

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DO RIO GRANDE DO NORTE

CURSO TÉCNICO INTEGRADO EM ELETRÔNICA

Amanda Maria da Silva Souza

Sara Beatriz Barbosa de Vasconcelos

**PCIFLEX - FABRICAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO FLEXÍVEL**

Natal-RN

2018

Amanda Maria da Silva Souza

Sara Beatriz Barbosa de Vasconcelos

## **PCIFLEX - FABRICAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO FLEXÍVEL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso Técnico integrado em Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - Campus Natal Zona Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Técnico em Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Fernandes de Souza

Natal-RN

2018

Amanda Maria da Silva Souza

Sara Beatriz Barbosa de Vasconcelos

## **PCIFLEX - FABRICAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO FLEXÍVEL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação do curso Técnico integrado em Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - Campus Natal Zona Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Técnico em Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Fernandes de Souza

Trabalho de conclusão de curso apresentado e aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_, pela seguinte banca examinadora:

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Érico Cadineli Braz, Prof. Dr. - Presidente

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

---

Liviane Catarine Almeida Melo, Prof. - Examinadora

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

---

Hilario Jose Silva Castro, Prof. - Examinador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

“Foi um dia memorável porque operou grandes mudanças em mim. Mas isso se dá com qualquer vida. Imagine um dia especial na sua vida e pense como teria sido seu percurso sem ele. Faça uma pausa, você que está lendo, e pense na grande corrente de ferro, de ouro, de espinhos ou de flores que jamais o teria prendido não fosse o encadeamento do primeiro elo em um dia memorável.”

Charles Dickens, *Grandes esperanças*.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de esforço e acima de tudo persistência, mas não só não negamos, como temos muito apreço às pessoas que nos ajudaram de maneiras diretas e indiretas a continuar e conseguir assim que esse texto esteja agora sob seus olhos. Portanto, primeiramente, gratidão de todo nosso ser aos nossos pais e irmãos e irmãs (no caso de Sara) que nos motivaram da maneira fisicamente mais próxima nessa jornada e também nos deram a chance de ingressar para início de tudo nessa instituição que com toda certeza podemos dizer que nos edificou ainda mais como as pessoas que seremos no futuro.

Continuando, agradecemos também aos nossos amigos e colegas de classe que sempre se dispuseram a nos auxiliar emergencialmente, tanto na prática como emocionalmente como sempre foi nosso costume como turma de assim ser. Especialmente a: Isabel Sousa, Luciana Gomes, Magno Nascimento, Marcus Cavalcante, Ricardo Queiroz, Sara Silva e Tabita Silva. Nessa ordem alfabética para não entrarmos em méritos de preferência dos preferidos. Queremos agradecer também a pessoas da nossa vida que não se encaixam no grupo amigos e colegas de sala e por não termos muito quem listar nos amigos sem ser colegas de sala — porque a nossa tendência era chorar menos as dores da construção desse trabalho nas costas destes para ter com quem conversar amenidades da vida —, fazemos uma chamada especial, estes são quem podemos chamar de namorado (no caso de Amanda) e noivo (no caso de Sara), na ordem também, Mateus Medeiros e Luiz Silva, lindos homens da nossa vida que nos ouviam pacientemente e comemoravam conosco as nossas quase vitórias até a vitória definitiva que concretizasse com a entrega destas 54 páginas e o recebimento do nosso (merecido) diploma.

Por fim, não nos esqueceremos também das ajudas de curtos eventos, mas de grande significado para a construção deste projeto e relatório de conclusão de curso. Aécio que nos dava acesso ao nosso próprio laboratório de pesquisa como também indicações em outros problemas, Ailton, por nos disponibilizar e confiar em nós para utilizar as estações de retrabalho do e-lixo e laboratório de manutenção, Sérgio por nos mostrar como nossa desatenção pode nos tirar muito tempo usando apenas um multímetro e também Érico, que agora presidiu a banca de nossos avaliadores, e colaborou no final do processo de conclusão deste trabalho há mais de um ano atrás como agora finalmente convocando esta bendita banca.

## RESUMO

Ao passo que o avanço tecnológico tem sido cada vez mais forte nas últimas décadas, a eletrônica está intrinsecamente ligada a isso, adaptando-se e redimensionando-se a fim de otimizar ao máximo os espaços, o peso e o consumo de potência dos circuitos. Principalmente nesse contexto do aproveitamento máximo de espaço, uma adjacência que tem se desenvolvido bastante nos últimos anos é a eletrônica flexível, uma tecnologia que tem agregado à eletrônica a possibilidade de desenvolver PCIs (Placas de Circuito Impresso) em superfícies flexíveis como poliamida, ou diversas outras. No entanto, há muito pouco no desenvolvimento desta área quando referente a materiais didáticos, principalmente sobre métodos de fabricação dos circuitos flexíveis em si, o que acaba inibindo a expansão de trabalhos acadêmicos na área da eletrônica flexível, cuja aplicação tem sido ampliada para finalidades médicas, comerciais e aeroespaciais. Como solução para esse problema, após diversas pesquisas, este projeto propõe o desenvolvimento de um método de fabricação de PCIs flexíveis baseado na técnica já conhecida de produção de PCIs rígidas com tecnologia de montagem em superfície (SMT). Utilizando os procedimentos desenvolvidos, foram projetados e construídos 03 circuitos com diferentes aplicações, que serão descritas detalhadamente garantindo assim a sua reprodutibilidade.

Palavras chave: **Circuitos flexíveis; Fabricação; Fotolitografia.**

## **ABSTRACT**

While technological advances have been increasingly strong in the last decades, electronics are inextricably linked to this, being adapted and resized in order to optimize the spaces, weight and power consumption of circuits to the maximum. Especially in this context of maximum utilization of space, an adjacency that has been developed quite a lot in recent years is flexible electronics, a technology that has added to electronics, the possibility of developing PCBs (Flexible Printed Circuit Boards) on flexible surfaces such as polyamide, or several others. However, there is very little in the development of this area when it comes to teaching material, mainly on methods of manufacturing the flexible circuits themselves, which ends up inhibiting the expansion of academic works in the area of flexible electronics, whose application has been expanded for medical, commercial and aerospace purposes. As a solution to this problem, after several researches, this project proposes the development of a method of manufacturing flexible PCBs based on the already known technique of production of rigid PCBs with Surface Mount Technology (SMT). Using the developed procedures, three circuits with different applications will be designed and built; and also described in detail, thus ensuring its reproducibility.

**Keywords: Flexible circuits; Fabrication; Photolithography.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático do circuito flexível de Hansen, de 1903.	17
Figura 2 – Elementos básicos da placa de circuito impresso, substrato e folha de cobre.	20
Figura 3 – Circuito flexível de camada única.	21
Figura 4 – Circuito flexível de dupla camada.	21
Figura 5 – Circuito flexível de múltiplas camadas.	23
Figura 6 – Circuito rígido-flexível.	23
Figura 7 – LEDs com configuração PTH e SMD.	25
Figura 8 – Etapas do processo de <i>Spin – Coating</i> .	28
Figura 9 – Máquina <i>Pick and Place</i> utilizada na inserção de componentes SMD.	31
Figura 10 – Perfil de refusão - zonas no interior do forno.	32
Figura 11 – Fluxograma dos processos adotados para a fabricação de uma PCI flexível.	33
Figura 12 – Aplicação do polímero fotossensível na superfície da poliamida.	36
Figura 13 – Poliamida coberta por polímero fotossensível sendo rotacionada no Spin Coater Hard Disk.	36
Figura 14 – Camada fina e uniforme de polímero fotossensível depositado na superfície da poliamida.	37
Figura 15 – Remoção do solvente do polímero fotossensível depositado (secagem).	37
Figura 16 – Poliamida submetida à exposição na cabine de luz UV.	38
Figura 17 – Placa de poliamida sendo submetida a corrosão	39
Figura 18 – Esquemáticos e layouts desenvolvidos para os circuitos. (a) Esquemático do arranjo de LEDs. (b) Esquemático do multivibrador astável. (c) Layout do esquemático de LEDs. (d) Layout do multivibrador astável.	41

Figura 19 – Fotolitos impressos em papel transparente. (a) Fotolito do multivibrador astável. (b) Fotolito do arranjo de LEDs (luminária). (c) Fotolitos do estêncil de ambos os circuitos.	42
Figura 20 – <i>Layout</i> do circuito transferido para poliamida. (a) <i>Layout</i> referente do arranjo de LEDs (luminária); (b) <i>Layout</i> do multivibrador astável.	43
Figura 21 – Substrato (poliamida) dos circuitos após processo de corrosão. (a) Circuito série da luminária pós processo de corrosão; (b) Circuito multivibrador astável; Circuito pulseira de LEDs.	44
Figura 22 – Estênceis produzidos. (a) Estêncil do arranjo de LEDs (luminária); (b) Estêncil do multivibrador astável; (c) Estêncil da pulseira de LEDs.	45
Figura 23 – Circuito após o posicionamento dos componentes sobre a pasta de solda fresca.	46
Figura 24 – Circuito multivibrador com componentes soldados por refusão.	47
Figura 25 – Curva de frequência do oscilador	48
Figura 26 – Demonstração do funcionamento final dos circuitos. (a) Funcionamento do circuito da série de LEDs para uma luminária; (b) Funcionamento do circuito multivibrador astável; (c) Funcionamento do circuito série de LEDs para uma pulseira.	49
Figura 27 – Luminária LED flexível; (b) Pulseira de LEDs.	49

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

CAD - *Computer-aided Design* (Design assistido por computador)

IFRN - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

LED - *Light Emitting Diode* (Diodo emissor de luz)

PCI - Placa de circuito impresso

PDF - *Portable Document Format* (Formato Portátil de Documento)

PTH - *pin through hole* (Terminal inserido no furo)

PWM - *Pulse-Width Modulation* (Modulação por largura de pulso)

SMD - *Surface mounted device* (Dispositivo montado em superfície)

SMT - *Surface mounted technology* (Tecnologia de montagem em superfície)

THT - *Through hole technology* (Tecnologia de montagem através de furos)

UV - Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	13
1.2 OBJETIVOS	14
<b>1.2.1 Objetivo geral</b>	14
<b>1.2.2 Objetivos específicos</b>	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
<b>2. EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	16
2.1 EVOLUÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS IMPRESSAS	16
2.2 EVOLUÇÃO DAS PCIs FLEXÍVEIS	17
2.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PCIs FLEXÍVEIS	17
<b>2.3.1 Material dielétrico (Base)</b>	18
<b>2.3.2 Folha metálica (camada condutiva)</b>	19
2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS PCIs FLEXÍVEIS QUANTO AO NÚMERO DE CAMADAS	20
<b>2.4.1 Circuitos flexíveis de lado único (Face simples)</b>	20
<b>2.4.2 Circuitos flexíveis dupla face</b>	21
<b>2.4.3 Circuitos flexíveis multicamadas (Multilayer)</b>	22
<b>2.4.4 Circuitos rígido-flexível</b>	23
2.5 COMPONENTES SMD	24
2.6 TECNOLOGIA SMT	25
2.7 PROCESSO DE FABRICAÇÃO INDUSTRIAL DA PCI FLEXÍVEL	26
<b>2.7.1 Fotolitografia e corrosão dos filmes de cobre</b>	26
<b>3. METODOLOGIA</b>	33
3.2 PROJETO DOS CIRCUITOS DE TESTE	34

3.2 FABRICAÇÃO	35
3.2.1 FOTOLITOGRAFIA	35
3.2.2 CORROSÃO DO FILME DE COBRE DA POLIAMIDA	35
3.2.3 FABRICAÇÃO DO ESTÊNCIL METÁLICO	39
3.2.4 POSICIONAMENTO DOS COMPONENTES E PROCESSO DE SOLDAGEM POR REFUSÃO	40
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>41</b>
4.1 ESQUEMÁTICO E LAYOUT DOS CIRCUITOS	41
4.2 FOTOLITOGRAFIA	42
<b>4.2.1 Elaboração dos fotolitos</b>	<b>42</b>
<b>4.2.2 Transferência dos Layouts</b>	<b>43</b>
4.3 CORROSÃO DO FILME DE COBRE DA POLIAMIDA	43
4.4 PRODUÇÃO DO ESTÊNCIL	44
4.5 APLICAÇÃO DA PASTA DE SOLDA E POSICIONAMENTO DOS COMPONENTES	45
4.6 PROCESSO DE SOLDAGEM POR REFUSÃO	46
4.7 TESTE DOS PROTÓTIPOS DESENVOLVIDOS	47
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>50</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos fazem parte da evolução do homem e, nos últimos tempos, trouxeram uma série de vantagens para a sua vida. Uma grande diversidade de trabalhos manuais são substituídos diariamente por equipamentos eletrônicos que desempenham as mesmas funções dos seres humanos, porém de modo mais eficaz e prático. Diante desse cenário atual, é notória a introdução massiva desses aparelhos no cotidiano de muitas sociedades, aparelhos esses que percorrem um longo processo de fabricação até que estejam apropriados para o uso. Nesse processo, ocorre o desenvolvimento das estruturas físicas e, separadamente, dá-se a fabricação da parte mais importante, os sistemas eletrônicos, principais responsáveis pelo funcionamento dos equipamentos. Trata-se da produção de placas de circuitos impressos controladores, projetadas única e exclusivamente para uma função específica que será desempenhada pelo equipamento.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

O progresso da tecnologia, segundo Del Claro (2009), trouxe o aumento da modernização nos utilitários de produção, comunicação, estudo e interação e, atrelado a isso, o avanço tecnológico dos aparelhos eletrônicos. Telefones celulares, computadores, câmeras fotográficas, controles remotos, GPS e pulseiras inteligentes. Exemplos da melhora, no que diz respeito à facilidade do indivíduo de realizar determinadas funções diárias, os aparelhos tornam-se cada vez mais portáteis, menores e leves. Mauricio Kugler afirma que

Atualmente, a complexidade dos sistemas eletrônicos vem crescendo de forma cada vez mais rápida, exigindo uma conseqüente evolução nos processos de projeto e fabricação de placas de circuito impresso. Mais componentes em um menor espaço, mais pinos por componentes, distâncias e furos cada vez menores e um número de camadas nunca antes imaginado vêm se tornando rotina no desenvolvimento de PCI, exigindo dos projetistas novas técnicas, novas ferramentas e novos procedimentos. (KUGLER, 2004, p.5)

Sabe-se que atualmente um dos maiores desafios da eletrônica é a busca pela otimização de espaço e por aperfeiçoamentos no desempenho de aparelhos eletrônicos, além do baixo custo concernente à produção destes. De acordo com o engenheiro espacial Felipe Iglesias (2016), entre os meios mais eficientes para a execução desses desafios estão os circuitos flexíveis, pois oferecem vantagens no que diz respeito à sua capacidade de se moldarem a múltiplos *designs* mecânicos. Muitos aparelhos estão fazendo uso da tecnologia flexível para melhorar tanto seu desempenho quanto a sua utilidade nas mais diversas áreas desde de aparelhos eletrônicos conhecidos popularmente como em televisores, celulares, câmeras fotográficas até em aparelhos de emprego específico na medicina, área militar e aeroespacial; o engenheiro também afirma que os circuitos flexíveis oferecem grande atrativo pela redução dos custos totais quando se substituem interconexões convencionais, o que pode reduzir em até 60% o custo e até 75% do volume ocupado.

