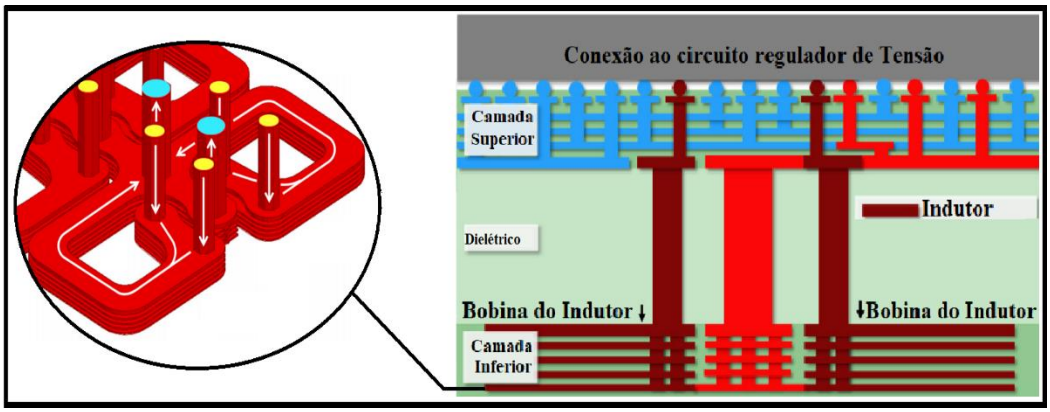
Figura 37 - Formação dos indutores com diferentes estruturas



Fonte: Alterada Pelo Autor. Modificado de Lee; Li; Wang (2008).

Este modelo com núcleo magnético foi objeto de estudo ainda no ano de 2008, porém a aplicação que se tem noticiada para microprocessadores, que será mostrada a seguir, foi publicada em 2014, e não possui núcleo magnético, sendo construída em uma plataforma de encapsulamento *Flip Chip*[9] orgânico, que foge um pouco a estrutura tradicional das PCIs, o que demonstra uma evolução no que tange a fabricação das placas. A Figura 38 mostra a estrutura desses indutores.

Figura 38 - Estrutura indutor embarcado em placa de circuito Regulador de Tensão.



Fonte: Alterada Pelo Autor. Modificado de Lambert (2014).

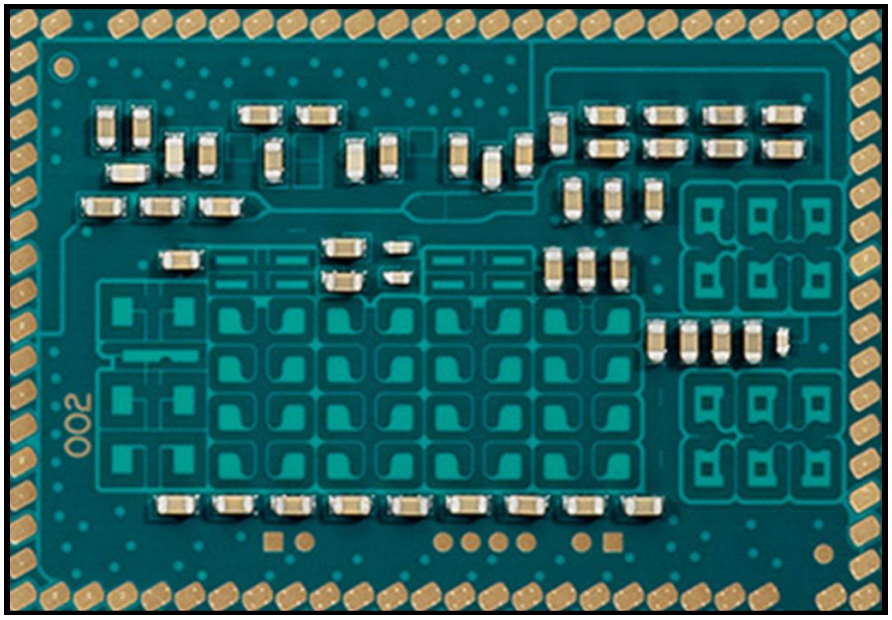
[9] *Flip Chip* é uma técnica de encapsulamento utilizada para otimizar as características de alguns componentes. Neste encapsulamento, toda a superfície da área é usada para realizar uma conecção com outro componente ou placa, assim reduz-se as dimensões e consolida-se o contato entre os elementos. Seus substratos podem ser de origem orgânica, ou cerâmica. Um exemplo de Flip Chip são os BGAs (*Ball Grid Array*), encapsulamentos usados em muitos microprocessadores (TEKTRONIX, 2019).

