

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
***CAMPUS* PATOS DE MINAS**

GUILHERME JOAQUIM BRITO DOS SANTOS

**NOVA PROPOSTA DE TINTA CONDUTIVA DE BAIXO CUSTO, PARA
APLICAÇÃO EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

Patos de Minas

2018

GUILHERME JOAQUIM BRITO DOS SANTOS

**NOVA PROPOSTA DE TINTA CONDUTIVA DE BAIXO CUSTO, PARA
APLICAÇÃO EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade De Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia - *Campus* Patos de Minas como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Prof (a) Orientador (a): Dr^a Elise Saraiva.

Patos de Minas

2018

GUILHERME JOAQUIM BRITO DOS SANTOS

**NOVA PROPOSTA DE TINTA CONDUTIVA DE BAIXO CUSTO, PARA
APLICAÇÃO EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade De Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – *Campus* Patos de Minas como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Patos de Minas, 04 de julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Elise Saraiva (Orientadora) - FEELT

Prof. Dr. Daniel Costa Ramos (Membro 1) - FEELT

Prof. Ms. Júlio Cezar Coelho (Membro 2) - FEELT

Patos de Minas

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado força e discernimento, para poder desenvolver este projeto.

Agradeço aos meus pais e minha família, por me apoiarem, e me incentivar a sempre me dedicar aos estudos.

Agradeço a técnica do laboratório de físico-química da UFU-Campus Patos de Minas Laís, por me disponibilizar o espaço, e também me ajudar nos procedimentos experimentais.

Agradeço a Prof.^a Dr.^a Elise Saraiva, por me orientar e auxiliar neste trabalho.

Agradeço aos meus colegas, por me ajudarem a solucionar vários problemas vividos na vida acadêmica, e a comemorar várias conquistas alcançadas.

RESUMO

Este trabalho tem a finalidade de pesquisar tintas condutivas, que utilizam materiais metálicos de boa condutividade em sua composição. Foram analisados métodos de produção de tintas condutivas, observando a estrutura e comportamento das ligas metálicas, para a construção de placas de circuito impresso. Foram analisados os métodos de serigrafia, fotolitografia e impressão por deposição de tinta condutiva.

Desta forma, estas pesquisas foram agregadas na produção experimental de uma amostra de tinta condutiva metálica, de baixo custo e alta condutividade. Além disso, foi feita uma comparação da aplicabilidade e perda de potencial elétrico da tinta produzida e outras duas tintas condutivas, que estão disponíveis comercialmente.

Para o processo de comparação, foram elaborados e construídos três circuitos idênticos, utilizando cada tinta separadamente para cada circuito. Além disso, foi medida a resistência das trilhas e a diferença de potencial elétrico para cada ponto demarcado no circuito projetado.

Por meio dos materiais e metodologias utilizados na produção da tinta condutiva proposta neste trabalho, pode-se concluir que a tinta produzida neste trabalho possui melhor custo/benefício, menor índice de resistência elétrica em relação às tintas comerciais utilizada para comparação, comprovados via testes laboratoriais realizados.

Além disso, ao final deste trabalho, propõem-se trabalhos futuros, como por exemplo, testes de capacidade de condução de corrente, indutância e capacitância parasita, *crossstalk*, oxidação em relação ao tempo, entre outros métodos.

Palavras-chaves: Placas de Circuito Impresso, Resistividade, Condutividade, Substrato, Potencial Elétrico, Tinta Condutiva.

ABSTRACT

This work aims to research conductive inks, which use metallic materials of good conductivity in its composition. Methods of production of conductive inks were analyzed, observing the structure and behaviour of the metallic alloys. For the construction of printed circuit boards, the methods of screen printing, photolithography and printing by deposition of conductive ink were analyzed.

In this way, these surveys were aggregated in the experimental production of a sample of metallic conductive ink, low-cost and high conductivity. In addition, a comparison of the applicability and loss of electrical potential of the ink produced and other two conductive inks, which are commercially available, was made.

For the comparison process, three identical circuits were developed and built, using each ink separately for each circuit. In addition, the resistance of the tracks was measured and the difference of electric potential for each point demarcated in the projected circuit.

Through the materials and methodologies used in the production of the conductive ink proposed in this work, it can be concluded that the ink produced in this work has better cost benefit, lower index of electrical resistance in relation to the commercial inks that were analyzed in this work, according to the tests carried out.

Furthermore, at the end of this work, future work is proposed, such as tests of current driving capacity, inductance and parasitic capacitance, crosstalk, oxidation in relation to time, among other methods.

Keywords: Printed Circuit Boards, Resistivity, Conductivity, Substrate, Electrical Potential, Conductive Ink.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tinta condutiva B.....	1
Figura 2 - PCI sobre substrato plástico.....	2
Figura 3 - Trilhas condutivas de prata.....	5
Figura 4 - Estrutura granular tinta de prata.....	6
Figura 5 - Linha condutiva de cobre.....	6
Figura 6 - Estrutura granular tinta de cobre.....	7
Figura 7 - Filtro passa baixa impresso por tinta de grafeno.....	8
Figura 8 - Ilustração esquemática da ligação metálica.....	9
Figura 9 - Bandas de energia para condutores, semicondutores e isolantes.....	10
Figura 10 - Placa de corroida pelo método de serigrafia.....	12
Figura 11 - Máquina fresadora industrial.....	13
Figura 12 - Placa eletrônica com terminais oxidados.....	14
Figura 13 - Substrato de fibra de vidro.....	16
Figura 14 - Procedimentos experimentais em laboratório.....	18
Figura 15 - Tinta condutiva impressa sobre base de substrato fibra de vidro.....	19
Figura 16 - Substrato base.....	19
Figura 17 - tinta condutiva proposta impressa.....	20
Figura 18 - Tinta condutiva C.....	22
Figura 19 - Tinta condutiva B.....	22
Figura 20 - Diagrama eletrônico do circuito a ser implementado.....	25
Figura 21 - Diagrama eletrônico de orientação de impressão da tinta condutiva.....	26
Figura 22 - Ilhoses metálicos.....	26
Figura 23 - Representação das dimensões do substrato a ser utilizado na confecção das PCI.....	27
Figura 24 - Placa após ser perfurada para a afixação dos ilhós.....	28
Figura 25 - Ilhoses afixados e prensados na placa.....	29
Figura 26 - Lado oposta da placa após fixação de ilhoses.....	30
Figura 27 - Componentes soldados sobre a placa por meio dos ilhoses.....	30
Figura 28 - Vista superficial dos componentes soldados na placa ou substrato.....	31
Figura 29 - Tinta própria impressa sobre substrato.....	31
Figura 30 - Tinta B impressa sobre o substrato.....	32
Figura 31 - Tinta C impressa sobre o substrato.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividades Elétricas à Temperatura Ambiente para Nove Metais e Ligas Comuns.....	9
Tabela 2 – Concentrações de materiais, para cada amostra produzida.....	16
Tabela 3 – Concentrações de materiais para cada amostra produzida.....	17
Tabela 4 – Concentrações de materiais para cada amostra produzida.....	17
Tabela 5 – Valores de resistência para cada amostra.....	20
Tabela 6 - Valores das dimensões e resistência das trilhas condutivas.....	23
Tabela 7 - Valores calculados de condutividade e resistividade para as três tintas condutivas.....	23
Tabela 8 - Medições de resistência ponto a ponto das trilhas impressas.....	33
Tabela 9 - Medições de tensão dos pontos das placas em relação ao terra.....	34

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

PCI – Placa de circuito impresso.

ECG – Eletrocardiograma.

CMC – Carboximetilcelulose.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. TEMA DO TRABALHO.....	3
1.2. PROBLEMATIZAÇÃO.....	3
1.3. OBJETIVOS DE PESQUISA.....	3
1.4. JUSTIFICATIVA.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. TINTAS CONDUTIVAS.....	5
2.2. PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS.....	8
2.3. LIGAÇÃO METÁLICA.....	8
2.4. CONDUÇÃO ELÉTRICA.....	10
2.5. MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO DE CIRCUITOS IMPRESSOS.....	11
2.5.1. SERIGRAFIA.....	11
2.5.2. FOTOLITOGRAFIA.....	12
2.5.3. FRESAGEM.....	12
2.5.4. DEPOSIÇÃO OU IMPRESSÃO POR TINTA CONDUTIVA.....	13
2.6. OXIDAÇÃO.....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1. PRODUÇÃO DA TINTA PROPOSTA.....	15
3.1.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	15
3.1.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	17
3.2. ANÁLISE DE ADERÊNCIA.....	24
3.3. PRODUÇÃO DOS CIRCUITOS.....	24
3.3.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	26
3.3.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	28
3.4. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL.....	32
4. RESULTADOS.....	33
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	35
REFERÊNCIAS.....	38

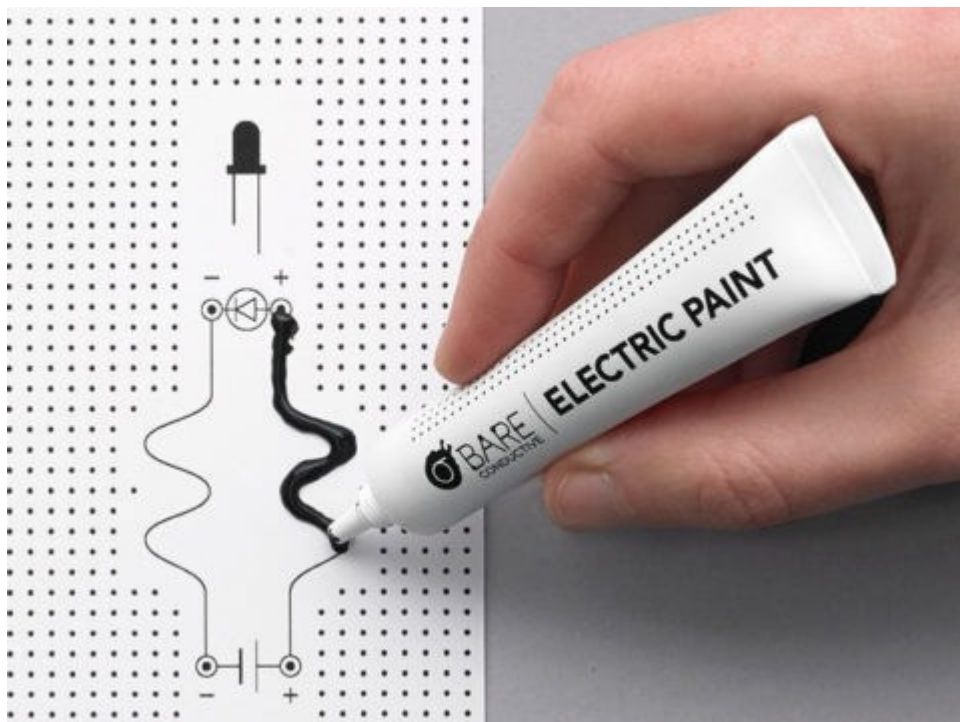
1. INTRODUÇÃO

As tintas condutivas estão crescendo rapidamente em popularidade, devido as suas múltiplas aplicações, e na sua versatilidade na produção de circuitos eletrônicos [19] [20].

Estas tintas trazem a possibilidade de desenhar ou imprimir circuitos eletrônicos sobre diversas superfícies, como papel, madeira, fibras sintéticas, plásticos, paredes, ou qualquer outra superfície que possua boa aderência à tinta utilizada [21] [23].

