

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE
DO NORTE – IFRN - CAMPUS NATAL – ZONA NORTE

AÍLA GABRIELA DA SILVA COELHO

ELIZA MARIA SILVA DE MORAIS

RHEBEKA ESTHER DE LIMA COSTA

**METALIZE - EQUIPAMENTO PARA METALIZAÇÃO DE SUBSTRATOS EM
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

NATAL/RN

2018

AÍLA GABRIELA DA SILVA COELHO

ELIZA MARIA SILVA DE MORAIS

RHEBEKA ESTHER DE LIMA COSTA

**METALIZE - EQUIPAMENTO PARA METALIZAÇÃO DE SUBSTRATOS EM
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à coordenação do Curso Técnico Integrado em Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Técnico em Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Fernandes de Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Rodrigues Cunha Lima

NATAL/RN

2018

AÍLA GABRIELA DA SILVA COELHO

ELIZA MARIA SILVA DE MORAIS

RHEBEKA ESTHER DE LIMA COSTA

**METALIZE - EQUIPAMENTO PARA METALIZAÇÃO DE SUBSTRATOS EM
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Coordenação do Curso Técnico Integrado em Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Técnico em Eletrônica.

Trabalho de conclusão de curso apresentado e aprovado em 15/08/2018, pela seguinte banca examinadora:

BANCA EXAMINADORA

Jair Fernandes de Souza, Prof. Dr. – Presidente

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

Érico Cadineli Braz, Prof. Dr. – Examinador

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

Jean Carlos da Silva Galdino, Prof. Dr. – Examinador

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

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, que nos deu saúde e força para prosseguir com o projeto e superar as inúmeras dificuldades que se fizeram presentes durante toda a jornada da pesquisa. Gostaríamos de expressar, também, nossos sinceros agradecimentos a todos os professores que nos auxiliaram no decorrer da pesquisa, com os quais aprendemos muitas coisas boas, relevantes e saudáveis.

Aos professores Drs. Jair Fernandes de Souza e Roberto Rodrigues Cunha Lima, que se mostraram orientadores esplêndidos, por estarem sempre nos motivando, preocupados com os conhecimentos e acompanhamento de nossas pesquisas.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Campus Natal – Zona Norte, por sempre investir e incentivar o envolvimento com a pesquisa, capacitando alunos e proporcionando um ambiente onde cada vez mais projetos serão desenvolvidos em prol de um bem comum.

Aos nossos pais que nos apoiam em todos os momentos e apontam que existe um futuro melhor constituído pela educação.

Agradecemos também aos técnicos de laboratório Aécio Amorim Farias e Sergio Roberto Dantas, e ao professor e coordenador do curso de eletrônica Érico Cadineli Braz por todo o apoio e auxílio em nossa jornada de estudos.

E a todos aqueles que auxiliaram no desenvolvimento deste projeto direta ou indiretamente.

A todos, nosso muito obrigada!

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo principal o projeto e construção de um arranjo experimental para a deposição de finas camadas metálicas sobre superfícies condutoras. O equipamento consiste de uma fonte de tensão projetada para operar nos modos contínuo e pulsado, instalada no interior de um gabinete equipado com sistema de exaustão. Testes elétricos demonstraram que quando no modo contínuo, a fonte apresenta uma tensão de saída que varia de 1,3 V a 12 V, enquanto que no modo pulsado os valores médios das tensões medidas nos terminais do equipamento aumentam de 0 V a 4,23 V com o aumento do ciclo de trabalho. Os processos de eletrodeposição de filmes finos de estanho realizados demonstraram o correto funcionamento do equipamento, constatando-se taxas de deposição de 3,63 nm/minuto para o equipamento operando no modo contínuo e 5,16 nm/minuto quando da operação em modo pulsado com ciclo de trabalho de 99,97 %. Dois circuitos eletrônicos, um amplificador de instrumentação e um filtro ativo passa-altas foram projetados, construídos e eletricamente testados com a finalidade de comprovar a funcionalidade do equipamento desenvolvido. O equipamento de eletrodeposição proposto mostrou-se eficiente quando da realização processos de deposição de filmes finos de estanho sobre substratos utilizados em placas de circuito impresso, tanto no modo contínuo quanto no pulsado. O desempenho do arranjo experimental desenvolvido demonstrou a viabilidade da substituição de fontes comerciais por um equipamento menos robusto, projetado e fabricado especificamente para o uso em processos de metalização.

Palavras-chave: Eletrodeposição; Metalização; Deposição de filmes metálicos; Metalização de PCIs.

ABSTRACT

The main purpose of this paper is the project and construction of an experimental arrangement to perform the electrodeposition of thin metallic layers on conductive surfaces. The equipment consists of a voltage source designed to operate on the continuous and pulsed modes, installed inside a cabinet equipped with exhaust system. The electrical tests have shown that in continuous mode, the source has an output voltage ranging from 1.3 V to 12 V, whereas in pulsed mode the average values of the measured voltages increase from 0 V to 4.23 V with the increasing of the duty cycle. The thin film electrodeposition processes showed the good functioning of the equipment. The equipment had deposition rates of 3.63 nm per minute for when operating in continuous mode and 5.16 nm per minute when operating in the pulsed mode with a 99.97% duty cycle. Two electronic circuits, an instrumentation amplifier and a high pass filter were projected, built and tested electronically in order to prove the functionality of the equipment developed. The electrodeposition equipment proved to be efficient when the film deposition processes were analyzed in relation to substrates used in printed circuit boards, in both continuous and pulsed modes. The performance of the experimental arrangement demonstrated a feasibility of replacing commercial sources with a less robust method, projected and specifically developed for use in metallization processes.

Keywords: Electrodeposition; Metalization; Deposition of metallic films; Metalization of printed circuit boards.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama em blocos de uma fonte de tensão contínua.....	20
Figura 2 - Retificador de onda completa em ponte.	22
Figura 3 - Forma da onda de tensão aplicada na carga proveniente da ponte de diodos.....	23
Figura 4 - Retificador de onda completa em ponte com capacitor de filtro.	23
Figura 5 - Forma de onda da tensão aplicada na carga proveniente de um retificador com filtro capacitivo.....	24
Figura 6 -Esquemático de circuito regulador de tensão variável com CI LM317.....	25
Figura 7 - Esquemático de circuito regulador de tensão com o CI LM317, capacitores externos e diodos de proteção.	26
Figura 8 - Esquemático de circuito regulador de tensão com CI LM7805.	27
Figura 9 - Esquemático de um circuito de geração de sinal PWM utilizando o CI LM555.....	28
Figura 10 - Formas de ondas geradas pelo circuito da Figura 9.....	29
Figura 11 - Simbologia de um transistor NPN.	30
Figura 12 - Símbolo do Amp Op.	31
Figura 13 - Circuito amplificador de instrumentação.....	32
Figura 14 - Resposta em frequência do filtro passa-alta.	34
Figura 15 - Esquemático do filtro ativo passa-alta.	35
Figura 16 - Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.....	36
Figura 17 - Esquemático do circuito da fonte de tensão contínua e pulsada.....	38
Figura 18 - Arranjo experimental utilizado para a obtenção do $\text{Sn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	40
Figura 19 - Esquema de uma célula de eletrodeposição de estanho em cobre.....	41
Figura 20 - Arranjo experimental para a eletrodeposição de estanho utilizando fonte DC comercial.	42
Figura 21 - Setup projetado e fabricado para metalização de substratos em placas de circuito impresso.....	43
Figura 22 - Pontos de medição das espessuras.	44
Figura 23 - Esquemáticos dos pontos de medidas de espessura nas placas de teste.	44
Figura 24 - Esquemático do circuito amplificador de instrumentação projetado.....	46
Figura 25 - Esquemático do circuito filtro passa-altas projetado.	47
Figura 26 - Aplicação de polímero fotossensível e preparação para o processo de spin coating.	48
Figura 27 - Processo térmico para remoção dos solventes do polímero fotossensível.....	48

Figura 28 - Preparação do conjunto fotolito-substrato para exposição à radiação UV - fotolitografia.	49
Figura 29 - Revelação do padrão gravado por fotolitografia.....	49
Figura 30 - Processo de corrosão química dos filmes metálicos (estanho e cobre).	50
Figura 31 - Remoção da camada polimérica responsável pela proteção dos filmes metálicos das trilhas e ilhas quando da corrosão química.	51
Figura 32 - Layout da fonte de tensão contínua/pulsada desenvolvida para compor o setup de eletrodeposição.	53
Figura 33 - Fotolito - layout do circuito e desenho de orientação da montagem dos componentes.	53
Figura 34 - Corrosão química dos filmes de estanho e cobre.....	54
Figura 35 - Remoção da camada polimérica após processo de corrosão química dos filmes metálicos.....	55
Figura 36 - PCI do setup com as trilhas estanhadas e componentes inseridos e soldados.	55
Figura 37 - Preparação para testes elétricos da fonte de tensão do METALIZE.	56
Figura 38 - Sinal de saída da fonte contínua do setup regulada para fornecer tensão mínima.	57
Figura 39 - Sinal de saída da fonte contínua do setup regulada para fornecer tensão máxima.	57
Figura 40 - Sinal da saída da fonte contínua do setup na máxima capacidade.....	58
Figura 41 - Sinal de saída da fonte de tensão pulsada com ciclo de trabalho ajustado em 25%.	59
Figura 42 - Sinal de saída da fonte de tensão pulsada com ciclo de trabalho ajustado em 50 %.	59
Figura 43 - Sinal de saída da fonte de tensão pulsada com ciclo de trabalho ajustado em 75 %.	60
Figura 44 - Sinal de saída da fonte de tensão pulsada com ciclo de trabalho ajustado em 99,97 %.	60
Figura 45 - Formação do acetato de estanho.	62
Figura 46 - Filmes de estanho depositados utilizando-se fonte de tensão comercial em modo contínuo, com densidade de corrente de 30 mA e diferentes tempos de processo.....	63
Figura 47 - Depósito de estanho em placa de face única (60 minutos).	65
Figura 48 - Filmes de estanho depositados utilizando-se o setup desenvolvido em modo contínuo, com densidade de corrente de 30 mA e diferentes tempos de processo.....	65

Figura 49 - Filmes de estanho depositados utilizando-se o setup desenvolvido em modo pulsado, com ciclo de trabalho de 50 %, densidade de corrente de 30 mA, e diferentes tempos de processo.	67
Figura 50 - Filmes de estanho depositados utilizando-se o setup desenvolvido em modo pulsado, com tempo de deposição de 60 min., densidade de corrente de 30 mA, e diferentes ciclos de trabalho.	68
Figura 51 - Layout do circuito amplificador de instrumentação (visualizado no software Proteus Design Suite).	70
Figura 52 - Fotelito do Amplificador de instrumentação (negativo).....	70
Figura 53 - Fotelito do desenho dos componentes do amplificador de instrumentação (espelhado e negativo).	71
Figura 54 - Representação 3D do circuito amplificador de instrumentação.	71
Figura 55 - PCI do circuito amplificador de instrumentação.	72
Figura 56 - Tensão de saída para o ganho máximo do amplificador de instrumentação.	73
Figura 57 - Rejeição de modo comum do Amplificador.	74
Figura 58 - Layout do circuito Filtro ativo passa-altas (visualizado no software Proteus Design Suite).	75
Figura 59 - Fotelito do circuito e do desenho de componentes do filtro ativo passa-altas (negativo).....	75
Figura 60 - Representação 3D do circuito filtro ativo passa-altas.....	76
Figura 61 - PCI do circuito filtro passa-altas.....	76
Figura 62 - Curva de resposta em frequência (ganho normalizado versus frequência, kHz) do filtro ativo passa-altas.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos de eletrodeposição realizados com fonte comercial e com o setup fabricado.	39
Tabela 2 - Valores de tensão nos eletrodos da célula e corrente drenada pelos processos.	61
Tabela 3 - Espessuras e taxa de deposição das camadas de estanho obtidas utilizando-se fonte comercial com corrente de 30 mA _{DC}	64
Tabela 4 - Espessuras e taxa de deposição das camadas de estanho obtidas utilizando-se o setup fabricado operando no modo contínuo.	66
Tabela 5 - Espessuras e taxa de deposição das camadas de estanho obtidas utilizando-se o setup fabricado em modo pulsado, com ciclo de trabalho 50 % e diferentes tempos de processo.	67
Tabela 6 - Espessuras e taxa de deposição das camadas de estanho obtidas utilizando-se o setup fabricado em modo pulsado, com tempo de deposição fixo e diferentes ciclos de trabalho.	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Resistência, em ohms
A	Ampère
A _{cm}	Ganho de modo comum
A _d	Ganho diferencial
A _{adj}	Terminal de ajuste
AmpOp	Amplificador operacional
A _v	Ganho de tensão
CC	Corrente contínua
CI	Circuito integrado
CMRR	Tensão de modo comum
F	Unidade de capacitância, Farad
<i>f_c</i>	Frequência de corte, em Hz
I _{adj}	Corrente de terminal de ajuste
I _b	Corrente de base
Hz	Unidade de medida do sistema internacional para frequência.
L	Litro(s)
ms	Milisegundos
R _b	Resistor de base
T _{alto}	Tempo de sinal ativo
T _{baixo}	Tempo em que o sinal fica em nível baixo.
V	Voltagem ou potencial, em volts
V _{be(sat)}	Tensão entre base e emissor no modo saturação (modo de chaveamento).

V_{eficaz}	Tensão eficaz
V_{in}	Tensão de entrada
V_{m}	Tensão média
V_{REF}	Tensão de referência
V_{rms}	Raiz do valor quadrático da tensão média (do inglês root mean square) ou valor eficaz
V_{out}	Tensão de saída
V_{p}	Tensão de pico
V_{pp}	Tensão de pico a pico
PWM	Modulação por largura de pulso (do inglês Pulse-Width Modulation)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivo Geral.....	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	Eletrodeposição de metais e características dos revestimentos de estanho: definições, características, fatores de influência.	18
3.1.1	Características do processo de eletrodeposição e fatores de influência.	18
3.1.2	Características dos revestimentos metálicos com estanho	19
3.2	Aportes teóricos do projeto de uma fonte pulsante e contínua regulável	19
3.2.1	Fonte de tensão contínua	19
3.2.2	Circuito retificador	21
3.2.3	Circuito regulador de tensão	24
3.2.4	Circuito oscilador de onda quadrada - sinal de PWM	27
3.2.5	Transistor operando como dispositivo de chaveamento	29
3.3	Aportes teóricos dos circuitos de teste desenvolvidos.....	30
3.3.1	Amplificador de instrumentação	30
3.3.2	Filtro ativo passa-alta	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	Fase 1	36
4.2	Fase 2	39
4.2.1	Preparação e limpeza das amostras	39
4.2.2	Preparação do eletrólito de acetato de estanho	40
4.2.3	Eletrodeposição dos filmes de estanho	41
4.3	Fase 3	45

4.3.1	Amplificador de instrumentação	45
4.3.2	Filtro ativo passa-altas	46
4.3.2	Fabricação das PCIs dos circuitos eletrônicos	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1	Projeto, fabricação e testes elétricos da fonte de tensão do <i>setup</i>	52
5.1.1	Projeto.....	52
5.1.2	Fabricação.....	54
5.1.3	Testes elétricos da fonte de tensão contínua/pulsada.....	56
5.2	Caracterização dos filmes de estanho obtidos	61
5.2.1	Preparação do eletrólito de acetato de estanho	61
5.2.2	Filmes obtidos utilizando-se fonte comercial em modo contínuo	62
5.2.3	Filmes obtidos utilizando-se o <i>setup</i> construído em modo contínuo.....	65
5.2.4	Filmes obtidos utilizando-se o <i>setup</i> construído em modo pulsado	66
5.3	Circuitos eletrônicos desenvolvidos para teste do equipamento	69
5.3.1	Amplificador de instrumentação	69
5.3.1.1	Projeto.....	69
5.3.1.2	Fabricação.....	72
5.3.1.3	Caracterização elétrica do circuito.....	72
5.3.2	Filtro ativo passa-altas	74
5.3.2.1	Projeto.....	74
5.3.2.2	Fabricação.....	76
5.3.2.3	Caracterização elétrica do circuito.....	77
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	78
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
8	APÊNDICE.....	83

1 INTRODUÇÃO

O processo de eletrodeposição de metais iniciou-se com o estudo das relações entre a Eletrônica e a Química, as quais possuem um papel significativo na evolução científica e tecnológica. É uma técnica de origem eletroquímica que permite a adição de um revestimento metálico a uma peça de metal colocando tal metal como polo negativo de um circuito de eletrólise e está presente desde as latas de alimentos que consumimos todos os dias, fabricadas através da utilização de metais recobertos por uma camada eletrodepositada de zinco (*Zn*) ou estanho (*Sn*), em equipamentos médicos e mecânicos (MARTINS, 1996), e nos dias atuais é uma técnica fundamental para a realização de interconexões em *chips* pela tecnologia através de furos no silício (*through-silicon-via* - TSV), técnica essa que permite o encapsulamento 3D utilizado em circuitos integrados de última geração.

Tradicionalmente, a eletrodeposição foi utilizada com a intenção de modificar as propriedades químicas e mecânicas de superfícies. Uma camada de um metal como o cromo (*Cr*), por exemplo, pode ser depositada sobre um metal menos nobre como o cobre (*Cu*), a fim de protegê-lo ou de aumentar seu valor comercial.

A célula de eletrodeposição pode ser controlada a partir de uma fonte de tensão e corrente elétrica contínua e/ou pulsada, o que faz desta uma técnica simples, de baixo custo, que pode ser aplicada em laboratórios não tão sofisticados, já que não necessita de muitos equipamentos e grandes aparatos tecnológicos. Em virtude disso, uma das aplicações da técnica de grande potencial inovador é a sua implementação no revestimento metálico de placas de circuitos impressos (PCIs): um método simples e que permite a fabricação de circuitos de maneira prática.

Ainda, a partir da técnica, é possível realizar a proteção contra a oxidação da camada condutora das PCIs. Esse procedimento geralmente é realizado com a adição de um revestimento de estanho sobre a superfície do filme de cobre, o que possibilita uma maior vida útil das trilhas e ilhas que compõem as placas e melhora o acabamento e a finalização, com incrível facilitação do processo de soldagem quando da montagem dos circuitos impressos.

Além de ser um processo muito utilizado, a eletrodeposição possui extrema importância devido à grande quantidade de vantagens que oferece: a deposição de camadas extremamente finas (espessura da ordem de 1 nm – de metais puros ou não); o revestimento

de peças de diferentes tamanhos e formas; e, principalmente, o baixo custo de implementação, construção e produção. Estas vantagens se relacionam diretamente à qualidade dos depósitos obtidos, cujas características são a condutividade elétrica, a dureza, a resistência à corrosão, de acordo com desejado (FIORI, 2000).

Em razão da grande funcionalidade dessa técnica, o presente trabalho teve como intuito principal desenvolver um arranjo experimental (*setup*) para a execução de processos de eletrodeposição de metais, viabilizando conseqüentemente, a fabricação de protótipos de PCI's com trilhas e ilhas protegidas da oxidação pela execução de processo de eletrodeposição de filme de estanho sobre a superfície metálica de placas de circuito impresso. A técnica possibilita a confecção de placas de forma simples, prática e com custo reduzido, apresentando qualidade semelhante àquelas fabricadas em processos industriais.

Para tanto, foi projetado e construído um equipamento para metalização de substratos em placas de circuito impresso, comprovando assim a funcionalidade da técnica. Por fim, o equipamento desenvolvido foi testado em três casos distintos de fabricação de PCIs utilizando substratos obtidos com o uso da técnica. Foram fabricadas e testadas as PCIs da fonte de tensão e corrente elétrica contínua/ pulsada do próprio *setup* de eletrodeposição; de circuitos amplificadores de instrumentação; e de filtros ativos passa-alta.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um *setup* para a execução de processos de eletrodeposição de metais sobre substratos em placas de circuito impresso para viabilizar, conseqüentemente, a fabricação de PCI's com trilhas e ilhas protegidas da oxidação pela deposição de finas camadas de estanho sobre o filme de cobre e garantir a melhor soldabilidade quando da etapa de montagem das mesmas.

2.2 Objetivos específicos

- Projetar os circuitos eletrônicos da fonte de tensão e corrente contínua/pulsada que constitui o próprio *setup*, de amplificadores de instrumentação, e de filtros ativos passa-alta.
- Construir a estrutura do equipamento para metalização de substratos.
- Aplicar o método de eletrodeposição e realizar a caracterização física dos depósitos obtidos.
- Utilizar o processo/equipamento desenvolvido para fabricar as placas de circuito impresso projetadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Eletrodeposição de metais e características dos revestimentos de estanho: definições, características, fatores de influência.

3.1.1 Características do processo de eletrodeposição e fatores de influência.

O processo de eletrodeposição foi tradicionalmente utilizado com a intenção de modificar as propriedades químicas e mecânicas de superfícies, não utilizando equipamentos sofisticados, pois o processo se realiza no interior de uma solução, que pode ser facilmente manipulada em qualquer laboratório, com a necessidade de apenas um meio de realização e reagentes químicos (MARTINS, 1996).