3.3 COMBATE AOS PROBLEMAS DE EMC COM OS COMPONENTES EMBARCADOS

3.3.1 Vantagens dos Indutores

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 como mostra a Figura 39. Como comentado no tópico sobre indutores, há o cuidado de deixar o espaço com os componentes embarcados, livre de outros componentes soldados, pois os mesmos podem causar interferência.

Figura 39 - Placa do circuito Regulador de Tensão com Indutores embarcados (estão dentro da placa bem ao centro da imagem) e capacitores comuns.



Fonte: Lambert (2014).

Esses indutores ainda apresentam uma qualidade que se sobressai aos demais, que é o controle das tolerâncias entre o roteamento das trilhas, pelo fato de estarem todos próximos em série, melhoram muito o desempenho da impedância controlada dos Sinais de entrada e saída de alta velocidade, que como visto no tópico sobre compatibilidade, é um grande desafio para o controle de EMC (LAMBERT, 2014).

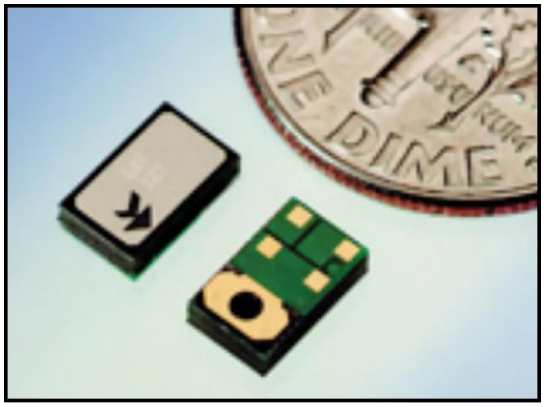
3.3.2 Vantagens dos capacitores

A redução de ocupação de espaço na placa ao se utilizar capacitores embarcados é de fato um dos grandes pontos positivos do seu uso.

Do ponto de vista dos benefícios elétricos, o ato de aproximar o capacitor aos *pads* dos outros componentes, é um fator que como visto previamente, reduz a probabilidade de se criarem *loops* de corrente além de reduzir a chance de possíveis interferências se propagarem, pois com layout reduzido, a chance de se criarem antenas decai muito, além de aumentar a confiabilidade por não haver tantas conexões no circuito. Além disso como afirma Ward (2017, p. 20, tradução nossa): Reduzem significantemente o ruído de barramento de alimentação. Apresentam indutância reduzida. Baixo ruído de alimentação para o Terra. Reduzido ruído de chaveamento simultâneo. Reduzida interferência de circuitos digitais para circuitos analógicos.”

Uma das aplicações onde se nota a urgência no uso desta tecnologia é nos microfones MEMS (*Micro Electro Mechanical Sensor*, ou, micro sensor eletromecânico). Esses microfones só atingem o tamanho que se demanda deles, graças à implementação dos capacitores embarcados, como visto no modelo da 3M mostrado na Figura 40 em comparação com uma moeda.

Figura 40 - Aplicação do capacitor embarcado em microfone MEMS da 3M



Fonte: Ward (2017).

4 CONSIDERAÇÕES ACERCA DO DESENVOLVIMENTO DOS COMPONENTES EMBARCADOS

A comparação mais explícita da vantagem de se utilizar um componente embarcado pode ser vista abaixo. A Tabela 7 mostra a comparação entre um indutor embarcado e seu principal concorrente um indutor 0402 discreto, mesmo tendo uma mais alta resistência AC, sua resistência DC e seu valor de indutância mesmo a 100 MHz se mostram extremamente satisfatórios.

Tabela 7 - Comparação componente discreto e embarcado

	Indutância (L)	Resistência AC	Resistência DC
Indutor 0402	2, 35 nH	90 mΩ	40 mΩ
Indutor Embarcado	2,51 nH	98 mΩ	36 mΩ

Fonte: Lambert (2014).

Porque então essa tecnologia ainda é pouco divulgada, e porque especialmente no Brasil é tão difícil ouvir falar, ou encontrar especialistas que tenham conhecimento sobre este assunto?