A figura 1 representa a tinta condutiva B, a qual está sendo utilizada para imprimir um circuito eletrônico.

Figura 1: Tinta condutiva B.



Fonte: Adaptado de [24].

Estes circuitos podem ser impressos manualmente, ou utilizando impressoras com cartuchos adequados para as referidas tintas. De acordo com a funcionalidade do circuito, este pode ser impresso por uma, ou várias camadas de tinta, dependendo da resistência desejada de sua trilha [22] [23].

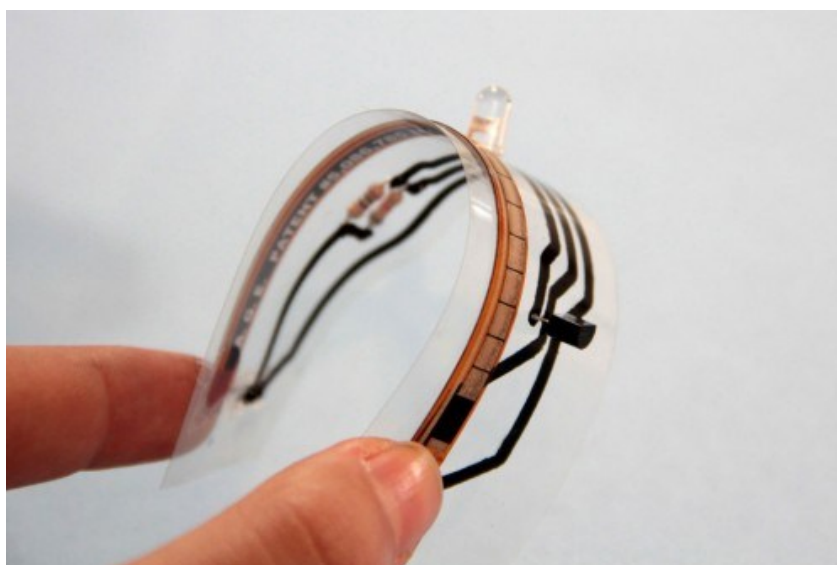
As placas de circuito impresso, também conhecidas como PCIs, geralmente não estão à vista, mas elas fazem parte de tudo o que envolve tecnologia.

Computadores, sistemas de segurança, *smartphones*, brinquedos e carros são apenas alguns exemplos de dispositivos que usufruem dessas placas repletas de componentes eletrônicos para desempenhar suas respectivas funcionalidades [19] [23].

Estes circuitos eletrônicos impressos, consistem em um substrato formado por camadas de materiais plásticos ou fibrosos (como o fenolite, fibra de vidro, papel, alumina, poliamida entre outros polímeros) como base de impressão do circuito. Sobre esta base, é impressa ou depositada uma fina camada de metal ou tinta condutiva, de acordo como o esquema elétrico projetado. Após sua impressão, é obtida uma “trilha” condutiva, que terá a função de conduzir a corrente elétrica entre os componentes do circuito [19] [23].

Uma placa de circuito impresso é representada pela figura 2.

Figura 2: PCI sobre substrato plástico.



Fonte: Adaptado de [22].

De acordo com o que foi dito, a tinta que foi elaborada neste trabalho, tem grande importância no desenvolvimento de novas misturas e novas metodologias para a produção de circuitos eletrônicos impressos. Portanto, este trabalho visa utilizar materiais de boa condutividade, métodos de impressão com baixa toxicidade e que estas soluções não causem efeitos danosos ao substrato e componentes do circuito, de acordo com o tema proposto.

1.1. TEMA DO TRABALHO

O tema deste trabalho é a produção e análise de tinta condutiva metálica, para impressão de circuitos eletrônicos.

1.2. PROBLEMATIZAÇÃO

Por meio de pesquisas de novos materiais e misturas, as tintas condutivas vêm ganhando espaço dentre os métodos já existentes para a confecção de circuitos eletrônicos [1].

Com o desenvolvimento destas tintas condutivas é possível criar circuitos ou dispositivos eletrônicos, sobre substratos plásticos curvos ou flexíveis. Para isso, é preciso criar métodos mais práticos e versáteis na aplicação destas tintas em circuitos eletrônicos, juntamente com a utilização de materiais de baixo custo e baixa toxicidade [1] [2] [18].

Além disso, é necessário utilizar materiais com baixa temperatura de fusão ou reação, e substratos que resistam a pequenas torções mecânicas [3].

1.3. OBJETIVOS DE PESQUISA

O objetivo deste trabalho é produzir uma tinta condutiva metálica, onde seus ingredientes e métodos de produção sejam de baixo custo e de baixa toxicidade. Além disso, foram adotados métodos que possam ser padronizados e eficientes, para a impressão de circuitos eletrônicos.

Este trabalho, também tem a finalidade de produzir amostras de tinta condutiva com baixa resistividade, boa viscosidade e aderência sobre substratos padrões.

Objetiva-se também, na comparação da amostra produzida, que obtenha menor valor de resistência, com tintas disponíveis comercialmente.

Desta forma, será possível analisar a aplicabilidade e viabilidade da tinta produzida, na impressão de circuitos eletrônicos, de acordo com valores medidos de resistência e queda de potencial elétrico.

1.4. JUSTIFICATIVA

Há muitos relatos sobre o uso de diferentes materiais como tintas condutoras: metal fundido, polímeros condutores, compostos organometálicos, precursores metálicos e suspensões de nanopartículas metálicas [1] [2] [3] [4] [5] [6] [18].

Em artigos recentes, tintas condutivas metálicas de prata, ouro, cobre e a base de carbono foram desenvolvidas e aplicadas à tecnologia de impressão, devido sua boa condutividade. Assim, a eletrônica impressa é uma das questões importantes sobre as tecnologias emergentes na área de embalagens eletrônicas e manufatura [2] [3] [4].

Estas tintas oferecem uma nova opção e possibilidade de construir componentes e estruturas funcionais, podendo ser amplamente investigadas e usadas na construção de *displays*, transistores, antenas e sensores [18], além de permitir que os engenheiros projetem e construam uma grande variedade de dispositivos eletrônicos mecanicamente flexíveis e elásticos [2].

As partículas de ouro e prata possuem ótima condutividade e são poucos passíveis de oxidação, porém são bastante caros, e a eletromigração da prata pode reduzir a confiabilidade do circuito. Vale ressaltar que, a eletromigração é a migração atômica causada pela ação de forças microscópicas em defeitos estruturais. Estas forças microscópicas surgem devido ao campo elétrico local e transporte de elétrons em um condutor [5].

A tinta de cobre e suas ligas podem ser uma boa solução para o preparo de uma tinta condutiva de baixo custo, com pequena eletromigração e de boa condutividade, porém sofre oxidação rapidamente. A tinta de carbono possui baixa condutividade, porém, possui ótimo fator antioxidante [1].

Quando utiliza-se metal fundido, a temperatura de operação é muito alta, podendo atingir temperaturas aproximadas de 1000 °C. Entretanto, os substratos base de impressão, não suportam esta gama de temperatura, sem ocorrer sua deteriorização [1].

Como por exemplo, pode-se citar a tinta que será o agente aglutinante e a base de fibra de vidro, onde estes materiais, não suportam temperaturas elevadas. Assim, é necessário pesquisar misturas de tintas metálicas que necessitam de baixa temperatura de cura, e na diminuição de resíduos orgânicos da tinta que afetam a condutividade da solução [1].

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. TINTAS CONDUTIVAS

Existem várias pesquisas recentes sobre tinta condutiva, sendo estas eficientes em termos de custo e de condutividade. Tais tintas utilizam procedimentos e materiais não tóxicos, além da redução da temperatura de cura ou sinterização da trilha impressa pela mesma [2].

Atualmente a prata é o material mais relatado para tinta condutiva, e o mais utilizado em aplicações industriais, devido a sua fácil síntese e estabilidade química sob condições ambientes. Desta forma, a tinta de prata permite obter padrões impressos com alta condutividade [2].

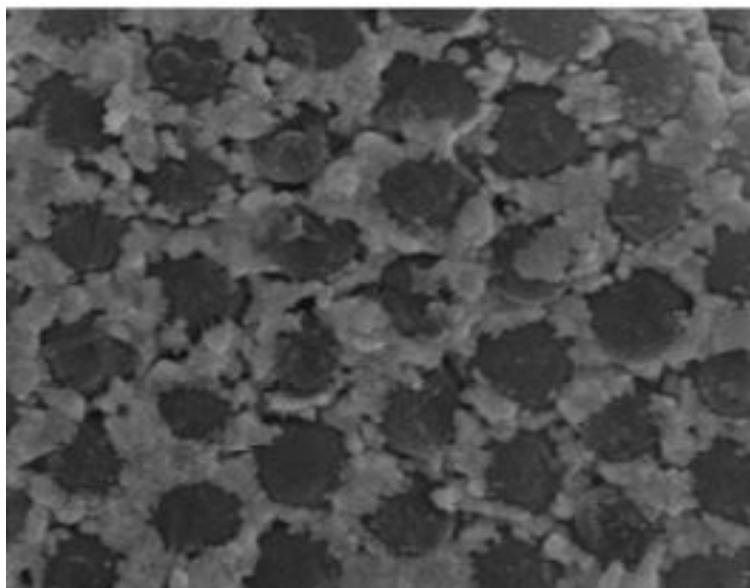
Devido ao alto custo da prata, um grande desafio é substituir a prata e outros metais nobres, por elementos mais baratos [3]. De acordo com pesquisas e experimentos, os autores do artigo [4] desenvolveram uma tinta condutiva de prata, onde foi possível imprimir trilhas condutivas em um substrato plástico flexível, representado pela figura 3. Sua estrutura granular é exposta pela figura 4.

Figura 3: Trilhas condutivas de prata.



Fonte: Adaptado de [4].

Figura 4: Estrutura granular tinta de prata.



Fonte: Adaptado de [3].

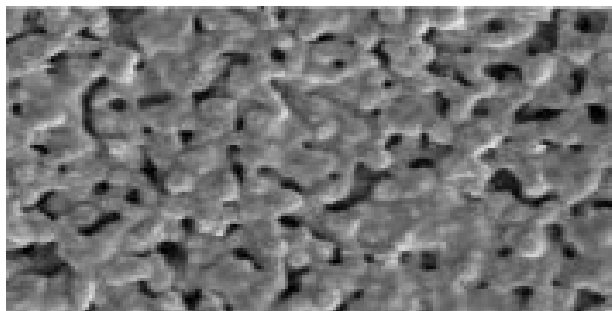
A tinta de nanopartículas de cobre ou suas ligas é uma boa solução para a produção de uma tinta condutiva, pois possui baixa temperatura de cura em relação ao material sólido, baixo custo e processo de eletromigração diminuída, em relação às tintas de cobre [1]. De acordo com pesquisas e experimentos, os autores do artigo [1] desenvolveram uma tinta condutiva de cobre, onde foi possível imprimir trilhas condutivas em um substrato plástico flexível, representado pela figura 5. Sua estrutura granular é apresentada pela figura 6.

Figura 5: Linha condutiva de cobre.



Fonte: Adaptado de [1].

Figura 6: Estrutura granular tinta de cobre.