Dessa forma, a técnica é um campo interdisciplinar entre a Química e a Eletrônica, e trata das transformações químicas produzidas por correntes elétricas e da produção de tais correntes por meio da transformação de substâncias químicas. É utilizada atualmente na produção de filmes finos e multicamadas, os quais são aplicados na fabricação de contatos metálicos em dispositivos semicondutores (FIORI, 2000).

A imersão de um metal numa solução eletrolítica acarreta o estabelecimento de uma diferença de potencial entre a face sólida (metal) e a líquida (solução). Este sistema, quando constituído por um metal puro, ou seja, formado pelo metal e por uma solução vizinha a este, que contém os íons deste num estado de oxidação bem definido, tende a evoluir espontaneamente até atingir um estado de equilíbrio, o que estabelece uma diferença de potencial entre as camadas de cargas elétricas de sinais opostos, que existem na interface metal-solução (GATTI, 1991). Isto é, quando o potencial dos íons metálicos for maior do que os íons metálicos presentes na solução, haverá a tendência espontânea a passagem dos íons pela solução e a superfície do metal ficará com um excesso de carga elétrica negativa, pois os elétrons não podem existir livres na solução e permanecem no metal.

MARTINS (1996) observou que a eletrodeposição poderia ser controlada a partir de uma fonte de tensão/corrente elétrica visando modificações nas características dos depósitos obtidos. Mas o fenômeno não é apenas elétrico, é também uma reação química, e as afinidades entre os íons presentes na solução influenciarão o resultado final. Estas afinidades afetarão a taxa de transferência de elétrons entre a superfície do substrato e os íons do

material que será depositado presentes na solução e, conseqüentemente, influenciarão o processo de crescimento do depósito.

CECCONELO (2006) constatou que as características morfológicas e a porosidade do recobrimento variam em função dos parâmetros da eletrodeposição, como, por exemplo, a densidade de corrente. PECCEQUILLO (2010) identificou que os revestimentos obtidos por eletrodeposição são bastante aderentes, desde que tenha sido realizado um bom pré-tratamento de limpeza do substrato, haja vista que peças bem desengraxadas e decapadas não apresentam, em geral, problemas de aderência.

3.1.2 Características dos revestimentos metálicos com estanho

Os revestimentos metálicos são usados geralmente quando se deseja proteção contra corrosão/oxidação, aumento da resistência ao desgaste e um acabamento mais brilhante. O processo de eletrodeposição com estanho é comumente utilizado para este fim devido a obtenção de revestimentos muito finos e uniformes.

Embora possua baixa resistência mecânica, a resistência a corrosão por ácidos fracos e a não toxidez tem dado ao estanho uma grande variedade de aplicações. Ao revestir aço ou cobre, o estanho age como uma barreira química para as reações que poderiam ocorrer entre o metal base e o meio, como a oxidação, por exemplo. Na atmosfera, em contato com os constituintes do ar o estanho permanece praticamente inalterado, exceto quando exposto a tais condições por um longo período. A presença de oxigênio cria um filme óxido (SnO_2) que protege a superfície do metal (GATTI, 1991).

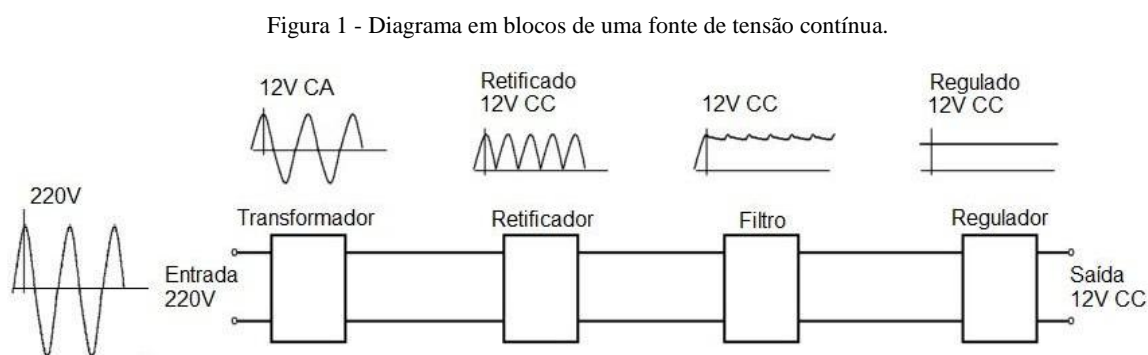
Em razão de suas características mecânicas e superficiais, camadas eletrodepositadas de estanho são utilizadas na confecção e proteção de embalagens por conservarem integralmente as substâncias nestas armazenadas.

3.2 Aportes teóricos do projeto de uma fonte pulsante e contínua regulável

3.2.1 Fonte de tensão contínua

Uma fonte de tensão contínua é um equipamento eletrônico que mantém uma tensão constante entre seus terminais. Nestes termos, uma fonte de tensão é um dispositivo feito para ser capaz de manter suas tensões nominais de forma independente dos dispositivos a elas conectados.

As fontes de tensão podem ser divididas em três categorias: baterias, geradores e fontes de alimentação. Conforme observa-se no diagrama da Figura 1, as fontes de alimentação usam os processos de retificação - conversão de uma tensão com variação no tempo em uma tensão de amplitude fixa; de filtragem - redução da ondulação da forma de onda entregue à carga; e regulação de tensão de saída.



Fonte: Adaptado de SOUZA (2016).

Para garantir o funcionamento normal da maioria dos aparelhos eletrônicos, necessita-se geralmente de alimentá-lo com uma fonte de tensão constante. Nos casos em que a corrente varia durante o funcionamento, como em amplificadores de áudio e rádios, a fonte deve ser estabilizada de modo que, mesmo com a ocorrência dessas variações de corrente, a tensão seja mantida.

Processos simples de deposição metálica por eletrodeposição ou ainda de laboratório para metalização de pequenos objetos, entretanto, exigem o emprego de fontes de corrente contínua com características especiais; em que o importante não é a tensão, mas sim a intensidade da corrente. Uma vez que, a intensidade da corrente determina a velocidade de deposição do metal durante o processo (BRAGA,2013).

De tal modo, é muito mais interessante para o processo de deposição de metais o uso de uma fonte que possa manter constante a corrente no dispositivo que está sendo alimentado,

por exemplo, uma célula de eletrodeposição, o que exige uma configuração especial de circuito.

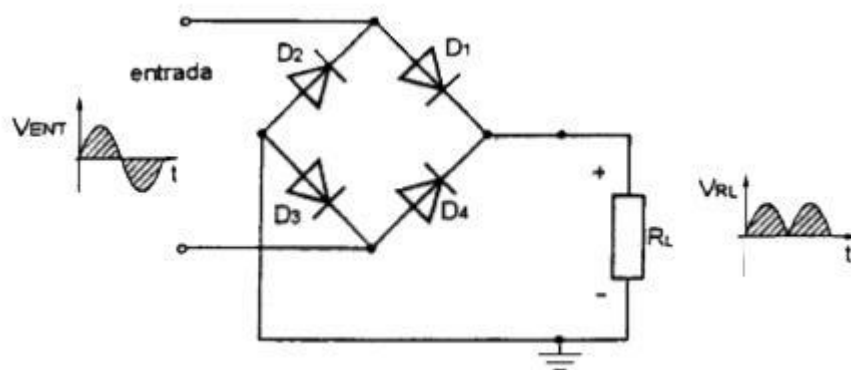
Neste caso, utiliza-se uma fonte de corrente constante, ou seja, um circuito cuja corrente não varia de intensidade, mesmo que ocorram variações das condições de alimentação e na própria carga. Tal circuito pode ser usado com eficiência na cromeação, niquelação, douração, prateação ou cobertura de pequenos objetos com eficiência.

Conforme BRAGA (2013) uma vantagem importante a ser considerada na fonte é seu isolamento da rede de energia através de um transformador, o que a torna totalmente segura. Deve ser possível tocar em qualquer parte do circuito que alimenta a célula, mesmo com ela ligada, sem que exista qualquer perigo de choque elétrico.

3.2.2 Circuito retificador

Os circuitos retificadores são empregados para transformar corrente alternada em corrente contínua. Como mostrado na Figura 2, a retificação de onda completa em ponte utiliza quatro diodos e entrega à carga uma onda completa, isto é, entrega os dois semiciclos, sendo que o semiciclo negativo é invertido, ou seja, é tornado positivo. Isso acontece porque a tensão positiva (primeiro semiciclo), no terminal de entrada superior, configura-se com as condições de polarização do diodo D1- anodo positivo em relação ao catodo (polarização direta), do diodo D2 - catodo positivo em relação ao anodo (polarização inversa), do diodo D3 - catodo negativo em relação ao anodo (polarização direta) e do diodo D4 - anodo negativo em relação ao catodo (polarização inversa), o que faz com que os diodos D1 e D3 estejam em condução e os diodos D2 e D4 em bloqueio. A corrente flui no circuito no primeiro semiciclo de forma a levar à carga uma tensão positiva (SEDRA; SMITH, 2005).

Figura 2 - Retificador de onda completa em ponte.

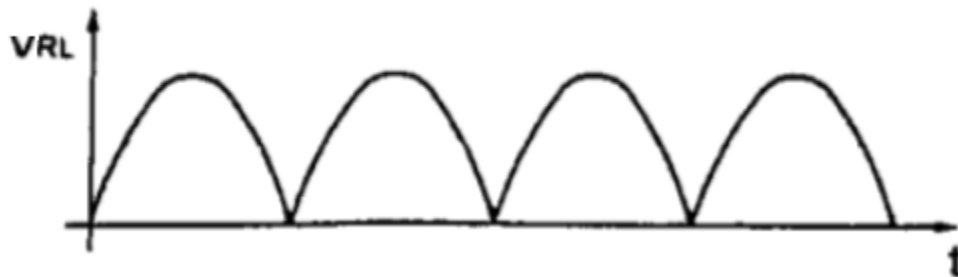


Fonte: SENAI (2002).

No segundo semiciclo, ocorre uma inversão da polaridade dos terminais que se configuram com as condições de polarização do diodo D1 - anodo negativo em relação ao catodo (polarização inversa), do diodo D2 - catodo negativo em relação ao anodo (polarização direta), do diodo D3 - catodo positivo em relação ao anodo (polarização inversa), e do diodo D4 - anodo positivo em relação ao catodo (polarização direta). O que leva os diodos D2 e D4 a condução e os diodos D1 e D3 ao bloqueio. Assim, obtemos um circuito elétrico fechado por meio de D2 e D4 que aplica a tensão de entrada sobre a carga no mesmo sentido que no primeiro semiciclo (SEDRA; SMITH, 2005).

A forma de onda observada sobre a carga é contínua e pulsante, como demonstrado na Figura 3, formato este que não é adequado para a alimentação de equipamentos eletrônicos que necessitam de uma forma de uma onda contínua constante ou pura. Consequentemente, faz-se necessário que a tensão de saída do retificador seja tornada o mais constante possível, objetivo que é parcialmente atingido adicionando-se um filtro capacitivo ao circuito.

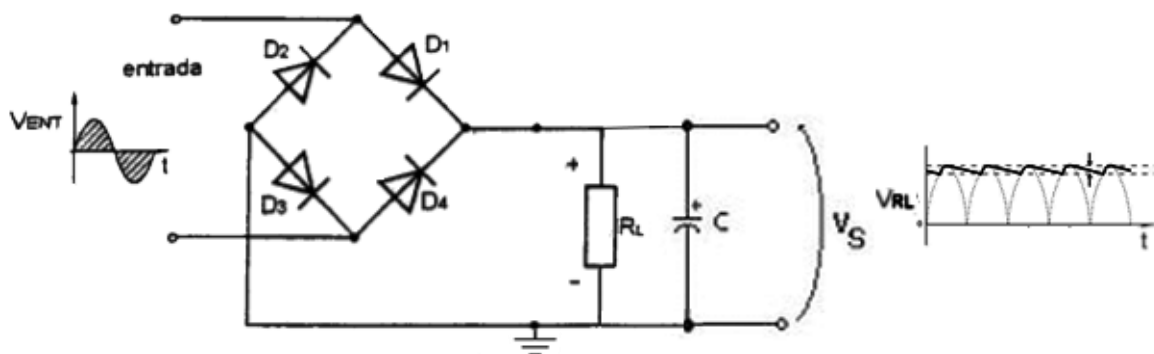
Figura 3 - Forma da onda de tensão aplicada na carga proveniente da ponte de diodos.



Fonte: adaptado de SENAI (2002).

O filtro capacitivo consiste de um capacitor conectado paralelamente ao retificador e à carga, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Retificador de onda completa em ponte com capacitor de filtro.



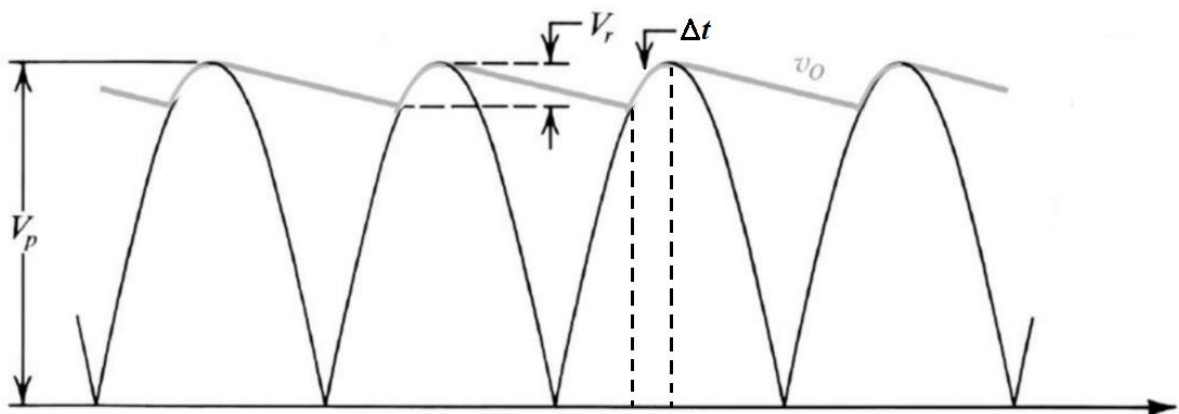
Fonte: adaptado de SOUZA (2016).

O capacitor atua sobre a tensão de saída do circuito retificador aproximando-a, o máximo possível, de uma tensão contínua e constante, reduzindo, conseqüentemente, as ondulações na saída do circuito retificador.

Isto acontece, pois, o capacitor carrega-se até o valor de pico da tensão de saída do retificador e, após atingi-la, os diodos D1 e D3 (Figura 4) tornam-se reversamente polarizados cortando sua condução, neste instante inicia-se um ciclo de descarga do capacitor através da carga, o que faz com que a tensão fornecida para a carga seja atenuada (SEDRA; SMITH, 2005).

O fim do ciclo de descarga do capacitor, assim como o início de um novo ciclo de carga ocorre quando os diodos D2 e D4 são polarizados diretamente e passam a conduzir, o carregamento novamente ocorre até o valor de pico da tensão de saída do retificador, quando os diodos se tornam reversamente polarizados. Os ciclos de carga e descarga descritos repetem-se indefinidamente enquanto o circuito retificador estiver sendo alimentado; os sucessivos carregamentos e descarregamentos fazem com que a forma de onda de tensão aplicada à carga ainda presente, como podemos ver na Figura 5, uma pequena ondulação cuja amplitude de pico a pico é denominada tensão de *ripple* (V_r) (SEDRA; SMITH, 2005). Para reduzir a tensão de *ripple*, tendo na saída uma tensão mais constante, é necessário que a constante de tempo de descarga do capacitor ($T = CR$) seja muito maior que o período da forma de onda aplicada na entrada do retificador (SEDRA; SMITH, 2005).

Figura 5 - Forma de onda da tensão aplicada na carga proveniente de um retificador com filtro capacitivo.



Fonte: adaptado de SOUZA (2016).

3.2.3 Circuito regulador de tensão

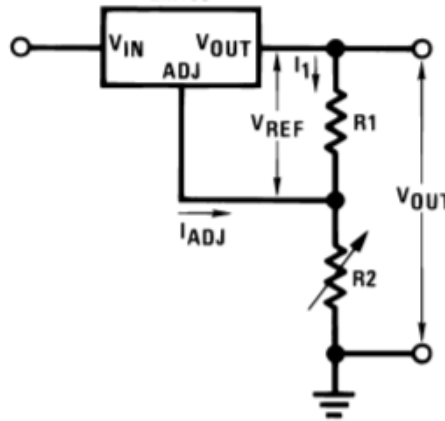
Em uma fonte de alimentação do tipo linear, a tensão de *ripple* observada após a introdução do filtro capacitivo pode ser eliminada com a inserção de um circuito regulador de tensão.

Circuitos reguladores de tensão variáveis são disponíveis comercialmente e possuem três pinos: Pino 1 (ADJ) - pino de ajuste; Pino 2 (Vout) - saída; e Pino 3 (Vin) - entrada. O esquemático da Figura 6 mostra que a tensão constante na saída do circuito pode ser regulada pelo ajuste do potenciômetro R2. A tensão de saída do circuito é calculada pela Equação 1:

$$V_{out} = V_{ref} \left(\frac{R2}{R1} + 1 \right) + I_{adj} \times R2 \quad (1)$$

Onde V_{ref} é de 1.25 V e I_{adj} é uma corrente constante de 50 μ A do pino de ajuste.

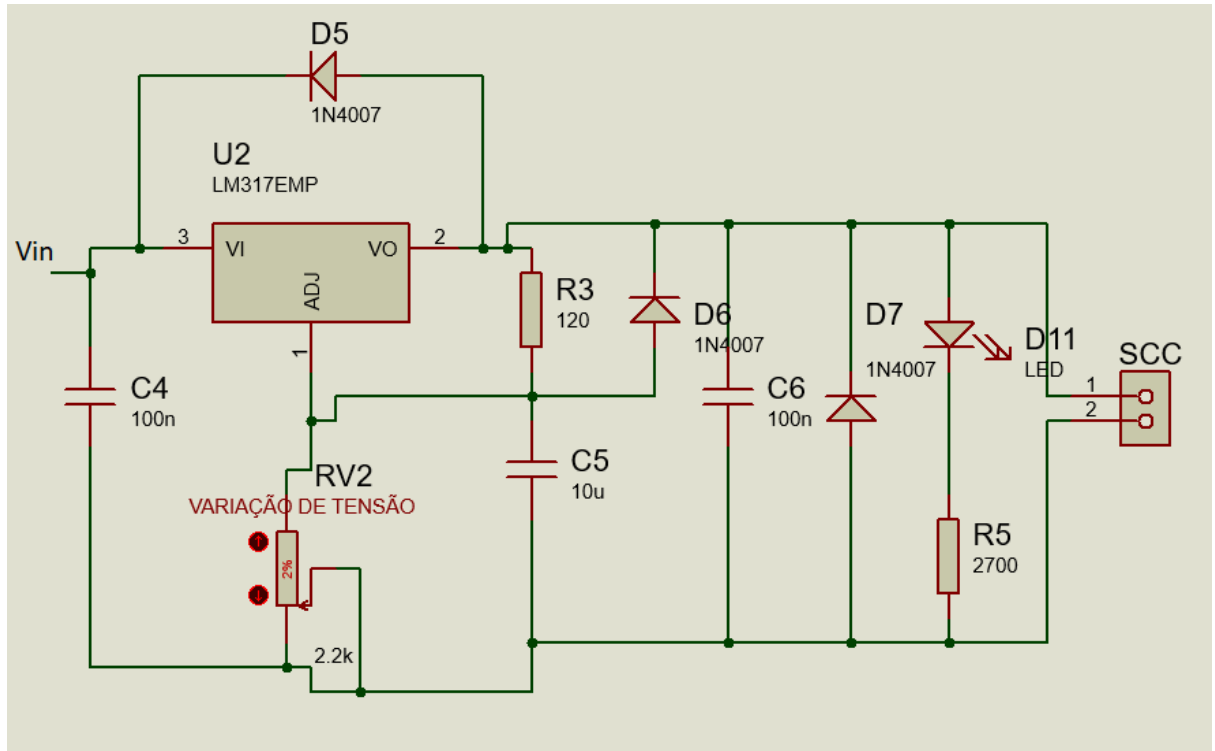
Figura 6 -Esquemático de circuito regulador de tensão variável com CI LM317.



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2016).

Quando capacitores externos são usados, necessariamente também serão usados diodos de proteção para evitar que os capacitores descarreguem na saída do regulador (TEXAS INSTRUMENTS, 2003). A Figura 7 mostra um circuito com o regulador LM317 utilizando capacitores externos e respectivos diodos de proteção.

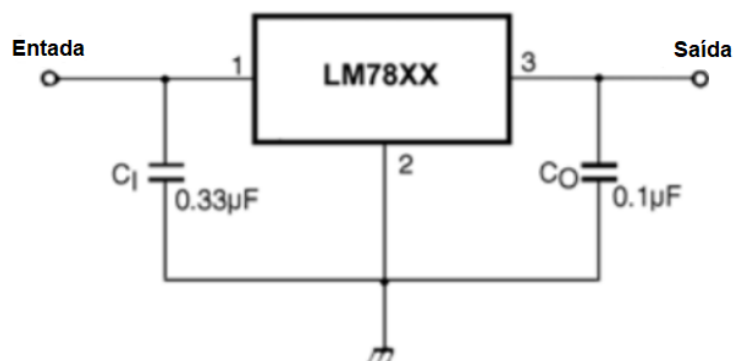
Figura 7 - Esquemático de circuito regulador de tensão com o CI LM317, capacitores externos e diodos de proteção.