Nesse contexto da atual inclusão das placas de circuito, ou PCI flexíveis no meio da eletrônica, torna-se fundamental o conhecimento a respeito do modo de fabricação dessas, fazendo-se necessária uma sequência de passos a serem seguidos para o seu desenvolvimento. Contudo, por ainda se tratar de uma novidade no meio eletrônico, este método de fabricação de circuitos é pouco abordado na teoria, principalmente, a respeito das técnicas necessárias para a produção da PCI flexível. Isso inibe, de certa forma, a expansão de trabalhos acadêmicos atuais que tendem a se limitarem ao meio tradicional de produção, já que esse continua sendo o mais acessível.

## 1.2 OBJETIVOS

Na sequência, serão expostos os objetivos gerais e específicos referentes à concretização deste projeto.

### 1.2.1 Objetivo geral

Em analogia ao encadeamento contextual apresentado até o momento, este projeto teve como objetivos principais: realizar um estudo acerca dos processos necessários para produção de PCIs flexíveis e desenvolver, baseando-se na fabricação de PCIs rígidas, um método para a produção das placas de circuito flexíveis; e projetá-las, por meio de softwares apropriados, analisá-las e, por fim, fabricá-las. Os procedimentos propostos devem apresentar detalhadamente os passos necessários à propagação da técnica de fabricação de PCIs flexíveis, almejando sua futura utilização pela comunidade acadêmica e por desenvolvedores independentes para, desse modo, impulsionar posteriores estudos relativos à fabricação das placas flexíveis, possibilitando a produção das mesmas com características mais vantajosas e emprego de novas técnicas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma metodologia de fabricação de circuitos eletrônicos flexíveis utilizando a Tecnologia de montagem em superfície (SMT);
- Projetar circuitos eletrônicos (desenvolvimento do esquemático, simulação e ajustes, desenvolvimento do *layout*, e produção dos fotolitos) para teste da metodologia desenvolvida - *cases*;
- Fabricar os circuitos projetados; e
- Testar o funcionamento dos circuitos fabricados

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia está organizada em cinco capítulos. O primeiro refere-se a introdução, que visa abordar os principais assuntos que levaram a produção deste trabalho, os quais são referentes aos avanços da tecnologia, que tem exigido dos projetistas a busca por conhecimentos acerca de tecnologias inovadoras, particularmente a fabricação manual de PCIs

flexíveis, que vêm ganhando ênfase no meio eletrônico, mas que são pouco abordadas em obras escritas. Além disso, a introdução expõe os objetivos deste trabalho e a estrutura do mesmo.

O segundo capítulo apresenta os aspectos teóricos necessários ao entendimento do trabalho, abordando assuntos como: a história das placas de circuito impresso; estruturas de placas de circuito flexíveis, bem como os materiais e métodos usados na fabricação industrial dessas - tecnologia SMT e componentes SMD. Posteriormente, no capítulo três, encontra-se a metodologia que foi empregada neste trabalho, sendo esta subdividida em pesquisa, projeto de protótipo usado como teste para as técnicas desenvolvidas, etapas do processo de fabricação desenvolvido.

Sucessivamente, no capítulo quatro, são expostos os resultados obtidos com a aplicação da técnica convencionada na metodologia deste trabalho no desenvolvimento de outros circuitos e também seus testes elétricos, trazendo discussões fundamentais para o entendimento do projeto. Por fim, no capítulo cinco, apresentam-se as considerações finais que terão como objetivo comparar os resultados alcançados ao passo que discute sobre esses, além de mostrar também as pretensões futuras para o aprimoramento do trabalho.

## 2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Esta seção está estruturada em tópicos, os quais irão explanar os conceitos necessários para a totalidade da compreensão do conteúdo apresentado neste trabalho, bem como acerca dos materiais utilizados para a execução do mesmo.

### 2.1 EVOLUÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS IMPRESSAS

Circuitos eletrônicos, segundo Filho (1998), são sistemas que relacionam informação a potenciais e correntes elétricas. E, de acordo, com Mehl (2011), antes do surgimento do transistor, esses sistemas eram protagonizados pelas válvulas e as ligações entre os componentes eram feitas geralmente artesanalmente com fios sobre chassis. Mas, com a invenção do circuito impresso em 1936, creditada ao engenheiro austríaco Paul Eisler<sup>1</sup>, que patenteou uma maneira de corroer uma camada de cobre sobre uma superfície isolante fazendo trilhas<sup>2</sup> por onde a corrente elétrica pudesse circular, a forma de fazer circuitos eletrônicos começou a mudar.

No entanto, a utilização realmente ampla das placas de circuito impresso se deu por volta de 1943 quando foram empregadas em equipamentos de rádio para uso militar, tais equipamentos precisavam enfrentar as mais adversas situações no contexto histórico de guerra. Mais a frente, com o descobrimento dos semicondutores, com a criação do transistor, e posteriormente o desenvolvimento dos circuitos integrados, os circuitos eletro-eletrônicos passaram a experimentar avanços significativos, principalmente no que se refere ao seu processo de fabricação.

Os principais elementos das PCIs, de acordo com Khandpur (2005), são, primeiramente, a superfície, composta por um material isolante, rígido ou flexível — no cenário industrial protagonizada por fenolite e fibra de vidro —, que seja capaz de suportar os componentes e condutores; e em segundo lugar, esses mesmos condutores — geralmente de cobre —, os quais são organizados em trilhas fortemente ligadas à superfície.

Existem também, ainda segundo Khandpur (2005), diferentes classificações para essas placas de circuito, as quais antes se baseavam na qualidade da fabricação, divididas em PCIs comerciais, profissionais e de maior confiabilidade. Atualmente, após o advento da Tecnologia de Montagem em Superfície - *Surface mount technology*, são separadas pela quantidade de

---

<sup>1</sup> **Paul Eisler** (1907-1992): Engenheiro austríaco, conhecido como o inventor das placas de circuito impresso. Construiu em 1936 um rádio que possuía uma placa de circuito impresso, com material isolante e trilhas metálicas de cobre. Na Segunda Guerra Mundial, desenvolveu circuitos impressos em placas usadas em baterias antiaéreas. Em 1948, após a guerra, ele se estabelece em uma nova empresa, a Technograph, que inicia a comercialização das placas de circuitos impressos.

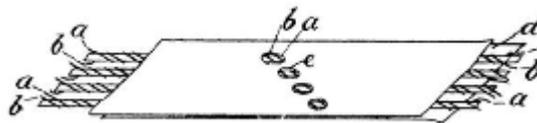
<sup>2</sup> **Trilha**: “caminhos” ou “pistas” condutoras, geralmente de cobre, dispersos sobre o material dielétrico. São responsáveis pelo transporte de sinais elétricos para os componentes eletrônicos presentes na PCI.

superfícies utilizadas nas placas como o que é definido pelo autor de, numa tradução literal, “planos de fiação”. As categorias dessa divisão são placas de circuito impresso *single-sided*, *double-sided* e *multi-sided*. As PCIs *single-sided*, são placas nas quais as trilhas de cobre estão em apenas um de seus lados, seguindo esse raciocínio, as PCIs *double-sided* e *multi-sided* possuem, respectivamente, duas e múltiplas superfícies com filmes condutores.).

## 2.2 EVOLUÇÃO DAS PCIs FLEXÍVEIS

A ideia das placas de circuito flexível tem seu primeiro registro no início de 1900 por uma patente creditada ao Dr. Gilleo e ao Dr. Hansen, pesquisadores ingleses que nesta patente, de acordo com o pesquisador Rodrigues (2013), descreveram o material como uma superfície metálica plana coberta por um papel parafinado, onde as trilhas que faziam ligações eram fios de cobre, como pode-se observar na Figura 1 abaixo.

Figura 1- Esquemático do circuito flexível de Hansen, de 1903 [Hansen, 1903].



Fonte: RODRIGUES, Guilherme Valença da Silva, 2013. Disponível em:  
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/107461/319295.pdf?sequence=1>

Em 1947, na publicação "Printed Circuit Techniques" por Cleo Brunetti e W. Roger Curtis há a abordagem sobre a produção de placas de circuito impresso em material isolante flexível, mas apenas na década de 1950 investigadores da *Sanders Associates* e o fundador da empresa *Royden Sanders* de fato desenvolveram a produção de circuitos em bases flexíveis a fim substituir cablagens (COSTA, 2013). Desde então, ainda de acordo com a tese de mestrado de Costa (2013), deve-se muito do atual desenvolvimento aos japoneses que têm desenvolvido diferentes formas para aplicar a tecnologia de fabricação de circuitos flexíveis no mercado.

## 2.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PCIs FLEXÍVEIS

A produção de circuitos flexíveis requer uma grande gama de materiais que, geralmente, são de difícil acesso tanto quantitativamente quanto financeiramente, o que traz desvantagens, já que inibe a produção em pequena escala de projetos desenvolvidos por pequenos grupos acadêmicos.

Os fatores determinantes para a escolha do material e do método que serão utilizados na produção do protótipo, são o tipo de aplicação, o volume e o meio no qual o mesmo será inserido. A produção de PCIs flexíveis requer adaptações e soluções inovadoras, o que torna imprescindível que o fabricante obtenha o conhecimento necessário acerca de cada material

empregado na fabricação, inclusive de suas características físicas e dimensionais. (GOVEA, 2015).

### 2.3.1 Material dielétrico (Base)

Existem na eletrônica muitos meios para se produzir uma PCI flexível, porém muitos convergem para aplicações que utilizem técnicas de fabricação de placas de circuito rígidas, que são produzidas geralmente em substratos como o fenolite e a fibra de vidro (FV).

O material dielétrico, ou o substrato, é o componente principal do circuito flexível, pois ele será o responsável pela flexibilidade da PCI. Este material serve como base para o posicionamento dos componentes eletrônicos. Diferente dos circuitos rígidos que utilizam comumente o fenolite ou a fibra de vidro, como dito anteriormente, os circuitos flexíveis utilizam-se de materiais que originam-se através da ligação de várias unidades de moléculas pequenas, os polímeros<sup>3</sup>. Cavalcante (2014, p.23) afirma que “[...] os materiais poliméricos são compostos orgânicos com composição química baseada em carbono, hidrogênio e outros elementos não metálicos.”

Por existir uma grande variedade de polímeros, e com o intuito de facilitar os estudos acerca das suas propriedades, os mesmos tiveram que ser classificados. Essa categorização é feita baseada em alguns critérios como: o tipo de estrutura química, as características de fusibilidade e o comportamento mecânico. Quando referente a classificação por comportamento mecânico, os polímeros fragmentam-se em três grupos: plásticos, elastômeros (ou borrachas) e fibras, sendo este último o grupo específico que compreende o objeto de estudo deste tópico (CAVALCANTE, 2014, p.24-26).

O grupo das fibras, de acordo com Gustavo Cavalcante

São corpos nos quais as razões entre o comprimento e as dimensões laterais assume um valor muito grande. Geralmente, as fibras são formadas por macromoléculas lineares orientadas longitudinalmente. Podemos citar como exemplo: poliésteres, poliamidas e poliácridonitrila. (2014, p. 26)

No Conselho regional de química IV região (2013) foi apresentado, além da exposta anteriormente, outra classificação dos polímeros sob outros aspectos como: origem (natural ou sintético), reação de preparação (poliadição, policondensação) e heterogeneidade da cadeia (homopolímero e copolímero).

Diante disso, de acordo com Iglesias (2016), o filme de poliamida, o filme de poliéster e o PET podem ser utilizados como camada dielétrica para a fabricação de circuitos flexíveis.

---

<sup>3</sup> **Polímeros:** É uma macromolécula formada pela união de moléculas de baixa massa molecular chamadas monômeros.

Um dos polímeros essenciais para produção de uma PCI flexível é o poliéster, pois o próprio apresenta características vantajosas como: alta flexibilidade, maior leveza, maior resistência à corrosão, baixas temperaturas de processamento e constante dielétrica adequada. (CAVALCANTE, 2014, p.28).

### 2.3.2 Folha metálica (camada condutiva)

A folha de metal é o material a ser sobreposto na camada dielétrica, tanto nos circuitos flexíveis quanto nos rígidos. De acordo com Safavi (2012) a folha metálica é o material no qual os percursos do circuito são normalmente gravados. “As trilhas que interligarão os vários componentes são definidas e marcadas nas folhas de cobre e o excesso de cobre é removido por corrosão, deixando apenas a região por onde circulará a corrente.” (VERASTEGUI, 2007, p.16).

A prata, o carbono, o alumínio e o cobre são materiais que podem ser utilizados como camadas condutivas. Apesar dessa variedade de elementos, tem-se o cobre como melhor opção, principalmente pelo custo, disponibilidade e excelente desempenho físico e elétrico. Além disso, o cobre destaca-se por possuir uma particularidade mecânica que permite a criação de camadas metálicas de pequena espessura, o que é ideal para se obter uma melhor adesão à película base, nesse caso o substrato (MEHL, 2011; SAFAVI, 2012).