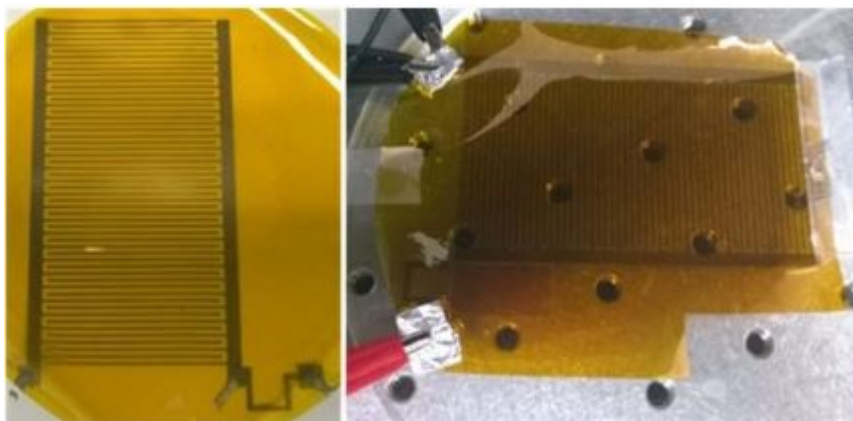
Fonte: Adaptado de [1].

Por outro lado, a natureza frágil dos filmes finos de metal tem sido uma grande preocupação. Uma das vantagens mais importantes para a impressão a jato de tinta é a sua capacidade de depositar filmes em substratos flexíveis que normalmente não podem ser usados em processos de serigrafia e fotolitografia convencionais. Como tal, os componentes impressos a jato de tinta seriam destinados a aplicações em que se espera que, os componentes suportem quantidades consideráveis de tensão mecânica e ângulos de flexão extremos. Campos de aplicação mais específicos, como sua aplicabilidade em têxteis inteligentes, para o monitoramento de biossinais, como eletrocardiogramas (ECG), exigem capacidade de resistir a esforços mecânicos repetitivos [2] [6].

A tinta a base de grafeno também pode ser utilizada na impressão de componentes elétricos passivos (condutores, resistores, capacitores, indutores), e circuitos sobre substratos de polímeros mecanicamente flexíveis. A tinta é sintetizada utilizando carboximetilcelulose (CMC). Uma vez depositado no substrato funcionalizado, a condutividade dos componentes elétricos impressos pode ser otimizada pela decomposição do estabilizador de celulose usando redução térmica [2].

Por meio da tinta de grafeno, é possível criar vários componentes eletrônicos passivos e circuitos integrados microeletrônicos (sensores capacitivos interdigitados, filtros passa-baixa), usando uma técnica de deposição camada por camada [2]. De acordo com pesquisas e experimentos, os autores do artigo [2] desenvolveram uma tinta condutiva a base de grafeno, onde foi possível imprimir um filtro passa baixa, e seu casamento de impedância em um substrato plástico flexível, representado pela figura 7.

Figura 7: Filtro passa baixa, impresso por tinta de grafeno.



Fonte: Adaptado de [2].

2.2. PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS

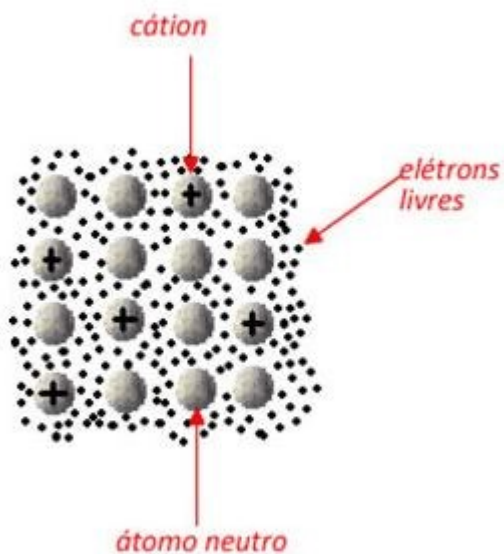
A composição de uma tinta condutiva necessita de um material base inerte de alta condutividade, como o cobre, ouro, prata, grafite de alta pureza, dentre outros metais. Também é necessário adicionar à mistura, um aglutinante para complementar a ligação coalescente entre os grãos do material condutor, como uma tinta ou solução polimérica, além de um solvente para definir a melhor opção de viscosidade e evaporação de resíduos da tinta condutiva, como o etanol [7].

Outras propriedades importantes são: a aderência da tinta ao substrato ou base, a flexibilidade ou a resistência mecânica da trilha em suportar torções de acordo com o substrato, além da sua baixa resistividade elétrica [7].

2.3. LIGAÇÃO METÁLICA

Ligas metálicas são metais que possuem até três elétrons de valência. Estes elétrons de valência não estão ligados ao átomo central, assim, são dispostos a movimentar-se livremente por todo o metal, podendo ser considerados como um “mar de elétrons” ou “nuvem de elétrons”. Os elétrons restantes, e os núcleos atômicos formam núcleos iônicos, os quais possuem uma carga positiva, sendo chamados de cátions. Os elétrons livres agem como uma cola, protegendo os núcleos iônicos das forças eletrostáticas de repulsão, ocorrendo uma forte atração entre as moléculas [8] [9]. A figura 8 representa a estrutura atômica de uma liga metálica.

Figura 8: Ilustração esquemática da ligação metálica.



Fonte: Adaptado de [9].

A tabela 1 representa os valores de condutividade de alguns metais e suas ligas.

Tabela 1 – Condutividades Elétricas à Temperatura Ambiente para Nove Metais e Ligas Comuns.

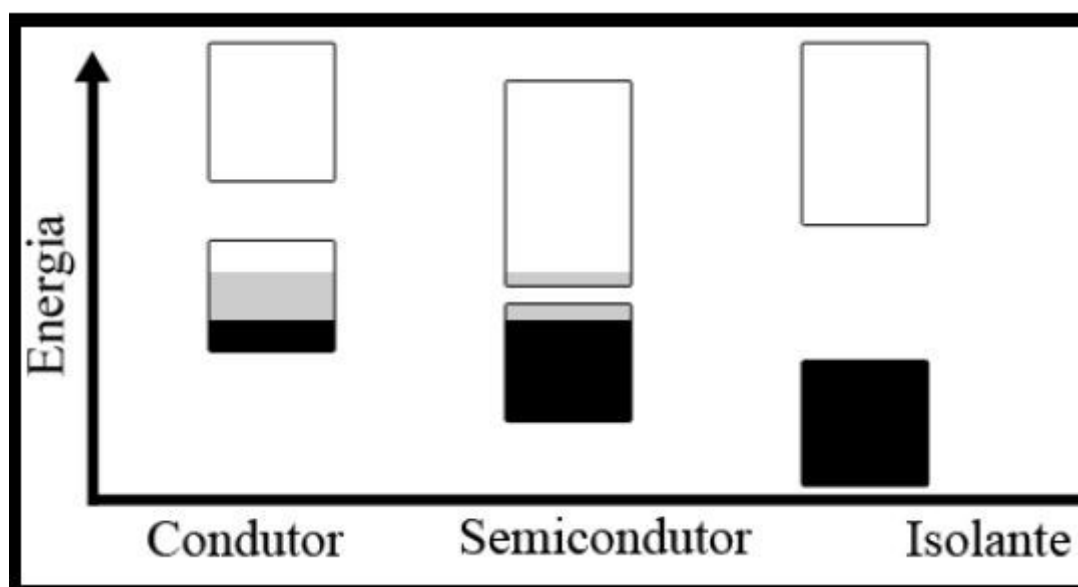
Metal	Condutividade Elétrica $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$
Prata	$6,8 \times 10^7$
Cobre	$6,0 \times 10^7$
Ouro	$4,3 \times 10^7$
Alumínio	$3,8 \times 10^7$
Latão (70Cu - 30Zn)	$1,6 \times 10^7$
Ferro	$1,0 \times 10^7$
Platina	$0,94 \times 10^7$
Aço-carbono	$0,6 \times 10^7$
Aço inoxidável	$0,2 \times 10^7$

Fonte: [8]

2.4. CONDUÇÃO ELÉTRICA

A figura 9 mostra as bandas de energia de condutores, semicondutores e isolantes. Para análise de um condutor, a banda em preto está completa de elétrons, já a cinza está parcialmente preenchida por elétrons. As brancas são bandas de energias de alta amplitude, que estão vazias. A facilidade dos elétrons em transpor a banda de menor energia para a energia mais elevada, ou seja, passar os elétrons da banda completamente preenchida para a parcialmente preenchida, é que possibilita o material ser um condutor. Sendo a banda parcialmente preenchida, como referência à banda de condução [10].

Figura 9: Bandas de energia para condutores, semicondutores e isolantes.



Fonte: Adaptado de [10].

Por meio da lei de Ohm é relacionado à corrente I (Coulomb/segundo), ou taxa de fluxo de cargas ao longo do tempo, quando é aplicado uma tensão ou diferencial de potencial elétrico V (Joules/Coulomb), tendo o material uma oposição ou resistência ao fluxo de corrente R (Volt/Ampère), conforme mostra a equação 1 [8].

$$V = I * R \quad (1)$$

O valor de R é dependente da geometria do material. A resistividade elétrica ρ ($\Omega.m$) é dependente da resistência R (Ω), à área da seção transversal A (metros), e a

distância l (metros) entre os pontos de medição da amostra do metal, dado pela equação 2 [8].

$$\rho = \frac{R * A}{l} \quad (2)$$

A condutividade elétrica σ ($(\Omega.m)^{-1}$) é dado pelo inverso da resistividade, que representa a facilidade de um material conduzir corrente elétrica, de acordo com a equação 3 [8].

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

2.5. MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO DE CIRCUITOS IMPRESSOS

Existem diversos métodos de impressão de PCI's, dentre eles, a serigrafia, fotolitografia e a impressão ou deposição de tinta condutiva.

2.5.1. SERIGRAFIA

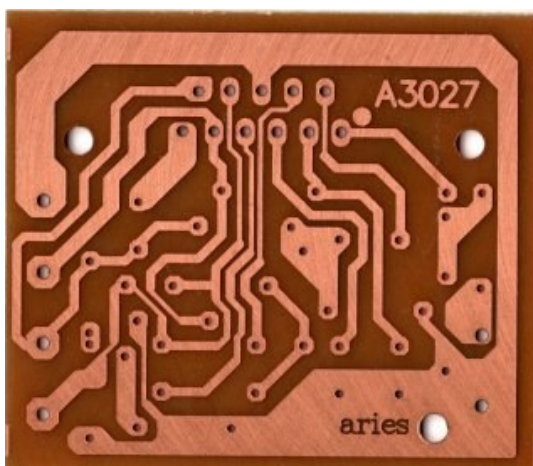
Na serigrafia é aplicada uma tinta resistente à corrosão, onde seu formato é relacionado com o diagrama do circuito a ser produzido. Este diagrama é colado por cima da placa de cobre, ou desenhado por meio de uma tinta anticorrosiva.

Depois que o diagrama é afixado na superfície de cobre, esta placa é levada para um banho de percloroeto de ferro ($FeCl_3$), sendo corroído o excesso de cobre, resultando apenas as trilhas condutoras do circuito, como mostra a figura 10.