Fonte: elaborado pelas autoras.

A regulação de tensão também pode ser feita utilizando-se regulador de tensão com saída fixa conforme mostrado no esquemático da Figura 8. Utilizando-se o CI LM7805, para uma tensão de entrada DC máxima de 30 V o circuito mantém a tensão saída constante em um valor típico de 5V. O capacitor C_I é necessário sempre que o circuito regulador é localizado longe do filtro da fonte de alimentação, enquanto que o capacitor C_O é importante para manter estável a tensão de saída.

Figura 8 - Esquemático de circuito regulador de tensão com CI LM7805.



Fonte: FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION (2005).

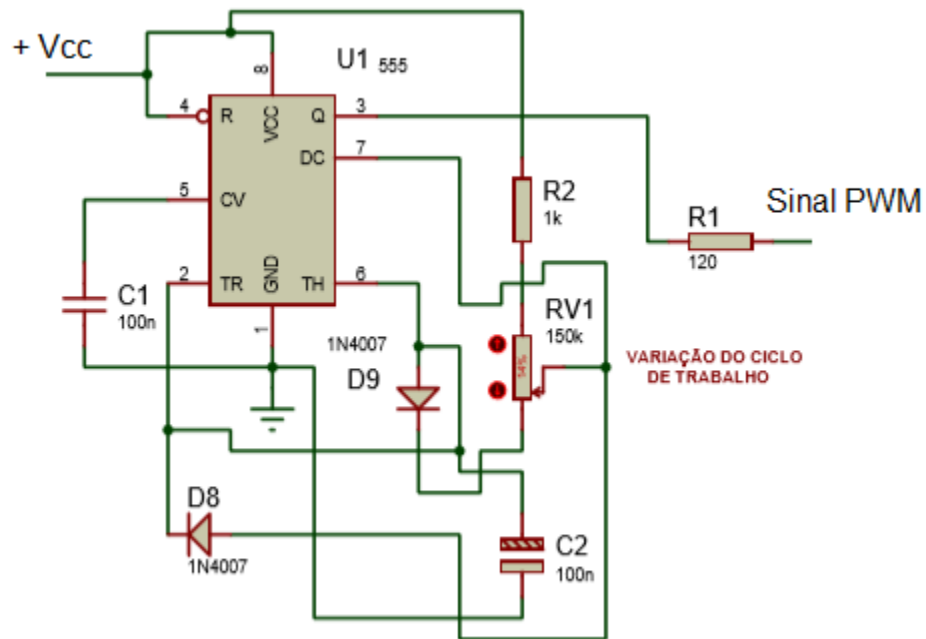
3.2.4 Circuito oscilador de onda quadrada - sinal de PWM

Para criar uma tensão pulsante, comumente se utiliza osciladores de onda quadrada. Os osciladores são circuitos que produzem um sinal repetitivo sem a necessidade de aplicação de um sinal externo. Esses sinais podem ter diversos formatos (os mais comuns são os senoidais e quadrados).

O CI LM555 configurado para funcionar no modo astável é um circuito oscilador comumente empregado para gerar ondas quadradas. Esse CI nos permite gerar um sinal com largura de pulso modulada (PWM), utilizado por exemplo para determinar o ângulo de rotação de motores e para ajustar o brilho em monitores LCD.

No circuito gerador de sinal PWM da Figura 9, o capacitor C2 é carregado através dos resistores R2 e RV1 e descarrega-se através de RV1. Assim, o ciclo de trabalho (*duty cycle*) do sinal pode ser precisamente ajustado pela relação entre esses dois resistores. O capacitor carrega-se e descarrega-se entre $\frac{1}{3} V_{CC}$ e $\frac{2}{3} V_{CC}$, enquanto que o tempo de descarga e consequentemente a frequência são independentes da fonte de tensão.

Figura 9 - Esquemático de um circuito de geração de sinal PWM utilizando o CI LM555.



Fonte: elaborado pelas autoras.

As formas de onda geradas pelo circuito da Figura 9 são mostradas na Figura 10. O tempo de carga corresponde ao nível alto da tensão de saída e pode ser calculado utilizando-se a Equação 2:

$$t_1 = 0,693 [(R2 + RV1_a) + RV1_b] C2 \quad (2)$$

Onde $RV1_a$ é a parcela de $RV1$ conectada em série com $R2$ e $RV1_b$ corresponde a parcela complementar. O tempo de descarga corresponde ao nível baixo da tensão de saída cujo valor é calculado pela Equação 3:

$$t_2 = 0,693(RV1_b)C2 \quad (3)$$

Assim, o período total pode ser obtido pela soma de t_1 e t_2 , conforme demonstrado na Equação 4:

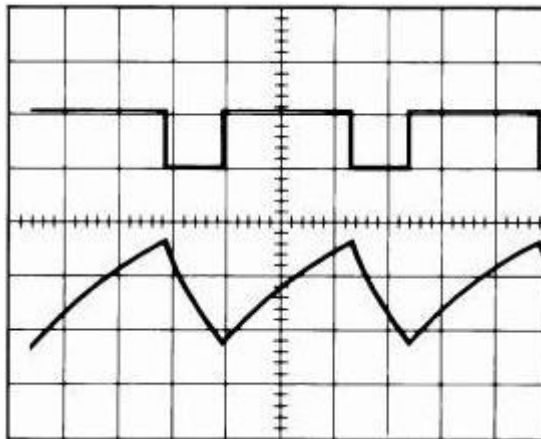
$$T = t_1 + t_2 = 0,693(R2 + RV1_a + 2RV1_b)C2 \quad (4)$$

A frequência é calculada pela Equação 5:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1,44}{(R2+RV1_a+2RV1_b)C2} \quad (5)$$

Na Figura 10, a seguir, é possível visualizar as formas de ondas geradas pelo circuito da Figura 9.

Figura 10 - Formas de ondas geradas pelo circuito da Figura 9.



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2015).

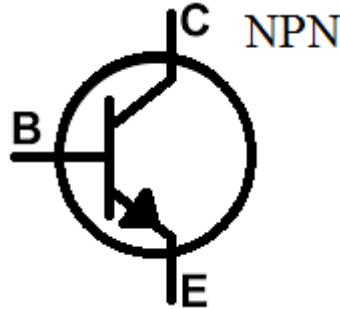
3.2.5 Transistor operando como dispositivo de chaveamento

O transistor consiste em um dispositivo eletrônico formado por duas junções PN construídas em um cristal de silício convenientemente dopado para formar três camadas, podendo ser duas de material do tipo N e uma do tipo P - transistor NPN (Figura 11), ou duas de material tipo P e uma de material tipo N - transistor PNP (FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, 2000).

Um transistor de junção bipolar pode operar como uma chave eletrônica se polarizado de forma a estar nas regiões de corte ou de saturação. Polarizando-se as junções emissor-base e coletor-base de forma direta o transistor estará saturado e operando como um curto - “uma chave fechada, entre o coletor e o emissor” - fazendo com que a tensão entre coletor e emissor (V_{CE}) seja aproximadamente igual a zero. Entretanto, quando as junções emissor-base e coletor-base estiverem polarizadas de forma reversa o transistor estará no corte, operando

como um circuito aberto - “uma chave aberta, entre o coletor e o emissor” - fazendo com que V_{CE} aproxime-se de V_{CC} .

Figura 11 - Simbologia de um transistor NPN.



Fonte: FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION (2000).

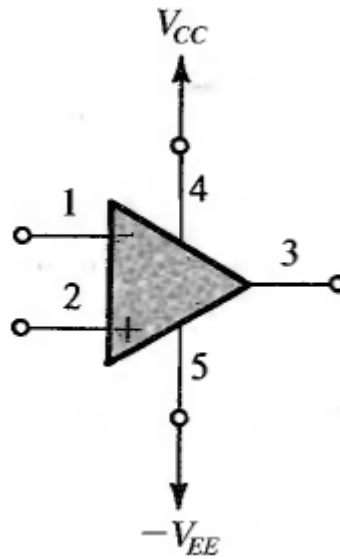
3.3 Aportes teóricos dos circuitos de teste desenvolvidos

3.3.1 Amplificador de instrumentação

Ricos em aplicações, os amplificadores operacionais, ou AmpOps, estão presentes nos sistemas de controle e instrumentação industrial, nos equipamentos de telecomunicações e áudio, nos sistemas de aquisição de dados etc. Uma das razões da popularidade do AmpOp é a sua versatilidade, além de o CI AmpOp possuir características muito próximas das que supomos ideais, estes possuem um baixo custo de implementação, alta confiabilidade e facilidade de aplicação (PERTENCE, 2015).

Conforme observa-se na Figura 12, o AmpOp possui três terminais do ponto de vista do sinal, dois terminais de entrada e um terminal de saída. Os terminais 1 e 2 são entradas e o terminal 3, a saída. Quase todos os CIs AmpOp necessitam de uma fonte *cc* simétrica para sua alimentação, os terminais 4 e 5 saem do encapsulamento do AmpOp para ser conectados as tensões positivas V_{CC} e negativa $-V_{EE}$ (SEDRA, 2005).

Figura 12 - Símbolo do Amp Op.



Fonte: SEDRA (2005).

Dentre as características de um AmpOp ideal, destacam-se a impedância de entrada infinita; a impedância de saída nula; ganho de modo comum nulo ou, equivalente, rejeição de modo comum infinita; ganho de malha aberta infinito e largura de faixa da resposta de frequência infinita (SEDRA, 2005).

O ganho de tensão de um amplificador conceitua-se como o fator pelo qual a tensão de entrada é multiplicada a fim de se obter a tensão de saída do dispositivo. A Equação 6 mostra a fórmula de cálculo, onde A_v equivale ao ganho de tensão.

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \quad (6)$$

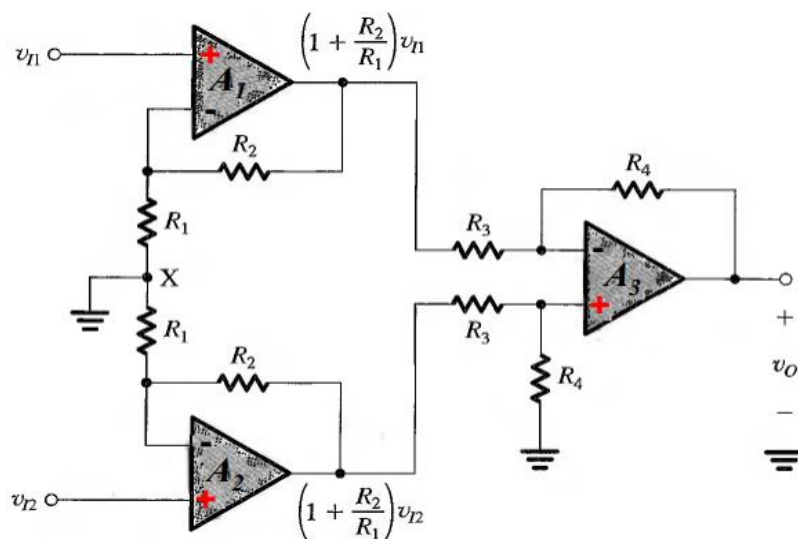
Os amplificadores operacionais possuem três principais modos de realimentação: sem realimentação, também conhecida como malha aberta, em que o ganho de tensão é uma característica do circuito medida e informada pelo fabricante no datasheet do dispositivo; realimentação positiva, em que a realimentação é feita na entrada não-inversora e realimentação negativa, na qual o ganho é controlado e a realimentação é feita na porta inversora.

Através de um arranjo de AmpOps é possível a confecção de circuitos Amplificadores de Instrumentação, os quais apresentam características bastante distintas quando comparados a um AmpOp isolado (AMARAL, 2015). Tais circuitos, por sua vez, possuem aplicações um pouco mais limitadas, se comparadas aos AmpOps tradicionais/diferenciais, contudo, podem desempenhar funções com resultados superiores em qualidade. Em outras palavras, um

AmpOp é extremamente flexível, e pode se adequar a maioria das necessidades através da realimentação. Enquanto o amplificador de instrumentação atuará somente como amplificador em uma faixa específica e bem delimitada de ganho.

A proposta do amplificador de instrumentação é resolver o problema da baixa resistência de entrada do amplificador diferencial, utilizando AmpOps adicionais seguidores de tensão isola-se os terminais de entrada, e além disso pode-se obter um ganho de tensão adicional. A Figura 13 mostra um circuito amplificador de instrumentação construído a partir de dois amplificadores não-inversores e um amplificador diferencial. Esta organização possibilita que a resistência de entrada vista por cada uma das duas fontes seja muito alta, e que os seguidores de tensão com ganho possam aliviar o segundo estágio, permitindo o seu ajuste para realizar as funções de diferença e de rejeição de sinais de modo comum (SEDRA, 2005).

Figura 13 - Circuito amplificador de instrumentação.



Fonte: SOUZA (2016).

No circuito da Figura 13 o ganho diferencial (A_d) do amplificador pode ser calculado pela Equação 7:

$$A_d = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (7)$$

O amplificador de instrumentação é provavelmente uma das aplicações mais especiais dos AmpOps, porém vale salientar que nem todo amplificador presente em um instrumento de medição necessariamente é um amplificador de instrumentação. Isto dependerá muito das

necessidades do projeto, em especial das características do sinal a ser amplificado e posteriormente processado.

Ao ser aplicado em ambas às entradas (V_{I1} e V_{I2}) do amplificador de instrumentação dois sinais da mesma amplitude, frequência e fase, ou seja, sinais de modo comum, eles devem se cancelar e nenhuma saída deve ocorrer. Na prática, entretanto, um pequeno sinal ainda aparece na saída do amplificador. A capacidade do amplificador em rejeitar estes sinais de modo comum é denominada rejeição de modo comum. Todo amplificador tem esse parâmetro definido como CMRR (Common Mode Rejection Rate) ou taxa de rejeição de modo comum, dada dB e calculada segundo a Equação 8.

$$CMRR_{dB} = 20 \log \left(\frac{\text{Ganho diferencial}}{\text{Ganho de modo comum}} \right) \quad (8)$$

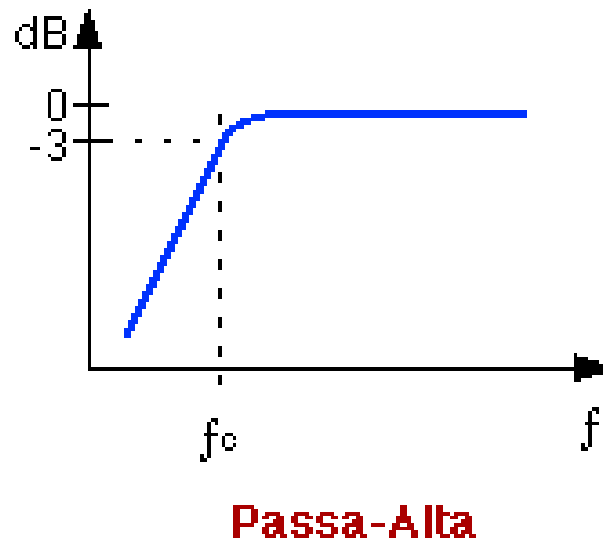
Onde o ganho diferencial (A_d) é obtido da razão entre os sinais de saída (V_o) e de entrada diferencial (V_{Id}), $A_d = \frac{V_o}{V_{Id}}$; enquanto que o ganho de modo comum (A_{cm}) é obtido pela razão entre os sinais V_o e entrada de modo comum (V_{Icm}), $A_{cm} = \frac{V_o}{V_{Icm}}$.

3.3.2 Filtro ativo passa-alta

Filtros são circuitos eletrônicos que têm por função selecionar sinais de entrada dentro de uma determinada faixa de frequência, onde os sinais fora da faixa estabelecida são atenuados. Os filtros podem ser classificados como passivos ou ativos, sendo os passivos constituídos apenas por componentes passivos (resistores, indutores e capacitores) enquanto que os ativos além dos componentes passivos, também possuem em sua composição transistores e/ou amplificadores, que são usados para amplificação de tensão; e bufferização e isolamento do sinal (PERTENCE, 2015).

De maneira geral, os filtros tanto passivos quanto ativos, podem ser classificados como: filtro passa-baixa, filtro passa-alta e filtro passa-faixa. Idealmente, um filtro possuiria uma banda passante que atenuaria completamente todas as frequências fora da mesma, porém, na prática, nenhum filtro apresenta um resultado ideal, e, por consequência, não rejeita todas as frequências fora da faixa desejada. Na Figura 14, é possível visualizar a resposta em frequência típica de um filtro passa-alta.

Figura 14 - Resposta em frequência do filtro passa-alta.



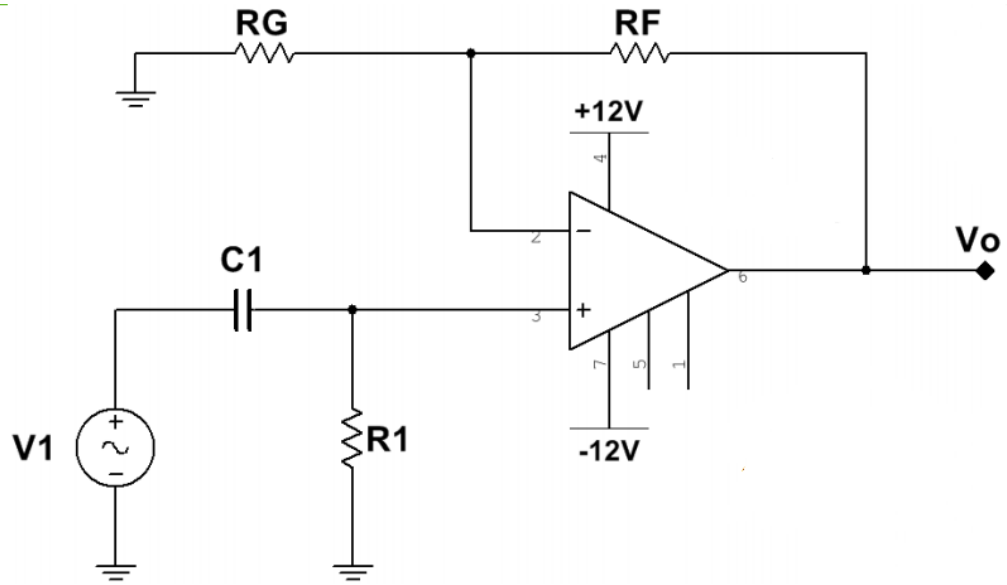
Fonte: PERTENCE (2015).

Um filtro passa-alta é um circuito que permite a passagem somente de sinais de frequência acima da frequência de corte atenua sinais abaixo da mesma, sendo esta a frequência na qual a tensão de saída é reduzida a 0.707 V da tensão de entrada (ou -3 dB). A Equação 9 mostra a fórmula de cálculo da frequência de corte de um filtro ativo passa-alta, onde f_c é a frequência de corte; R , a resistência do resistor; e C , a capacitância do capacitor.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (9)$$

Na Figura 15, é possível visualizar o esquemático de um filtro ativo passa-alta de primeira ordem composto basicamente por uma malha RC conectada à entrada de um AmpOp configurado no modo não inversor. Para sinais de frequências menores que f_c a reatância do capacitor X_C tende a infinito e a tensão no nó conectado a entrada não inversora do AmpOp tende a zero, por outro lado, para sinais de frequências maiores que f_c a reatância do capacitor X_C tende a zero e a tensão na entrada do AmpOp tende a V_I . O sinal na saída do filtro é dada pelo produto entre o sinal presente na entrada não inversora e o ganho do AmpOp.

Figura 15 - Esquemático do filtro ativo passa-alta.



Fonte: SOUZA (2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O componente experimental deste trabalho é composto por três fases como mostra o fluxograma da Figura 16. A primeira relativa à revisão bibliográfica, ao projeto da fonte de tensão, e ao desenvolvimento/fabricação do equipamento para metalização de substratos em placas de circuito impresso; a segunda refere-se à produção e caracterização de filmes de estanho; e a terceira trata do projeto, fabricação e teste dos circuitos amplificador de instrumentação e filtro ativo passa-alta.

Figura 16 - Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: elaborado pelas autoras.

4.1 Fase 1

Na fase 1, foi feita a revisão bibliográfica, uma pesquisa apontando os resultados de trabalhos anteriores acerca tanto dos processos de eletrodeposição e metalização de superfícies - um estudo sobre a técnica evidenciando seus fatores de influência: duração, densidade de corrente, e limpeza e dimensões das superfícies, quanto do funcionamento dos circuitos a serem projetados.