Mehl (2011) expôs em seu artigo a técnica utilizada na deposição da folha de cobre sobre os substratos isolantes e afirma que esse processo

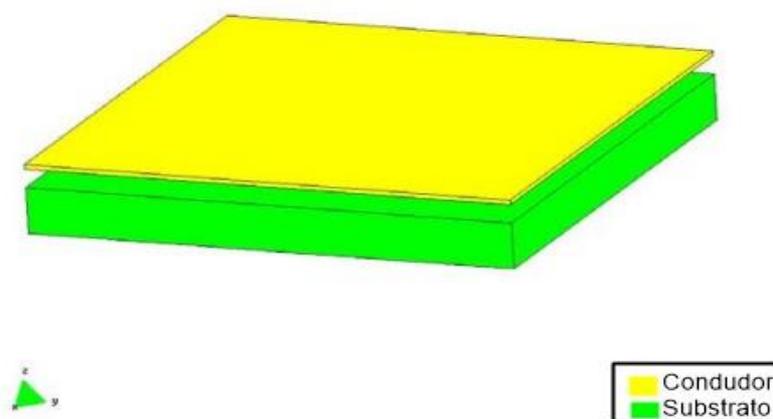
inicia-se pela aplicação de uma tinta à base de grafite. Em seguida as placas são ligadas ao pólo negativo de uma fonte de corrente contínua e mergulhadas em uma solução saturada com sais de cobre, sendo tal solução ligada ao pólo negativo da fonte. Ocorre então um processo eletroquímico chamado **galvanoplastia**<sup>4</sup>, obtendo-se a deposição de uma fina camada de cobre metálico sobre a placa. Ao se obter a espessura de cobre desejada, a placa é retirada do processo de galvanoplastia e passada por uma calandra metálica aquecida, que fixa a camada de cobre à placa e deixa-a com uma superfície lisa e uniforme (MEHL, 2011, p.3)

Ao fim do processo de galvanoplastia, a placa de circuito impresso apresenta-se conforme ilustra a Figura 2.

---

<sup>4</sup> **Galvanoplastia:** É um processo que consiste em depositar um metal sobre o outro material e foi desenvolvido pelo físico e químico Galvani. O processo é considerado uma tecnologia responsável pela transferência de íons metálicos de uma dada superfície sólida ou meio líquido denominado eletrólito, para outra superfície, seja ela metálica ou não. Este processo usa a corrente elétrica, sendo chamado de “eletrólise”.

Figura 2 - Elementos básicos da placa de circuito impresso, substrato e folha de cobre.



Fonte: VERASTEGUI, Thomaz Milton Navarro, 2007. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/artuzi/pesquisa/projeto/thomaz.pdf>. Adaptado

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS PCIs FLEXÍVEIS QUANTO AO NÚMERO DE CAMADAS

Devido às suas características, as PCIs flexíveis abrangem uma vasta esfera de empregabilidade, atendendo a necessidades de projetos que não podem ser atendidas quando utiliza-se PCIs rígidas.

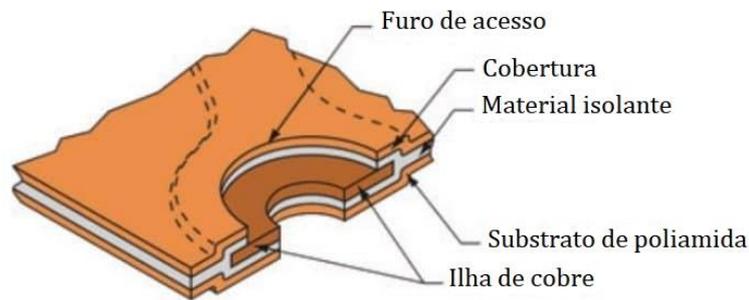
Neste tópico se fará uma breve exposição das variedades mais comuns de estruturas das placas de circuito impresso flexível e suas principais características.

### 2.4.1 Circuitos flexíveis de lado único (Face simples)

O circuito flexível de lado único é o modelo de estrutura mais simples entre os demais, porém de extrema importância, considerando-se que este serve como matriz para as outras estruturas. Semelhante a estrutura da PCI rígida simples, esta consiste em uma camada de material condutor, comumente o cobre, sobreposta em um único lado do substrato flexível, onde serão posicionados os componentes, conforme mostra a Figura 3.

Esta estrutura, Segundo Safavi (2012), possibilitou vantagens, pois o desenvolvimento de dispositivos que fazem uso desse arranjo viabilizou a produção de filmes transparentes de LED, como também compósitos flexíveis de iluminação automotiva.

Figura 3 - Circuito flexível de camada única



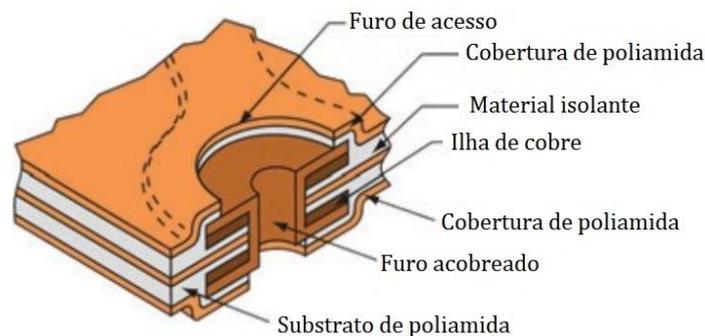
Fonte: IGLESIAS, Felipe, 2016. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/circuitos-flexiveis-e-rigido-flexiveis/>. Adaptado.

#### 2.4.2 Circuitos flexíveis dupla face

De acordo com Safavi (2012) e Iglesias (2016), o circuito flexível dupla face consiste em duas camadas de material condutor separadas por uma única camada de material isolante, conforme ilustra a Figura 4.

Os circuitos flexíveis de dupla face apresentam, entre suas características, a presença de furos metalizados interconectando seus dois lados e possibilitando a utilização do mesmo componente em ambos os lados da PCI. Embora apresentem vantagens, estas estruturas exigem requisitos de processamento especializados para acessar seus recursos, fato que limita seu uso.

Figura 4 - Circuito flexível de dupla camada.



Fonte: IGLESIAS, Felipe, 2016. Disponível em:

<https://www.embarcados.com.br/circuitos-flexiveis-e-rigido-flexiveis/>. Adaptado.

### 2.4.3 Circuitos flexíveis multicamadas (Multilayer)

Os circuitos flexíveis com três ou mais camadas de condutores e com uma camada isolante entre elas são conhecidos como circuitos flexíveis multicamadas. Nesse caso, as camadas também podem ser interligadas através de furos metalizados, assim como nos circuitos de dupla face.

As camadas do circuito flexível multicamada podem ou não ser laminadas continuamente em conjunto ao longo da construção, com a óbvia exceção das áreas ocupadas pelos orifícios de passagem. A prática de laminação<sup>5</sup>, descontínua é comum nos casos em que é necessária a máxima flexibilidade. Isto é conseguido deixando não ligadas às áreas onde a flexão deve ocorrer. (SAFAVI, 2012)

Para Souza (2016), em se tratando de grandes volumes de produção, os circuitos com multicamadas de material condutor podem apresentar a vantagem de baixo custo de montagem, dado que:

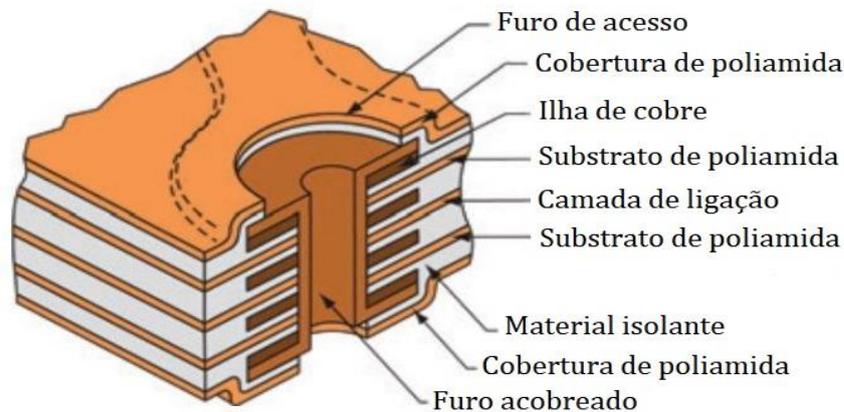
- Exige menor tempo de montagem e ajuste dos circuitos;
- Possui maior confiabilidade de montagem;
- Permite que sejam utilizados métodos automatizados de montagem; e
- Proporciona pequenas dimensões de montagem e pequeno peso, bem como facilita o manuseio.

Os circuitos flexíveis multicamadas apresentam-se conforme ilustra a Figura 5.

---

<sup>5</sup> **Laminação:** Método utilizado para modificar a geometria/dimensões de objetos metálicos através da passagem dessas peças por dois cilindros laminadores.

Figura 5 - Circuito flexível de múltiplas camadas.



Fonte: IGLESIAS, Felipe, 2016. Disponível em:

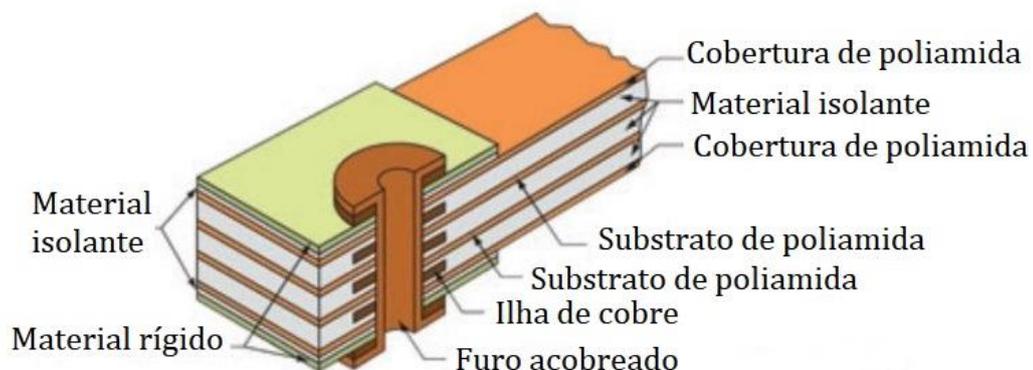
<https://www.embarcados.com.br/circuitos-flexiveis-e-rigido-flexiveis/>. Adaptado.

#### 2.4.4 Circuitos rígido-flexível

Circuitos rígido-flexíveis possuem uma construção híbrida. São constituídos de duas ou mais camadas condutoras e seu material dielétrico pode ser rígido ou flexível, os mesmos são laminados em conjunto em uma única estrutura; os furos de interconexão são trabalhados nas áreas flexíveis ou rígidas, dependendo do design do projetista.

Esta estrutura é utilizada amplamente nas indústrias para confecção de produtos que necessitem de um reforço para suportar o peso de alguns componentes. (IGLESIAS, 2016; SAFAVI, 2012). O arranjo desse circuito está demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Circuito rígido-flexível.



Fonte: IGLESIAS, Felipe, 2016. Disponível em:

<https://www.embarcados.com.br/circuitos-flexiveis-e-rigido-flexiveis/>. Adaptado.

Quando fabricados com dupla face, mas sem furos metalizados e/ou outros recursos de conexão entre suas faces, o circuito é definido, de acordo com as especificações militares, como um quinto tipo. (SAFAVI, 2012).

## 2.5 COMPONENTES SMD

Os circuitos eletrônicos dispõem de um conjunto de partes que exercem funções diversas e significativas para o excelente desempenho das PCIs. Entre esses segmentos, os componentes eletrônicos destacam-se por serem essenciais na construção das placas de circuito e para a totalidade do funcionamento dos equipamentos nos quais as PCIs serão inseridas.

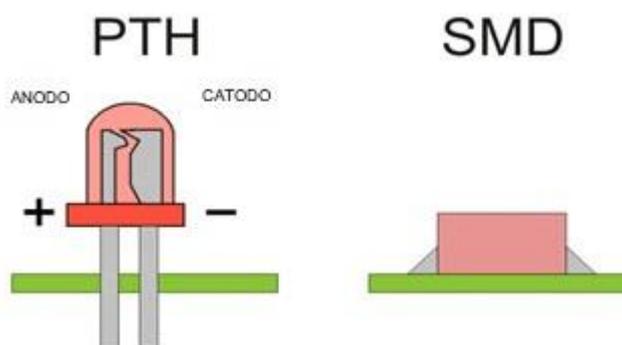
De acordo com Mehl (2011, p.5), até a década 1970, os componentes eletrônicos foram fabricados com terminais longos na forma de arames de cobre revestidos com estanho e adequados apenas para o uso em PCIs por meio de perfuração. Contudo, esses componentes, com configuração de pinos através de furos (PTH), passaram a apresentar desvantagens como por exemplo o fato que se fazia necessário cortar o comprimento em excesso dos terminais. Além disso, a necessidade de orifícios para passagem dos terminais representa uma etapa a mais no processo de fabricação do circuito e faz crescer o seu custo e tempo de produção. Em face disso, sobreveio a necessidade de manufaturar um novo componente apropriado para solucionar estes problemas. Foi, então, em 1975 que começaram a surgir PCIs com uma nova classe de componentes, chamados dispositivos de montagem em superfície (SMD).

Souza (2016) indica as principais características desses componentes, que segundo ele, apresentam dimensões físicas demasiadamente reduzidas e são fabricados com terminais bem curtos (*Solder pins*) ou sem terminais (*Soldering pads*) o que lhes permite apresentar capacitâncias e indutâncias baixas, além de diferenciarem-se na soldagem quando comparado aos componentes PTH. Ademais, os componentes SMD possuem características iguais e até superiores, quando comparados aos PTH, sendo capazes de suportar maior *stress* térmico<sup>6</sup> no momento da soldagem. A Figura 7 abaixo ilustra as diferenças físicas concernentes aos terminais dos componentes SMD e PTH.

---

<sup>6</sup> **Stress térmico:** Efeito causado nos componentes eletrônicos, ocasionado pela má distribuição térmica no circuito. O stress térmico pode diminuir a vida útil dos componentes.