4.1 A REALIDADE ATUAL DO DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES EMBARCADOS

Dos temas abordados até aqui, os pontos mais evidentes, e que limitam o uso dos capacitores embarcados são a frequência, e o processo produtivo. Circuitos que utilizam baixa frequência, em geral não demandam miniaturização, e geralmente tem menos foco no combate a problemas de EMC que outros de alta frequência, mesmo passando por validações para obterem certificação. Além disso, trabalham com componentes em valores estabelecidos comercialmente, raramente necessitando de componentes que tenham valores fora do padrão já fornecido pelas fabricantes. Um outro ponto notado, é que desenvolver e produzir dispositivos eletrônicos em tempo hábil, dominando o processo de manufatura, e também os materiais que já se tem conhecimento de custo e qualidade, levanta uma margem de segurança a qual as empresas não tem perspectiva de sair, pois muitas vezes não tem essa exigência dos clientes, ao passo que entregam seus produtos com qualidade, custo e eficiência razoáveis, que atendem as expectativas.

A partir dos exemplos mostrados no capítulo 3, foi visto uma aplicação particular em circuitos pequenos, que compõem um grande projeto, quase como um componente à parte, e aí vem um ponto também de reflexão: Haja vista que no Brasil não se tem uma indústria de componentes eletrônicos que seja forte e bem estabelecida, e também sabendo-se que investimento nessa área ainda é muito baixo, percebe-se que incentivos a pesquisas para componentes embarcados, acabam sendo muito limitados. Um exemplo disso foi uma pesquisa feita, ao se questionar algumas produtoras de placas de circuito impresso nacionais, se possuíam os materiais dielétricos para capacitores embarcados da Tabela 6. O retorno não poderia ser mais negativo: Ao responderem que dentre todos os materiais, mesmo algumas delas afirmando que poderiam produzir placas com aqueles dielétricos, não os possuíam em estoque, e não estavam aptas nem a informar o custo de tais materiais. Os nomes dessas empresas serão mantidos em sigilo por conta de não haverem acordado com a divulgação de seus nomes.

Além disso, apesar das ferramentas ECAD, possuírem *plugins* que auxiliam no cálculo em tempo real de casamento de impedâncias para projetos de alta velocidade, por exemplo, e também outros softwares ECAD, terem capacidade de calcular e projetar antenas em placas, ainda não há uma ferramenta específica para auxílio no desenvolvimento de componentes embarcados. Em contato com uma empresa representante de uma das desenvolvedoras de software ECAD, o engenheiro de suporte técnico explicou que para os componentes embarcados soldados nas camadas internas da PCI já existe suporte, e na indústria já é utilizado há alguns anos. Porém, se tratando dos componentes embarcados confeccionados na própria placa, esse suporte ainda não existe. Um indutor por exemplo, deve ser projetado e calculado à mão, ou usando ferramentas como Matlab e Simulink, e ao ser transferido para o projeto do layout, usar-se-á trilhas e vias de maneiras a criar espiras que atravessem da camada superior para a inferior da placa, uma a uma, deixando o processo moroso. Os nomes dessas empresas serão mantidos em sigilo por conta de não haverem acordado com a divulgação de seus nomes.

5 CONCLUSÃO

As limitações de uso para os componentes embarcados vêm principalmente da frequência e do processo produtivo. Geralmente em projetos eletrônicos, diferentes circuitos pairam sobre uma mesma placa, e nem todos eles trabalham sob uma mesma frequência de operação. A ocorrência mais provável desse tipo de situação são os circuitos SOC (*System On Chip*, ou sistema em um chip), pequenas placas com alguns componentes passivos, e que no conjunto trabalham executando uma tarefa global como um único componente. Esses componentes SoC, trabalham geralmente em uma faixa de frequências mais homogênea, e caso seja alta, poderá explorar os componentes embarcados, para auxiliar na redução de espaço, custo e também precisão de valores.

Um dos problemas para a introdução dessa tecnologia e difusão de seu conhecimento no Brasil, se deve a duas limitações do mercado: A primeira, na questão da indústria de componentes eletrônicos, que não está na dianteira das maiores tecnologias, em relação aos outros países, tendo baixíssimo investimento, e nenhuma perspectiva de mudança. A segunda, é a morosidade das empresas fornecedoras de placas de circuito impresso nacionais, que não trabalham com novos materiais, nem processo, e assim inviabilizam qualquer tipo de produção nacional nesse âmbito.