Para a produção de uma PCI pelo método da serigrafia, será demonstrado de acordo com os seguintes passos:

- Impressão do diagrama do circuito, utilizando tinta resistente à corrosão;
- Limpeza e polimento da superfície de cobre da placa;
- Afixação e colagem do diagrama sobre placa de cobre;
- Corrosão da placa, pelo banho de percloroeto de ferro ($FeCl_3$);
- Polimento e Remoção de imperfeições;

Figura 10: Placa de corroída pelo método de serigrafia.



Fonte: Adaptado de [11].

2.5.2. FOTOLITOGRAFIA

A fotolitografia é uma técnica de impressão do *layout* do circuito sobre uma placa de cobre, através de uma máscara e tinta fotossensível a luz ultravioleta. Esta máscara plástica onde é desenhado o circuito é afixada juntamente com a tinta fotossensível sobre a superfície de cobre da placa.

Consecutivamente esta tinta será exposta a luz ultravioleta, onde, a tinta que não está sobre o desenho do circuito, será deteriorada.

Depois que a tinta que está fora do desenho do circuito, foi absorvida, sobrarão apenas a máscara do desenho do circuito sobre a placa de cobre.

Logo após este processo, a placa é levada para um banho de percloroeto de ferro (FeCl_3), onde o cobre que não está protegido pela máscara do desenho do circuito, será corroído, sobrando apenas as trilhas do circuito em cobre [12].

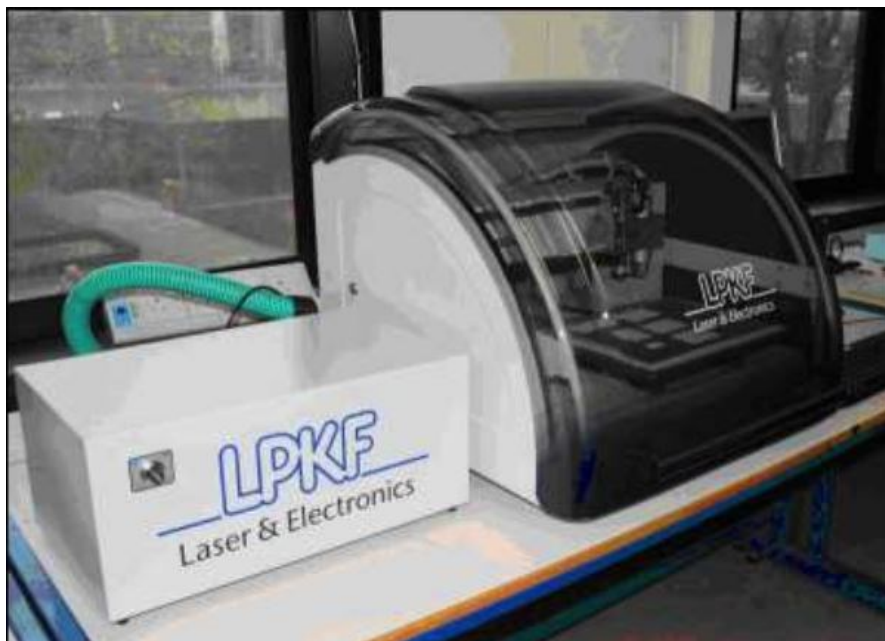
2.5.3. FRESAGEM

Já o método de fresagem na construção de uma PCI, é um processo onde o circuito é desenhado e produzido instantaneamente por meio de brocas de máquinas fresadoras, que retiram o excesso de cobre da placa.

A máquina fresadora tem como base para a produção da placa, o desenho do circuito projetado em uma versão digital de acordo com *softwares* específicos, onde este desenho será o molde, ou gabarito, para a máquina fresadora em relação às escalas reais do circuito.

Porém, a fresagem é um método arriscado, onde qualquer erro pode acarretar na perda da placa [13]. A figura 11 exibe uma máquina fresadora com utilização em escala industrial, na produção de PCI's.

Figura 11: Máquina fresadora industrial.



Fonte: Adaptado de [13].

2.5.4. DEPOSIÇÃO OU IMPRESSÃO POR TINTA CONDUTIVA

Como este foi o método escolhido para a produção deste trabalho, a descrição de sua metodologia, será descrita no tópico matérias e métodos. A sua escolha deve-se por causa de sua versatilidade, e novas possibilidades de construção de placas de circuito impresso, utilizando materiais e métodos de baixo custo, e baixa toxicidade.

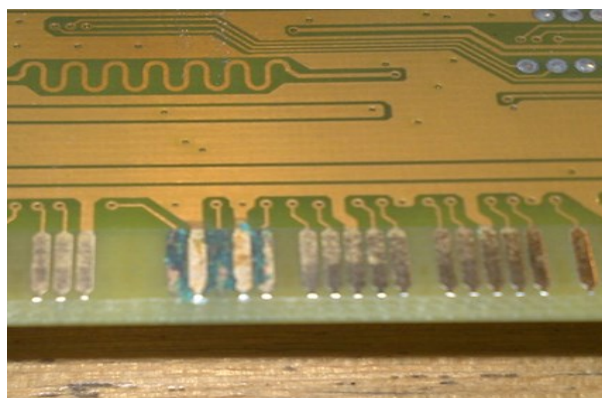
Por meio da deposição ou impressão de tinta condutiva, é possível desenhar ou imprimir circuitos eletrônicos sobre diversas superfícies, como papel, madeira, fibras sintéticas, plásticos, paredes, ou qualquer outra superfície que possua boa aderência à tinta utilizada [21] [23].

Estes circuitos podem ser impressos manualmente, ou por meio de impressoras, com cartuchos adequados. De acordo com a funcionalidade do circuito, este pode ser impresso por uma, ou várias camadas de tinta, dependendo da resistência desejada de sua trilha [22] [23].

2.6. OXIDAÇÃO

A oxidação é um processo eletroquímico em materiais metálicos. Este processo ocorre quando estes metais são expostos ao ar livre. Assim, uma camada de óxido ou de incrustação é formada sobre a superfície deste material. Esta incrustação pode proteger o material contra uma rápida oxidação, atuando como uma barreira de difusão iônica. Porém, essa barreira, diminui a condução elétrica, sendo um grande problema para as tintas condutivas metálicas [8]. A figura 12 demonstra a oxidação de metais condutores em PCI's, podendo causar danos na condutividade e no funcionamento do dispositivo.

Figura 12: Placa eletrônica com terminais oxidados.



Fonte: Adaptado de [14].

Deste modo, a superfície das nano e micropartículas de cobre devem ser cobertas por um surfactante orgânico ou carbono, para evitar a oxidação destas partículas pelo ar [1].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção da tinta condutiva, foram realizados vários experimentos em laboratório, com diferentes composições de materiais. Estas experiências resultaram em amostras de tintas, com diferentes graus de viscosidade e condutividade. Desta forma, foi possível escolher a solução com melhor custo/benefício, para a produção de uma placa de circuito impresso.

3.1. PRODUÇÃO DA TINTA PROPOSTA

Nas amostras aqui produzidas foram utilizados em sua composição, o cobre, o latão, ou cobre e latão, como material condutor da solução, por serem metais de baixo custo e com certa facilidade de se encontrar no mercado. Metais como o ouro, prata, platina e índio não foram utilizados por serem materiais de elevado custo e de difícil disponibilidade no mercado comum.

3.1.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Para a produção das amostras de tintas foram utilizados os seguintes materiais:

- **Balança semi analítica MARTE AD200:** Balança de precisão, para a pesagem das devidas quantidades de massa de latão, cobre e carbono grafite;
- **Seringa:** Utilizada para medir o volume adequado do esmalte e etanol;
- **Béquero:** Utilizado para comportar a mistura dos ingredientes da tinta condutiva;
- **Esmalte a base de água para metais Iquine:** Utilizado como base na aglutinação e viscosidade da tinta condutiva;
- **Latão em pó:** Metal base, sendo o principal ingrediente para que a tinta adquira uma boa condutividade, com granulometria de 800 nm á 100 µm;
- **Cobre em pó:** Metal base, utilizado na produção de amostras de tinta condutiva, com granulometria de 800 nm á 65 µm;

- **Carbano Grafite:** Utilizado como surfactante na mistura, para prevenir e ajudar contra a oxidação da tinta;
- **Etanol, com 92,8% de concentração:** Utilizado como solvente, para ajudar na viscosidade e secagem da tinta;
- **Substrato fibra de vidro:** Utilizado como base de impressão da tinta condutiva, conforme a figura 13;

Figura 13: Substrato de fibra de vidro.



Fonte: O autor (2018).

As concentrações da mistura para cada amostra produzida, utilizando o cobre como material condutor estão descritas na tabela 2.

Tabela 2 – Concentrações de materiais para cada amostra produzida (cobre).

	Cobre (gramas)	Aglutinante (mililitros)	Carbano grafite (gramas)	Etanol (mililitros)
Amostra 1	0,9511	2,6	0,0247	0,6
Amostra 2	1,2530	2,6	0,0247	0,6
Amostra 3	1,8555	2,6	0,0247	0,6
Amostra 4	2,2252	2,6	0,0247	0,6

Fonte: O autor (2018)

Utilizando o latão como metal base, as concentrações da mistura para cada amostra produzida estão descritas na tabela 3.

Tabela 3 – Concentrações de materiais para cada amostra produzida (latão).

	Latão (gramas)	Aglutinante (mililitros)	Carbono grafite (gramas)	Etanol (mililitros)
Amostra 5	0,9511	2,6	0,0247	0,6
Amostra 6	1,2530	2,6	0,0247	0,6
Amostra 7	1,8555	2,6	0,0247	0,6
Amostra 8	2,2252	2,6	0,0247	0,6

Fonte: O autor (2018).

Nas últimas amostras desenvolvidas foram utilizados simultaneamente o cobre e o latão em quantidades diferentes, sendo as concentrações da mistura para cada amostra produzida descritas na tabela 4.

Tabela 4 – Concentrações de materiais para cada amostra produzida (cobre e latão).

	Cobre (gramas)	Latão (gramas)	Aglutinante (mililitros)	Carbono grafite (gramas)	Etanol (mililitros)
Amostra 9	0,5563	1,6690	2,6	0,0247	0,6
Amostra 10	0,8773	1,207	2,6	0,0247	0,6
Amostra 11	1,2552	0,0816	2,6	0,0247	0,6
Amostra 12	1,6789	0,5433	2,6	0,0247	0,6

Fonte: O autor (2018).

3.1.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Logo após a separação dos ingredientes, em suas quantidades especificadas, os mesmos foram misturados em um béquer até resultar em uma mistura homogênea. A figura 14 representa o momento em que foram misturados os materiais, produzindo as amostras de tinta condutiva no laboratório de físico-química.

Figura 14: Procedimentos experimentais em laboratório.