Figura 7 - LEDs com configuração PTH e SMD.



Fonte: <http://www.newstarvision.it/en/led-smd-pt.html>.

Na montagem industrial de placas com componentes SMD, devido à quantidade de componentes a serem montados, a miniaturização desses e o fato que os terminais possuem formato compatível com os pads nas placas e por este motivo devem permanecer estáveis durante a inserção e a refusão, é necessário um maquinário versátil que execute a coleta e o posicionamento automático e preciso dos componentes. Para isso, geralmente são empregadas, na linha de produção, máquinas automáticas conhecidas como *Pick & Place*. (MEHL, 2011; CARDOSO et al.,2007)

Concordante com Ewaldo Mehl

Os componentes são fornecidos pelos fabricantes afixados em rolos. Um sistema robotizado coloca os componentes de forma muito precisa nos pontos corretos na placa, aplicando a eles uma pequena gota de cola. Nos circuitos de maior complexidade, os SMDs podem ser aplicados em ambas as faces da placa. Após a colagem dos componentes na placa, segue-se um processo de soldagem feito pela rápida imersão da placa em um banho da liga de solda em estado de fusão. (MEHL, 2011, p. 5)

A incorporação desses equipamentos industriais, indubitavelmente, oferece inúmeras vantagens inerentes à produção das placas de circuito impresso. Todavia, esse mecanismo automatizado suscita infortúnios, como por exemplo o elevado custo destes equipamentos, o que impossibilita o acesso da comunidade acadêmica da área de eletrônica. Além disso, há a necessidade de mão de obra qualificada para o manuseio destas máquinas, exigência que dificulta o acesso à uma produção nestes moldes.

## 2.6 TECNOLOGIA SMT

O método de montagem de placas eletrônicas convencional e amplamente utilizado por indústrias e estudantes da área eletrônica é a *Through-Hole Technology* (THT) ou tecnologia de

montagem através dos furos, que compreende uma montagem com componentes de configuração PTH. Nesse processo, segundo Nogueira, Queiroz-Neto e Manzato (2007, p.4), os componentes possuem terminais (*leads*) que são montados em furos feitos no circuito e soldados pelo outro lado do substrato, sobre uma película de cobre (*pads*)<sup>7</sup>. Contudo, o uso dessa tecnologia vem deixando de ser utilizada gradativamente, isso devido a moderna implementação de circuitos miniaturizados que necessitam de uma montagem específica, que permite o aproveitamento de ambas as faces das PCIs e a utilização de *layouts* mais complexos, para esse fim as indústrias têm empregado a tecnologia SMT.

“A tecnologia de montagem de componentes em superfície possibilita altas densidades de empacotamento e um processo de maior automatização, diminuindo as operações de montagem intensivas realizadas pelos operadores” (GRIGOLETTO; FERREIRA, 1999, p.1)

De acordo com Carlos Sievers e Israel Silva (2015, p.49-50), o processo de confecção industrial de placas de circuito impresso com tecnologia de montagem em superfície necessita de uma grande gama de maquinário que compõem a linha de produção, isso devido ao crescimento diário da demanda de produtos que utilizam PCIs com tecnologia SMT.

## 2.7 PROCESSO DE FABRICAÇÃO INDUSTRIAL DA PCI FLEXÍVEL

Ao realizar pesquisas bibliográficas acerca dos métodos essenciais para fabricação de placas de circuito impresso flexíveis, é perceptível a escassez de materiais que auxiliem na aplicação manual desta técnica. Devido a isto, é imprescindível, para se obter a maior compreensão, uma exposição mais direta sobre as técnicas utilizadas industrialmente, possibilitando então uma adaptação para o método manual. Essas técnicas fundamentais para produção de PCIs flexíveis serão explanadas nos subtópicos posteriores.

### 2.7.1 Fotolitografia e corrosão dos filmes de cobre

No processo de fabricação de circuitos com utilização de tecnologia SMT várias etapas são executadas para que se obtenha o desfecho desejado e um sistema que funcione com eficiência. Entre essas etapas de produção, a fotolitografia exerce uma função fundamental, pois é por meio do processo fotolitográfico que os parâmetros estabelecidos pelo projetista, no *layout* feito em uma ferramenta CAD, são transferidos para o filme de cobre do substrato a fim de se fabricar a PCI. É importante realçar que falhas nesse processo podem comprometer todo o encadeamento subsequente da fabricação das PCIs.

A técnica de fotolitografia surgiu em 1817 e foi inventada por Joseph Nicéphore Niepce ao fazer pesquisas sobre como tornar permanente em um substrato uma imagem observada em uma câmera escura. O processo de transferência por fotolitografia foi sendo

---

<sup>7</sup> *Pads*: Película de cobre, dispersa sobre o substrato de acordo com o layout do projetista, onde são soldados os componentes SMD. Os *pads* são equivalentes as ilhas dos componentes PTH.

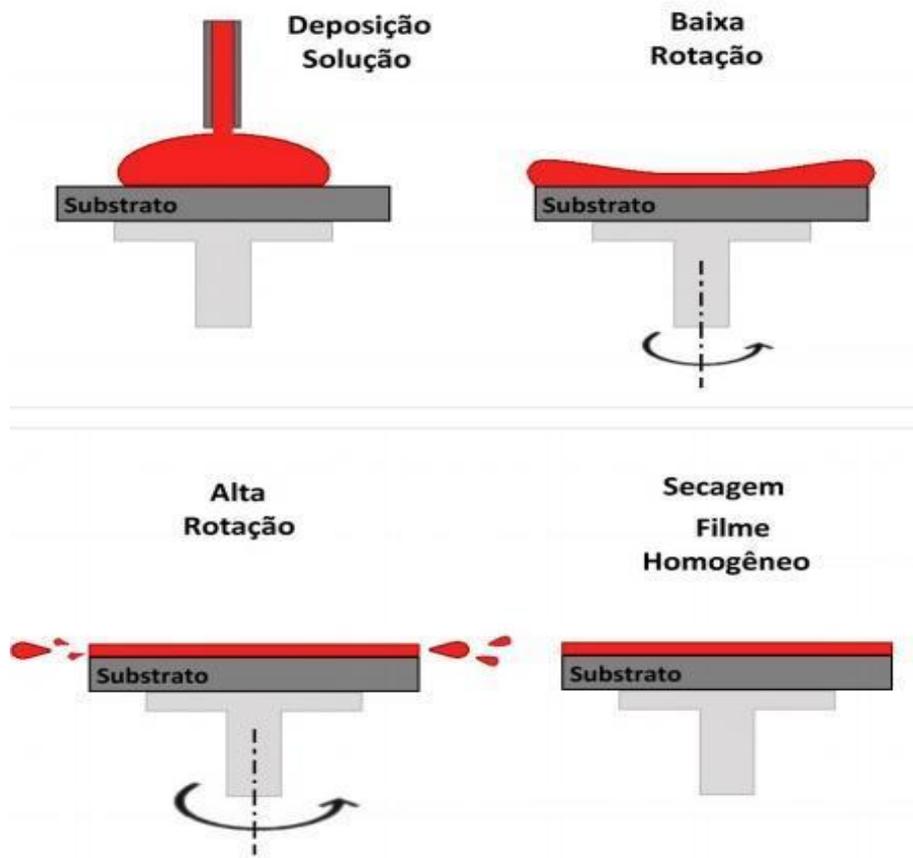
desenvolvido ao longo dos anos e atualmente existem vários tipos de materiais fotossensíveis adequados ao desenvolvimento desse processo, que consiste na utilização da luz ultravioleta como fonte de energia no processo de transferência de padrões de uma máscara para um substrato. Essa técnica exige que as condições de temperatura, umidade e outras características do ambiente sejam bem controladas para que o processo de transferência tenha um resultado satisfatório. (SOUZA, 2008)

A transferência fotolitográfica tem algumas etapas a serem seguidas, as quais são usadas frequentemente na produção de PCIs. De acordo com Souza (2008), o processo de produção das PCIs deve ocorrer em ambientes limpos com baixos índices de poluentes ambientais. O processo tem início com a confecção do fotolito, uma máscara feita de um material transparente onde os desenhos desenvolvidos em *softwares* específicos são impressos em tinta preta e com o uso de uma impressora. Os substratos, para os quais o padrão é transferido, geralmente possuem uma camada metálica de cobre, prata, platina, níquel, cobalto ou ouro.

Além da gravação do *layout* para o filme de cobre do substrato que será utilizado na fabricação da PCI, a fotolitografia também é utilizada para imprimir o design dos *pads* dos componentes em uma fina lâmina de alumínio (estêncil) que será usada posteriormente como matriz para aplicação da pasta de solda no processo de soldagem, que será explanado no tópico 2.7.2 deste trabalho.

Em um segundo momento, após o processo de limpeza do substrato, acontece a disposição do polímero fotossensível. Esse estágio é realizado em um equipamento denominado *Spin Coater* onde o substrato, após receber em sua superfície uma certa quantidade do polímero, é posto a girar a velocidades entre 500 e 7000 rpm e, ao fim, a solução depositada torna-se um filme com espessura uniforme sobre toda extensão do substrato. O processo por *spin coating* pode ser observado na Figura 8. (SOUZA, 2008; MACK, 2007)

Figura 8 - Etapas do processo de *Spin-Coating*.



Fonte: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2672081/mod\\_resource/content/1/Aula-06-Fotogravacao-2012.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2672081/mod_resource/content/1/Aula-06-Fotogravacao-2012.pdf)

Após o processo de *spin coating*, ocorre a etapa de *pre-bake*, ou pré-cozimento suave. Esta etapa tem duração variável em torno de 5 a 30 minutos em um forno com temperaturas entre 80 e 150°C e tem, como principal objetivo, de acordo com Jaeger (1988) melhorar a adesão e remover o solvente do polímero fotossensível.

Uma vez removido o solvente do polímero, inicia-se a etapa de exposição à luz UV, nessa fase do processo o padrão a ser gravado é transferido para o substrato. Nesse processo, de acordo com Souza (2008), a exposição é feita por meio de um equipamento denominado fotoexpositora, trata-se de um aparato equipado com lâmpadas que emitem feixes de luz ultravioleta.

Com o polímero já exposto à luz UV, ele passa por um processo semelhante ao que é aplicado com filmes fotográficos, conhecido como revelação, realizada utilizando-se uma solução reveladora que varia de acordo com o polímero utilizado. Para polímeros positivos, as regiões não expostas à radiação UV terão o polímero removido quando da revelação, enquanto

que as regiões expostas serão mantidas. Entretanto, utilizando-se polímeros negativos, as regiões expostas serão removidas, sendo mantidas aquelas não submetidas a radiação.

Concluída a revelação, realiza-se uma etapa denominada *hard-baking* que tem como objetivo endurecer o fotoresiste e melhorar ainda mais sua adesão. (JAEGER, 1988). Geralmente esse processo se dá em um forno, numa temperatura entre 120°C e 180°C, durante cerca de 25 minutos. Os parâmetros desse processo são definidos nas especificações do fabricante do polímero utilizado.

Assegurada a perfeita adesão do polímero na superfície do substrato, inicia-se a corrosão das partes do filme metálico que não foram protegidas pelo polímero, deixando intacta a camada que constitui as trilhas e os pads da PCI. Existem duas técnicas para realização dessa etapa; a corrosão úmida (*wet etching*) e a corrosão seca (*dry etching*), cuja escolha depende do material a ser corroído.

A corrosão úmida é o método mais utilizado, por ter menor custo e atuar da forma desejada na maioria das vezes, sendo um processo isotrópico<sup>8</sup>; o processo é realizado pela imersão do substrato em uma solução química corrosiva. Por sua vez, a corrosão seca, por tratar-se de um método majoritariamente anisotrópico<sup>9</sup> é comumente utilizada quando o objetivo é a produção de padrões em escala nanométrica, a técnica consiste no uso de gases corrosivos por aceleração molecular e/ou reações químicas. (Jaeger, 1988). Em sequência ao processo de corrosão, também por processo químico, é executada a remoção completa do polímero utilizado para proteger as trilhas metálicas do ataque químico.

## 2.7.2 Processos de soldagem para componentes SMD

A soldagem é uma etapa indispensável na fabricação de PCIs rígidas e flexíveis. O correto desenvolvimento desta etapa na linha de produção de PCIs assegura o êxito da fabricação e conseqüentemente o bom funcionamento dos circuitos impressos. É importante ressaltar, que a soldagem na eletrônica serve para unir dois materiais, os terminais dos componentes eletrônicos e as trilhas da PCI, devendo garantir além da circulação de corrente elétrica pela união, a necessária rigidez mecânica exigida para o conjunto.

O método de soldagem pode variar de acordo com os componentes utilizados na fabricação das placas de circuito impresso. De acordo com Coelho (2011), os componentes com tecnologia PTH têm seus terminais inseridos através de furos, sendo soldados na outra face da PCI. Diferente dos componentes PTH, após a aplicação da pasta de solda, os componentes SMD são montados sobre a superfície da placa. A soldagem de componentes

---

<sup>8</sup> **Processo isotrópico:** Processo no qual a corrosão distribui-se igualmente em todas as direções.

<sup>9</sup> **Processo anisotrópico:** Processo no qual a corrosão é focada em uma única direção.

SMD pode ser realizada por processo de refusão (*reflow solder*) em fornos, soldagem por onda e soldagem manual.

Um dos principais materiais usados no processo de soldagem é a solda eletrônica, utilizada normalmente em pasta no contexto de componentes com tecnologia SMD. De acordo com DS TOOLS (2011), esta solda é composta por uma liga eutética, isto é, uma liga com ponto de fusão baixo, o que implica na geração de uma solda com menor chance de inadequações do ponto vista elétrico e mecânico. Estas ligas são geralmente constituídas, em maior percentual, por estanho, combinado a um ou mais metais, como chumbo, prata, zinco, dentre outros.

De acordo com Grigoletto (1999), as partículas da pasta de solda têm de ser uniformes para que essa então possua consistência de deposição, visto que possíveis irregularidades na superfície das partículas impediriam a disposição adequada sobre a placa de circuito impresso, acarretando como consequência a ocorrência de falhas no processo de soldagem.