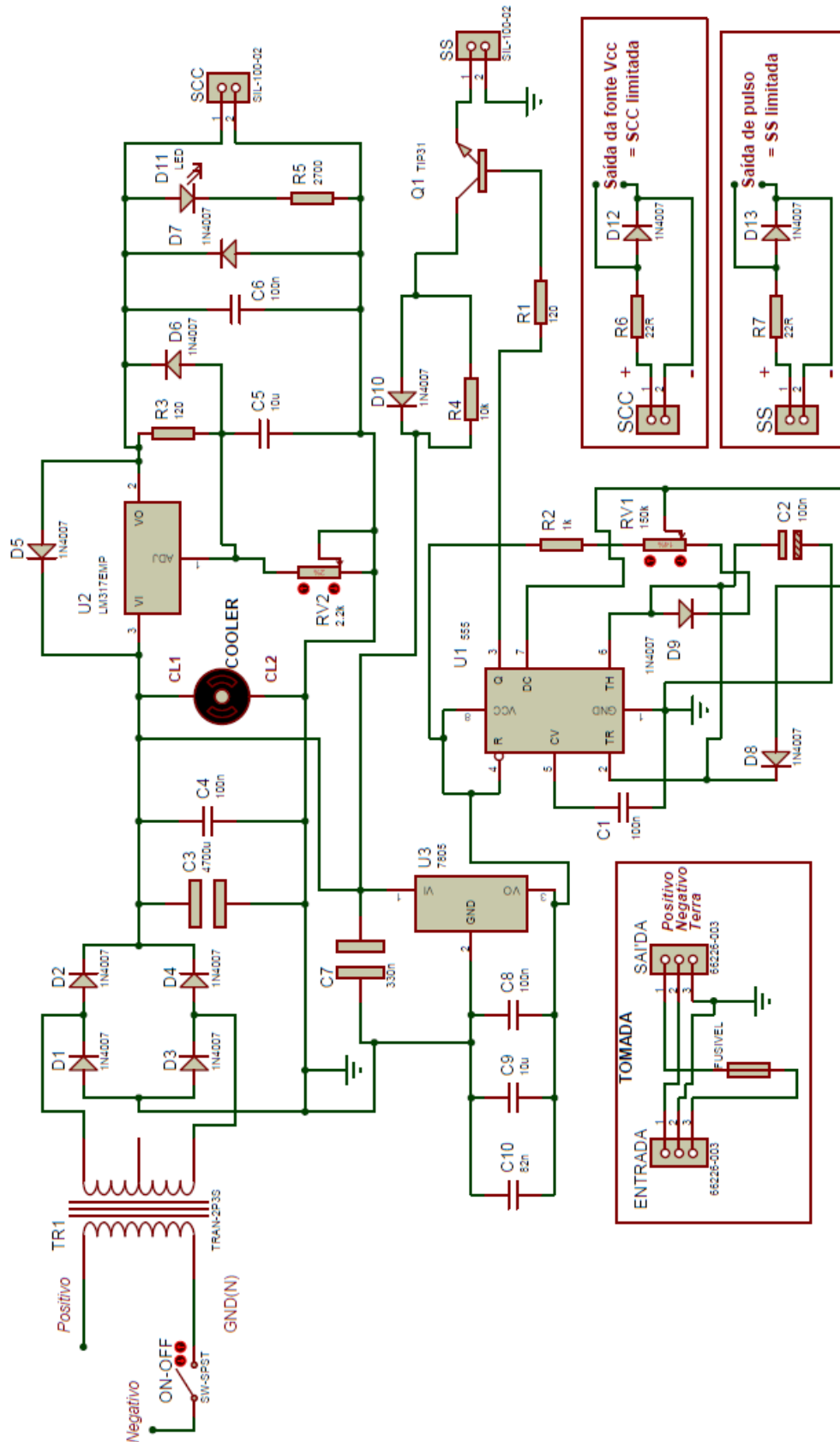
O circuito da fonte de tensão que compõe o equipamento foi projetado utilizando a ferramenta de projeto assistido por computador (CAD) *Proteus Design Suite*, tendo seu esquemático e *layout* desenvolvidos com base nos aportes teóricos apresentados na revisão bibliográfica. Uma vez concluído o projeto, de posse dos fotolitos, o circuito foi fabricado, testado e armazenado em um gabinete de madeira projetado com o intuito de funcionar como a célula de eletrodeposição e estrutura do *setup*.

No esquemático desenvolvido na etapa de projeto, mostrado na Figura 17, é possível observar os componentes que compõem os blocos do circuito da fonte de tensão. Dentre os inúmeros componentes, ressalta-se a utilização de um transformador abaixador de 220 V/12 V na interface de potência do equipamento; dos diodos de junção PN (2N4007) que compõem a ponte retificadora; do CI LM317 responsável pela regulação da tensão constante produzida; do CI LM7805 utilizado para produzir uma tensão fixa de 5 V e corrente fixa de 30 mA; do CI LM555 responsável pela geração do sinal PWM que controla a fonte de tensão pulsada; e do transistor bipolar de junção do tipo NPN configurado para operar como uma chave controlada pelo sinal PWM.

Para evitar a formação de bolhas de hidrogênio e a conseqüente não uniformidade dos filmes depositados, um diodo de junção PN (referência: 1N4007) foi conectado aos terminais das fontes de tensão e um resistor de potência de 10 Ω foi utilizado para limitar a corrente no diodo. Os eletrodos foram conectados em paralelo com o diodo garantindo assim que a diferença de potencial entre os mesmos não ultrapasse 0,8 V.

Após a fabricação, o circuito da fonte de tensão foi exaustivamente testado antes e depois de ser inserido no gabinete. Para a realização dos testes, foram utilizados um multímetro digital marca: Agilent Technologies, modelo: U3401A; e um osciloscópio digital marca: Tektronix, modelo: TDS1002B.

Figura 17 - Esquemático do circuito da fonte de tensão contínua e pulsada.



Fonte: elaborado pelas autoras.

4.2 Fase 2

Para comprovar a funcionalidade da técnica, na fase 2 do projeto, foram realizados 04 (quatro) etapas de processos de eletrodeposição (Tabela 1). Foi utilizada uma fonte de tensão DC comercial marca: Minipa, modelo: MPL 3303M, assim como o *setup* projetado e fabricado durante a execução do trabalho. Nos processos realizados, além do tipo de fonte e do modo de operação (contínuo ou pulsado) utilizados, também foram testados diferentes tempos de deposição e de ciclos de trabalho. A medição da espessura dos filmes de estanho obtidos, foi realizada utilizando-se um micrômetro marca: *DIGIMESS*, modelo: 110.220A com graduação milesimal de 0,001 mm e capacidade para medir espessuras de 0 a 25 mm.

Tabela 1 - Processos de eletrodeposição realizados com fonte comercial e com o *setup* fabricado.

	Número Amostras	Tipo de fonte	Tempo de deposição [minutos]				
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Etapa 1	5	DC comercial	15	30	45	60	-
Etapa 2	5	DC <i>setup</i> fabricado	15	30	45	60	90
Etapa 3	5	Pulsado ciclo trab. 50% <i>setup</i> fabricado	15	30	45	60	90
Etapa 4	4	Pulsado 60min. <i>setup</i> fabricado	Ciclo de trabalho [%]				
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	
			25	50	75	99,97	

Fonte: elaborado pelas autoras.

4.2.1 Preparação e limpeza das amostras

As amostras são placas retangulares sendo - 4,7 cm de largura e 6,5 cm de comprimento -, as realizadas com a fonte comercial, e - 3,0 cm de largura por 7,5 cm de comprimento -, as utilizadas com o *setup*, de fenolite recoberto com filme de cobre. Antes da realização dos processos de eletrodeposição dos filmes de estanho, para remover impurezas,

gorduras e o óxido nativo da superfície do filme de cobre, todas as amostras foram submetidas a um processo de limpeza química realizada pela imersão das mesmas em um becker de vidro contendo ácido clorídrico (HCl) com uma concentração de 37%, durante aproximadamente 60 minutos. Quando do processo de limpeza, os ácidos sofrem uma reação de oxidação-redução capaz de dissolver o material oxidado sem dificuldade, deixando para trás apenas cobre limpo. Após a imersão, as amostras foram enxaguadas em água bidestilada e secas com papel toalha.

4.2.2 Preparação do eletrólito de acetato de estanho

O eletrólito consiste de uma solução a base do o sulfato do metal que se deseja depositar, no caso da eletrodeposição de estanho se faz necessário o uso do acetato de estanho, $Sn(CH_3COO)_2$. Conforme mostra o arranjo experimental da Figura 18, o $Sn(CH_3COO)_2$ utilizado foi obtido por processo eletroquímico, realizado em um becker de vidro de 1000 ml, utilizando-se eletrodos de cobre e de estanho sem chumbo, mergulhados em aproximadamente 500 ml de ácido acético com acidez volátil referente a 4% (vinagre comum a base de álcool).

Figura 18 - Arranjo experimental utilizado para a obtenção do $Sn(CH_3COO)_2$.



Fonte: elaborado pelas autoras.

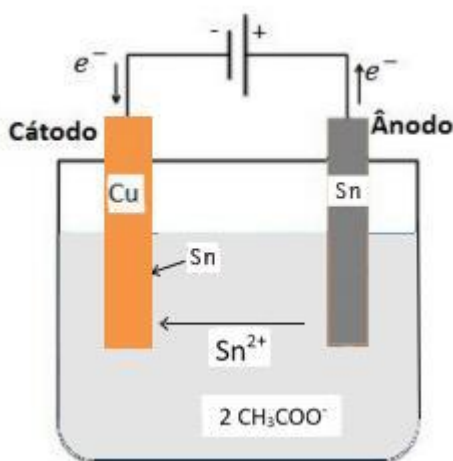
O processo eletroquímico teve duração de 3 horas e a corrente elétrica necessária foi fornecida por uma fonte de tensão DC marca: Minipa, modelo: MPL 3303M, regulada para fornecer uma tensão de 5 V e uma corrente de aproximadamente 30 mA, cujos terminais positivo e negativo foram conectados ao eletrodo de estanho e de cobre, respectivamente.

Ao final da reação, os eletrodos foram removidos e a solução armazenada em uma garrafa de vidro devidamente rotulada. Para lavar o depósito residente no fundo do béquer, foi utilizado o vinagre a base de álcool. O depósito restante foi armazenado na garrafa junto ao acetato de estanho.

4.2.3 Eletrodeposição dos filmes de estanho

A Figura 19 demonstra o esquemático do *setup* de eletrodeposição de estanho utilizado, bem como, as reações de oxidação e de redução que viabilizam formação do filme metálico desejado.

Figura 19 - Esquema de uma célula de eletrodeposição de estanho em cobre.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Durante o processo de deposição, é extremamente importante que o eletrodo de estanho fique a uma distância fixa e uniforme de toda a superfície de cobre a ser recoberta.

Conforme mostrado no arranjo experimental da Figura 20, quando da eletrodeposição realizada utilizando-se a fonte de tensão DC comercial, o correto posicionamento dos eletrodos foi obtido pela utilização de um suporte metálico e de garras de alumínio fundido.

Figura 20 - Arranjo experimental para a eletrodeposição de estanho utilizando fonte DC comercial.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Na Figura 21, observa-se o *setup* projetado e constata-se que o correto posicionamento dos eletrodos também é obtido pela utilização das garras de alumínio fundido, entretanto, a fixação das mesmas é feita na estrutura do próprio equipamento.

Figura 21 - Setup projetado e fabricado para metalização de substratos em placas de circuito impresso.



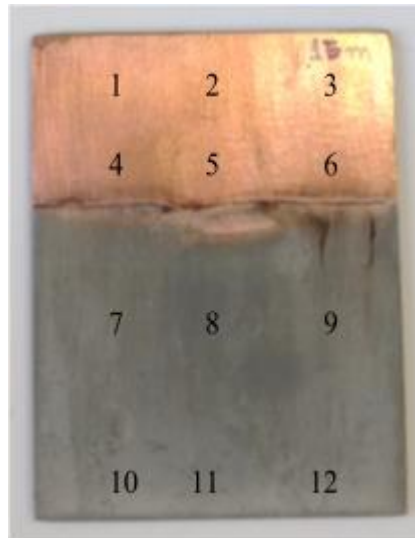
Fonte: elaborado pelas autoras.

Em todos os processos de eletrodeposição de estanho realizados (com fonte DC comercial, e com o setup fabricado nos modos DC e pulsado), o terminal negativo da fonte foi conectado ao substrato onde deve ser depositado o filme de estanho, enquanto que o terminal positivo é conectado a uma barra de estanho sem chumbo. Os eletrodos (substrato e barra de estanho) foram mergulhados em um becker de vidro contendo a solução de $\text{Sn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, mantendo-se um fluxo constante de corrente.

Concluído o processo de eletrodeposição, as amostras foram removidas do setup, enxaguadas em água corrente, limpas utilizando-se uma esponja macia e enxugadas utilizando-se papel toalha.

Para realizar a caracterização dos eletrodepósitos, foram feitas medições em doze pontos distintos dispostos paralelamente na superfície das amostras de corrente contínua utilizando a fonte comercial (Figura 22). As medições foram feitas utilizando um micrômetro externo da marca *DIGIMESS* - modelo 110.220A – e, ao final, foi feita uma média dos valores obtidos nos pontos na área cobreada (1 - 6) e na área revestida pelo estanho (7 - 12) com vistas a medição da espessura dos filmes de estanho.

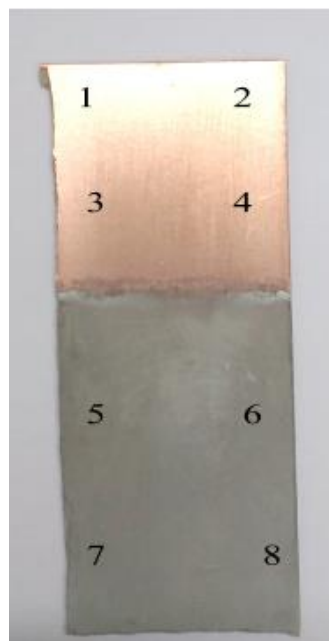
Figura 22 - Pontos de medição das espessuras.



Fonte: elaborado pelas autoras.

A caracterização dos depósitos das amostras fabricadas com o uso do *setup* também foi feita pela medição da espessura da placa com micrômetro. Desta vez foram medidos oito pontos da placa devido ao tamanho reduzido com relação às placas da seção anterior. Os pontos de medição com micrômetro nas respectivas placas são ilustrados a seguir (Figura 23).

Figura 23 - Esquemáticos dos pontos de medidas de espessura nas placas de teste.



Fonte: elaborado pelas autoras.

4.3 Fase 3

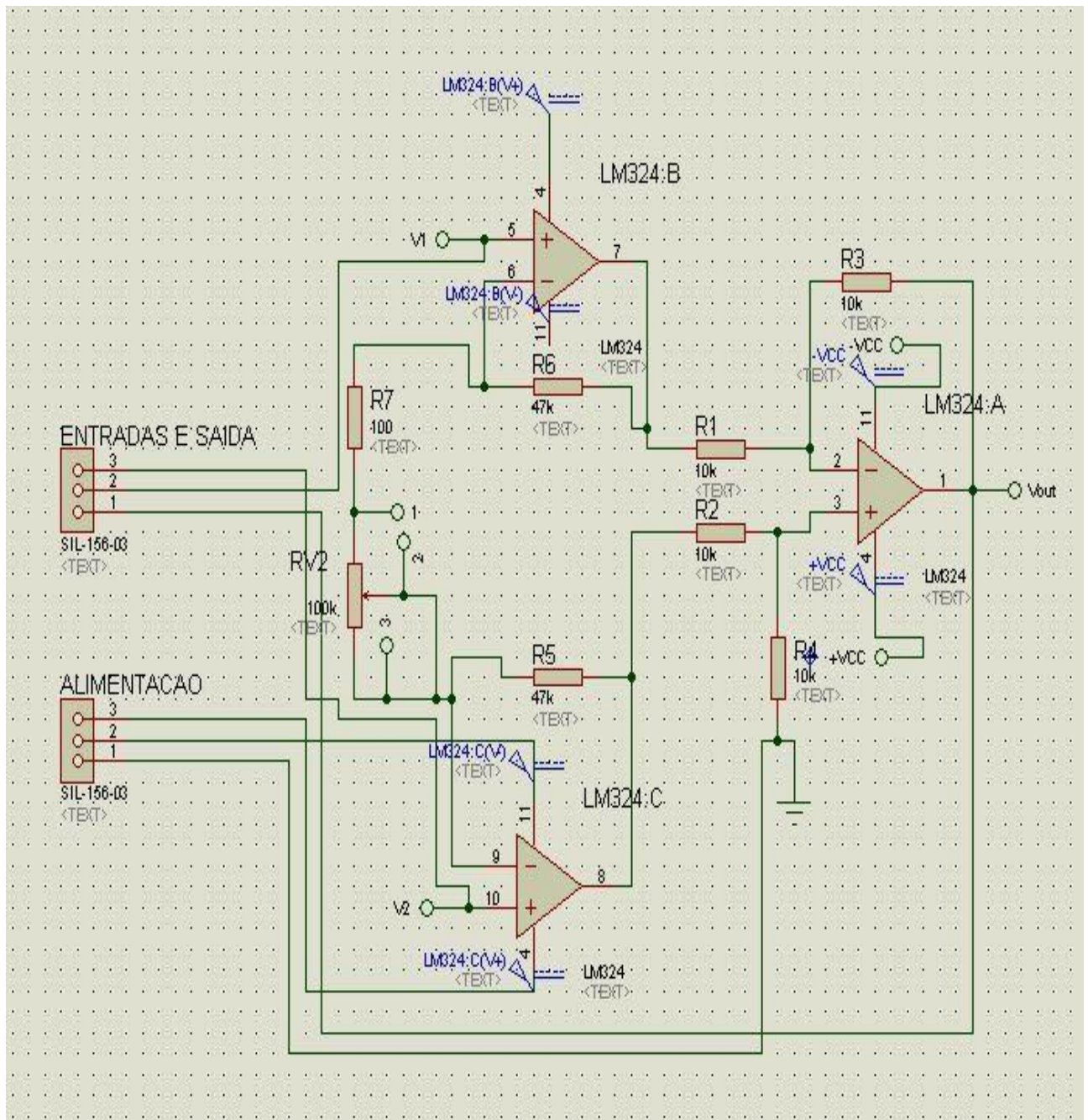
Na fase 3, utilizando-se a ferramenta de CAD já citada, foram projetados os circuitos do amplificador de instrumentação e do filtro ativo passa-alta. Tais circuitos desenvolvidos para testar o *setup* fabricado, tiveram os seus respectivos *layouts* transferidos para a superfície dos filmes de estanho utilizando-se a técnica de fotolitografia. Em seguida, com os padrões já transferidos, os substratos foram submetidos a processos de corrosão química para a remoção seletiva das camadas de estanho e cobre.

Estando definidas as trilhas e ilhas que compõem os circuitos, as PCIs foram perfuradas, seus componentes foram soldados, e foram realizados os respectivos testes elétricos para verificar o correto funcionamento das mesmas. Os testes elétricos foram realizados utilizando-se uma fonte de tensão DC marca: Minipa, modelo: MPL 3303M; um gerador de funções marca: Agilent Technologies, modelo: 33210A; um multímetro digital marca: Agilent Technologies, modelo: U3401A; e um osciloscópio digital marca: Tektronix, modelo: TDS1002B.

4.3.1 Amplificador de instrumentação

Na Figura 24 é possível observar o esquemático do circuito eletrônico do amplificador de instrumentação projetado, fabricado, e eletricamente testado neste trabalho. O projeto foi desenvolvido com base nos aportes teóricos apresentados na revisão bibliográfica e, dentre os componentes utilizados, destaca-se o circuito integrado LM324 com encapsulamento do tipo DIP (*Dual-In-Line Package*) 14 pinos contendo quatro AmpOps de baixo consumo de potência e 1 MHz de largura de banda (Texas Instruments, 2015).

Figura 24 - Esquemático do circuito amplificador de instrumentação projetado.



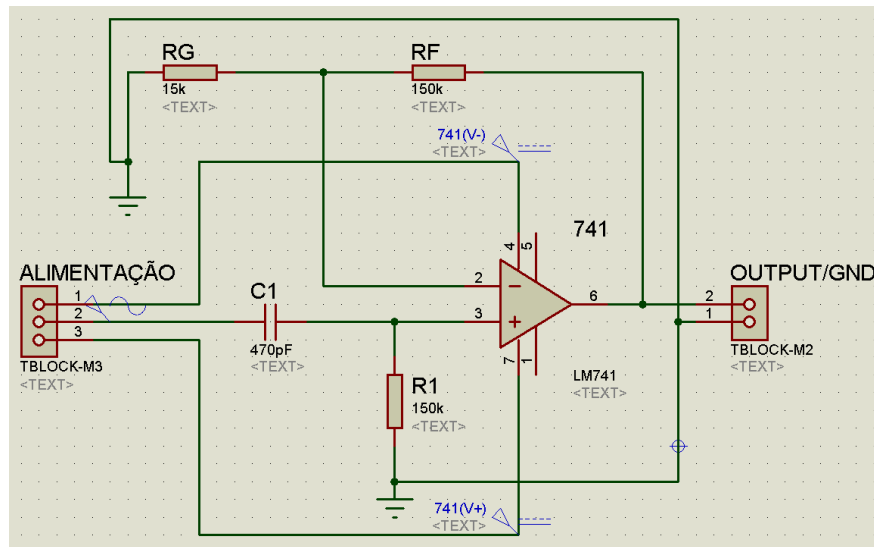
Fonte: elaborado pelas autoras.