Ao analisar também as ferramentas ECAD que estão disponíveis aos desenvolvedores, o trabalho de inovação para com os componentes embarcados ainda é muito independente. O uso comercial ainda é pouco explorado, e seu desenvolvimento depende principalmente de uma evolução dos materiais disponíveis e das ferramentas de desenvolvimento.

É notória a qualidade dos componentes embarcados e sua eficiência nos circuitos eletrônicos, porém as restrições que ainda existem em torno de sua aplicação acabam fazendo com que seu uso e aplicação em larga escala, esteja longe de ser uma realidade, principalmente em nosso país.

REFERÊNCIAS

EISLER, Paul; WILLIAMS, Mari E. W. **My Life with the Printed Circuit Boards.** Estados Unidos: Lehigh University Press, 1989.

MONTROSE, Mark I. **Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance:** A Handbook for Designers. 2ª Ed. Estados Unidos: Wiley, 2000.

R. PAUL, Clayton. **Introduction to Electromagnetic Compatibility.** Estados Unidos: Wiley, 1992.

MERIDIGUIAN, Michel; **Controlling Radiated Emissions by Design.** 3ª Ed. Estados Unidos: Wiley, 2014.

SANCHES, Durval. **Interferência Eletromagnética.** Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

ASSUMPÇÃO B., João Pedro. **Eletromagnetismo para Engenharia:** Estática e Quase Estática. 3ª Ed. Santa Catarina: EDUFSC, 2012.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física.** Vol. 3, 9ª Ed. Tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

DELABALLE, Jacques. **EMC: Electromagnetic Compatibility.** Schneider Electric. França: Cahier Technique no. 149, 2001. Disponível em: <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/3398/3398-ect149.pdf > Acesso em: 19 set. 2018.

INFINEON. **EMC and System-ESD Design Guidelines for Board Layout.** Infineon Technologies AG. Alemanha: Application Note AP24026, 2016. Disponível em: < https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AP2402635_General_PCB-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46261ff5777016229f8523036f1> Acesso em: 19 set. 2018.

ETHW. **Eletromagnetism.** Engineering and Technology History Wiki, 2017. Disponível em: <https://ethw.org/Electromagnetism?gclid=CjwKCAjw54fdBRBbEiwAW28S9sk_uo7q49bFBfeZiNURhuuwcSN3IVBlZkeJ36dS-0Y5GOGokDirmxoCWL0QAvD_BwE>. Acesso em: 21 set. 2018.

SANTOS, Marco Aurélio da Silva. **Condutores e isolantes**. Brasil Escola Disponível em <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/condutores-isolantes.htm>. Acesso em: 06 de nov. 2018.

BENJAMIN-FRANKLIN-HISTORY. **Kite Experiment**. Benjamin Franklin Historical Society, 2014. Disponível em:<http://www.benjamin-franklin-history.org/kite-experiment/>. Acesso em: 25 set. 2018.

BBC. **Michael Faraday**, England: Historic Figures, 2014. Disponível em:<http://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/faraday_michael.shtml>. Acesso em: 26 set. 2018.

HYPERPHYSICS. **Magnetic Field of Current**. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magcur.html>. Acesso em: 26 set. 2018, il. color.

HYPERPHYSICS. **Cylindrical Capacitor**. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/capcyl.html>. Acesso em: 15 out. 2018, il. color.

HYPERPHYSICS. **Spherical Capacitor**. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/capsph.html#c1>. Acesso em: 15 out. 2018, il. color.

WEIL, Edward; LEVCHIC, Sergei V. **Flame Retardant for plastics and textiles:** Practical Applications**.** Alemanha: Hanser, 2009.

CONDON, E.U. et al. **New advances in Printed Circuits**. United States Department of Commerce: National Bureau of Standards, Miscellaneous Publication 192, 1948. Disponível em: <https://play.google.com/store/books/details?id=9YHK-5auHToC&rdid=book-9YHK-5auHToC&rdot=1> Acesso em: 14 ago. 2018.