Um dos fatores que influenciam no desempenho da pasta de solda é a viscosidade que é especificada em cps (centpoise). Pastas com diferentes viscosidades utilizam diferentes métodos de aplicação, a técnica de impressão por estêncil de metal é a mais utilizada e também a que demanda uma das maiores viscosidades, entre 600 a 1400 Kcps. (DS TOOLS, 2011)

No processo de aplicação da pasta de solda por serigrafia, o estêncil é precisamente posicionado sobre o substrato, posicionando-se seus furos alinhados com as ilhas de cobre presentes no substrato conforme o *layout* da PCI; em seguida, a pasta de solda aplicada sobre o estêncil é pressionada por um rodo metálico e espalhada por toda área, preenchendo uniformemente todos os furos e deixando uma película de pasta de solda exclusivamente nos locais onde os componentes serão fixados durante a soldagem. O equipamento que faz a aplicação da pasta de solda é conhecido como *screen printer*. (GRIGOLETTO; FERREIRA, 1999; CAMILO, 2015)

Logo após o processo de serigrafia, os componentes devem ser devidamente posicionados sobre a pasta aplicada onde ficaram fixados após o processo de soldagem. A inserção dos componentes é feita, na escala manufatureira, por máquinas de alta precisão denominadas *pick and place* (pegar e colocar), que tem a função de retirar os componentes das embalagens e então dispô-los em suas respectivas posições na PCI. (SIEVERS; SILVA, 2015). Esse maquinário é responsável pelo ritmo, velocidade e precisão em uma linha de produção de PCIs com tecnologia SMT. A Figura 9 abaixo apresenta a máquina *Pick and Place*.

Figura 9 - Máquina *Pick and Place* utilizada na inserção de componentes SMD



Fonte: Juki (2013). Disponível em:

[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4002/1/CT\\_COALT\\_2015\\_1\\_04.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4002/1/CT_COALT_2015_1_04.pdf)

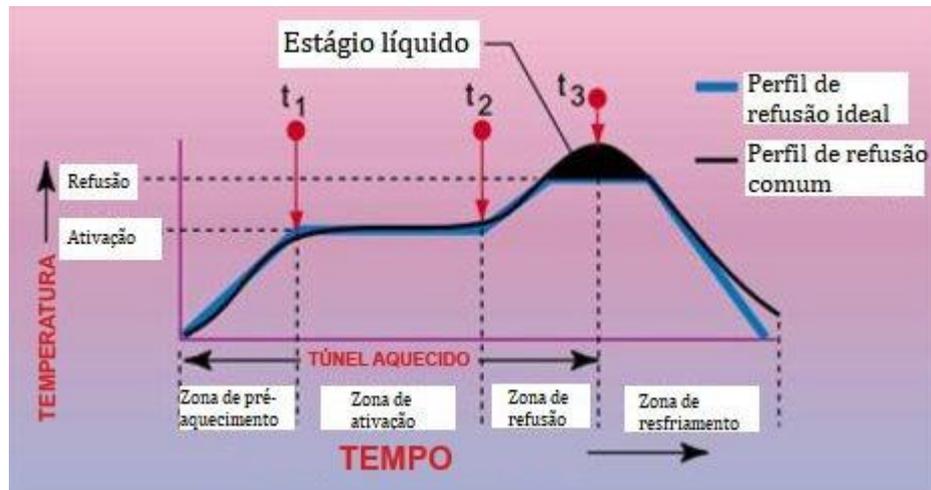
Após o posicionamento dos componentes é iniciado o processo de refusão da pasta de solda, que segundo Sievers e Silva

Consiste em transferir calor para a PCI, onde estão depositados os componentes e a pasta de solda, até a temperatura atingir a fusão da pasta para efetuar a ligação intermetálica, proporcionando desta forma a conexão eletromecânica entre os terminais dos componentes e as ilhas de contato da PCI. (SIEVERS; SILVA, 2015, p.52)

A refusão da pasta de solda é feita em forno ou estufa que aquece a placa de circuito enquanto a mesma “se movimenta por zonas com temperaturas diferenciadas em seu interior com auxílio de uma esteira rolante (*conveyor*).” (COELHO, 2011). Em virtude das zonas de temperaturas, é necessário que exista um controle maior com relação ao tempo (velocidade da esteira) e a temperatura do processo de aquecimento. Tais parâmetros são descritos na documentação técnica da pasta de solda, e podem variar em função dos componentes químicos presentes na mesma. (SIEVERS; SILVA, 2015; COELHO, 2011)

O interior do forno é dividido em zona de pré-aquecimento, zona de ativação do fluxo, zona de refusão da pasta de solda e zona de resfriamento da PCI. As quatro zonas representadas na Figura 10 compõem, segundo Sievers e Silva (2015), o chamado perfil de refusão. Trata-se do detalhamento do processo de aquecimento necessário à soldagem efetiva dos componentes.

Figura 10 - Perfil de refusão: zonas no interior do forno



Fonte: SHILOH; MALBOEUF, 2009.

Cada uma dessas zonas de temperatura de um perfil de refusão ideal têm uma curva de temperatura diferente, devendo exercer uma função específica. A primeira, zona de pré-aquecimento, também chamada de zona de rampa, tem o papel de elevar a temperatura - até então ambiente - da PCI à temperatura de ativação, utilizando uma taxa de variação entre 2 °C e 5 °C por segundo. Idealmente, também deve representar de 25 % a 33 % do percentual total do perfil de refusão.

A zona de ativação deve ter uma temperatura constante cujo valor deve ser ajustado na faixa de 120 °C a 150 °C, representando um percentual de 33 % a 50 % do tempo total do processo de refusão. Nessa zona, deve ocorrer a homogeneização da temperatura nas diversas partes da PCI e, também, a ativação do fluxo da pasta de solda, bem como a remoção de substâncias voláteis.

A zona de refusão, também conhecida como zona de pico final, é responsável por elevar a temperatura a uma taxa de 2 °C a 5 °C por segundo, partindo da temperatura de ativação até atingir a temperatura de pico recomendada, cujo valor encontra-se acima do ponto de fusão da liga metálica presente na pasta de solda, em geral na faixa de 205 °C a 230 °C.

Por último, a zona de resfriamento é responsável por evitar a ocorrência de estresse térmico na PCI e componentes, influenciando decisivamente para o bom resultado e obtenção da qualidade do processo de soldagem. A curva de resfriamento deve representar o espelhamento da curva na zona de refusão. (SHILOH; MALBOEUF, 2009)

### 3. METODOLOGIA

Este item do trabalho evidencia as etapas que foram executadas ao longo do projeto e exibe os materiais e os métodos que foram necessários para o desenvolvimento dos circuitos flexíveis. Os tópicos expostos a seguir irão esclarecer os procedimentos desenvolvidos para confecção dos circuitos.

As etapas, citadas anteriormente, consistem em: pesquisas bibliográficas referentes às técnicas necessárias para a fabricação dos circuitos, compreendendo tanto os materiais que foram utilizados como os procedimentos adequados a serem seguidos, tendo em vista a construção de PCIs flexíveis em substrato de poliamida, utilizando a tecnologia SMT e componentes com configuração SMD; projeto simulação e desenvolvimento do *layout* dos circuitos de teste, feitos no ambiente de simulação PROTEUS versão 8.0; desenvolvimento de técnicas de fabricação de circuitos eletrônicos em substrato flexível; e, por fim, a fabricação e análise dos protótipos, sendo estas etapas, respectivamente, a ordem cronológica que foi seguida durante todo o percurso até a finalização deste trabalho que estão topicalizadas em sua sequência no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho.



Fonte: As autoras (2018).

### 3.1 PROJETO DOS CIRCUITOS DE TESTE

Em etapa anterior ao projeto e simulação dos circuitos de teste escolhidos, os dispositivos utilizados foram selecionados entre os componentes presentes na biblioteca da ferramenta de CAD utilizada (PROTEUS versão 8.0) e disponíveis no mercado local. Quando da etapa de elaboração do *layout*, componentes disponíveis no mercado e não encontrados na biblioteca do software foram substituídos por componentes de dimensões e pinagem equivalentes.

O primeiro passo para o projeto dos circuitos de teste foi a elaboração de um esquemático e sua respectiva simulação utilizando o módulo ISIS do software PROTEUS. A função desta etapa é ter uma prévia de como o circuito, com os componentes dispostos da maneira certa, vai funcionar na prática.

Após a simulação bem sucedida do esquemático, é necessária a utilização de outro módulo do software, o ARES, que por sua vez permite que o usuário determine, em um plano virtual, a maneira como os componentes, trilhas e *pads* de circuitos projetados no ISIS serão dispostos numa futura PCI, ou seja, o *layout*. O ARES conta com uma grande variedade de ferramentas que possibilitam a edição de espessura das trilhas, dimensões das ilhas dos componentes, tamanho da placa e etc.

A seguir, na etapa de geração do fotolito, o *layout* finalizado é salvo em formato .pdf sendo posteriormente modificado usando-se o editor de imagens Adobe Photoshop CC versão 2017, com o objetivo de inverter o padrão de cores em razão do processo de corrosão que o substrato da PCI irá sofrer e também para espelhar a imagem que posteriormente será sobreposta na superfície da poliamida. A escolha do *software* de edição se deu em função do programa gerar uma imagem com qualidade e dimensões próximas ao arquivo original em PDF.

Finalizada a elaboração do fotolito que será usado na fabricação da PCI, deu-se início ao processo de elaboração do *layout* e do fotolito usado na fabricação do estêncil que será utilizado para aplicação da pasta de solda sobre os *pads* de cada componente dos circuitos. Nesses processos foram utilizadas as mesmas ferramentas de CAD utilizadas para criação do *layout* e fotolito das PCIs.

Quando o conjunto de padrões a serem utilizados nos processos de fabricação dos circuitos foram concluídos, estes foram impressos em filmes transparentes de alto brilho de tamanho A4, marca Filipaper com a utilização de uma impressora à jato de tinta marca: Epson, modelo: L395.

## 3.2 FABRICAÇÃO

Primeiramente foram comprados os materiais e componentes que compõem os circuitos de teste. De posse dos projetos e dos respectivos componentes, foi iniciado o desenvolvimento das metodologias necessárias à fabricação dos circuitos de teste. Os processos foram executados no Laboratório de Pesquisa em Recursos Naturais - LAPERN - do IFRN Campus Natal - Zona Norte.

### 3.2.1 FOTOLITOGRAFIA

O primeiro passo para a confecção dos circuitos de teste foi a transferência do *layout* projetado para a superfície dos substratos. Tendo como objetivo a exposição seletiva à radiação ultravioleta (UV), os *layouts* do estêncil e dos circuitos, impressos em filme transparente, foram sobrepostos aos substratos de alumínio e de poliamida recobertos com polímero fotossensível, após o que, o sistema de exposição UV foi mantido acionado por 120 segundos.

A deposição de uma camada fina e uniforme de polímero fotossensível sobre os substratos foi realizada utilizando-se um equipamento *spin coater* fabricado pelo grupo de pesquisa em eletrônica do IFRN Campus Natal - Zona Norte (DANTAS; SILVA, 2017), trata-se de um equipamento eletrônico cujo funcionamento é gerenciado por um microcontrolador, capaz de rotacionar substratos rígidos em velocidades selecionadas pelo usuário que podem chegar a 8000 rotações por minuto (rpm). A força centrípeta provocada pela rotação do substrato promove o espalhamento do polímero e conseqüentemente a formação de um filme fino, contínuo e uniforme sobre o substrato. Tendo em vista que a fixação do substrato ao *spin coater* quando da rotação é feito por vácuo, para evitar a deformação da poliamida quando da aplicação do polímero, a mesma foi fixada em um substrato rígido. Conforme demonstrado na Figura 12, após a fixação, o polímero fotossensível foi depositado na superfície do substrato flexível que foi posicionado no *spin coater*, sendo posteriormente rotacionado a uma velocidade de 5000 rpm durante 30 segundos (Figura 13).

Figura 12 - Aplicação do polímero fotossensível na superfície da poliamida.



Fonte: As autoras (2018).

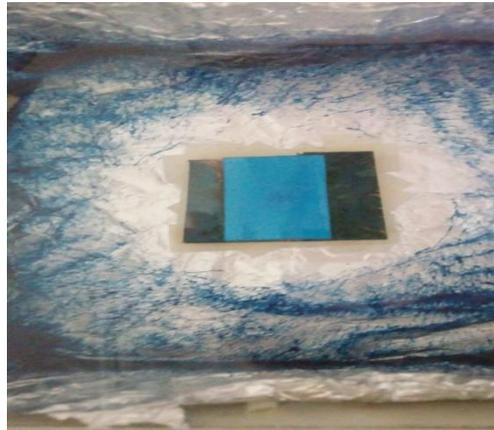
Figura 13 - Poliamida coberta por polímero fotossensível sendo rotacionada no Spin Coater



Fonte: As autoras (2018).

Uma vez depositada uma camada fina e uniforme de polímero fotossensível sobre a superfície da poliamida, conforme a Figura 14, para remover os solventes do polímero (secagem) e melhorar a fixação do mesmo na superfície do filme de cobre do substrato, o conjunto foi submetido à etapa térmica em um forno marca: Unox, modelo: XF003 regulado em uma temperatura de 80°C por 25 minutos (Figura 15).

Figura 14 - Camada fina e uniforme de polímero fotossensível depositado na superfície da poliamida.



Fonte: As autoras (2018).