4.3.2 Filtro ativo passa-altas

Assim como o circuito eletrônico do amplificador de instrumentação, o protótipo do circuito do filtro ativo passa-altas também foi projetado e construído com base nos conhecimentos abordados na fundamentação teórica. Na Figura 25, é possível observar o esquemático do circuito do filtro passa-altas projetado, fabricado, e eletricamente testado.

Dentre os componentes utilizados, destaca-se o circuito integrado LM741 com encapsulamento do tipo DIP (*Dual-In-Line Package*) 8 pinos contendo um AmpOp de propósito geral com 1,5 MHz de largura de banda típica e impedância de entrada de 2 M Ω (Texas Instruments, 2015).

Figura 25 - Esquemático do circuito filtro passa-altas projetado.



Fonte: elaborado pelas autoras.

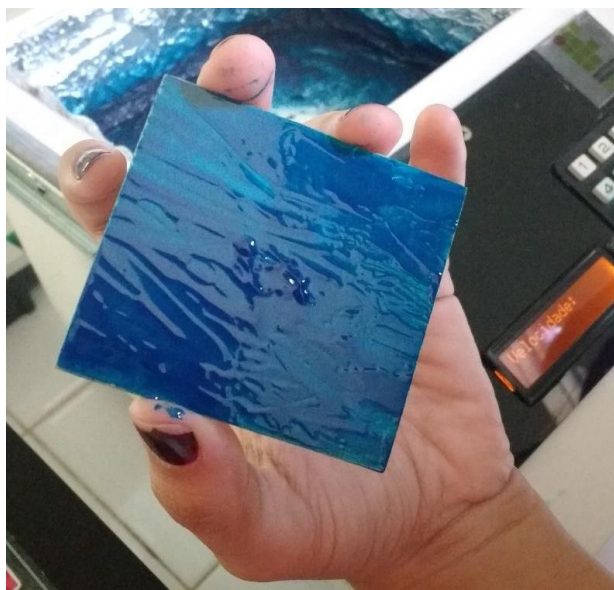
O circuito eletrônico dos protótipos foi inicialmente projetado em meio virtual e teve seu layout desenvolvido com o uso do programa Proteus Design Suite, versão *portable*. Esta ferramenta de simulação e desenvolvimento de módulos de *layout* PCI permitiu a realização de boa parte dos testes funcionais necessários para a construção das placas de circuito impresso.

4.3.2 Fabricação das PCIs dos circuitos eletrônicos

A fabricação das PCIs foi realizada através da técnica de fotolitografia (Cavalcante; Silva, 2017). Utilizando-se uma esponja macia, os substratos com filmes de estanho depositados foram lavados com detergente neutro, enxaguados em água corrente e secos com papel toalha. Utilizando a técnica de *spin coating* (DANTAS; SILVA, 2017), conforme mostra-se na Figura 26, uma fina camada de material fotossensível foi aplicada sobre a

superfície dos filmes de estanho sendo posteriormente submetidas a processo térmico - 80 °C, 20 minutos - em um forno marca: UNOX, modelo: XF 003, para remoção dos solventes (Figura 27).

Figura 26 - Aplicação de polímero fotossensível e preparação para o processo de spin coating.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Figura 27 - Processo térmico para remoção dos solventes do polímero fotossensível.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Os *layouts* produzidos na etapa de projeto e impressos em filme transparente de alto brilho tamanho A4 marca: Filipaper, ou seja, os fotolitos, juntamente com os substratos que

receberam a camada de polímero fotossensível, foram devidamente posicionados no interior de uma câmara sendo expostos à radiação ultravioleta por 120 segundos (Figura 28).

Figura 28 - Preparação do conjunto fotolito-substrato para exposição à radiação UV - fotolitografia.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Concluída a etapa de exposição, conforme mostrado na Figura 29, os substratos foram submetidos a processo de revelação em solução aquosa de bicarbonato de sódio (NaHCO_3).

Figura 29 - Revelação do padrão gravado por fotolitografia.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Após o processo de transferência do padrão por fotolitografia, inicia-se a etapa de corrosão seletiva dos filmes de estanho e cobre. A corrosão é realizada utilizando-se uma solução de perclorato de ferro ($FeCl_3$) e água, com uma proporção de 400 ml de água para cada 400g de perclorato.

Como se pode visualizar na Figura 30, as corrosões acontecem em um béquer de vidro, onde utilizando-se uma placa aquecedora da marca THELGA, modelo: TMA10C, com o intuito de acelerar o processo de corrosão, a solução é mantida aquecida a 65 °C sendo mecanicamente agitada. Visando eliminar os vapores tóxicos e nocivos à saúde, o processo de corrosão foi realizado em capela química equipada com sistema de exaustão.

Figura 30 - Processo de corrosão química dos filmes metálicos (estanho e cobre).

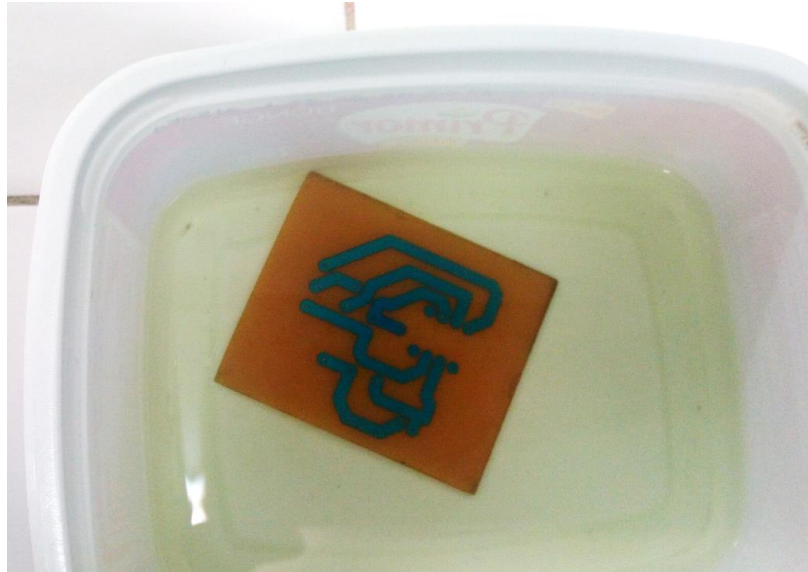


Fonte: elaborado pelas autoras.

Ao final da corrosão, com o intuito de bloquear o processo e retirar os vestígios de perclorato de ferro, as placas foram lavadas em água corrente.

A camada polimérica utilizada para evitar a corrosão nas regiões das trilhas e ilhas das PCIs é finalmente removida utilizando-se uma solução aquosa de Hidróxido de Sódio (NaOH) (Figura 31).

Figura 31 - Remoção da camada polimérica responsável pela proteção dos filmes metálicos das trilhas e ilhas quando da corrosão química.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Logo após a corrosão, as placas passaram novamente por processo de fotolitografia para de transferir para a superfície do substrato (lado oposto ao das trilhas e ilhas) o desenho que orienta a montagem dos componentes na placa.

Na continuidade do processo de fabricação, utilize-se uma broca com 1 mm de diâmetro acoplada a uma furadeira, foram perfuradas as ilhas das placas de maneira que os furos possibilitem o encaixe dos componentes eletrônicos durante o processo de montagem. Após a montagem, os componentes foram soldados utilizando-se uma Estação de Solda analógica 60W HK-936B da marca HIKARI, e deu-se início aos testes elétricos de acordo com as especificações de projeto do circuito proposto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

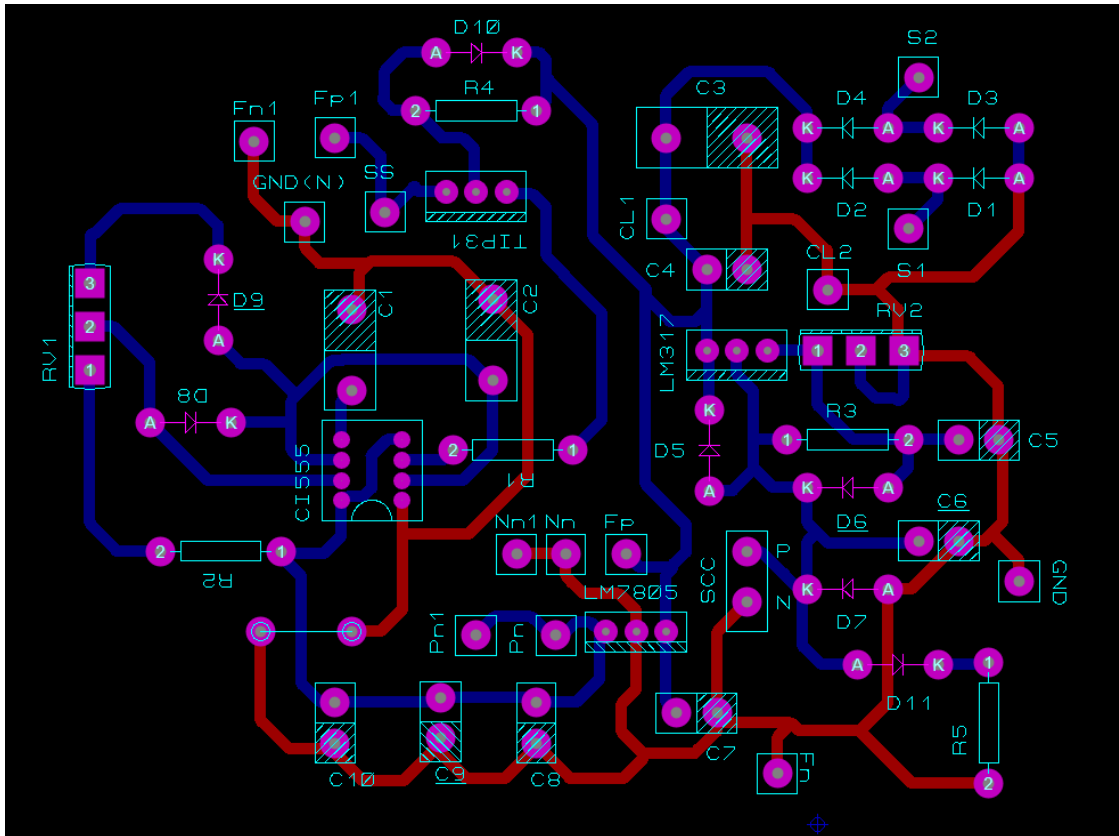
Os resultados do trabalho serão apresentados e discutidos seguindo a mesma sequência utilizada quando da apresentação dos métodos de sua execução (capítulo 4), ou seja, inicialmente serão apresentados os resultados do projeto, fabricação e testes da fonte de tensão que compõe o *setup* de eletrodeposição desenvolvido; a seguir serão apresentados os resultados da produção dos filmes de estanho realizada com fonte comercial em modo contínuo e com o *setup* fabricado nos modos contínuo e pulsado; e finalmente, serão apresentados os resultados dos projetos, fabricação e testes elétricos de protótipos construídos em substratos com filme de estanho depositado utilizando o arranjo experimental fabricado.

5.1 Projeto, fabricação e testes elétricos da fonte de tensão do *setup*

5.1.1 Projeto

Na Figura 32, é possível observar o *layout* do circuito da fonte de tensão contínua e pulsada que foi posteriormente impresso para produzir o fotolito utilizado na fabricação da PCI. A necessidade de utilização de duas camadas de cobre demonstrada no *layout* foi contornada pela utilização de um jumper conectando as trilhas ligadas ao contato C10 e ao pino 1 do CI 555.

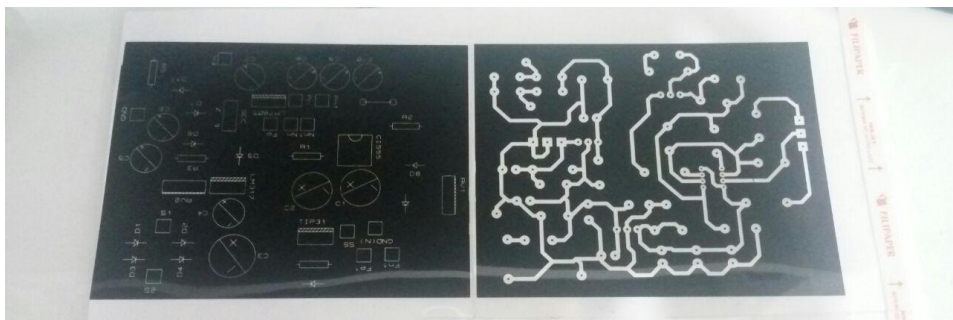
Figura 32 - Layout da fonte de tensão contínua/pulsada desenvolvida para compor o setup de eletrodeposição.



Fonte: elaborado pelas autoras.

O fotolito obtido pela impressão do layout pode ser visto na Figura 33, onde observa-se o layout do circuito assim como o desenho que orienta a montagem dos componentes, ambos impressos em filme transparente adequado para utilização no processo de fotolitografia.

Figura 33 - Fotolito - layout do circuito e desenho de orientação da montagem dos componentes.



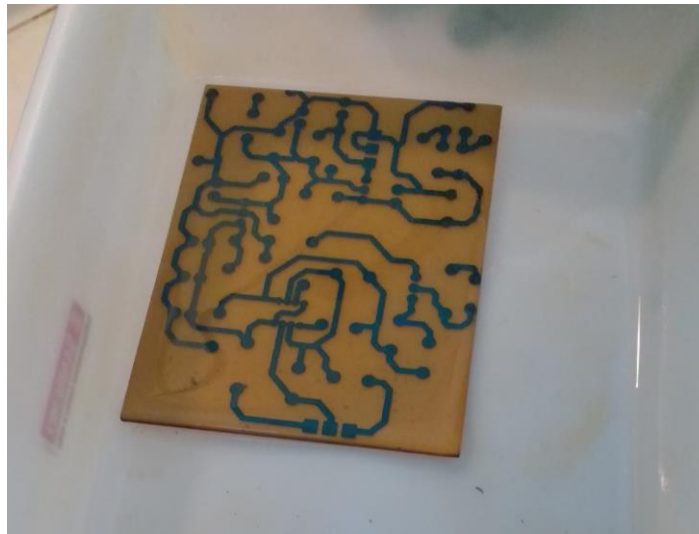
Fonte: elaborado pelas autoras.

5.1.2 Fabricação

Para fabricar o circuito da fonte de tensão que compõe o *setup*, fez-se necessária a utilização de uma placa de circuito impresso com dimensões aproximadas de 9,5 cm de largura por 12 cm de comprimento com o cobre da placa recoberto por uma fina camada de estanho obtida por eletrodeposição.

Na Figura 34, é possível observar a situação da placa após a realização dos processos de fotolitografia e corrosão seletiva dos filmes de estanho e cobre, ou seja, com o padrão definido no *layout* transferido para o substrato. Observa-se que durante a corrosão a camada polimérica foi mantida intacta conforme definida quando da fotolitografia.

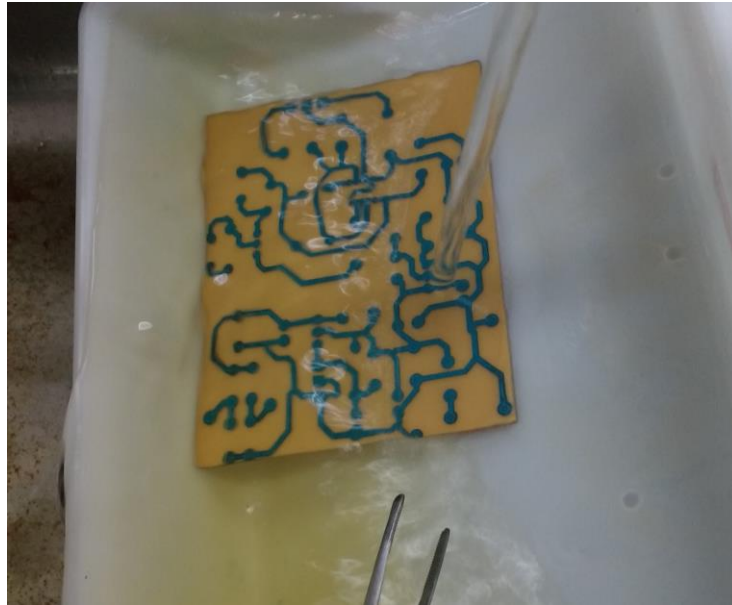
Figura 34 - Corrosão química dos filmes de estanho e cobre.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Na Figura 35, mostra-se o procedimento de remoção da camada polimérica utilizada para evitar a corrosão nas regiões das trilhas e ilhas da placa.

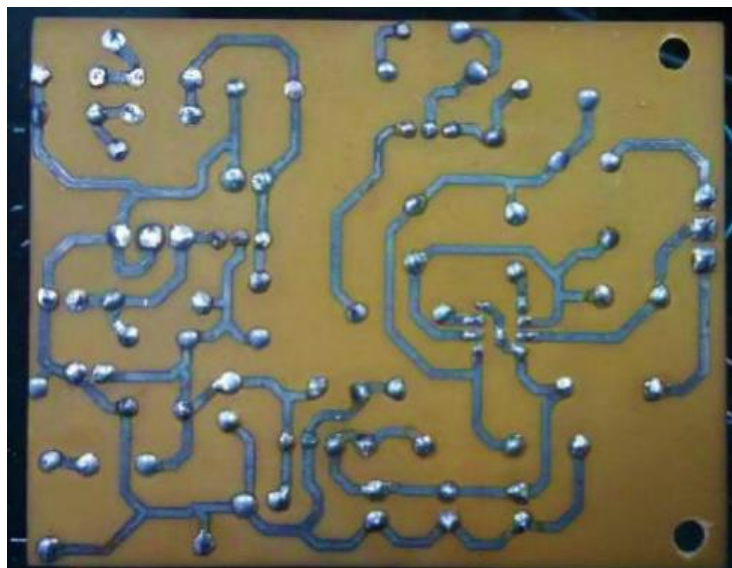
Figura 35 - Remoção da camada polimérica após processo de corrosão química dos filmes metálicos.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Após a completa remoção da camada polimérica, a placa foi perfurada e os componentes foram inseridos e soldados. O resultado obtido para a placa de circuito impresso da fonte de tensão pode ser observado na Figura 36.

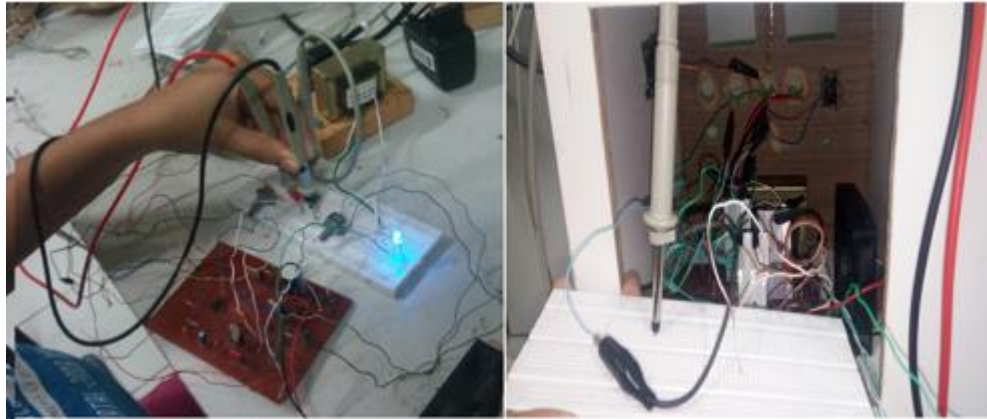
Figura 36 - PCI do setup com as trilhas estanhadas e componentes inseridos e soldados.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Na figura 37, é possível observar o resultado final da PCI que integra a fonte de tensão. Para a realização dos testes elétricos, a PCI juntamente com o transformador rebaixador de tensão, com o cooler e respectivos conectores, foram inseridos no gabinete do equipamento fabricado (METALIZE).

Figura 37 - Preparação para testes elétricos da fonte de tensão do METALIZE.

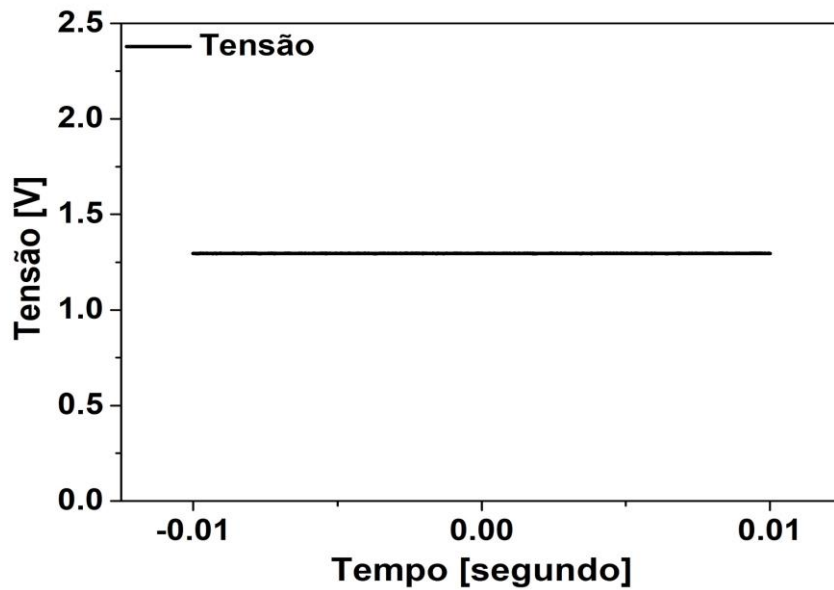


Fonte: elaborado pelas autoras.