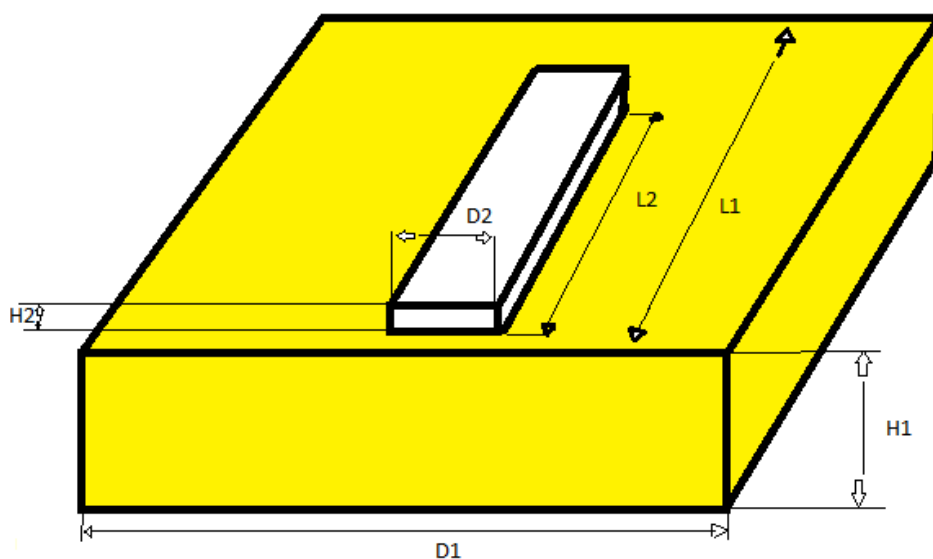
Fonte: O autor (2018).

Consecutivamente, as amostras foram impressas sobre o substrato, conforme a figura 15. Tal procedimento foi realizado para que fosse possível realizar a medição da resistência elétrica obtida por cada amostra, tomando-se o devido cuidado para padronizar o comprimento da trilha e área de seção transversal.

Para a impressão das tintas, foi produzido um molde, representado pelo retângulo branco, para a sua deposição de acordo com as dimensões da figura 15.

Sucessivamente, a tinta foi impressa manualmente sobre o molde, por meio de um frasco gotejador de plástico. A tinta foi depositada, até preencher totalmente o molde.

Figura 15: Tinta condutiva impressa sobre base de substrato fibra de vidro.

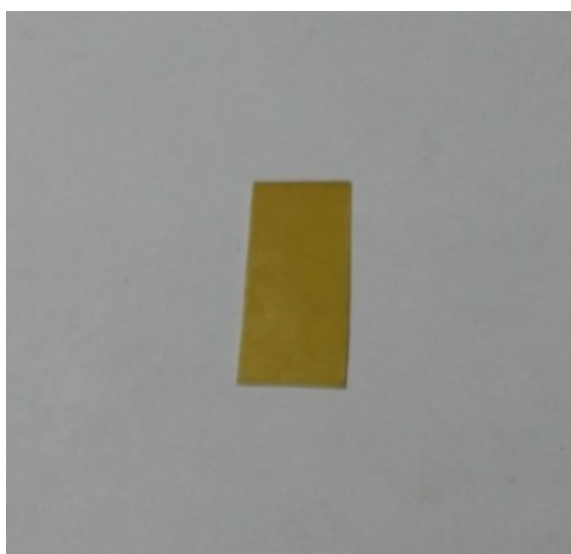


Fonte: O autor (2018).

Onde $H1$ é a espessura, $L1$ a largura e $D1$ a distância do substrato de fibra de vidro expresso em milímetros, sendo $H1 = 0,5\text{ mm}$, $L1 = 52,1\text{ mm}$ e $D1 = 23,2\text{ mm}$. $H2$ é a espessura, $L2$ a largura e $D2$ a distância da tinta condutiva expresso em milímetros, sendo $H2 = 0,8\text{ mm}$, $L2 = 30,0\text{ mm}$ e $D2 = 4,0\text{ mm}$.

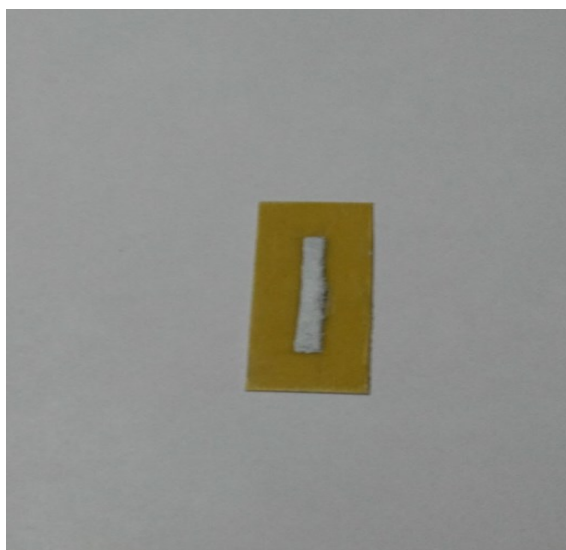
A figura 16 representa o substrato de fibra de vidro, e a figura 17 representa a amostra 8, produzida neste trabalho.

Figura 16: Substrato base.



Fonte: O autor (2018).

Figura 17: Tinta condutiva proposta impressa sobre substrato.



Fonte: O autor (2018).

Logo após a secagem da tinta, foram realizadas medições de resistência para todas as amostras produzidas. As medições foram realizadas nas duas extremidades da impressão, em relação ao seu comprimento. Vale ressaltar que tais medições foram realizadas um dia após a mistura estar completamente seca, e a tabela 5 representa os valores de resistência para cada amostra.

Tabela 5 – Valores de resistência para cada amostra.

Amostra	Resistência [Ω]
1	15,23
2	13,55
3	10,01
4	7,56
5	2,53
6	1,99
7	1,63
8	1,50
9	3,30
10	5,78
11	8,23
12	10,44

Fonte: O autor (2018).

Analisando a tabela 5, pode-se perceber que as amostras de tinta condutiva, onde foram utilizados somente o cobre como material condutor (1, 2, 3), obtiveram em média, os maiores valores (piores) de resistência de todas as amostras.

A amostra (4), contendo somente o cobre em sua solução, obteve em média, o menor valor de resistência em relação às amostras (1, 2, 3).

Já aquelas que utilizaram somente o latão como material condutor (5, 6, 7 e 8), obteve em média os melhores valores (menores) de resistência, sendo a amostra 8, a que alcançou o menor valor de resistência de todas as amostras.

As amostras contendo cobre e latão (9, 10, 11), obtiveram em média, valores medianos de resistência, em comparação com as amostras (5, 6, 7 e 8). Ou seja, seus valores de resistência são pouco maiores que as amostras que cotiam somente o latão em sua solução.

A amostra (12), contendo a mistura de cobre e latão, possui o maior valor de resistência em sua solução, em comparação com as amostras (9, 10, 11).

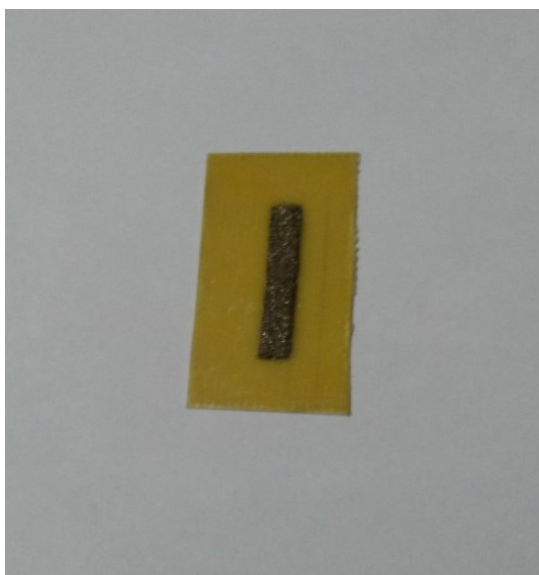
Assim, pode-se afirmar que o latão é o melhor metal para a composição da tinta condutiva, para este trabalho.

Realizados tais procedimentos, e chegando-se a conclusão de que a amostra 8 foi a que apresentou o melhor resultado, no sentido de possuir menor resistência elétrica, na sequência do desenvolvimento do projeto, faz-se necessário comparar tal amostra, com tintas comercialmente disponíveis no mercado. Desta forma, foram adquiridas duas tintas, sendo elas, a tinta condutiva B, e a tinta condutiva C.

Tais tintas foram impressas com as mesmas dimensões da figura 15, utilizando como base de impressão o mesmo substrato de fibra de vidro.

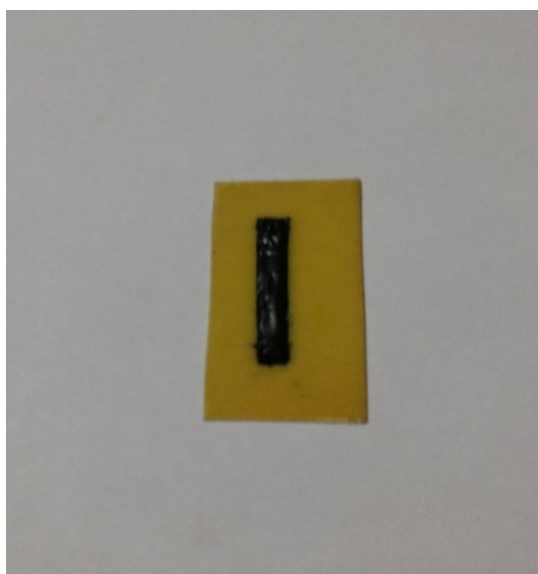
A figura 18 representa a tinta condutiva C e a figura 19 representa a tinta condutiva B impressas sobre o substrato fibra de vidro.

Figura 18: Tinta condutiva C.



Fonte: O autor (2018).

Figura 19: Tinta condutiva B.



Fonte: O autor (2018).

Com o objetivo de comparar os valores de condutividade e resistividade, entre a tinta produzida (amostra 8) e as tintas compradas, foram realizadas medições de resistência para cada tinta. Estas medições basearam-se sobre as impressões das figuras 17, 18 e 19. A tabela 6 apresenta as medidas realizadas sobre estas tintas. Será mencionada, a partir deste tópico, a tinta condutiva produzida neste trabalho (amostra 8), como “Tinta Própria”, e as tintas adquiridas no mercado como “Tinta B” e “Tinta C”.

Tabela 6 – Valores das dimensões e resistência das trilhas condutivas.

Grandeza	Tinta Própria	Tinta B	Tinta C
H2 (espessura)	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
D2 (distância)	4,0 mm	4,0 mm	4,0 mm
L2 (comprimento)	30,0 mm	30,0 mm	30,0 mm
R (resistência)	1,5Ω	440 Ω	5,6Ω

Fonte: O autor (2018).

Analisando a tabela 6, pode-se perceber que a tinta condutiva do trabalho possui menor resistência elétrica em comparação com as tintas compradas, sendo a tinta condutiva B, a que possui maior resistência.

Deste modo, pôde-se calcular os valores de condutividade e resistividade das trilhas por meio das equações 1, 2, 3, e das constantes medidas na tabela 6. A tabela 7 demonstra os valores calculados de condutividade e resistividade para as três tintas condutivas.

Tabela 7 - Valores calculados de condutividade e resistividade para as três tintas condutivas.

Grandeza	Tinta Própria	Tinta B	Tinta C
ρ (resistividade)	$1,6 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$	$4,69 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$	$5,97 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$
σ (condutividade)	$6,25 \times 10^3 (\Omega \cdot m)^{-1}$	$21,32 (\Omega \cdot m)^{-1}$	$1,67 \times 10^3 (\Omega \cdot m)^{-1}$

Fonte: O autor (2018).

De acordo com a tabela 7, é notável que a tinta produzida neste trabalho, possui menor resistividade e maior condutividade, em comparação com as tintas compradas, sendo a tinta B, a que possui menor condutividade e maior resistividade.