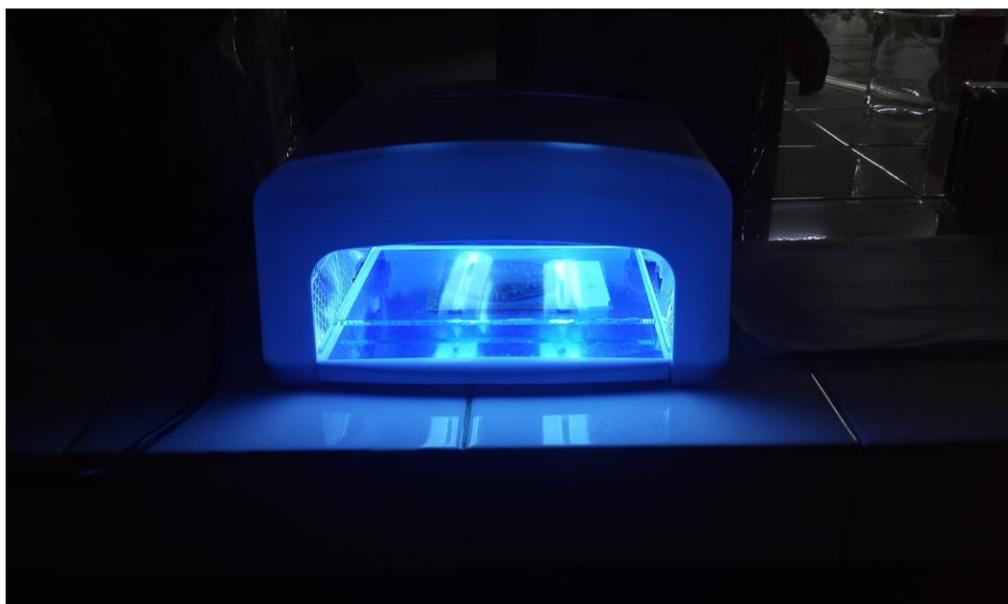
Figura 15 - Remoção do solvente do polímero fotossensível depositado (secagem).



Fonte: As autoras (2018).

Com o polímero aplicado e seco, inicia-se a etapa de exposição à luz UV. Nessa fase do processo foi utilizada uma cabine de luz UV, o fotolito é posicionado sobre o conjunto substrato/polímero fotossensível e uma lâmina de vidro foi sobreposta para garantir o contato perfeito entre fotolito e a camada polimérica, ou seja, para eliminar eventuais bolhas de ar existentes na interface. Conforme demonstrado na Figura 16, concluída a preparação descrita, executa-se a exposição propriamente dita acionando-se as luzes UV durante 120 segundos.

Figura 16 - Poliamida submetida à exposição na cabine de luz UV.



Fonte: As autoras (2018).

Após a exposição o substrato foi submetido a processo de revelação, mediante imersão do mesmo em uma solução aquosa de Carbonato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

### 3.2.2 CORROSÃO DO FILME DE COBRE DA POLIAMIDA

Concluída a transferência do padrão da PCI para o substrato, foi iniciado o processo de corrosão seletiva do filme de cobre existente na superfície da poliamida. O ataque químico do filme de cobre foi realizado utilizando-se uma solução aquosa de Perclorato de Ferro ( $\text{FeCl}_3$ ). Para aumentar a taxa de corrosão, a solução foi aquecida a  $65^\circ\text{C}$  e agitada utilizando-se uma placa aquecedora equipada com agitador mecânico marca Thelga, modelo TMA10R (Figura 17). Esse processo de corrosão foi realizado em ambiente de capela química equipada com sistema de exaustão.

Figura 17 - Placa de poliamida sendo submetida a corrosão



Fonte: As autoras (2018).

### 3.2.3 FABRICAÇÃO DO ESTÊNCEL METÁLICO

Para a fabricação do estêncil foram necessárias lâminas finas de alumínio. Tais lâminas foram obtidas do reaproveitamento de latas de refrigerante, que, com o auxílio de uma esponja de lã de aço, foram submetidas a limpeza e remoção da tinta existente. Após a remoção da tinta, as lâminas foram submetidas a limpeza química utilizando um detergente desengraxante e desincrustante composto de Tensoativo Aniônico biodegradável, Ácido Duodecil Benzeno (Ácido Sulfônico), Ácido Fluorídrico e Conservantes, uma solução química geralmente utilizada para a limpeza de ar-condicionado. O alumínio foi inteiramente submerso numa placa de petri contendo cerca 30ml da substância durante 20 minutos.

O procedimento de transferência do *layout* do estêncil para a lâmina de alumínio foi o mesmo aplicado à poliamida, sumarizados em aplicação do polímero fotossensível, exposição à luz UV e revelação. Diferente da corrosão do filme de cobre, a parte da lâmina recoberta pelo polímero seria a corroída. Para o processo da corrosão do *layout* do estêncil foi necessário o revestimento deste por papel *contact*, apenas do lado o qual o polímero não havia sido aplicado, a fim de proteger a lâmina no processo, de modo que a corrosão seguisse o padrão delimitado pelo *layout* em apenas um sentido não correndo risco da expansão da corrosão além do tamanho dos *pads*.

Seguinte à aplicação do papel *contact*, a lâmina foi submetida a cerca de 40 ml numa solução de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$  - 74%), ácido nítrico ( $HNO_3$  - 2,5%), e água destilada ( $H_2O$  - 23,5%), uma solução que é capaz de corroer o alumínio, mas em seu resultado ideal não corrói o papel *contact* e nem o polímero ao redor dos *pads* revelados. Desta forma as partes desprotegidas foram corroídas e as protegidas se mantiveram.

### 3.2.4 POSICIONAMENTO DOS COMPONENTES E PROCESSO DE SOLDAGEM POR REFUSÃO

Com o estêncil e a poliamida prontos foi possível dar início a preparação necessária anteriormente ao começo da soldagem por refusão. Inicialmente o estêncil foi colocado em cima da poliamida de forma que a lâmina de alumínio protegesse todas as partes com exceção dos *pads*. Foi aplicada então a pasta de solda os componentes nos *pads* foi utilizada a pasta de solda *Sn63/Pb37 No Clean Solder Past 4860P* que devido às características observadas em seu datasheet teve de ser mantida a uma temperatura entre 2°C e 10°C. Ao ser removida da refrigeração, foi necessário aguardar um tempo de cerca de 40 minutos para essa chegasse à temperatura ambiente e pudesse ser empregada. Ao atingir a temperatura ideal, foi depositada na superfície da lâmina de alumínio uma pequena quantidade da pasta e essa então foi dispersa sobre o estêncil com o auxílio de uma espátula de silicone em apenas um sentido de modo a cobrir todos os *pads*.

Neste ponto, o substrato flexível estava então pronto para o posicionamento dos componentes, os quais foram colocados em seus respectivos locais com o auxílio de uma pinça. Isso finalizado, a placa foi levada a um forno industrial onde passou pelo processo de refusão, diferente da escala industrial, assistido apenas por um termopar e com uma variação manual de temperatura para acompanhar cada zona do perfil de refusão especificado da pasta de solda da maneira mais próxima; e respeitando a divisão percentual das zonas. O processo por completo durou um total de cerca de aproximadamente 20 minutos, mas foi deixado pouco mais do mesmo tempo no forno, mesmo desligado, para não interromper a zona de resfriamento.

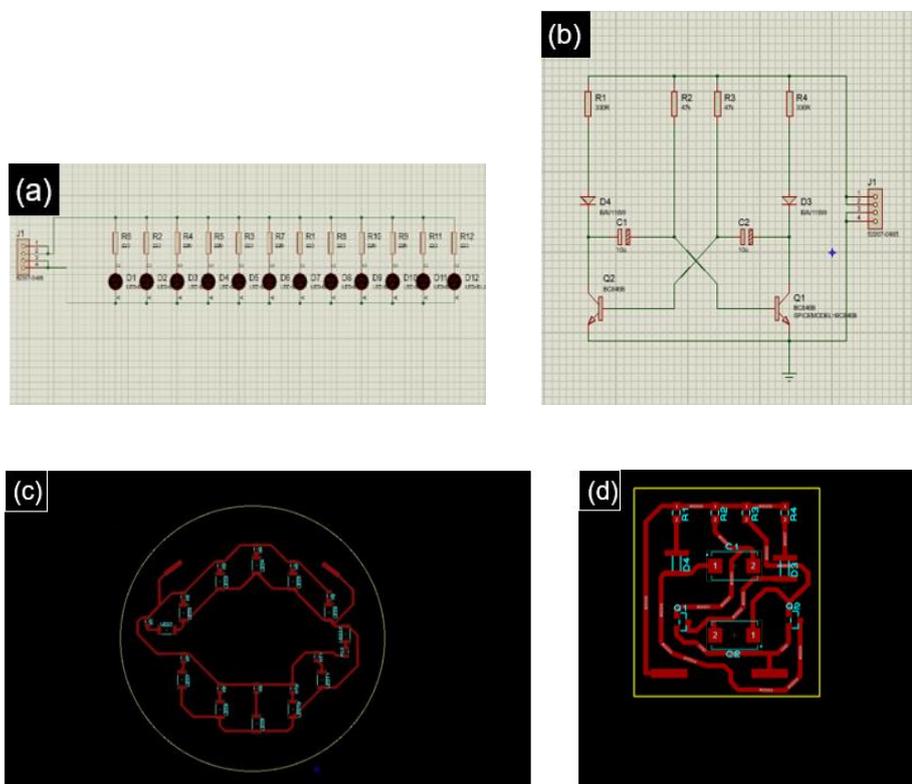
## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após o desenvolvimento da técnica de fabricação de circuitos flexíveis e teste do circuito inicial, que demonstrou resultados satisfatórios, foram desenvolvidos dois outros circuitos para a aplicação e análise da técnica desenvolvida nesta monografia, a fim de demonstrar algumas das incontáveis possibilidades de utilização que comprovam a reprodutibilidade deste método.

### 4.1 ESQUEMÁTICO E LAYOUT DOS CIRCUITOS

Inicialmente, foram elaborados os esquemáticos dos circuitos para a aplicação do método de fabricação manual das placas eletrônicas flexíveis, sendo estes um circuito oscilador, especificamente o Multivibrador Astável e, além deste, um arranjo de LEDs (luminária). Após o processo de simulação na ferramenta CAD, constatou-se o correto funcionamento de ambos os circuitos, conforme apresentado na Figura 18, permitindo consequentemente o desenvolvimento dos layouts a serem utilizados na etapa de produção dos fotolitos.

Figura 18 - Esquemáticos e layouts desenvolvidos para os circuitos. (a) Esquemático do arranjo de LEDs. (b) Esquemático do multivibrador astável. (c) Layout do esquemático de LEDs. (d) Layout do multivibrador astável.



Fonte: As autoras (2018).

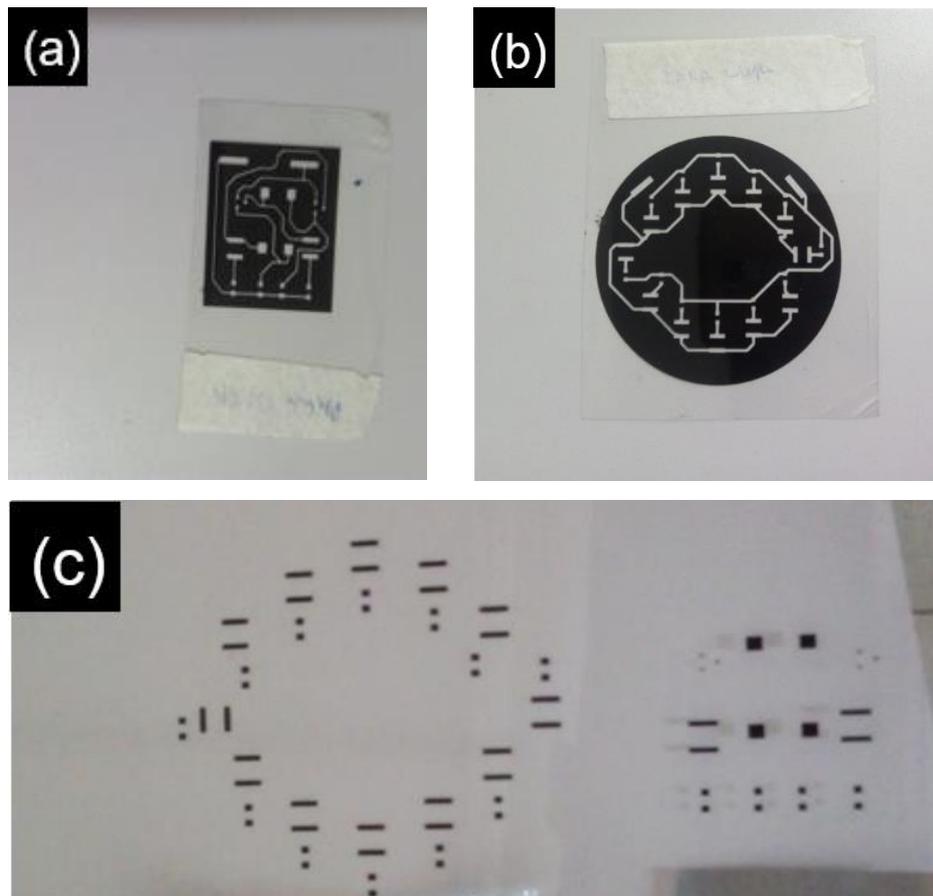
## 4.2 FOTOLITOGRAFIA

Em sequência estão expostos os resultados do processo de fotolitografia que baseia-se nas discussões de dois momentos que foram melhor divididos nos dois subtópicos seguintes.

### 4.2.1 Elaboração dos fotolitos

Uma das principais etapas dos processos de produção dos circuitos flexíveis foi a geração dos fotolitos. A resolução dos layouts impressos por uma impressora do tipo jato de tinta em um filme transparente de alto brilho tamanho A4, permitiu a transferência perfeita do layout para os substratos e a boa execução das sucessivas etapas da produção dos circuitos. Nas Figuras 19 (a), (b) e (c), são mostrados os fotolitos finais utilizados na fabricação dos circuitos.

Figura 19 - Fotolitos impressos em papel transparente. (a) Fotolito do multivibrador astável. (b) Fotolito do arranjo de LEDs (luminária). (c) Fotolitos do estêncil de ambos os circuitos.