5.1.3 Testes elétricos da fonte de tensão contínua/pulsada

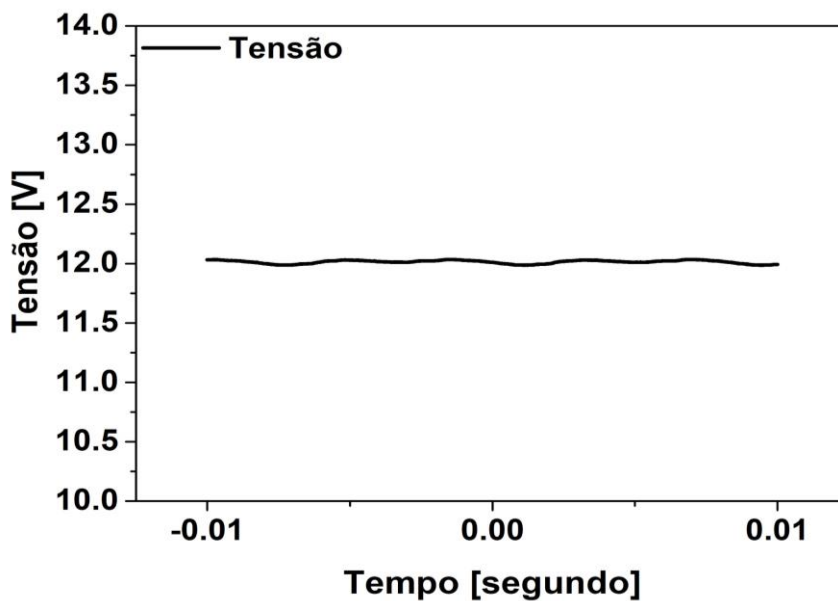
Nas Figura 38 e Figura 39, são mostradas as características da tensão de saída da fonte de tensão contínua. Observa-se no ajuste, em seu valor mínimo, a fonte apresenta uma tensão de 1,3 V_{DC} em seus terminais. Entretanto, quando ajustada em seu valor máximo, o valor medido é 12 V_{DC}.

Figura 38 - Sinal de saída da fonte contínua do setup regulada para fornecer tensão mínima.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Figura 39 - Sinal de saída da fonte contínua do setup regulada para fornecer tensão máxima.

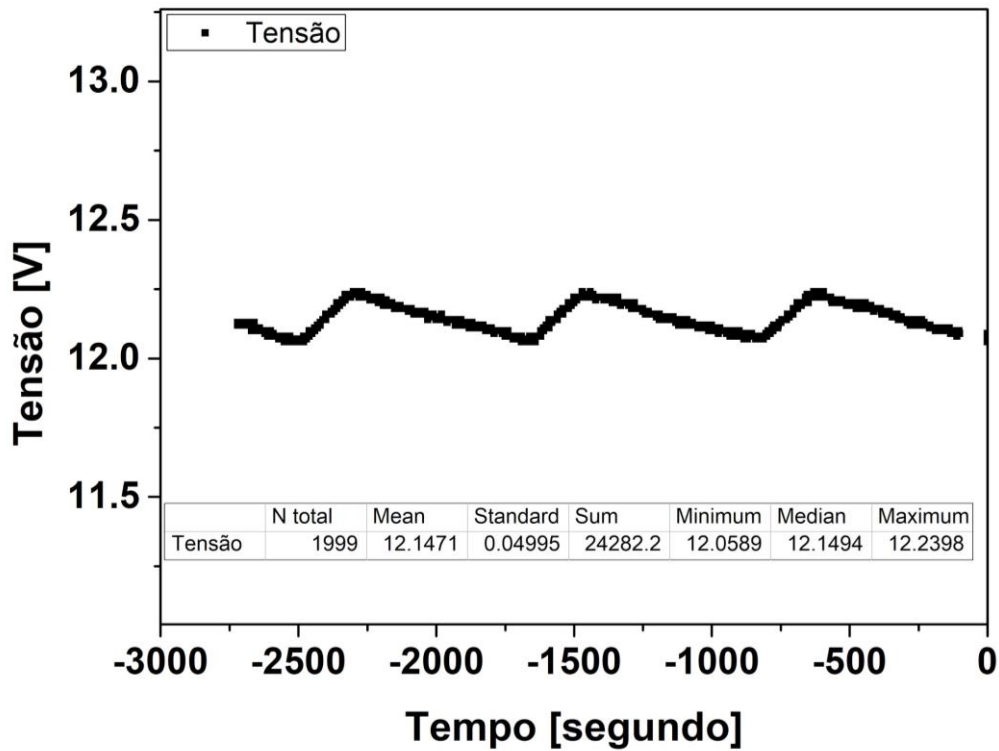


Fonte: elaborado pelas autoras.

A Figura 40 mostra a tensão de *ripple* medida na saída da fonte de tensão contínua do *setup*. Observa-se que quando ajustada para seu valor de tensão máxima, a fonte apresentou uma tensão de *ripple* com valor equivalente a 181 *mVpp*. A tensão de *ripple* na eletrônica é considerada um valor residual e periódico obtido de uma fonte de tensão que, por sua vez, é

alimentada por uma corrente alternada. O *ripple* é derivado das características de carregamento e descarregamento do capacitor de filtro.

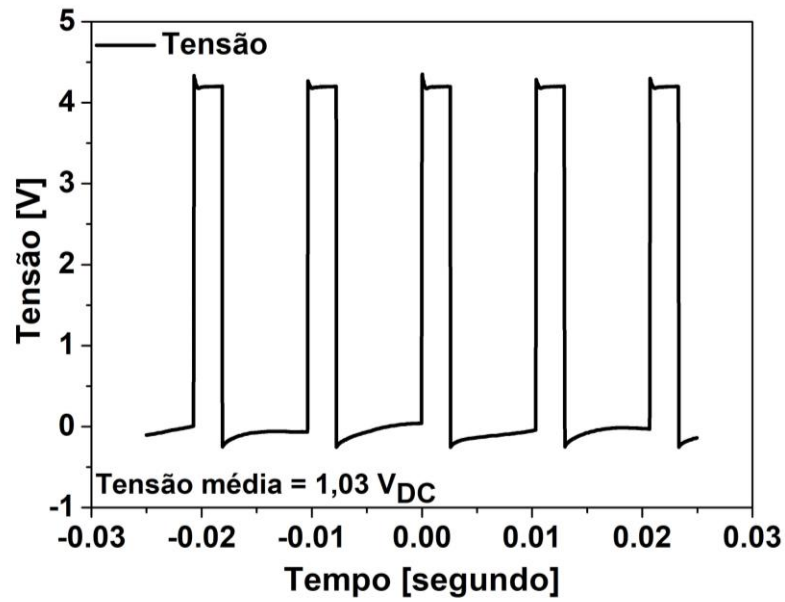
Figura 40 - Sinal da saída da fonte contínua do setup na máxima capacidade.



Fonte: elaborado pelas autoras

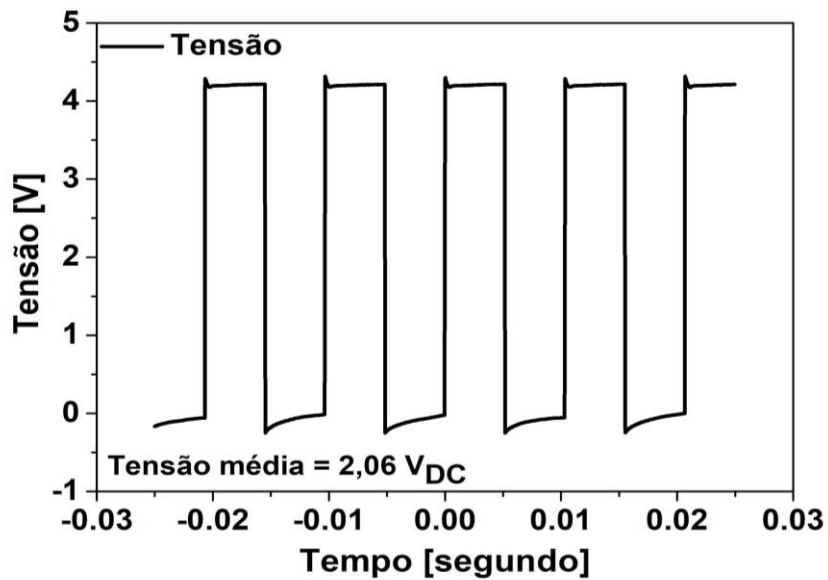
A tensão de saída pulsada foi analisada para diferentes ciclos de trabalho, 25 %, 50 %, 75 % e 99,97 %, como pode ser mostrado, respectivamente, nas Figuras 41, 42, 43 e 44. O sinal demonstrou uma frequência quase constante alternando de 100 Hz à 104 Hz e os valores médios das tensões medidas nos terminais do equipamento aumentam com o aumento do ciclo de trabalho. Os resultados obtidos estão de acordo com as especificações consideradas na etapa de projeto.

Figura 41 - Sinal de saída da fonte de tensão pulsada com ciclo de trabalho ajustado em 25%.



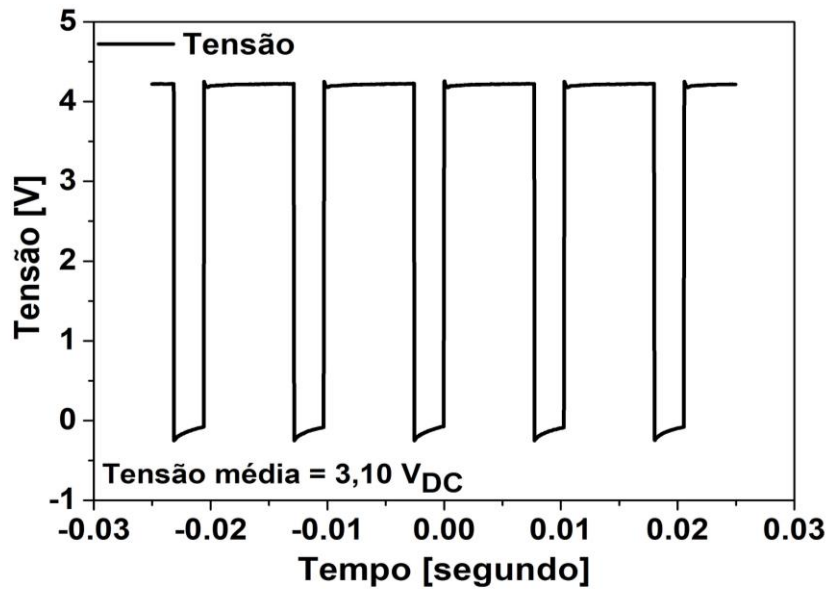
Fonte: elaborado pelas autoras.

Figura 42 - Sinal de saída da fonte de tensão pulsada com ciclo de trabalho ajustado em 50 %.



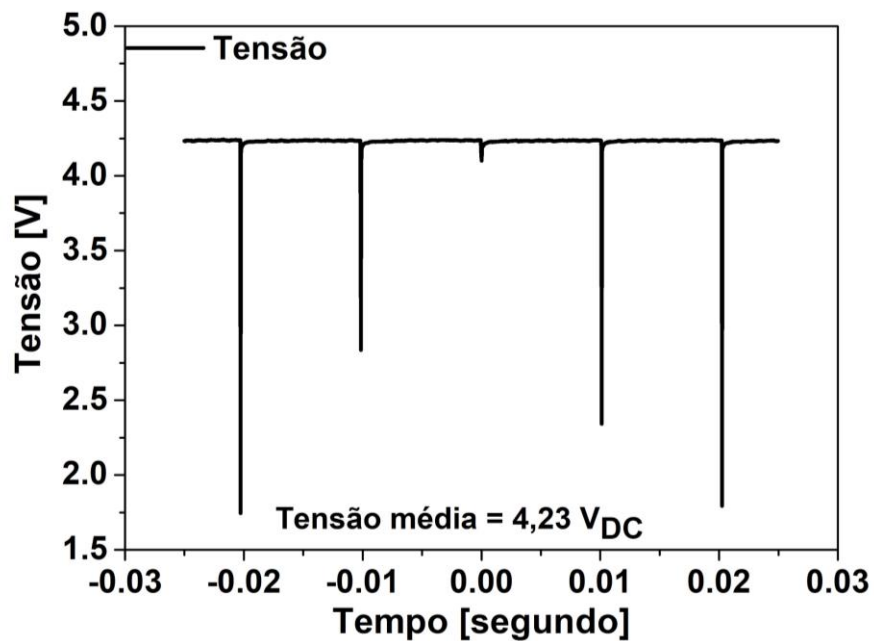
Fonte: elaborado pelas autoras.

Figura 43 - Sinal de saída da fonte de tensão pulsada com ciclo de trabalho ajustado em 75 %.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Figura 44 - Sinal de saída da fonte de tensão pulsada com ciclo de trabalho ajustado em 99,97 %.



Fonte: elaborado pelas autoras.

É possível observar nos gráficos (Figuras 41 a 44) que os sinais apresentam picos nas bordas de seus pulsos tanto em nível alto, quanto em nível baixo, tais picos são causados pelo surto de tensão (efeito *spike*), são ruídos constituídos por pulsos repetitivos de amplo espectro

de frequências que acometem a rede elétrica continuamente. Os dispositivos chaveadores costumam gerar ruídos como esses, como é o caso o LM555, utilizado para o chaveamento da tensão de saída do circuito. Este, quando do chaveamento, oscila criando uma interferência impossível de se eliminar totalmente (PIMENTEL, 2016).

Durante a realização dos processos de eletrodeposição utilizando-se ciclos de trabalho de 25 %, 50 %, 75 % e 99,97 %, foram medidas as tensões na célula de eletrodeposição, além da corrente drenada por cada processo. Os resultados das medições realizadas encontram-se sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de tensão nos eletrodos da célula e corrente drenada pelos processos.

Ciclo de Trabalho	Corrente média (mA)	Tensão média na célula de eletrodeposição (mV)
25%	0,586	405
50%	1,024	523
75%	1,426	617
99,97%	1,796	702

Ao analisar os dados da tabela 2, observa-se que a tensão média na célula de eletrodeposição depende diretamente do ciclo de trabalho, ou seja, o valor da tensão aumenta com o aumento do tempo em que o sinal da saída pulsada permanece em nível alto.

Além disso, é possível perceber a mesma característica para os valores de corrente, como se observa na Tabela 2, o que, por sua vez, influencia diretamente no resultado final dos depósitos de estanho feitos com o uso do *setup*. Nota-se que a tensão média medida na célula de eletrodeposição, durante a realização do processo, é limitada pelo diodo conectado a saída da fonte pulsada, o qual possui a função de garantir que a tensão na célula não ultrapasse 800 mV, a fim de evitar o surgimento e bolhas de hidrogênio na solução de eletrodeposição e, portanto, garantir uma maior uniformidade nos depósitos obtidos.

5.2 Caracterização dos filmes de estanho obtidos

5.2.1 Preparação do eletrólito de acetato de estanho

A execução dos procedimentos descritos no tópico MATERIAIS E MÉTODOS item 4.2.2 acarretou no resultado ilustrado na Figura 45. A solução tornou-se opaca e apresentou uma coloração esbranquiçada demonstrando a formação do acetato de estanho que tende a se hidrolisar em água, a reação foi concluída quando o eletrodo de cobre começou a ficar escuro, significando que todo o ácido acético havia se convertido em acetato de estanho.

Figura 45 - Formação do acetato de estanho.



Fonte: elaborado pelas autoras.

5.2.2 Filmes obtidos utilizando-se fonte comercial em modo contínuo

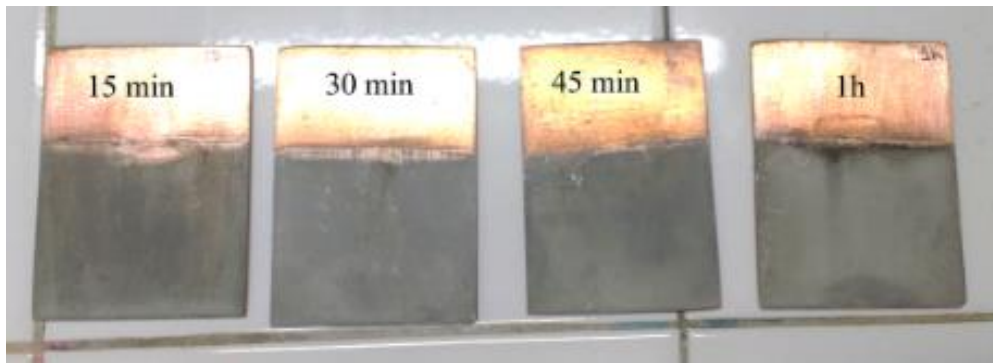
Quando da deposição realizada, conforme descrito no tópico MATERIAIS E MÉTODOS item 4.2 Fase 2, o aumento da densidade de corrente provocou a formação de filmes porosos e de baixa aderência, acarretando conseqüentemente a formação de filmes de características não uniforme, ou seja, com tendência à menor cobertura do substrato.

Valores de corrente na faixa de 0,01 A a 0,5 A foram testados, e o valor que apresentou melhores resultados foi o de 30 mA, para o qual foi observado a redução da porosidade do filme depositado e conseqüente formação de uma camada fina, lisa e uniforme de estanho. Para o valor de corrente citado, as camadas de estanho obtidas tornaram-se

aderentes a superfície da placa de circuito impresso, e apresentaram para filmes de diferentes espessuras, coloração variando em diferentes tonalidades de cinza.

Após verificar a intensidade de corrente ideal do processo (30 mA), novos testes foram realizados com a finalidade de verificar a influência do tempo de deposição sobre a qualidade dos filmes de estanho obtidos. Foram realizados processos com duração de 15, 30, 45 e 60 minutos, cujos resultados podem ser observados na Figura 46.

Figura 46 - Filmes de estanho depositados utilizando-se fonte de tensão comercial em modo contínuo, com intensidade de corrente de 30 mA e diferentes tempos de processo.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Nos filmes mostrados na Figura 46 é possível observar a diferença de coloração entre a camada de cobre (onde não houve deposição de estanho -cor laranja) e a camada de estanho depositada (cor cinza).

A Tabela 3 apresenta as espessuras dos filmes depositados, obtidas pela diferença entre a espessura média do substrato na região recoberta apenas pelo filme de cobre e a espessura média do substrato na região recoberta pelos filmes de cobre e de estanho. Com base nos resultados de espessura dos filmes de estanho obtidos, bem como nos tempos dos processos de eletrodeposição, foram calculadas as respectivas taxas de deposição (espessura em nm/tempo em minuto). A Tabela 3 também apresenta a taxa de deposição média dos processos para a intensidade de corrente considerada.

Tabela 3 - Espessuras e taxa de deposição das camadas de estanho obtidas utilizando-se fonte comercial com densidade de corrente de 30 mA_{DC}.

Duração do processo (minutos)	Espessura média do substrato com filme de cobre (μm)	Espessura média do substrato com filmes de cobre e estanho (μm)	Espessura aproximada da camada de estanho (nm)	Taxa de deposição média (nm/min)
15	1,578	1,645	61	3,55
30	1,597	1,711	114	
45	1,581	1,724	143	
60	1,576	1,767	191	

Fonte: elaborado pelas autoras.

Os processos de deposição realizados apresentaram taxa de deposição média de 3,55 nm/minuto. É importante salientar que o equipamento utilizado nas medições (o micrômetro) não é o mais adequado devido a espessura das camadas dos depósitos ser da ordem de nanômetros. Além disso, outro fator de influência na precisão dos resultados é a espessura irregular dos substratos, razão pela qual as medições foram realizadas em diferentes pontos das amostras visando reduzir a incerteza das medições.

A análise dos resultados obtidos permitiu observar que a amostra submetida a processo de eletrodeposição com duração de 15 minutos apresentou uma camada fina e uniforme de estanho. Entretanto, nota-se que as regiões do filme formadas próximas à superfície da solução apresentam algumas falhas decorrentes da presença de bolhas na célula de eletrodeposição.

As amostras submetidas a processos de eletrodeposição com duração de 30 e 45 minutos apresentaram uma cobertura visivelmente mais uniforme. É possível perceber visualmente que os filmes de estanho obtidos são espessos e que o efeito das bolhas nas regiões próximas à superfície da solução de acetato de estanho foi minimizado.

Dentre os testes realizados com a fonte comercial e corrente de 30 mA_{DC}, a eletrodeposição que apresentou melhor resultado do ponto de vista da aderência e uniformidade do filme foi aquela realizada com duração de 60 minutos. Como pode-se observar na Figura 47 o filme depositado apresentou espessura adequada e acabamento uniforme em toda a superfície do substrato, exceto pelas bordas onde a limpeza é mais difícil de ser feita.