WARD, Jack. **History of transistors:** Volume 1, The first Germanium Hobbyist Transistors. Transistor Museum, 2009. Disponível em: <http://www.semiconductormuseum.com/MuseumLibrary/HistoryOfTransistorsVolume1.pdf > Acesso em: 19 ago. 2018

S. KHAN, Moin. **Glass Fiver Composites.** Textile learner, 2012. Disponível em: < http://textilelearner.blogspot.com/2012/09/glass-fiber-composites-properties-of.html> Acesso em: 19 ago. 2018.

CLEMONS, Max. **Use embedded components to improve PCB performance and Reduce Size.** Electronic Design, 2014. Disponível em: < http://electronicdesign.com/embedded/use-embedded-components-improve-pcb-performance-and-reduce-size> Acesso em 20 ago. 2018.

UHER, Radim; ZEDNICEK, Tomas. **Ultrathin Discrete Capacitors for Emerging Embedded Technology.** AVX, 2014 Disponível em: < Ultrathin Discrete Capacitors for Emerging Embedded Technology> acesso em: 07 Nov. 2018.

PEIFFER, Joel S. **Fabrication of Embedded Capacitance Printed Circuit Boards.** 3M, 2001. Disponível em: < https://multimedia.3m.com/mws/media/251029O/fabrication-of-embedded-capacitance-printed-circuit-boards.pdf> Acesso em: 07 nov. 2018.

CAILLAUD, Rémy et al. **High-Power PCB-embedded inductors based on ferrite powder**. Mitsubishi Electric, Université de Lyon, Université de Toulouse, 2017. Disponível em: < http://www.fr.mitsubishielectric-rce.eu/images/fck_upload/Caillaud_Minapad17.pdf> Acesso em: 07 nov. 2018.

ZHANG, Wenli et al. **High-Density Integration of High-Frequency High-Currente Point-of-Load (POL) Modules with planar inductors.** IEE, 2015. Disponível em: < https://ieeexplore.ieee.org/document/6807744> Acesso em: 07 nov. 2018.

MICROWAVEJOURNAL. **Composing Capacitors and Inductors on PCB Materials**. Rog Blog by Rogers Corporation, 2015. Disponível em: <http://www.microwavejournal.com/blogs/1-rog-blog/post/23846-composing-capacitors-and-inductors-on-pcb-materials> Acesso em: 08 nov. 2018

LEE, Dok Won; LI, Liang Liang; WANG, Shan 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: 08 nov. 2018.

LAMBERT, William J. et al. **Package Embedded Inductors for Integrated Voltage Regulators.** Intel Corporation, 2014. Disponível em: < https://ieeexplore.ieee.org/document/6897335> Acesso em: 09 nov. 2018

FRENZEL JR., Louis E. **Fundamentos de comunicação eletrônica modulação, demodulação e recepção.** Vol. 1, 3ª Ed. Brasil, Grupo AISBN, 2013.

WARD, Jesse. **A Brief Tutorial on Embedded Capacitors**. The PCB Magazine, Ed. jun. 2017, p. 16-20. Disponível em: < http://magazines007.com/pdf/PCB-Jun2017.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2018.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8188**: Guia de projeto e uso de placa de circuito impresso. Rio de Janeiro, 1983.

HPPLOTTER. **What is a Plotter?** HP Plotter UK, 2018. Disponível em: <https://www.hpplotter.co.uk/what-is-a-plotter> Acesso em: 19 ago. 2018.

DIPTRACE. **PCB Layout.** DipTrace, Novarm Limited, 2017. Disponível em: < https://diptrace.com/diptrace-software/pcb-layout/> Acesso em: 19 ago. 2018.

MENDES, Mariana. **Eletromagnetismo.** Brasil Escola, 2018. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/eletromagnetismo.htm> Acesso em: 12 nov 2018.

DECISPINDLE. **PCB Drilling Spindle Motor**. Decispindle, 2018. Disponível em: < https://www.decispindle.com/product-view/pcb-drilling-spindle-motor/> Acesso em: 12 nov. 2018.

SCHMID. **Electroless Copper.** Schmid-Group, 2017. Disponível em: < https://schmid-group.com/en/business-units/electronics/printed-circuit-board/metallization/electroless-copper/> Acesso em: 12 nov. 2018.