3.2. ANÁLISE DE ADERÊNCIA

Para a análise da aderência das tintas sobre o substrato, as tintas que foram produzidas e compradas neste trabalho, foram impressas sobre quatro diferentes substratos. Os substratos utilizados neste experimento foram a fibra de vidro, o fenolite, papel (celulose) e a poliamida (plástico polimérico).

De acordo com a análise das impressões, o substrato que possuiu melhor aderência, ou fixação para as tintas, foi o substrato fibra de vidro. Já o substrato plástico, obteve um menor índice de aderência das tintas ao substrato base, porém o plástico suportou maiores níveis de torção mecânica sem a deterioração da trilha impressa.

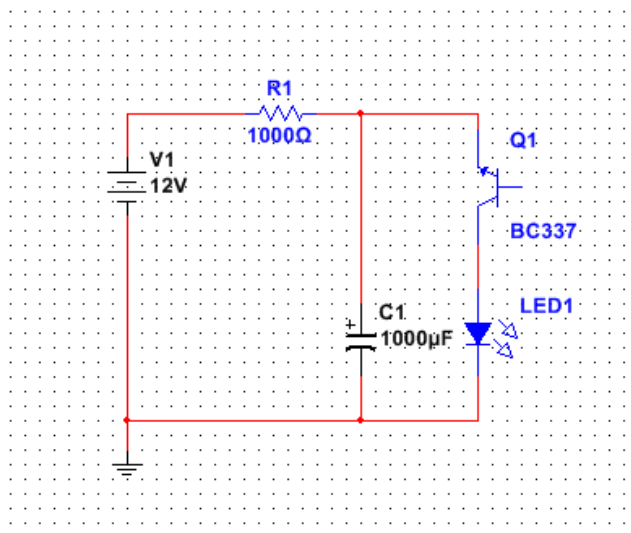
3.3. PRODUÇÃO DOS CIRCUITOS

De acordo com a análise dos artigos e referências pesquisadas, além da tabela 5, optou-se por confeccionar um circuito para realização de testes, utilizando tanto tinta condutiva metálica da amostra 8, quanto as adquiridas no mercado.

Foram produzidas então três placas de circuito impresso iguais, de mesma dimensão, sendo uma, para cada tinta aqui a ser comparada.

Na elaboração das placas de circuito impresso, foi escolhido o circuito oscilador simples, uma vez que o foco aqui será a averiguação da eficiência da tinta produzida, quando comparada com as demais tintas adquiridas, tal circuito é representado na figura 20.

Figura 20: Diagrama eletrônico do circuito a ser implementado.

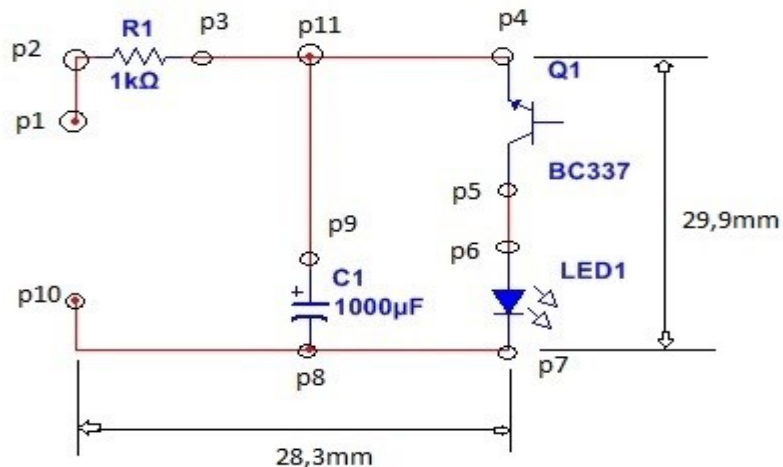


Fonte: O autor (2018).

Seu funcionamento é descrito de forma que a resistência de 1000Ω carregará lentamente o capacitor de $1000\mu\text{F}$, até atingir a tensão nominal da alimentação de 12Vdc . Desta forma, o transistor BC337 será capaz de liberar sua junção emissor-base. Consecutivamente o transistor conduzirá rapidamente e descarregará parcialmente a tensão do capacitor sobre o LED, acendendo-o de forma rápida. Assim este ciclo será repetido novamente, resultando em uma condição oscilatória [15] [16].

Durante a confecção das placas, a afixação dos ilhoses, componentes eletrônicos e a impressão das trilhas, serão feitas de acordo com a figura 21, sendo que os ilhoses serão afixados nos pontos circulados, os componentes serão soldados sobre os ilhoses, e a tinta condutiva será impressa sobre as linhas vermelhas.

Figura 21: Diagrama eletrônico de orientação de impressão da tinta condutiva.



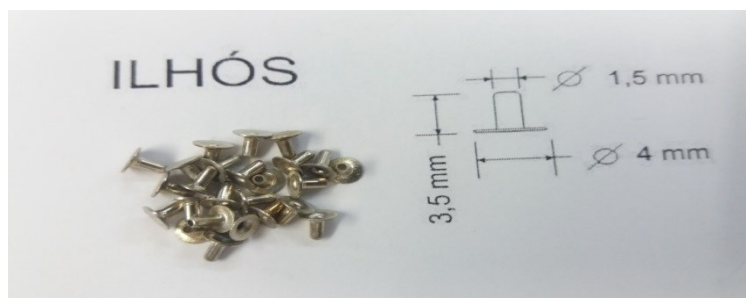
Fonte: O autor (2018).

3.3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Como as PCI's são iguais, será mostrado a construção de apenas uma placa, utilizando os seguintes materiais:

- **1 resistência de 1000Ω;**
- **1 capacitor de 1000μF;**
- **1 transistor NPN BC337;**
- **1 led vermelho(2,5volts/20mA);**
- **10 ilhoses de latão com tratamento superficial em estanho:** Suas dimensões são apresentadas na figura 22, onde serão soldados os componentes na PCI;

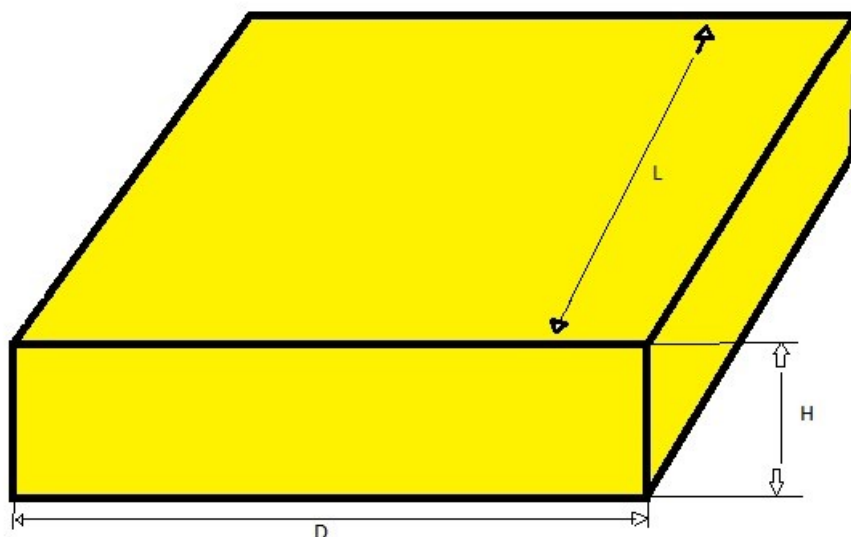
Figura 22: Ilhoses metálicos.



Fonte: Adaptado de [17].

- **Placa de substrato fibra de vidro:** Onde H é a espessura, L a largura e D a distância do substrato de fibra de vidro expresso em milímetros, sendo $H = 0,5\text{mm}$, $L = 32,3\text{ mm}$ e $D = 35,5\text{ mm}$, apresentada na figura 23;

Figura 23: Representação das dimensões do substrato a ser utilizado na confecção das PCI.



Fonte: O autor (2018).

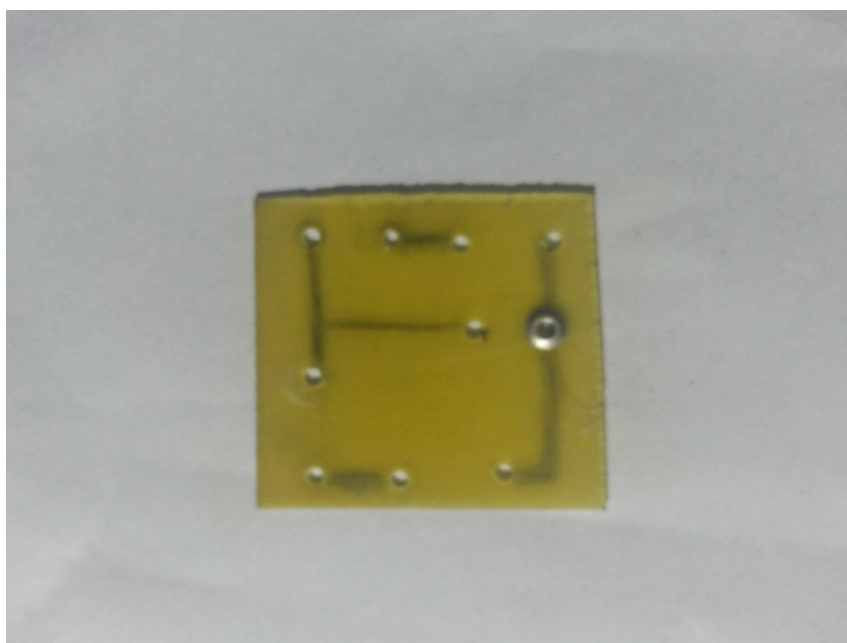
- **Tinta condutiva B;**
- **Tinta condutiva C;**
- **Ferro de solda HIKARI modelo 21K404:** Utilizado para a soldagem dos componentes nos ilhoses;
- **Solda de estanho cobix:** Para a soldagem dos componentes nos ilhoses;
- **Paquímetro com escala em milímetros:** Para medições;
- **Multímetro de bancada MINIPA modelo MDM8145:** Para medições de resistência e tensão nas PCI'S;
- **Fonte de alimentação INSTRUTERM modelo FA3005:** Utilizada como fonte de tensão contínua;
- **Furadeira DWT modelo BM440VS:** Utilizada para furar os buracos onde os ilhoses serão prensados;

3.3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a fabricação da PCI, com a orientação da figura 21, seguiram-se os seguintes passos:

- Corte e limpeza do substrato base;
- Furo dos buracos nos substratos para fixação dos ilhoses;

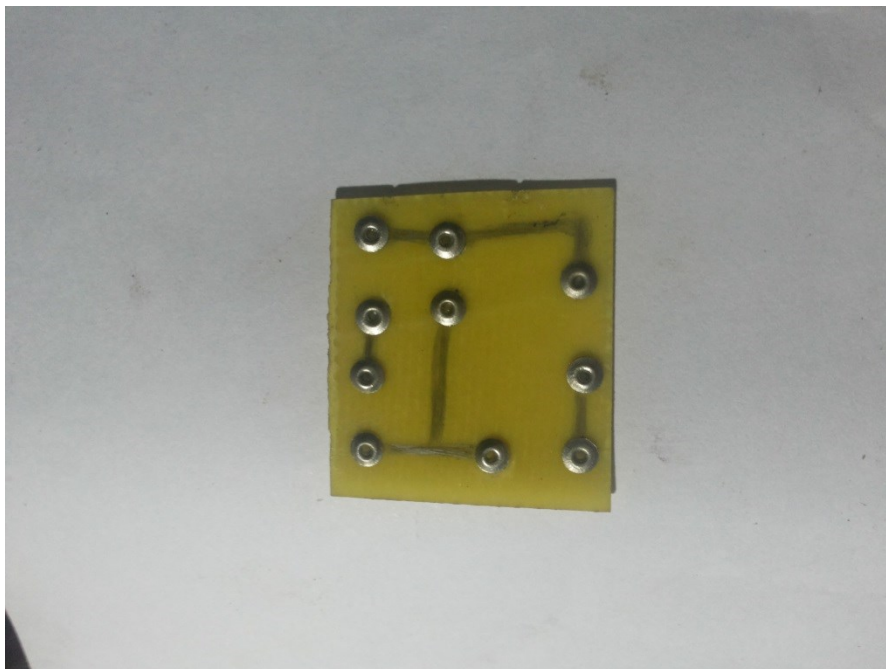
Figura 24: Placa após ser perfurada para a afixação dos ilhoses.