Figura 47 - Depósito de estanho em placa de face única (60 minutos).



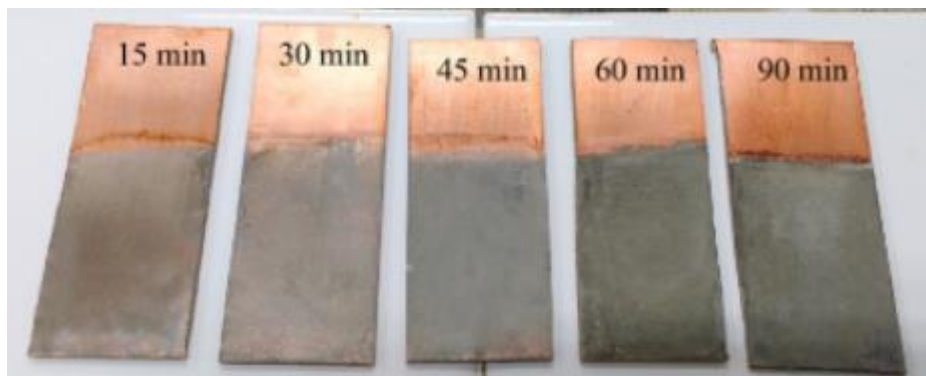
Fonte: elaborado pelas autoras.

Finalizados os testes com a fonte de tensão comercial, os processos de eletrodeposição foram repetidos usando-se os mesmos parâmetros, porém utilizando o *setup* de metalização desenvolvido operando em modo contínuo.

5.2.3 Filmes obtidos utilizando-se o *setup* construído em modo contínuo

Os resultados dos processos realizados são mostrados na Figura 48.

Figura 48 - Filmes de estanho depositados utilizando-se o *setup* desenvolvido em modo contínuo, com corrente de 30 mA e diferentes tempos de processo.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Seguindo a mesma metodologia adotada na seção 5.2.2 os dados obtidos foram tratados e sintetizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Espessuras e taxa de deposição das camadas de estanho obtidas utilizando-se o setup fabricado operando no modo contínuo.

Duração do processo (minutos)	Espessura média do substrato com filme de cobre (μm)	Espessura média do substrato com filmes de cobre e estanho (μm)	Espessura aproximada da camada de estanho (nm)	Taxa de deposição média (nm/min)
15	1,584	1,646	62	3,63
30	1,587	1,685	98	
45	1,595	1,760	165	
60	1,602	1,849	247	
90	1,615	1,890	275	

Fonte: elaborado pelas autoras.

Os processos de deposição realizados apresentaram taxa de deposição média de 3,63 nm/minuto.

Os filmes depositados em processos com duração de 60 e 90 minutos apresentaram os melhores resultados com relação a aderência ao substrato e uniformidade do preenchimento da superfície.

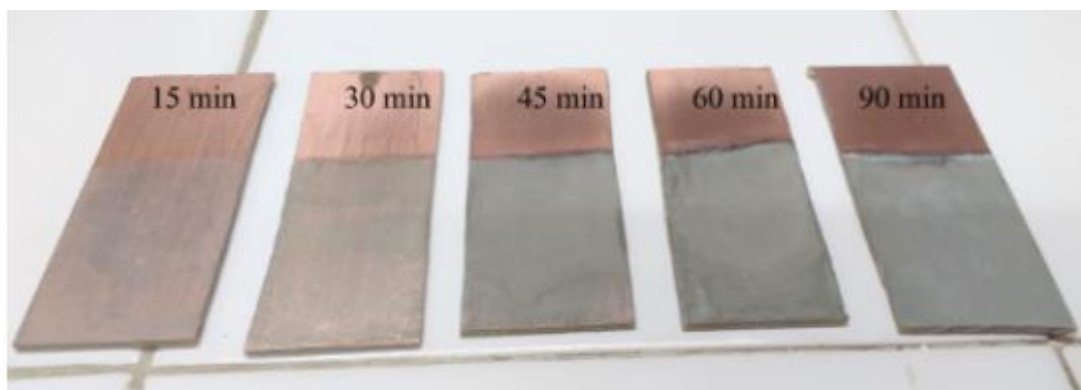
A comparação entre os resultados obtidos usando-se a fonte comercial e o *setup* fabricado foram semelhantes, inclusive no que se refere a taxa de deposição média. Sendo assim, podemos considerar que os resultados atingidos utilizando o *setup* foram extremamente significativos, principalmente por tratar-se de um equipamento de baixo custo, desenvolvido exclusivamente para a realização de processos de eletrodeposição.

5.2.4 Filmes obtidos utilizando-se o *setup* construído em modo pulsado

Foram realizados experimentos utilizando dois parâmetros de influência em testes feitos separadamente. Primeiramente foram realizadas deposições variando-se o tempo de

processo, utilizando-se 15, 30, 45, 60 e 90 minutos, e mantendo-se o ciclo de trabalho constante em 50 %. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 49.

Figura 49 - Filmes de estanho depositados utilizando-se o setup desenvolvido em modo pulsado, com ciclo de trabalho de 50 %, corrente de 30 mA, e diferentes tempos de processo.



Fonte: elaborado pelas autoras.

Seguindo a mesma metodologia adotada na seção 5.2.2 os dados obtidos foram tratados e sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Espessuras e taxa de deposição das camadas de estanho obtidas utilizando-se o setup fabricado em modo pulsado, com ciclo de trabalho 50 % e diferentes tempos de processo.

Duração do processo (minutos)	Ciclo de Trabalho	Espessura média do substrato com filme de cobre (μm)	Espessura média do substrato com filmes de cobre e estanho (μm)	Espessura aproximada da camada de estanho (nm)	Taxa de deposição média (nm/min)
15	50 %	1,582	1,655	73	3,60
30	50 %	1,587	1,689	102	
45	50 %	1,581	1,723	142	
60	50 %	1,584	1,789	205	
90	50 %	1,579	1,823	294	

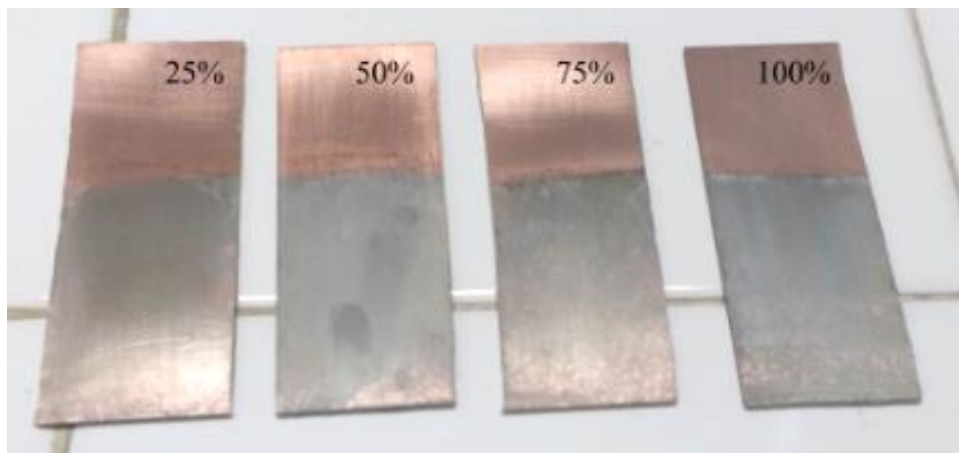
Fonte: elaborado pelas autoras

Os processos de deposição realizados apresentaram taxa de deposição média de 3,60 nm/minuto.

A Figura 49 bem como os dados da tabela 5 demonstram que os processos realizados com duração de 45 min., 60 min., e 90 min. produziram filmes de estanho aderentes e uniformes.

Também foram realizados processos de eletrodeposição utilizando o *setup* desenvolvido em modo pulsado mantendo-se o tempo de deposição constante em 60 minutos e variando-se o ciclo de trabalho em 25 %, 50 %, 75 %, e 99,97 %. Os resultados obtidos encontram-se demonstrados na Figura 50.

Figura 50 - Filmes de estanho depositados utilizando-se o *setup* desenvolvido em modo pulsado, com tempo de deposição de 60 min., corrente de 30 mA, e diferentes ciclos de trabalho.



Fonte: elaborado pelas autoras

Seguindo a mesma metodologia adotada na seção 5.2.2 os dados obtidos foram tratados e sintetizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Espessuras e taxa de deposição das camadas de estanho obtidas utilizando-se o *setup* fabricado em modo pulsado, com tempo de deposição de 60 minutos e diferentes ciclos de trabalho.

Duração do processo (minutos)	Ciclo de Trabalho	Espessura média do substrato com filme de cobre (μm)	Espessura média do substrato com filmes de cobre e estanho (μm)	Espessura aproximada da camada de estanho (nm)	Taxa de deposição (nm/min)
60	25 %	1,582	1,755	173	2,88
60	50 %	1,584	1,789	205	3,41
60	75 %	1,588	1,801	213	3,55
60	99,97 %	1,502	1,812	310	5,16

Fonte: elaborado pelas autoras

Os dados da Tabela 6 demonstram que taxa de deposição aumenta com o aumento do ciclo de trabalho, ou seja, a melhor taxa de deposição (5,16 nm/minuto) foi obtida para o ciclo de trabalho 99,97 %.

Constata-se que “entre os filmes produzidos por corrente pulsada, verificou-se que o tamanho de grão é tanto maior quanto maior o tempo de pulso e menor o tempo de relaxação” (Cunha, p. 03, 2016). Isso explica porque na amostra realizada, com ciclo de trabalho ajustado para próximo de 99,97 %, foi possível perceber melhores resultados em relação aos demais ciclos de trabalho. Desta forma é possível concluir que quanto maior o ciclo de trabalho, maior é a velocidade em que os grãos aderem à superfície da placa, resultando conseqüentemente num aumento da espessura do filme.

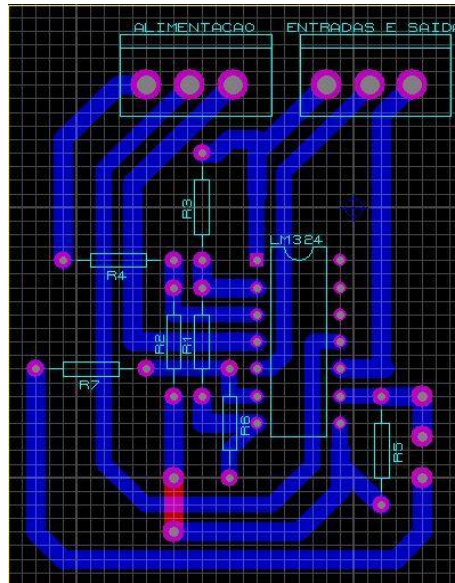
5.3 Circuitos eletrônicos desenvolvidos para teste do equipamento

5.3.1 Amplificador de instrumentação

5.3.1.1 Projeto

O *layout*, elaborado com o auxílio da ferramenta CAD, contendo o desenho das trilhas, das ilhas e o desenho dos componentes do circuito amplificador de instrumentação, pode ser observado na Figura 51.

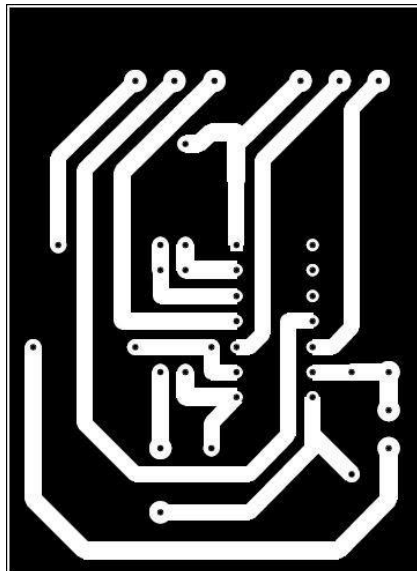
Figura 51 - Layout do circuito amplificador de instrumentação (visualizado no software Proteus Design Suite).



Fonte: elaborado pelas autoras.

Como resultado da etapa de projeto do amplificador operacional de instrumentação obteve-se o fotolito mostrado na Figura 52 que será utilizado na etapa de transferência do *layout* do circuito para a superfície do substrato quando da fabricação da PCI.

Figura 52 - Fotolito do Amplificador de instrumentação (negativo).

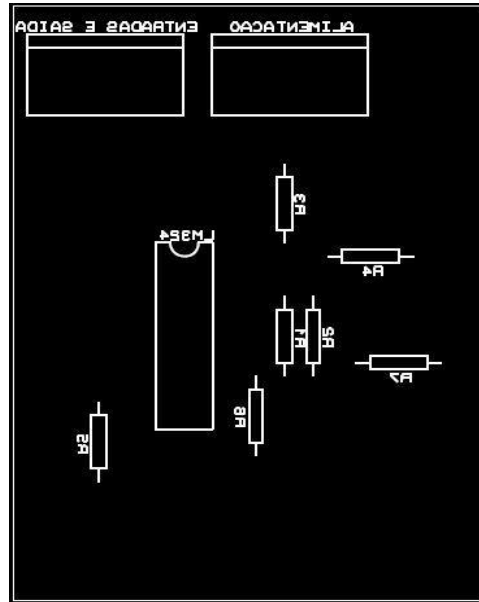


Fonte: elaborado pelas autoras.

Também como resultado da etapa de projeto, foi obtido o fotolito mostrado na Figura 53 que representa o desenho dos componentes e que será transferido para a superfície do

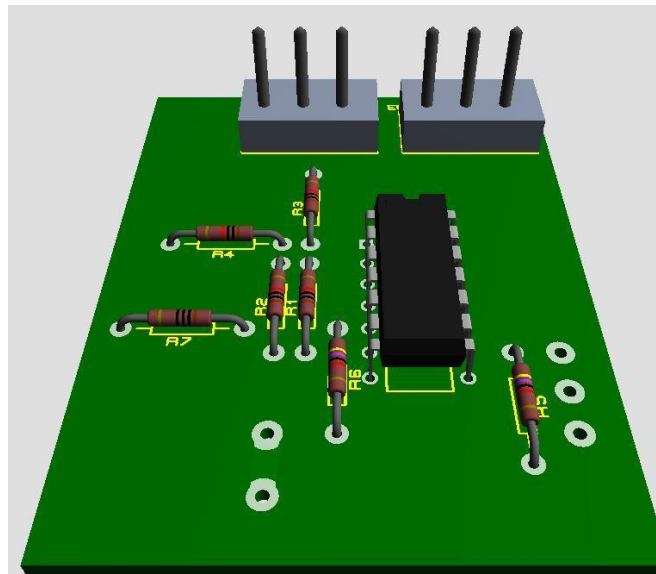
substrato (lado oposto ao das trilhas e ilhas) quando da fabricação da PCI. O desenho dos componentes orientará a inserção dos componentes na etapa final de montagem do circuito.

Figura 53 - Fotelito do desenho dos componentes do amplificador de instrumentação (espelhado e negativo).



Fonte: elaborado pelas autoras.

Figura 54 - Representação 3D do circuito amplificador de instrumentação.



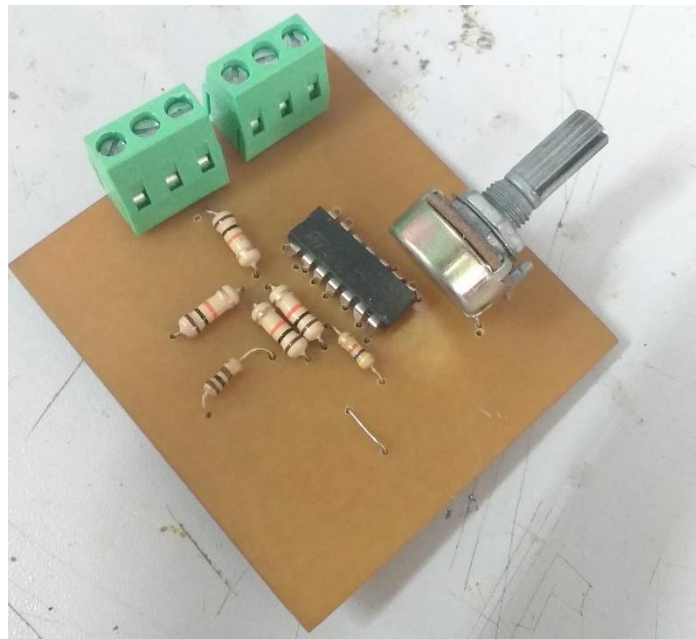
Fonte: elaborado pelas autoras.

A Figura 54 mostra a representação 3D do circuito amplificador de instrumentação projetado. A representação 3D do circuito projetado permite visualizar a disposição dos componentes na placa.

5.3.1.2 Fabricação

Ao utilizar os procedimentos descritos no item 4.3.2 do tópico MATERIAIS E MÉTODOS, o circuito amplificador de instrumentação foi fabricado obtendo-se o resultado apresentado na Figura 55. O circuito foi fabricado com a utilização do substrato com camada de estanho depositada sobre o filme de cobre.

Figura 55 - PCI do circuito amplificador de instrumentação.



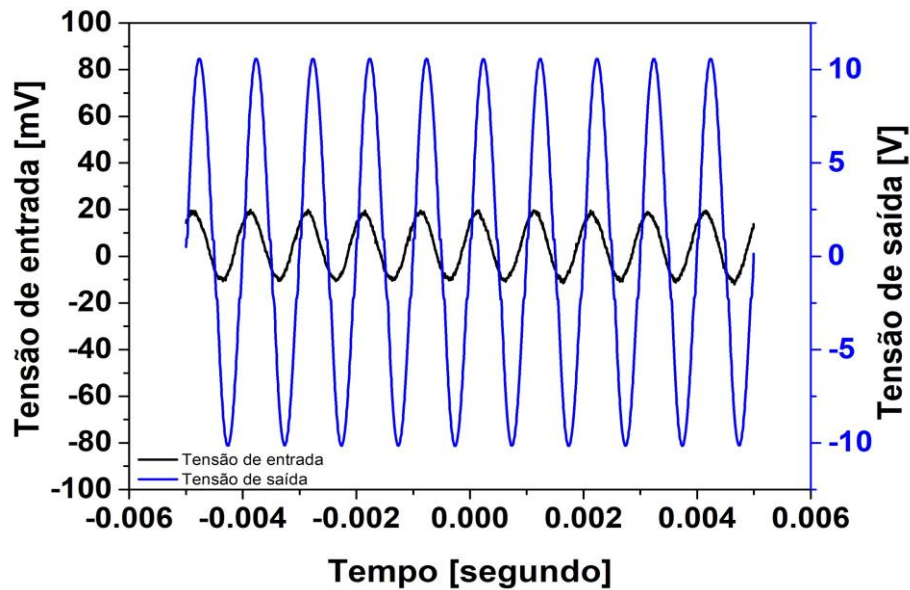
Fonte: elaborado pelas autoras.

5.3.1.3 Caracterização elétrica do circuito

A Figura 56 representa a característica de amplificação do circuito quando ajustado na condição de ganho máximo, observa-se que para um sinal de entrada de 33 mVpp, 1 kHz

obteve-se um sinal de saída de 20,8 V_{pp}, 1 kHz, ou seja, com base nos conceitos apresentados no item 3.3 do tópico Revisão Bibliográfica obtém-se um ganho de tensão máximo de 630,3 V/V (≈ 56 dB), o que corresponde a 66,98 % do valor de projeto do ganho máximo (941 V/V).

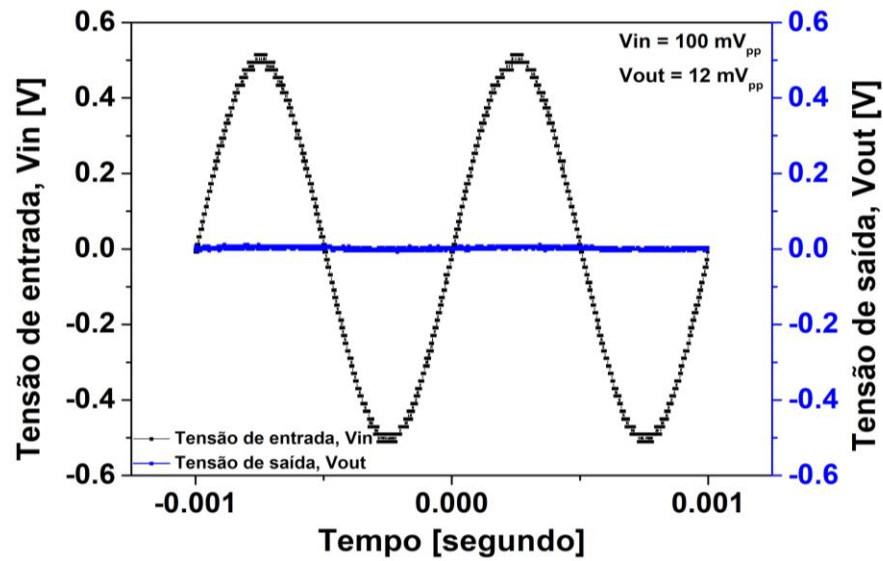
Figura 56 - Tensão de saída para o ganho máximo do amplificador de instrumentação.



Fonte: elaborado pelas autoras.