FREZYCNC. **Hot Roll Dry-Film Roll Laminators DFL 4200 and DFL 5200**. Frezycnc, 2017. Disponível em < http://www.frezycnc.eu/pcb-online-catalog/dry-film-lamination/pcb-dry-film-laminators/hot-roll-dry-film-laminators-dfl-series/> Acesso em: 12 nov. 2018.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Ordem de reatividade dos metais.** Brasil Escola, 2018. Disponível em: < https://brasilescola.uol.com.br/quimica/ordem-reatividade-dos-metais.htm > Acesso em: 26 out. 2018.

BELLIS, Mary. **History of Electromagnetism**: The Innovations of Andre Marie Ampere and Hans Christian Oersted. ThoughtCo., 2018. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/history-of-electromagnetism-1991597>. Acesso em: 21 set. 2018.

BRITANNICA, Editors of Encyclopaedia. **Standing wave**. Encyclopædia Britannica, inc. 2017. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/standing-wave-physics>. Acesso em: 20 out. 2018.

BRITANNICA, Editors of Encyclopaedia. **Wavelength**. Encyclopædia Britannica, inc. 2011. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/wavelength>. Acesso em: 20 out. 2018.

BRITANNICA, Editors of Encyclopaedia. **Inductance**. Encyclopædia Britannica, inc. 2018. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/inductance>. Acesso em: 15 out. 2018.

BRITANNICA, Editors of Encyclopaedia. **Parallel-plate capacitor: Image**. Encyclopædia Britannica, inc. 2018. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/parallel-plate-capacitor/images-videos/media/442852/1330>. Acesso em: 15 out. 2018, il. color.

HELMENSTINE, Anne Marie. **What Is the Most Conductive Element?** ThoughtCo. 2018. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/the-most-conductive-element-606683>. Acesso em: 26 out. 2018.

ROBINSON, F. N. H. *et al*. **Electromagnetism**. Encyclopædia Britannica, inc. 2018. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/electromagnetism/Historical-survey%20-%20acesso%20em%2021/09>. Acesso em: 21 set. 2018.

KASHY, E. *et al*. **Electricity.** Encyclopædia Britannica, inc. 2018. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/electricity/Deriving-electric-field-from-potential>. Acesso em: 15 out. 2018.

HELMENSTINE, Anne Marie. **Frequency Definition in Science**: Understand What Frequency Means in Physics and Chemistry. ThoughtCo, 2017. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/definition-of-frequency-605149>. Acesso em: 8 out. 2018.

HELMENSTINE, Todd. **Convert Frequency to Wavelength Worked Example Problem**: Frequency to Wavelength Spectroscopy Example Problem. ThoughtCo, 2018. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/convert-frequency-to-wavelength-problem-609469>. Acesso em: 8 out. 2018.

JONES, Andrew Zimmerman. **Voltage Definition in Physics**: Electric Potential Energy Per Unit Charge. ThoughtCo, 2017. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/voltage-2699022>. Acesso em: 4 out. 2018.

SPARAVIGNA, Amelia Carolina. **Petrus Peregrinus of Maricourt and the Medieval Magnetism.** Politecnico di Torino, 2016. Disponível em: < https://arxiv.org/abs/1512.02634> Acesso em: 13 nov. 2018.

ASSIS, André Koch Torres. **Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade.** Canadá: Apeiron Montreal, 2010.

BOSS, Sergio Luiz Bragatto; CALUZI, João José. **Uma Breve Biografia de Stephen Gray (1666-1736).** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 32, no. 1, 2010. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/321602.pdf> Acesso em: 15 nov. 2018.

JARDIM, Wagner Tadeu; GUERRA Andreia. **Práticas científicas e difusão do conhecimento sobre eletricidade no século XVIII e início do XIX:** possibilidades para uma abordagem histórica da pilha de volta na educação básica. Revista Brasileira de Ensino de

Física, vol. 40, no. 3, 2018. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172018000300703&lng=en&nrm=iso> Acesso em: 15 nov. 2018.

PRIESTLEY Joseph. **The History and Present State of Electricity:** with original experiments. Inglaterra: Cambridge University Press, 2013.

O'CONNOR, J. J.; ROBERTSON, E. F. *apud* LYUBIMOV. **Charles Augustin de Coulomb.** University of St. Andrews, p.3, 2000. Disponível em: < http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2003/icm14/matematicos/Coulomb.htm> Acesso em: 15 nov. 2018.