Fonte: O autor (2018).

- Afixação dos ilhoses;

Figura 25: Ilhoses afixados e prensados na placa.

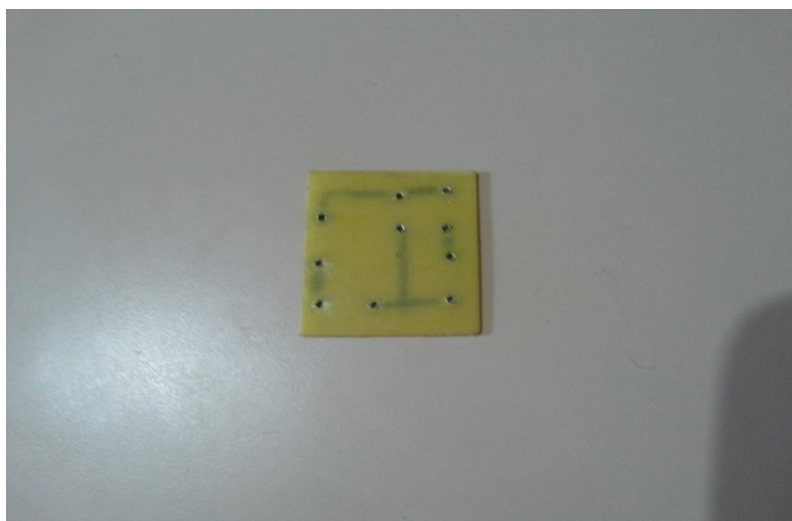


Fonte: O autor (2018).

A linha preta da figura 25 representa a demarcação onde será impressa a trilha, utilizando a tinta condutiva.

A figura 26 representa o lado oposto do substrato, logo após a fixação dos ilhoses.

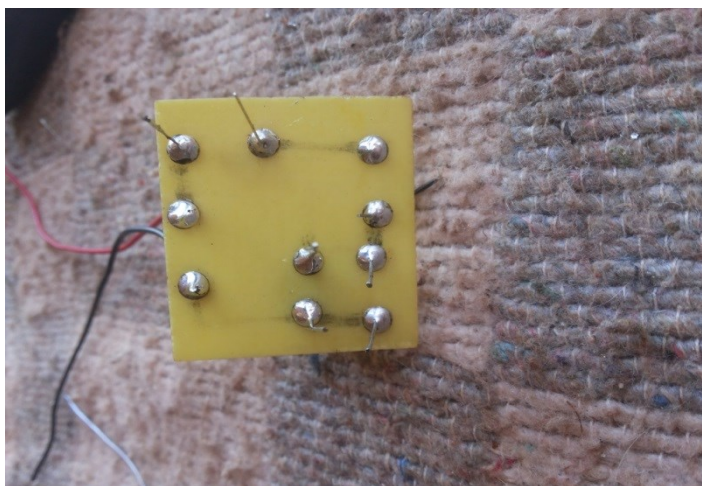
Figura 26: Lado oposta da placa após fixação de ilhoses.



Fonte: O autor (2018).

- Soldagem dos componentes;

Figura 27: Componentes soldados sobre a placa por meio dos ilhoses.



Fonte: O autor (2018).

A figura 28 representa o lado oposto da placa, logo depois que os componentes foram soldados.

Figura 28: Vista superficial dos componentes soldados na placa ou substrato.



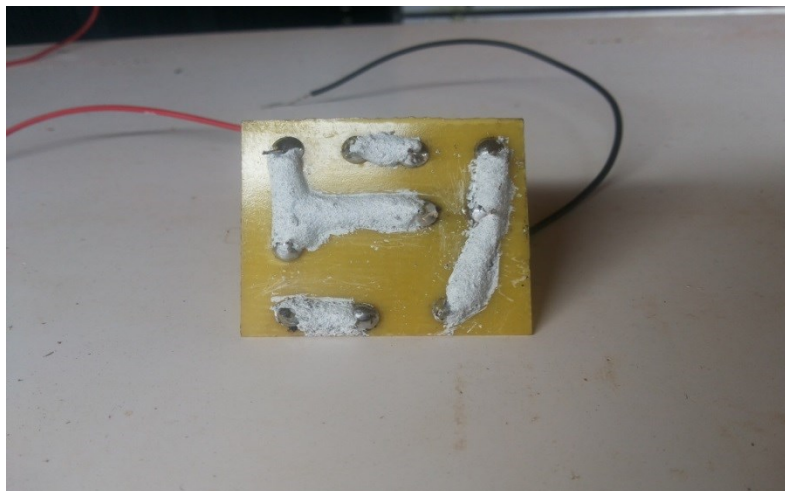
Fonte: O autor (2018).

- Impressão das tintas sobre as linhas demarcadas de preto de acordo com a figura 21;

A tinta foi impressa com espessura nominal de 1,6 mm e largura nominal de 4mm para as três PCI's.

A figura 29 representa a PCI, onde foi utilizado como impressão de suas trilhas, a tinta condutiva da amostra 8.

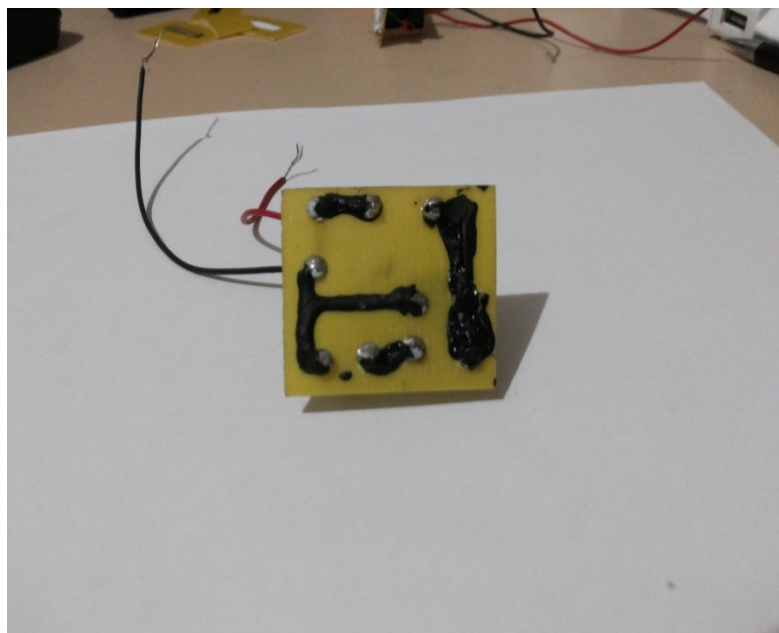
Figura 29: Tinta própria impressa sobre substrato.



Fonte: O autor (2018).

A figura 30 representa a PCI, onde foi impressa por meio da tinta condutiva B.

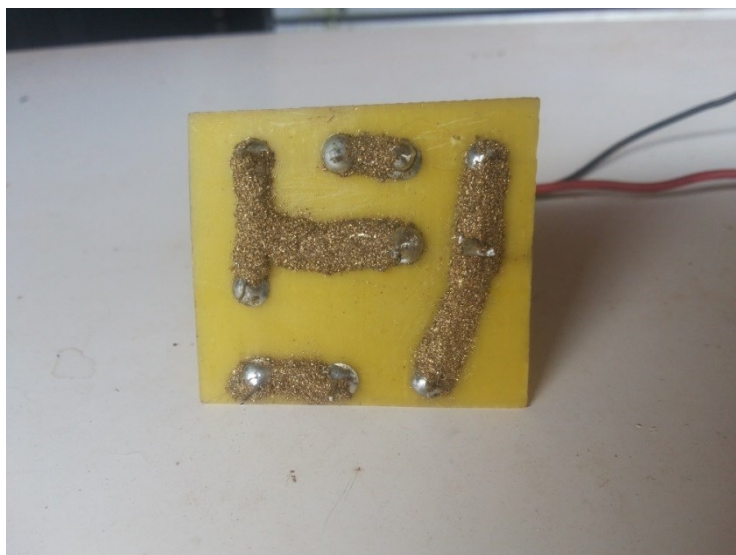
Figura 30: Tinta B impressa sobre o substrato.



Fonte: O autor (2018).

A figura 31 representa a PCI, onde utilizou-se a tinta condutiva C como impressão de suas trilhas.

Figura 31: Tinta C impressa sobre o substrato.



Fonte: O autor (2018).

3.4. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Para todas as três PCI's, a fonte de alimentação foi ajustada em 12 V, em corrente contínua. As medições de resistência e tensão das trilhas, das figuras 27, 28 e 29, seguem o mesmo padrão da figura 19, onde os pontos de análise são os mesmos para as três PCI's. Desta forma, os resultados serão demonstrados no próximo tópico.

4. RESULTADOS

Para a análise da aplicabilidade das tintas, foram medidas as resistências ponto a ponto nas trilhas, como base de referência, a figura 19. Estes valores estão descritos na tabela 8. Foi utilizado o multímetro para as medições de resistência.

Tabela 8 – Medições de resistência ponto a ponto das trilhas impressas.

Resistência	Tinta Própria	Tinta B	Tinta C
ponto 1 ao ponto 2	0,36Ω	161,12 Ω	7,00 Ω
ponto 3 ao ponto 4	0,46 Ω	86,80 Ω	4,00 Ω
ponto 3 ao ponto 9	0,86 Ω	129,70 Ω	4,40 Ω
ponto 5 ao ponto 6	0,35 Ω	290,00 Ω	1,30 Ω
ponto 7 ao ponto 8	0,55 Ω	68,35 Ω	1,80 Ω
ponto 8 ao ponto 10	0,71 Ω	231,40 Ω	4,70 Ω
ponto 4 ao ponto 9	1,00 Ω	114,05 Ω	4,65 Ω

Fonte: O autor (2018).

Analisando a tabela 8, pode-se observar que as trilhas impressas por meio da tinta própria obtiveram valores menores de resistência em comparação com as tintas compradas, o que já era esperado, uma vez que tal averiguação já havia sido realizada. Deste modo, a tinta própria possui maior aplicabilidade na impressão de trilhas para PCI's por causa de sua menor resistência e maior condutividade.

Na análise das tensões, é considerado a medição de um determinado ponto da figura 19, em relação ao terra do circuito. Para a alimentação do circuito, é utilizada a fonte de tensão, com nominais 12 V, para as três PCI's. Além disso, para a medição das tensões em cada ponto, é utilizado o multímetro, onde apresenta-se na tabela 9 os valores obtidos.