A característica de rejeição de modo comum do amplificador é mostrada na Figura 57. Para um sinal senoidal de 100 mV_{pp} aplicado simultaneamente às entradas V_{I1} e V_{I2} do circuito, obteve-se um sinal de saída de 12 mV_{pp}, ou seja, um ganho de modo comum (A_{cm}) de 0,12 V/V. Com base nos conceitos apresentados no item 3.3.1, do tópico Revisão Bibliográfica, obtém-se uma taxa de rejeição de modo comum (CMRR) de 74,70 dB.

Figura 57 - Rejeição de modo comum do Amplificador.



Fonte: elaborado pelas autoras.

5.3.2 Filtro ativo passa-altas

5.3.2.1 Projeto

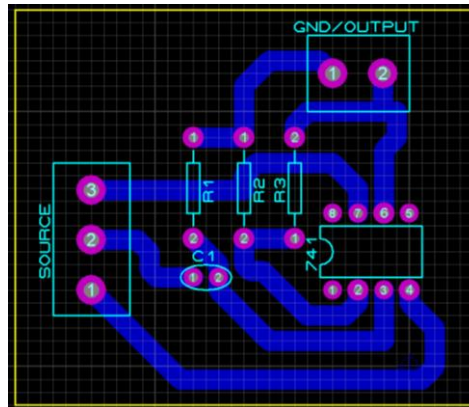
O esquemático do filtro ativo passa-altas foi desenvolvido e simulado com o auxílio da ferramenta CAD conforme mostrado anteriormente na Figura 25, apresentada na seção MATERIAIS E MÉTODOS. O circuito apresentou frequência de corte de 2,25 kHz obtida pela aplicação da Equação 10 e ganho de tensão de 11 V/V calculado utilizando-se a Equação 11.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 470\text{pF} \cdot 150\text{k}\Omega} = 2257,5 \text{ Hz} \quad (10)$$

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_g} = 1 + \frac{150\text{k}\Omega}{15\text{k}\Omega} = 11 \quad (11)$$

O *layout* contendo o desenho das trilhas, das ilhas e o desenho dos componentes, do circuito filtro ativo passa-altas, pode ser observado na Figura 58.

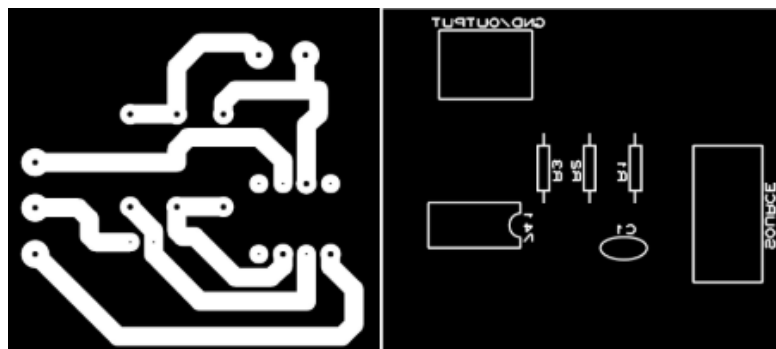
Figura 58 - Layout do circuito Filtro ativo passa-altas (visualizado no software Proteus Design Suite).



Fonte: elaborado pelas autoras.

Como resultado da etapa de projeto do filtro passa-altas obteve-se o fotolito mostrado na Figura 58 que será utilizado na etapa de transferência do *layout* do circuito para a superfície do substrato quando da fabricação da PCI. Na Figura 59 também é possível verificar o fotolito do desenho dos componentes que será transferido para a superfície do substrato (lado oposto ao das trilhas e ilhas) quando da fabricação da PCI. O desenho dos componentes orientará a inserção dos componentes na etapa final de montagem do circuito.

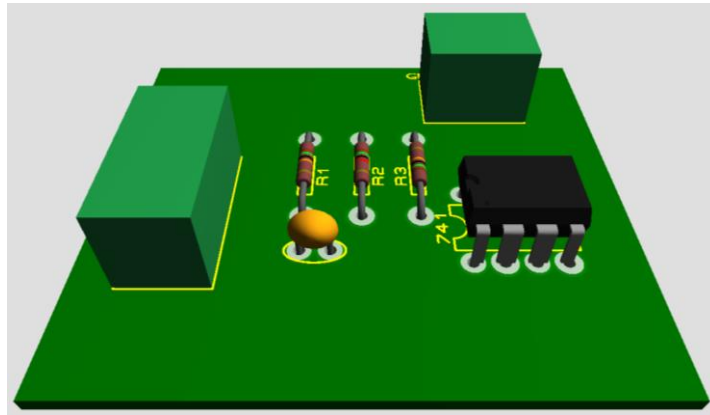
Figura 59 - Fotolito do circuito e do desenho de componentes do filtro ativo passa-altas (negativo).



Fonte: elaborado pelas autoras.

A Figura 60 mostra a representação 3D do circuito filtro ativo passa-altas que permite visualizar a disposição dos componentes na placa.

Figura 60 - Representação 3D do circuito filtro ativo passa-altas.

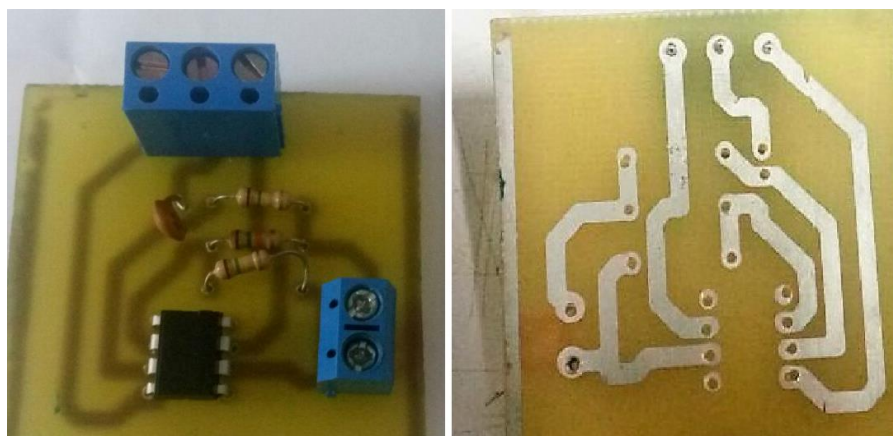


Fonte: elaborado pelas autoras.

5.3.2.2 Fabricação

Com a utilização dos procedimentos descritos no item 4.3.2 do tópico MATERIAIS E MÉTODOS, o circuito filtro passa-altas foi fabricado e obteve-se o resultado apresentado na Figura 61. O circuito foi fabricado com uso de substrato com camada de estanho depositada sobre o filme de cobre.

Figura 61 - PCI do circuito filtro passa-altas.

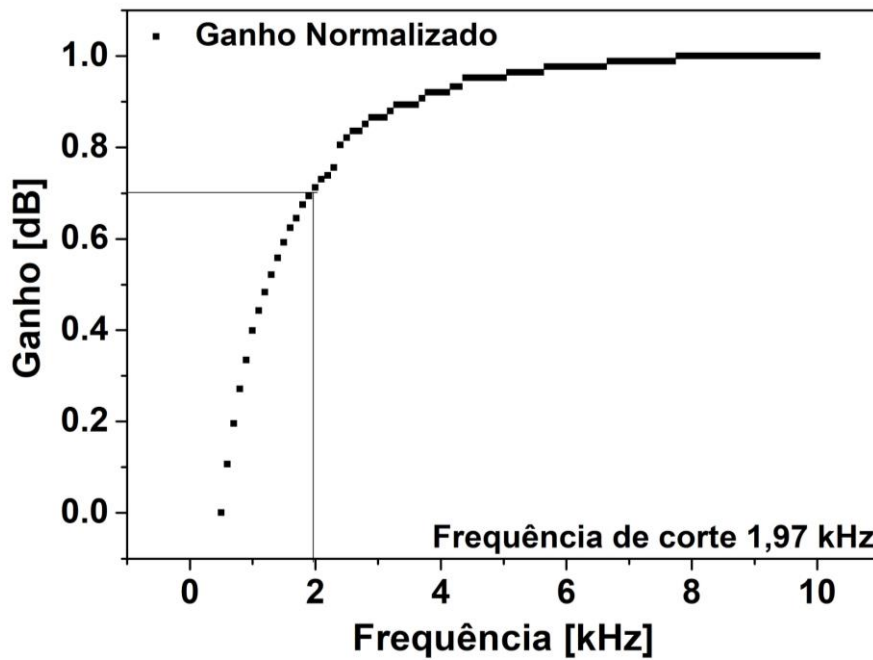


Fonte: elaborado pelas autoras.

5.3.2.3 Caracterização elétrica do circuito

A resposta em frequência do circuito foi analisada para um sinal de entrada de $1 V_{pp}$, cuja frequência foi variada na faixa de 0,5 kHz a 10 kHz com passo de 0,1 kHz. A tensão de saída medida, assim como o ganho de tensão calculado encontram-se sintetizados na tabela localizada no apêndice A. Na Figura 62, é possível visualizar a curva de resposta em frequência onde é possível observar a frequência de corte medida de 1,97 kHz, ou seja, um valor semelhante ao calculado quando do projeto do filtro passa-altas.

Figura 62 - Curva de resposta em frequência (ganho normalizado versus frequência, kHz) do filtro ativo passa-altas.



Fonte: elaborado pelas autoras.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Com relação ao desenvolvimento da fonte de tensão contínua/pulsada do *setup* desenvolvido, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. Os testes elétricos realizados em modo contínuo demonstraram que a tensão de saída variou de 1,3 V a 12 V, enquanto que a faixa da tensão de saída calculada quando do projeto do equipamento foi de 1,25 V à 12 V. Com a fonte operando no modo pulsado, o chaveamento do transistor TIP31 realizado pelo sinal PWM produzido pelo circuito astável com o CI 555 funcionou como esperado, alterando a largura do pulso de tensão de saída do equipamento e produzindo ciclos de trabalho ajustados na faixa de 0 % a 99,97 %, com valor médio da tensão de saída variando na faixa de 1,03 V a 4,23 V, respectivamente.

O equipamento de eletrodeposição (*setup*) desenvolvido mostrou-se eficiente quando da realização processos de deposição de filmes finos de estanho sobre substratos utilizados em placas de circuito impresso, tanto no modo contínuo quanto no pulsado. O desempenho do *setup* demonstrou a viabilidade da substituição da fonte comercial em processos de eletrodeposição de filmes metálicos de baixo custo, pela utilização de um equipamento menos robusto e desenvolvido especialmente para o uso em processo de metalização.

Os filmes de estanho produzidos por eletrodeposição, quer no modo contínuo (*setup*), quer no modo pulsado, produziram camadas aderentes e uniformes. A melhor aderência foi obtida para a corrente de 30 mA e a tensão de 5V. No modo pulsado, a deposição t é afetada pelos tempos de pulso e de relaxação.

A caracterização física dos filmes depositados demonstrou que os processos realizados utilizando-se o *setup* fabricado apresentaram resultados melhores quando comparados com aqueles realizados com a fonte comercial. A taxa média de deposição calculada para o processo realizado utilizando o *setup* fabricado em modo contínuo é de 3,63 nm/min. Enquanto que no modo pulsado, a melhor taxa média de deposição, 5,16 nm/min., foi obtida para o ciclo de trabalho de 99,97 %.

O protótipo do amplificador de instrumentação desenvolvido utilizando substrato com filme de estanho depositado no *setup* fabricado, apresentou ganho de tensão diferencial de 630,3 V/V, ganho de modo comum 0,12 V/V e taxa de rejeição de modo comum 74,40 dB.

O filtro ativo passa-altas, também desenvolvido usando-se o equipamento de eletrodeposição fabricado, apresentou características elétricas medidas coerentes com as de projeto. A frequência de corte medida, 1,97 kHz, apresentou valor muito próximo ao calculado de 2.25 kHz. A característica de filtro passa-altas pode ser comprovada pela curva de resposta em frequência levantada.

O projeto e fabricação do equipamento para a execução de processos de eletrodeposição de filmes metálicos permitiu que o objetivo desse trabalho fosse alcançado, ou seja, viabilizou a fabricação de PCI's com trilhas e ilhas protegidas da oxidação pela deposição de finas camadas de estanho sobre o filme de cobre, garantindo conseqüentemente a melhor soldabilidade quando da etapa de montagem das mesmas. Os objetivos específicos relacionados com o projeto e fabricação de circuitos eletrônicos também foram alcançados, representando casos de sucesso da aplicação dos processos desenvolvidos. Portanto, foi possível comprovar a funcionalidade da aplicação da técnica de metalização de substratos em placas de circuito impresso quando da fabricação de circuitos eletrônicos, garantindo conseqüentemente, maior facilidade na montagem das placas e, provavelmente, maior vida útil dos circuitos desenvolvidos.

Como forma de complementar e melhorar o equipamento e os processos desenvolvidos, são sugeridos os trabalhos futuros listados a seguir:

- Instalação de instrumentos para medição e indicação das tensões e correntes utilizadas nos processos realizados em modo contínuo e modo pulsado.
- Melhoria do processo de limpeza e preparação da superfície dos substratos para a eletrodeposição, inclusive com a utilização de banho de ultrassom.
- Desenvolvimento de procedimentos para a eletrodeposição de diferentes filmes metálicos, tais como: cobre, alumínio, ouro, etc..
- Desenvolvimento de procedimentos para a eletrodeposição de filmes metálicos sobre substratos isolantes.

Ademais, vale salientar a importância do projeto METALIZE para pesquisas futuras, cuja contribuição para o desenvolvimento de processos de metalização de superfícies metálicas e não metálicas cuja execução é fundamental quando da execução de projetos que envolvem sistemas eletrônicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, H (2015). “*Amplificador de Instrumentação com Amplificador Operacional*”; Embarcados. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/amplificador-operacional-amplificador-de-instrumentacao>>. Acesso em 01 de novembro de 2017.

BRAGA, N. C. *Fontes de Alimentação – V. 1*. 1. ed. São Paulo: NCB, 2013.

CAVALCANTE, M. SILVA, R. MINIMIZE - *Método Manual para Redução de Dimensões Físicas, Peso e Dissipação de Potência Elétrica em Sistemas Eletrônicos*. TCC (curso técnico em eletrônica) - Instituto Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017. Disponível em: <<https://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/1436>>. Acesso em 07 de junho de 2018

CECCONELO, E. *Morfologia e Porosidade de Níquel Eletrodepositado em Cobre*. 2006. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

CUNHA, L. *Caracterização Mecânica de Filmes Metálicos de Cobre Produzidos por Eletrodeposição*. 2016. 67 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal. 2016.

DANTAS, A. J. de M.; SILVA, D. L. da. SCHD – Spin Coater Hard Disk. 2017. 77 f. TCC - Curso de Eletrônica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Cap. 1.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, DATASHEET: 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator (Preliminary). April 1999 Revised October 2005.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION, DATASHEET: TIP31 Series (TIP31/31A/31B/31C). February, 2000.

FIORI, M. A. *Eletrodeposição de Níquel em Silício Tipo-n Monocristalino*. 2000. 115 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

GATTI, J. Estudo do comportamento de anodos insolúveis no processo de eletrodeposição de estanho sobre chapas de aço carbono. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Departamento de engenharia e materiais. Campinas, 1991.

MARTINS, L. *Eletrodeposição de cobre em silício tipo-n monocristalino*. 1996. 101 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas. Florianópolis, 1996.

PERTENCE, A. *Amplificadores operacionais e filtros ativos: eletrônica analógica [recurso eletrônico]* / Antônio Pertence Jr. – 8. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2015.

PIMENTEL, R. DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA CAUSAS, EFEITOS E SOLUÇÕES. **Revista TecnoENG**. Faculdades Ponta Grossa, v. I, 2016.

SEDRA, S.; SMITH, K. **Microeletrônica**. 4ª. Edição, Pearson Makron Books, São Paulo, Brasil, 2005.

SENAI. **Eletrônica Analógica – Atividades de Laboratório**. SENAI, Departamento Regional de São Paulo, 2002 (Apostila de eletrônica analógica elaborada pela Escola SENAI “Prof. Dr. Euryclides de Jesus Zerbini”).

SOUZA, Jair Fernandes de. **Circuitos para instrumentação**. 2017. 22 slides.

SOUZA, Jair Fernandes de. **Eletrônica Analógica: Diodo de junção**. 2016. 61 slides.

TEXAS INSTRUMENTS, DATASHEET: μ A7800 series positive-voltage regulators. SLVS056J – MAY 1976 – REVISED MAY 2003.

TEXAS INSTRUMENTS, DATASHEET: LM555 Timer. SNAS548D – FEBRUARY 2000 – REVISED JANUARY 2015.

TEXAS INSTRUMENTS, DATASHEET: LM317 3-Terminal Adjustable Regulator. SLVS044X – SEPTEMBER 1997 – REVISED SEPTEMBER 2016.

TEXAS INSTRUMENTS, DATASHEET: LM741 Operational Amplifier. SNOSC25D –
MAY 1998–REVISED OCTOBER 2015.

8 APÊNDICE

APÊNDICE A – Tabela com as características de resposta em frequência do circuito para um sinal de entrada de 1 Vpp com frequência variando na faixa de 0,5 kHz a 10 kHz.

Frequência do sinal de entrada (kHz)	Tensão na entrada do amplificador (mVpp)	Tensão na saída do amplificador (Vpp)	Ganho de tensão do amplificador (dB)
0,5	0.205	2.23	12.9867
0.6	0.242	2.64	14.45268
0.7	0.279	3.04	15.67807
0.8	0.314	3.43	16.72648
0.9	0.347	3.79	17.59338
1	0.38	4.2	18.48559
1.1	0.42	4.5	19.08485
1.2	0.45	4.8	19.64542
1.3	0.47	5.1	20.172
1.4	0.5	5.4	20.66848
1.5	0.53	5.7	21.1381
1.6	0.55	6	21.58362
1.7	0.57	6.2	21.86843
1.8	0.59	6.5	22.27887
1.9	0.61	6.7	22.5421
2	0.63	6.9	22.79758
2.1	0.65	7.1	23.04577
2.2	0.66	7.2	23.16725
2.3	0.68	7.4	23.40523
2.4	0.72	8	24.0824
2.5	0.73	8.2	24.29688
2.6	0.76	8.4	24.50619
2.7	0.78	8.4	24.50619
2.8	0.78	8.6	24.71057
2.9	0.8	8.8	24.91025
3	0.8	8.8	24.91025
3.1	0.82	8.8	24.91025
3.2	0.82	9	25.10545
3.3	0.84	9.2	25.29636
3.4	0.84	9.2	25.29636
3.5	0.86	9.2	25.29636
3.6	0.86	9.2	25.29636
3.7	0.86	9.4	25.48316
3.8	0.86	9.6	25.66602
3.9	0.86	9.6	25.66602
4	0.88	9.6	25.66602
4.1	0.88	9.6	25.66602
4.2	0.9	9.8	25.84512
4.3	0.9	9.8	25.84512
4.4	0.9	10.1	26.10703
4.5	0.9	10.1	26.10703
4.6	0.9	10.1	26.10703
4.7	0.9	10.1	26.10703
4.8	0.9	10.1	26.10703
4.9	0.92	10.1	26.10703
5	0.92	10.1	26.10703
5.1	0.92	10.3	26.27734

5.2	0.94	10.3	26.27734
5.3	0.94	10.3	26.27734
5.4	0.94	10.3	26.27734
5.5	0.94	10.3	26.27734
5.6	0.94	10.3	26.27734
5.7	0.94	10.5	26.44439
5.8	0.94	10.5	26.44439
5.9	0.94	10.5	26.44439
6	0.94	10.5	26.44439
6.1	0.94	10.5	26.44439
6.2	0.94	10.5	26.44439
6.3	0.94	10.5	26.44439
6.4	0.96	10.5	26.44439
6.5	0.96	10.5	26.44439
6.6	0.96	10.5	26.44439
6.7	0.96	10.7	26.60828
6.8	0.96	10.7	26.60828
6.9	0.96	10.7	26.60828
7	0.96	10.7	26.60828
7.1	0.96	10.7	26.60828
7.2	0.96	10.7	26.60828
7.3	0.96	10.7	26.60828
7.4	0.96	10.7	26.60828
7.5	0.98	10.7	26.60828
7.6	0.98	10.7	26.60828
7.7	0.98	10.7	26.60828
7.8	0.98	10.9	26.76913
7.9	0.98	10.9	26.76913
8	0.98	10.9	26.76913
8.1	0.98	10.9	26.76913
8.2	0.98	10.9	26.76913
8.3	0.98	10.9	26.76913
8.4	0.98	10.9	26.76913
8.5	0.98	10.9	26.76913
8.6	0.98	10.9	26.76913
8.7	0.98	10.9	26.76913
8.8	0.98	10.9	26.76913
8.9	0.98	10.9	26.76913
9	0.98	10.9	26.76913
9.1	0.98	10.9	26.76913
9.2	0.98	10.9	26.76913
9.3	0.98	10.9	26.76913
9.4	0.98	10.9	26.76913
9.5	0.98	10.9	26.76913
9.6	0.98	10.9	26.76913
9.7	0.98	10.9	26.76913
9.8	0.98	10.9	26.76913
9.9	0.98	10.9	26.76913
10	0.98	10.9	26.76913

Fonte: elaborado pelas autoras.