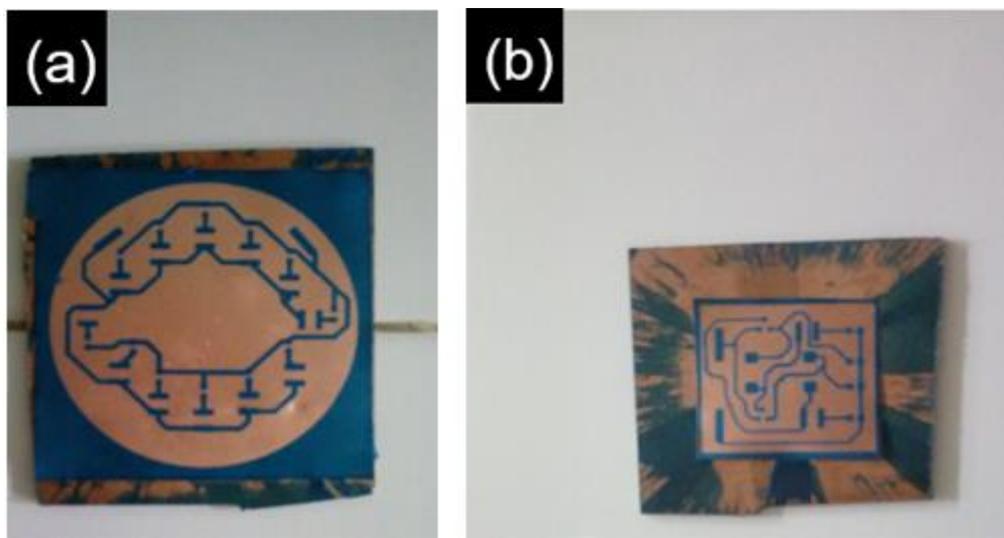


Fonte: As autoras (2018)

#### 4.2.2 Transferência dos Layouts

A utilização de fotolitos com boa resolução viabiliza a execução da etapa de transferência do layout para os substratos. Nos resultados demonstrados na Figura 20, é perceptível que o processo de fotolitografia ocorreu conforme esperado, possibilitando a transferência dos layouts dos circuitos com nitidez e sem falhas, viabilizando consequentemente a correta corrosão do filme de cobre que deve ocorrer na etapa seguinte.

Figura 20 - *Layout* do circuito transferido para poliamida. (a) *Layout* arranjo de LEDs (luminária). (b) *Layout* do multivibrador astável.

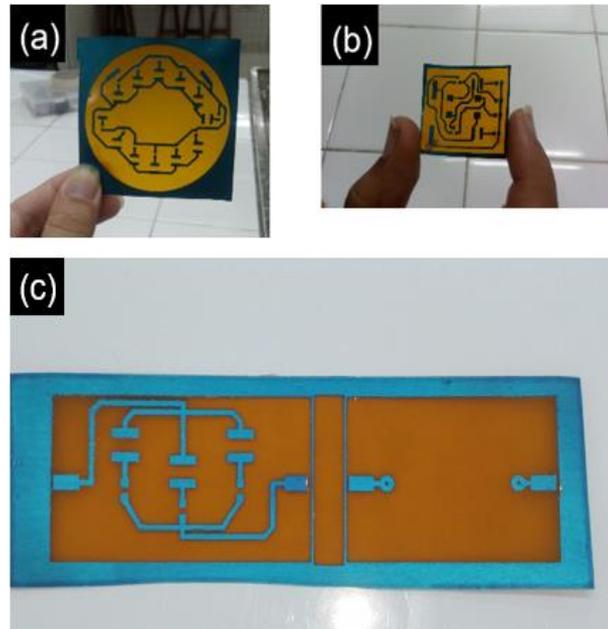


Fonte: As autoras (2018).

#### 4.3 CORROSÃO DO FILME DE COBRE DA POLIAMIDA

Esta etapa do processo de fabricação foi realizada como descrito no item Metodologia, tendo apresentado excelentes resultados e alta repetibilidade. Os resultados obtidos para os circuitos fabricados podem ser vistos na Figura 21.

Figura 21 - Substrato (poliamida) dos projetados após processo de corrosão. (a) Arranjo de LEDs. (b) Circuito multivibrador astável. (c) Circuito da pulseira de LEDs.



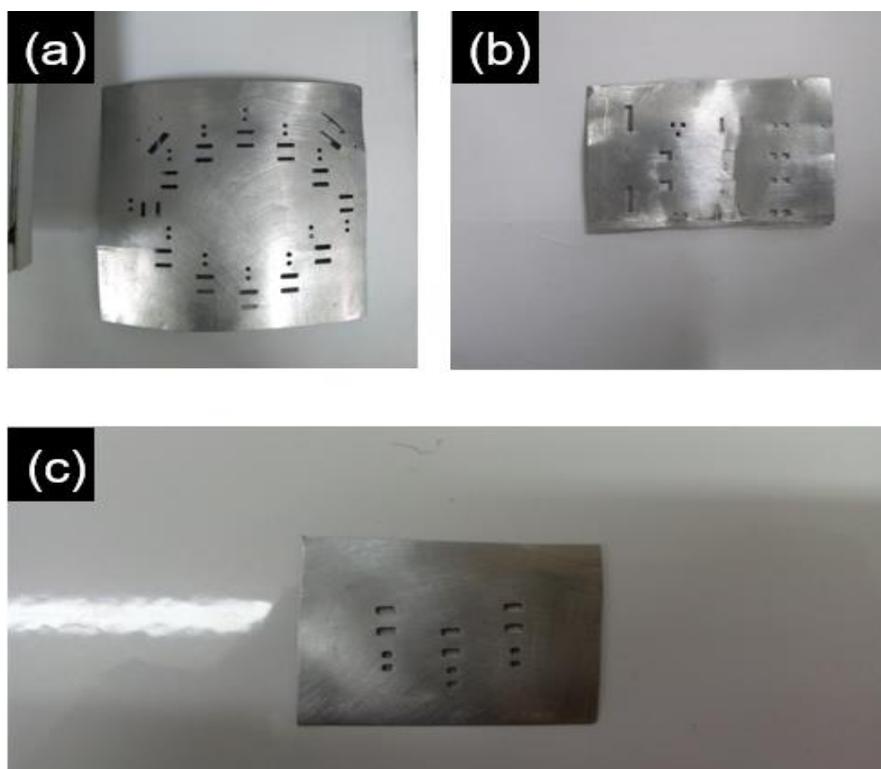
Fonte: As autoras (2018).

#### 4.4 PRODUÇÃO DO ESTÊNCIL

Na etapa de produção do estêncil de ambos os circuitos, concluiu-se que a fase de limpeza da lâmina de alumínio é necessária para se obter resultados satisfatórios. Foi possível identificar que a corrosão ocorre de modo mais preciso e rápido quando a lâmina de alumínio permanece por maior tempo submetida ao processo de limpeza química, ou seja, quando as finas camadas de óxidos existentes na superfície da lâmina de alumínio são completamente removidas.

Constatou-se também que o tempo de exposição da chapa de alumínio a solução corrosiva deve ser controlado, tempos excessivos podem ocasionar falhas no processo de corrosão em decorrência da remoção do polímero de proteção e ou pela ocorrência de corrosão lateral das regiões protegidas da lâmina de alumínio. Após o aperfeiçoamento da técnica foram obtidos os resultados mostrados na Figura 22.

Figura 22 - Estênceis produzidos. (a) Estêncil do arranjo de LEDs (luminária). (b) Estêncil do multivibrador astável. (c) Estêncil da pulseira de LEDs.



Fonte: As autoras (2018).

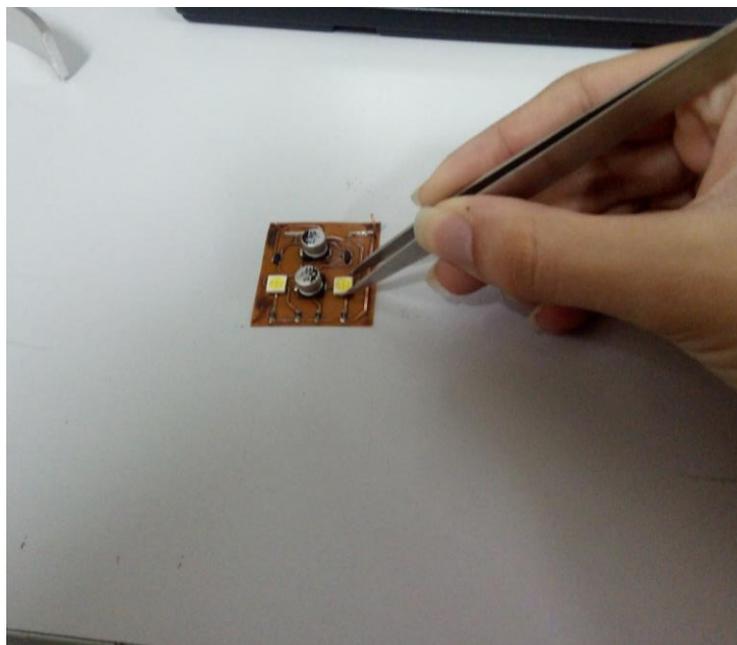
#### 4.5 APLICAÇÃO DA PASTA DE SOLDA E POSICIONAMENTO DOS COMPONENTES

A aplicação da pasta de solda com a utilização do estêncil de uma lâmina de metal nos possibilitou um bom resultado desejado no posicionamento dos componentes. Isso deu-se em razão desse processo de aplicação utilizar apenas a quantidade necessária da pasta de solda, assim evitando consequências de excessos e faltas, respectivamente, como o efeito *tombstone*<sup>10</sup> uma fraca fixação dos componentes. Esses resultados só foram possíveis em primeira instância devido ao conhecimento de um dos métodos mais eficientes de se utilizar em virtude de pesquisas. Havendo, dessa forma, uma mínima necessidade de um *rework*<sup>11</sup> apenas em função de algum componente colocado numa posição por engano de primeira. O resultado está ilustrado na Figura 23 abaixo.

<sup>10</sup> **Tombstone:** Efeito de uma má refusão com falhas que consiste em ilhas dos terminais de um componente desnivelados acarretando numa abertura do circuito.

<sup>11</sup> **Rework:** Processo de reparo de algum defeito da soldagem de componente ou para substituição por outro, sem ser necessária refusão novamente.

Figura 23 - Circuito após o posicionamento dos componentes sobre a pasta de solda fresca.

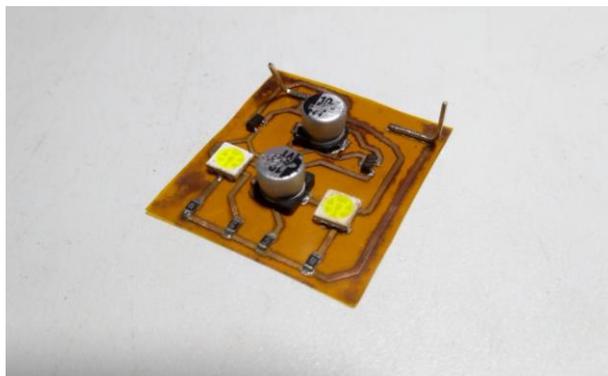


Fonte: As autoras (2018).

#### 4.6 PROCESSO DE SOLDAGEM POR REFUSÃO

Devido a flexibilidade e ao baixo peso da poliamida, a fixação da mesma em um substrato rígido e mais pesado foi muito importante para a realização do processo de soldagem por refusão. O processo de fixação além de impedir o encurvamento da poliamida e o consequente deslocamento dos componentes quando do aquecimento, também evitou o deslocamento do conjunto substrato/componentes pela ação do fluxo de ar decorrente da exaustão do forno. Para esse procedimento, foi constatado que a fixação é melhor executada utilizando-se pregadores de metálicos, a colagem da poliamida no fenolite com fitas adesivas levou a carbonização das fitas, acarretando problemas ao processo de soldagem e um aspecto indesejado das PCIs. Os resultados do processo de soldagem por foram satisfatórios e podem ser observados na Figura 24.

Figura 24 - Circuito multivibrador com componentes soldados por refusão.



Fonte: As autoras (2018).

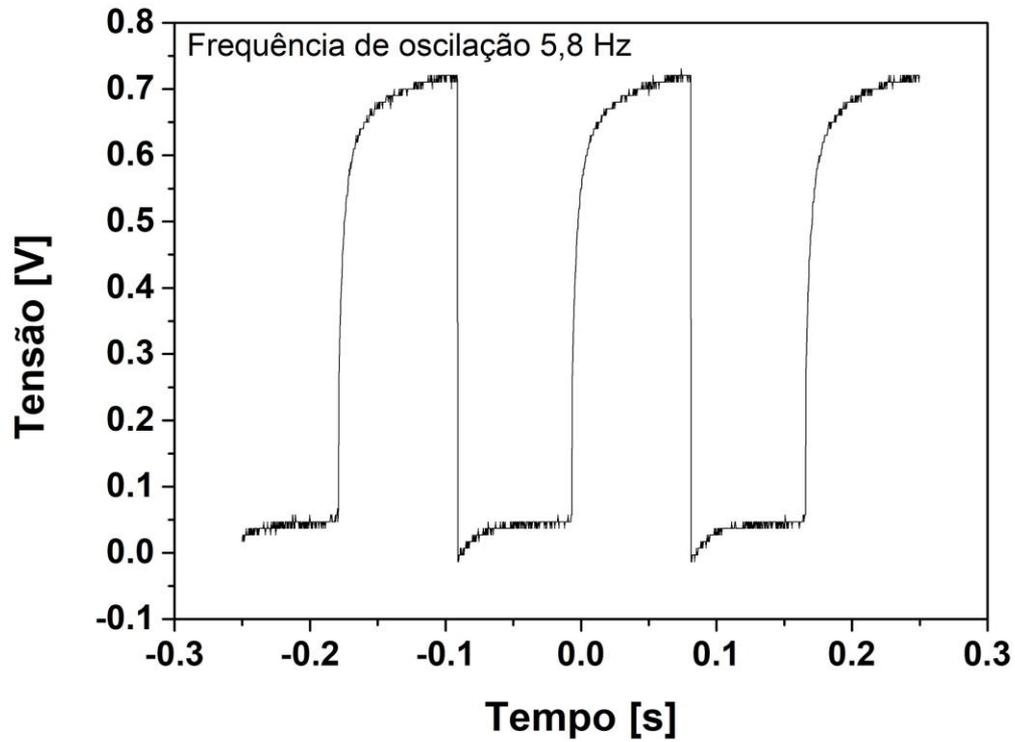
#### 4.7 TESTE DOS PROTÓTIPOS DESENVOLVIDOS

Após o processo de soldagem, as PCIs desenvolvidas foram submetidas a testes de funcionamento. O objetivo dos ensaios foi verificar o comportamento dos circuitos e comparar com as especificações consideradas na etapa de projeto. Conforme observa-se na Figura 25, os testes demonstraram o bom funcionamento dos circuitos fabricados.