Tabela 9 – Medições de tensão dos pontos das placas em relação ao terra.

Tensão(V-volts)	Tinta Própria	Tinta B	Tinta C
Ponto 1	12,000V	12,000V	12,000V
Ponto 2	11,990V	9,100V	11,990V
Ponto 3	8,320V	4,300V	8,260V
Ponto 9	8,317V	3,300V	8,260V
Ponto 4	8,315V	4,100V	8,260V
Ponto 5	1,490V	0,030V	1,410V
Ponto 6	1,487V	0,029V	1,410V
Ponto 7	0,001V	0,001V	0,002V
Ponto 8	0,001V	0,001V	0,001V
Ponto 10	0,000V	0,000V	0,000V

Fonte: O autor (2018).

Pode-se analisar na tabela 9, que a tinta produzida neste trabalho possui menor perda de potencial elétrico entre os pontos das trilhas impressas devido a sua menor resistência e maior condutividade elétrica. A tinta B, possui maior perda de potencial elétrico devido a sua baixa condutividade.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi proposto a produção de uma tinta condutiva metálica, em que seus ingredientes fossem de baixo custo e de baixa toxicidade para aplicação em PCI, onde tal tinta possuiria boa condutividade, e consequentemente baixa resistência elétrica nas trilhas impressas. Para isso realizou-se diversas misturas e amostras experimentais para buscar uma melhor eficiência e custo/benefício desta solução condutiva.

Para a produção das amostras de tinta, os ingredientes e materiais das soluções foram medidos e pesados utilizando instrumentos de precisão, desta forma, obteve-se uma solução padronizada e homogênea para todas as amostras.

Desta forma, foram produzidas tintas com variadas concentrações de metais em suas amostras, como o cobre e o latão, até chegar a uma mistura, onde possuísse bons índices de resistência e viscosidade em sua solução. Dentre as amostras produzidas, a amostra que obteve o melhor valor de resistência, foi a amostra 8.

Por meio das amostras produzidas, é notável a observação de que o latão possui menor índice de oxidação em relação ao cobre. Desta forma, o latão possui menor índice de resistência elétrica em comparação ao cobre, de acordo com os testes e amostras produzidas neste trabalho.

Também foram feitos testes de aderência das tintas estudadas, em relação a alguns substratos padrões, como a fibra de vidro e plásticos poliméricos. Estas tintas foram impressas sobre os substratos relatados no trabalho, e o material que obteve uma melhor fixação ou aderência da tinta condutiva, foi o substrato de fibra de vidro. Já a tinta impressa sobre substrato plástico obteve uma melhor resistência mecânica a torção, sem que houvesse a ruptura ou deterioração das trilhas impressas. Desta forma, o substrato escolhido para a produção dos circuitos testes foi o substrato de fibra de vidro.

Para analisar a aplicabilidade da tinta produzida neste trabalho, foi construído três PCI's, sendo que, numa placa empregou-se a tinta aqui proposta, e nas outras duas placas as tintas compradas, para impressão das trilhas condutivas dos circuitos.

Pôde-se perceber que após a impressão e secagem dos circuitos utilizando as tintas da amostra 8 e tinta C, estes obtiveram um funcionamento satisfatório de acordo com a tensão aplicada, sem que houvesse sobreaquecimento ou ruptura das

trilhas impressas. Porém o circuito que utilizou a tinta condutiva B, não houve resultados satisfatórios de acordo com os testes realizados, por causa de seu maior nível de resistência elétrica.

Para a produção da tinta proposta, somando os custos dos materiais utilizados na mistura, seu custo efetivo ficou na faixa de R\$ 4,00 para a elaboração de 10 ml de tinta. A tinta B foi comprada pelo preço de R\$ 95,00 contendo 10 ml, já a tinta condutiva C, por R\$ 71,42 contendo 10 ml. Assim, pode-se analisar que a tinta produzida neste trabalho possui menor custo de produção, em comparação as tintas comerciais comparadas neste trabalho.

De acordo com os resultados pode-se concluir que a tinta produzida neste trabalho possui melhor eficiência condutiva e resistiva. Além disso, esta tinta possui menor queda de potencial elétrico em suas trilhas, quando comparada às tintas adquiridas no mercado. Também pode-se perceber, que ela possui menor custo de produção, além de ser mais rentável para a impressão de circuitos eletrônicos baseados nos testes proferidos neste trabalho. Deste modo, a tinta proposta possui maior vantagem nos quesitos estudados sobre as demais tintas aqui comparadas, lembrando que tais tintas são as mais vendidas no mercado.

Apesar da pesquisa intensa neste projeto, o trabalho não se encerra por aqui. Outras pesquisas e análises futuras podem ser desenvolvidas por meio dos seguintes tópicos:

- Pesquisa de novas misturas de tintas utilizando outros metais ou ligas;
- Análise da oxidação das trilhas impressas em relação ao tempo;
- Análise da temperatura e tempo de secagem da tinta impressa;
- Análise da capacidade de condução de corrente (Máxima corrente que possa passar nas trilhas, sem que haja aquecimento ou sua ruptura);
- Testes e análises de indutância e capacitância parasita;
- Análise da viscosidade;
- Análise da ductibilidade ou máxima força de torção, em que a trilha impressa possa suportar, sem que haja sua ruptura ou deterioração;
- *Croosstalk* (análise da integridade de sinal no circuito impresso);
- Análise da viabilidade de condicionamento da tinta condutiva para equipamento automatizado para impressão de PCB's;

- Aprimoramento dos métodos e processos de produção das PCI's por meio de tintas condutivas, além de possíveis comparações com outras tintas existentes no mercado.

REFERÊNCIAS

- [1] ZHANG, Y. et al. **A simple way to prepare large-scale copper nanoparticles for conductive ink in printed electronics**. 14th International Conference on Electronic Packaging Technology, Shenzhen, China, p. 317-320, mar. 2013.
- [2] KNOFF, G. K. et al. **Flexible Electrical Circuits Printed on Polymers using Graphene-cellulose Inks**. Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), IEEE, p. 854-857, jul. 2016.
- [3] TANG, X. et al. **Conductive Property of Inkjet Printed Film by Reactive Silver Inks on PET Flexible Substrate**. 17th International Conference on Electronic Packaging Technology, IEEE, p. 1293-1296, set. 2016.
- [4] BRODEALA, A. et al. **Physical Properties of Silver Inkjet Printed Circuits**. 35th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, IEEE, p. 114-116, dez. 2012.
- [5] DE ORIO, R.L. **Electromigration Modeling and Simulation**. 2011. Disponível em: <<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/orio/node5.html>>. Acesso em: 14 maio 2018.
- [6] INOUE, M. et al. **Development of Highly Conductive Inks for Smart Textiles**. JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research, IEEE, p. 1-4, abr. 2012.
- [7] ELETRODOS FABRICADOS POR "SILK-SCREEN. SÃO PAULO: QUÍMICA NOVA, 1998. Disponível em: <[http://submission.quimicanova.s bq.org.br/qn/qnol/1998/vol21n5/v21_n5_%20\(13\).pdf](http://submission.quimicanova.s bq.org.br/qn/qnol/1998/vol21n5/v21_n5_%20(13).pdf)>. Acesso em: 04 abr. 2018.
- [8] CALLISTER, W. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro. Grupo Gen-LTC, 7ª ed. 2000.
- [9] ROCHA, J. **Ligação Metálica**. 2016. Disponível em: <<https://manualdaquimica.uol.com.br/quimica-geral/ligacao-metalica.htm>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- [10] BARRETO, J. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA**. 2015. 34 p. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (Bacharelado em Física)- CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ, MARINGÁ, 2015. Disponível em: <<http://site.dfi.uem.br/wp-content/uploads/2016/12/Jade-Barreto.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2018.
- [11] A, B. **Realizacion de plaquetas PCB**. 2015. Disponível em: <<http://www.taringa.net/posts/hazlo-tu-mismo/9481586/Realizacion-de-plaquetas-PCB-Metodo-de-la-plancha-quot.html>>. Acesso em: 10 maio 2018.
- [12] FRUETT, F. **Tecnologia para microfabricação**. 2010. Disponível em: <<http://www.dsif.fee.unicamp.br/~fabiano/EE640/PDF/Tecnologia%20para%20fabricacao%20microeletronica.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2018.

- [13] LUCCA, J. **PLOTTER DE BAIXO CUSTO PARA PROTOTIPAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**. 2013. 94 p. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA)- DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA, UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, CURITIBA, 2013. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1261/1/CT_ENGELN_2012_2_11.pdf>. Acesso em: 01 maio 2018
- [14] PIROPO, B. **Como limpar o seu computador**. 2011. Disponível em: <<http://www.techtudo.com.br/platb/hardware/2011/03/24/limpeza-computador-parte-2/>>. Acesso em: 3 maio 2018.
- [15] ELETRÔNICA, NOVA. **Pisca-pisca de LED com um transistor Simples e Barato**. 2018. Disponível em: <<http://blog.novaeletronica.com.br/pisca-pisca-led-transistor-simples-e-barato/>>. Acesso em: 3 abr. 2018.
- [16] VM, AR. **Transístores Bipolares**. 2012. Disponível em: <<http://www.arvm.org/exames/trasistor.htm>>. Acesso em: 1 abr. 2018.
- [17] L, M. **Ilhós De Latão C/ Tratam. Sup. Em Estanho - Conj. 1000 Pçs**. 2018. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-800439373-ilhos-de-lato-c-tratam-sup-em-estanho-conj-1000-pcs_-JM>. Acesso em: 10 maio 2018.
- [18] HU, Y. et al. **P(St-AA)/Ag nano-composite particles as electrical conductive filler for conductive ink in printed electronics**. 16th International Conference on Electronic Packaging Technology, IEEE, p. 283-287, jan. 2015.
- [19] WAYT GIBBS, W. **How to Brew Your Own Conductive Ink**. 2013. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/geek-life/hands-on/how-to-brew-your-own-conductive-ink>>. Acesso em: 03 jul. 2018.
- [20] G, R. **Tinta condutora é capaz de iluminar seus rabiscos**. 2015. Disponível em: <<http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI299690-17770,00-TINTA+CONDUTORA+E+CAPAZ+DE+ILUMINAR+SEUS+RABISCOS.html>>. Acesso em: 03 jul. 2018.
- [21] E, B. **Caneta de Tinta Condutiva - BarePaint**. 2017. Disponível em: <<http://www.baudaeletronica.com.br/caneta-de-tinta-condutiva-barepaint.html>>. Acesso em: 03 jul. 2018.
- [22] E, N. **Como fazer Circuito Impresso Flexível em casa usando Tinta Condutiva**. 2018. Disponível em: <<http://blog.novaeletronica.com.br/faca-circuito-impresso-flexivel-em-casa-usando-tinta-condutiva/>>. Acesso em: 03 jul. 2018.
- [23] D, F. **Como as placas de circuito impresso são produzidas**. 2012. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/como-e-feito/18501-como-as-placas-de-circuito-impresso-sao-produzidas.htm>>. Acesso em: 03 jul. 2018.

[24] C, B. **5 Things You Can Do With An Electric Paint 10ml Tube**. 2015. Disponível em: <<https://www.bareconductive.com/make/5-things-you-can-do-with-your-electric-paint-10ml-tube/>>. Acesso em: 03 jul. 2018.