CHAPMAN, S. Jonathan; HEWETT, David P.; TREFETHEN, Lloyd N. **Mathematics of the Faraday Cage.** SIAM Review**.** University of Oxford, 2015. Disponível em: < https://people.maths.ox.ac.uk/trefethen/chapman_hewett_trefethen.pdf> Acesso em: 15 nov. 2018.

CORAZZA, Gia Carlo. **Marconi's History.** Proceedings of IEEE, vol. 86, 1998. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/681364> Acesso em: 15 nov. 2018.

IEC, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEV 161-01-05**. IEC 60050, 2018. Disponível em: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=161-01-05> Acesso em: 17 nov. 2018.

IEC, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEV 161-01-06**. IEC 60050, 2018. Disponível em: < http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=161-01-06> Acesso em: 17 nov. 2018.

IEC, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEV 161-01-07**. IEC 60050, 2018. Disponível em: < http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=161-01-07> Acesso em: 17 nov. 2018.

SWANBERG, Roger**. Estimating Emissions from Your Printed Circuit Board**. Evaluation Engineering, 2007. Disponível em: < https://www.evaluationengineering.com/estimating-emissions-from-your-printed-circuit-board> Acesso em: 20 out. 2018, il. color.

TUTORIALSPOINT. **Antenna Theory - Half-Wave Folded Dipole**. Tutorials Point ,2016. Disponível em:< https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_half_wave_folded_dipole.htm >. Acesso em: 8 out. 2018, il. Color.

ANTENNA-THEORY. **The Half-Wave Dipole Antenna**. Antenna Theory, 2009. Disponível em:<http://www.antenna-theory.com/antennas/halfwave.php>. Acesso em: 8 out. 2018.

PINTO, Carlos Roberto. **Tecnologia TVSS (Supressor de surtos transientes de tensão)**. CRPEficien, 2014. Disponível em:<https://crpeficien.com.br/ess.html>. Acesso em: 5 out. 2018, il. Color.

ANTENNA-THEORY. **VSWR (Voltage Standing Wave Ratio.** Antenna Theory, 2009. Disponível em:< http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php>. Acesso em: 8 out. 2018.

MUBEEN, Suraya *et al.* **Design of Dipole Antenna and various radiation patterns for various lengths.** Global Journal for Research Analysis, vol. 6, issue 4, 2017. Disponível em: <https://www.worldwidejournals.com/global-journal-for-research-analysis-GJRA/recent_issues_pdf/2017/April/April_2017_1492843868__74.pdf> Acesso em: 17 nov. 2018.

DAVDSON, Michael D *et al.* **Electromagnetic Wave Propagation.** Micro.Magnetic, 2016. Disponível em: < https://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/polarizedlight/emwave/> Acesso em 17 nov. 2018.

BRITANNICA, Editors of Encyclopaedia. **Gauss's Law**. Encyclopædia Britannica, inc. 2009. Disponível em: < https://www.britannica.com/science/Gausss-law>. Acesso em: 18 nov. 2018.

ROUSE, Margaret. **EIA (Electronic Industries Association or Electronics Industries Alliance)**. WhatIs, 2011. Disponível em:< https://whatis.techtarget.com/definition/EIA-Electronic-Industries-Association-or-Electronics-Industries-Alliance>. Acesso em: 21 nov. 2018.

TEKTRONIX. **Tektronix Component Solutions:** Flip Chip Assembly. Tektronix, INC. 2018. Disponível em: < https://www.tek.com/component-solutions/ic-package/interconnect-technologies/flip-chip > Acesso em 23 nov. 2018.

ALI *et al*. **Design of a Hybrid Integrated EMC Filter for a DC–DC Power Converter.** IEEE, 2012. Disponível em: < https://ieeexplore.ieee.org/document/6126051> Acesso em: 24 nov. 2018.

SATTEL, Sam. **Everything You need to know About Capacitors**. Autodesk Inc. 2016. Disponível em: < https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/everything-need-know-capacitors/> Acesso em: 26 nov. 2018.

SATTEL, Sam. **How Your PCB is Manufactured**. Autodesk Inc. 2016. Disponível em: < https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/pcb-manufacturing/> Acesso em: 22 out. 2018.

SOFTEQ. **Electronic Circuit Design.** Softeq Developmetn Corp. 2016. Disponível em: < https://www.softeq.com/electronic_circuit_design> Acesso em: 31 out. 2018.