Uma bateria de 3 V foi utilizada para alimentar o circuito flexível inicial que consiste de três LEDs conectados em paralelo (pulseira LED). Conforme observa-se na Figura 25 (c) o circuito funcionou conforme o projeto desenvolvido.

O circuito oscilador - multivibrador astável - mostrou funcionamento análogo ao observado na etapa de projeto quando da utilização da ferramenta de simulação *Proteus 8.0*, Figura 25 (b). Utilizando uma tensão de alimentação de 6V, o circuito funcionou como desejado. Conforme mostrado na Figura 25, o sinal entregue aos LEDs (carga) tem frequência de oscilação de 5,8 Hz, cujo valor é determinado pelos ciclos de carga e descarga dos capacitores de 10 nF que compõem o circuito.

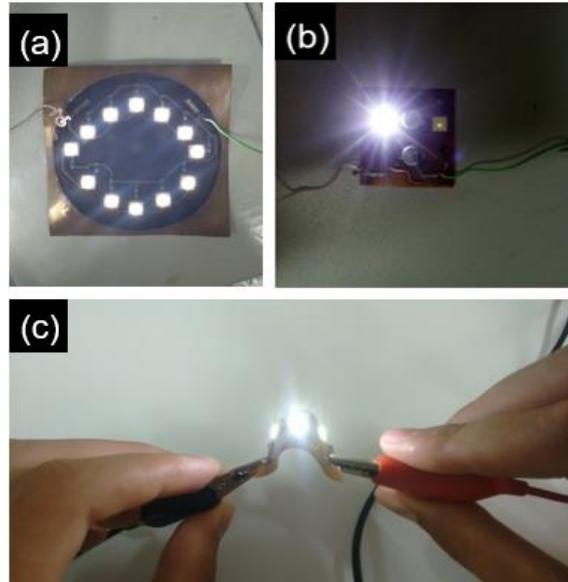
Figura 25 - Curva de frequência do oscilador.



Fonte: As autoras (2018).

Na Figura 26 (a) observa-se que o arranjo de LEDs (luminária) utilizando-se uma tensão de alimentação de 4 V, também apresentou o desempenho estabelecido na etapa de projeto.

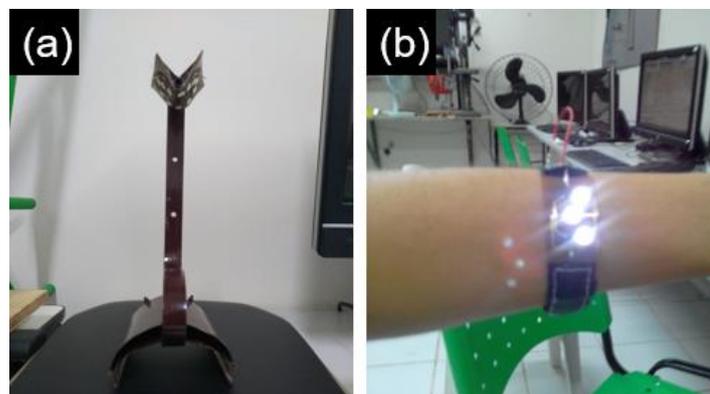
Figura 26 - Demonstração do funcionamento final dos circuitos. (a) Funcionamento do arranjo de LEDs (luminária). (b) Funcionamento do circuito multivibrador astável. (c) Funcionamento do circuito flexível concebido inicialmente para o desenvolvimento do processo.



Fonte: As autoras (2018).

Após os testes dos circuitos, com o intuito de sugerir uma aplicação final, foram construídas estruturas de suporte para os arranjos de LEDs, dando aos mesmos, respectivamente, a forma de uma pulseira e de uma luminária. Conforme observa-se na Figura 27 (b), para a construção da pulseira, os circuitos foram revestidos com tecido utilizando-se um velcro para garantir a fixação ao pulso do usuário. Na Figura 27 (a), é possível observar a estrutura da luminária que foi construída utilizando-se um suporte de aço e uma dobradiça metálica na qual o circuito foi colado e testado, evidenciando assim a característica flexível do mesmo pela possibilidade de utilização com diferentes ângulos de abertura da dobradiça.

Figura 27 - Arranjos de LEDs. (a) Luminária LED flexível. (b) Pulseira LED.



Fonte: As autoras (2018).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A meta principal desta monografia foi realizar um estudo para o desenvolvimento de um método manual para fabricação de placas de circuito impresso flexíveis. Tendo em vista que estes estão sendo inseridos amplamente no mercado eletrônico, em virtude do desenvolvimento de dispositivos mais modernos que dispõem de menores dimensões e maior flexibilidade. Contudo, os procedimentos de fabricação utilizados são especificamente industriais e de alto custo, o que inibe a produção de circuitos com essas características por desenvolvedores independentes e pesquisadores da área.

Após a produção dos circuitos flexíveis e a análise dos resultados encontrados, foi possível constatar que as técnicas desenvolvidas e empregadas neste projeto, de fato, se demonstraram funcionais, não sendo as limitações pela execução de uma técnica manual para a fabricação de circuitos flexíveis um impedimento para obtenção de um bom resultado, com as etapas sendo devida e cuidadosamente realizadas, cumpriram-se os requisitos essenciais que foram buscados na iniciação deste trabalho.

Os objetivos iniciais traçados foram alcançados, mas melhorias complementares no projeto sem dúvidas são possíveis, portanto deseja-se, que futuramente, esse seja continuado de modo que venham a ser incrementadas novas técnicas para a fabricação das PCIs flexíveis, como a exemplo técnicas para fabricação manual de circuitos flexíveis de dupla face ou multicamadas, como também o desenvolvimento de técnicas que explorem outros substratos flexíveis e utilização de componentes PTH em estrutura flexível.

Além das possibilidades de exploração futura do trabalho, sugere-se uma maior disseminação do método de fabricação desenvolvido, permitindo desta forma que futuros desenvolvedores de projetos, assim como grupos de pesquisa do IFRN, possam aplicá-los em posteriores trabalhos mais complexos.

## 6. REFERÊNCIAS

CAMILO, E.. **Propostas de design de layout da PCI para redução de curto circuito de solda a onda, para processo de montagem de placa eletrônica.** 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015. Disponível em:

<[http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/260044/1/Camilo\\_Edson\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/260044/1/Camilo_Edson_M.pdf)>.

Acesso em: 12 dez. 2017.

CARDOSO, I. A. P.; SOUZA, G. F. M. de; TOMYAMA, D. M.. **Elaboração de estratégias de manutenção para linha de produção operando novos conceitos em smd.** Cibim8: Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, p.1-13, 25 out. 2007. Disponível em: <<http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/12/12-09.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

CAVALCANTE, Gustavo Araújo. **Desenvolvimento de Circuitos Planares sobre Substratos Têxteis...** 2014. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte., Natal, 2014. Disponível em:

<[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15245/1/GustavoAC\\_TESE.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15245/1/GustavoAC_TESE.pdf)>.

Acesso em: 08 nov. 2017.

COELHO, C. **Estágio curricular II.** Florianópolis: 2011. 36 p. Disponível em:

<[www.emc.ufsc.br/control/arquivos/estagio/relatorio/relatorio\\_2395\\_1161\\_1.pdf](http://www.emc.ufsc.br/control/arquivos/estagio/relatorio/relatorio_2395_1161_1.pdf)>. Acesso em: 12 dez. 2017.

CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA IV REGIÕES. 2013, São Paulo. **Polímeros termoplásticos, termofixos e elastômeros...** São Paulo: [s.n.], 2013. 158 p. Disponível em: <[http://www.crq4.org.br/sms/files/file/apostila\\_polimeros\\_0910082013\\_site.pdf](http://www.crq4.org.br/sms/files/file/apostila_polimeros_0910082013_site.pdf)>. Acesso em: 08 nov. 2017.

COSTA, Tiago de Azevedo. **Desenvolvimento e Caracterização de Díodos Orgânicos Emissores de Luz.** 2013. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores, Universidade do Minho Escola de Engenharia, Braga (Portugal), 2013. Disponível em:

<[https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/39561/1/Tese\\_Tiago de Azevedo Costa\\_2013.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/39561/1/Tese_Tiago%20de%20Azevedo%20Costa_2013.pdf)>. Acesso em: 25 dez. 2017.

DANTAS, A. J. de M.; SILVA, D. L. da. **SCHD – Spin Coater Hard Disk.** 2017. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Eletrônica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

DEL CLARO, Fernanda. O avanço tecnológico no mundo econômico. **Revista FAE, Vitrine da Conjuntura**, v. 2, n. 8, 2009.

DS TOOLS (São Paulo). **Tecnologia da Pasta de Solda**. 2011. Disponível em: <<http://www.dstools.com.br/tecnologia-da-pasta-de-solda>>. Acesso em: 19 Fev. 2018

FILHO, Mário Vaz da silva. **Projeto de circuitos eletrônicos com estatística**. 1998. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas- Unicamp, Campinas- Sp, 1998. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260609/1/SilvaFilho\\_MarioVaz\\_D.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260609/1/SilvaFilho_MarioVaz_D.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2017.

GOUVEA, Marcelo. **Circuitos impressos flexíveis: conceito e características**. 2015. Disponível em: <<http://produza.ind.br/tecnologia/circuitos-impressos-flexiveis/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

GRIGOLETTO, Eliane M.; FERREIRA, Itamar. SMT: materiais, processos de fabricação e resistência à fadiga de soldas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA., 15., 1999, Campinas - Sp. **Anais..** Águas de Lindóia - Sp: [s.n.], 2007. p. 1 - 6. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/cobem/1999/pdf/AAAJJE.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

IGLESIAS, Felipe. **Circuitos flexíveis e Rígidos Flexíveis**. 2016. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/circuitos-flexiveis-e-rigido-flexiveis/>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

JAEGER, R. C.. **Introduction to Microelectronic Fabrication**. 2. ed. Nova Jersey: Prentice Hall, 1988. 328 p. (Modular Series on Solid State Devices). Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/168374759/Introduction-to-Microelectronic-fabrication-RC-jaeger>>. Acesso em: 10 abr. 2018

KHANDPUR, R. S.. **Printed Circuit Boards: Design, Fabrication, Assembly and Testing**. Nova Deli: Tata Mcgraw-hill Education, 2005. 691 p. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=VY8iBAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

KUGLER, Mauricio. **Projeto de Placas de Circuito Impresso**. Curitiba. 2004. Disponível em: <[http://www.mauriciokugler.com/publications/pcb\\_mauricio\\_kugler.pdf](http://www.mauriciokugler.com/publications/pcb_mauricio_kugler.pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2017.

MACK, C.. **Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication**. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2007. 534 p. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr;=&id=nHm4e7rFNfgC&oi=fnd&pg=PR7&d>>

q=Fundamental+Principles+of+Optic  
al+Lithography&ots=AU\_guFcFbS&sig=Kh4VVC7tpLsJ130OQ7Q4j5tfzc#v=onepage&q&f;=  
false>. Acesso em: 11 ab. 2018.

MEHL, E. L. de M.. **Conceitos Fundamentais Sobre Placas De Circuito Impresso**. 2011.

Disponível em:

<[http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI\\_Conceitos\\_fundamentais.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf)>. Acesso em:  
13 nov. 2017.

NOGUEIRA, Cláudia Lenir A.; QUEIROZ-NETO, José P.; MANZATO, Lizandro. O impacto do uso de solda lead free no processo de tecnologia de montagem em superfície (SMT). In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 2., 2007, João Pessoa - Pb. **Anais**. João Pessoa - Pb: [s.n.], 2007. p. 3 - 8. Disponível em: <<http://docshare04.docshare.tips/files/4909/49093910.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

RODRIGUES, Guilherme Valença da Silva. **Contribuição ao desenvolvimento de ligas para interconexão eletrônica utilizando moagem de alta energia**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/107461/319295.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

SAFAVI. **Flexible electronics**. 2012. Disponível em: <<http://www.etagco.com/en/everything-about-pcb/81-everything-about-pcb-flexible-electronics>>. Acesso em: 05 mai. 2017.

SHILOH, P. J.; MALBOEUF, J. **How to Profile a PCB: Especially with the new lead free solders, getting the correct temperature profile is more important than ever**. Hungtingdon Valley: Aps Novastar, 2009. 5 p. Disponível em: <<http://www.smtnet.com/library/files/upload/how-to-profile-a-PCB.pdf>>.

SIEVERS, Carlos A.; SILVA, Israel L. **Integração do processo de refusão de solda com o processo de inspeção óptica automática**. Trabalho de Conclusão de Curso – UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial, Curitiba, 2015. 96p. Disponível em:

<[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4002/1/CT\\_COALT\\_2015\\_1\\_04.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4002/1/CT_COALT_2015_1_04.pdf)>. Acesso em: 19 nov. 2017.

SOUZA, Beijamim Rodrigues de. **Etapas dos Processo Fotolitográfico**. 2008. 103 f. Monografia (Especialização) - Curso de Microeletrônica Com ênfase em Microfabricação de

Circuitos Integrados, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://lilith.fisica.ufmg.br/posgrad/Monografias/dec2000/beijamim-souza/mono-BejaminSouza.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2017

SOUZA, Jair Fernandes de. **Técnicas de Fabricação de Placas de Circuito Impresso**. 2016. Disponível em: <[https://suap.ifrn.edu.br/media/edu/material\\_aula/Fabricação\\_de\\_PCIs.pdf](https://suap.ifrn.edu.br/media/edu/material_aula/Fabricação_de_PCIs.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2017.

VERASTEGUI, Thomaz Milton Navarro. **PROPAGAÇÃO DE MODOS ENTRE PLANOS DE REFERÊNCIA EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE MÚLTIPLAS CAMADAS**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná., Curitiba, 2007. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/artuzi/pesquisa/projeto/thom.az.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2017.