ALTIUM. **Our Industry.** Altiuim designer, 2018. Disponível em: < https://www.altium.com/fr/company/about-altium/our-industry > Acesso em: 30 out. 2018.

AUTODESK. **ECAD MCAD Collaboration:** ECAD and MCAD. Autodesk Inc. 2018. Disponível em: < https://www.autodesk.com/solutions/ecad-and-mcad-software> Acesso em: 30 nov. 2018.

PCBWAY. **Cost Cores Foil & Prepreg for PCBs**. Pcbway, 2018. Disponível em: <

https://www.pcbway.com/pcb_prototype/Cost_cores_Foil___Prepreg_for_PCBs.html> Acesso em: 27 out. 2018.

PCBWAY. **PCB Manufacturing and equipment**. Pcbway, 2018. Disponível em: < https://www.pcbway.com/pcb-service.html> Acesso em: 25 out. 2018.

EPECTEC. **PCB Laminate Material Information (Table).** Epec, 2018. Disponível em: < https://www.epectec.com/pcb/laminate-material.html> Acesso em: 27 out. 2018.

CANDORIND. **PCB Manufacturing Process.** Candor, 2018. Disponível em: < https://www.candorind.com/pcb-manufacturing-process/> Acesso em: 25 out. 2018.

COPPERALLIANCE. **Copper and its Alloys:** properties. EU Copper Institute, 2018. Disponível em: < https://copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys/properties/> Acesso em: 26 out. 2018.

PCBCART. **PCB Materials Selection Guide**. PCBCART, 2018. Disponível em: < https://www.pcbcart.com/pcb-capability/pcb-materials.html> Acesso em: 26 out. 2018.

PCBCART. **PCB Manufacturing Process**. PCBCART, 2018. Disponível em: < https://www.pcbcart.com/article/content/PCB-manufacturing-process.html> Acesso em: 22 out. 2018.

PCBCART. **Everything You Should Know about Flex-Rigid PCB Manufacturing Technology**. PCBCART, 2018. Disponível em: < https://www.pcbcart.com/article/content/flex-rigid-pcb-manufacturing-process.html > Acesso em: 22 out. 2018.

MCLPCB. **PCB Material Options and Classifications and Substrate Property Considerations.** MCLPCB, 2018. Disponível em:<https://www.mclpcb.com/pcb-material-selection-guide/> Acesso em 27 out. 2018.

MCLPCB. **The PCB Manufacturing Process.** MCLPCB, 2018. Disponível em:< https://www.mclpcb.com/pcb-manufacturing-process/> Acesso em 27 out. 2018.

MITTAL, Atar. **PCB Substrates:** Knowing Your Dielectric Material's Properties. Sierra Circuits, 2015. Disponível em: < https://www.protoexpress.com/blog/pcb-substrates-knowing-dielectric-materials-properties/ > Acesso em: 19 out. 2018. Il. Color.

NEWWORLDENCYCLOPEDIA, Writers and Editors. **Inductor**. Disponível em: <http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Inductor> Acesso em 15 out. 2018.

MINIPHYSICS. **SS:** Magnetic field due to current in a solenoid. Miniphysics, 2018. Disponível em: < https://www.miniphysics.com/ss-magnetic-field-due-to-current-in-a-solenoid.html> Acesso em: 15 out. 2018. Il. Color.

ADAMCZYK, Bogdan; ALDRIDGE, Ryan. **Guard Trace Impact on Crosstalk Between PCB Traces**. INCompliance, 2018. Disponível em: < https://incompliancemag.com/article/guard-trace-impact-on-crosstalk-between-pcb-traces/ > Acesso em: 11 out. 2018. Il. Color.

ELECTRONICNOTES. **The Radio Spectrum:** VLF, LF, MF, HF, VHF, UHF. Electronic notes, 2016.Disponível em: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/electromagnetic-waves-em/radio-spectrum-vlf-lf-mf-hf-vhf-uhf.php> Acesso em: 26 nov. 2018.

SPRING, Kenneth R. *et al.* **Electromagnetic Wave Propagation.** Olympus-lifescience, 2018. Disponível em: < https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/java/polarizedlight/emwave/> Acesso em: 26 nov. 2018.

POOLE, Ryan. **SMT / SMD Component Packages.** Radio Electronics, 2018. Disponível em: < https://www.radio-electronics.com/info/data/smt/smt_packages.php>Acesso em: 26 nov. 2018.