

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO NORTE  
CAMPUS NATAL – ZONA NORTE  
CURSO TÉCNICO INTEGRADO EM ELETRÔNICA

ARLAN JOSÉ DE MELO DANTAS  
DAYRONE LIMA DA SILVA

SCHD – SPIN COATER HARD DISK

NATAL/RN, 2017

ARLAN JOSÉ DE MELO DANTAS  
DAYRONE LIMA DA SILVA

SCHD – SPIN COATER HARD DISK

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

Orientador: Jair Fernandes de Souza  
Coorientador: Aécio Vinicius Amorim Farias

NATAL/RN, 2017

ARLAN JOSÉ DE MELO DANTAS  
DAYRONE LIMA DA SILVA

SCHD – SPIN COATER HARD DISK

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

BANCA EXAMINADORA

---

Jair Fernandes de Souza, Prof. Dr. - Presidente  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas

---

Roberto Rodrigues Cunha Lima, Prof. Dr. - Examinador  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

---

José Adriano da Costa, Prof. Msc. - Examinador  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

NATAL/RN, 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Devemos reconhecer que esse trabalho, apesar de levar apenas o nome de dois autores, contou com a participação de terceiros sem os quais a execução não seria possível .

Foram contribuições das mais variadas formas, desde os orientadores registrados neste documento, Jair Fernandes de Souza e Aecio Vinicius Amorim Farias, que foram de suma importância, visto que éramos totalmente inexperientes quanto ao desenvolvimento, organização e tudo mais de um TCC. Mas a orientação deles foi necessária não só por ser um Trabalho de Conclusão de Curso, mas também enquanto um projeto de pesquisa, visto que nos direcionaram para meios, formas e fontes que contribuíram bastante com a pesquisa.

Além dos nossos orientadores apontados aqui, também foi de grande valia a orientação que recebemos do professor Ailton Câmara no que se refere à redação e organização do relatório. Além da disponibilização dos recursos eletrônicos provenientes do projeto E-lixo.

A instituição de ensino que nos abrigou durante a execução do curso que estamos concluindo também deve receber o nosso reconhecimento, visto que sem ela não teríamos cursado esses quatro anos e talvez não tivéssemos a oportunidade de ter contato com os profissionais que nos levaram ao conhecimento aqui descrito.

Além dessas contribuições acadêmicas, devemos citar, também, as contribuições que recebemos “extra-academia”, por assim dizer, que também foram muito importante para o desenvolvimento desse projeto. E dentro dessas contribuições podemos citar as de longo prazo, de pessoas que nos seguem desde o início do curso (e até da vida), e as contribuições de curto prazo, de pessoas que nos ajudaram no desenvolver do projeto ou até na caminhada final, nos incentivando a não desistir do projeto. Agradecemos a cada um de vocês por suas contribuições, ainda que não tenha sido de forma direta e “acadêmica”, como falamos, vocês foram de grande importância para nós.

Mas tem algumas pessoas que não podemos deixar de citar de forma mais específica aqui, como é o caso dos nossos pais, que há tantos anos cooperam para o nosso crescimento não só físico como intelectual. Agradecemos a vocês pois sem a educação que recebemos de vocês talvez nem metade disso aqui estivesse

pronto, pois foi graças a essa educação que os conflitos internos do grupo foram resolvidos de forma simples ou até mesmo ultrapassados, isso cooperou, também, para a forma como recebemos as orientações a nós passadas. Sabemos que isso descreve e expressa pouco do que sentimos por vocês, mas deixamos aqui a expressão da nossa gratidão e amor por vocês.

Não só os pais como toda nossa família deve se sentir agradecida, foram vocês que contribuíram para o contexto no qual fomos criados. E também não só aos que nos acompanham desde cedo, mas também aos que estão chegando agora às nossas vidas e nos ajudarão a continuar nossas histórias e famílias, muito obrigado por suas contribuições morais, emocionais e acadêmicas, ainda que mínimas, mas que nos ajudaram bastante.

E por último queremos agradecer Àquele sem o qual absolutamente nada disso teria acontecido, visto que é dEle, por Ele e para Ele que todas as coisas existem. Agradecemos a Ele sabendo que a mais pura gratidão ainda é pouco diante de tudo o que Ele fez por nós, até mesmo o simples (e também complexo) ar que respiramos já é motivo de estarmos gratos, quanto mais uma vitória tão significativa quanto consideramos a conclusão deste trabalho e deste curso. E é a Deus a quem rendemos a verdadeira gratidão e reconhecimento por todo esse trabalho, admitindo não merecermos nada disso e reconhecendo que tudo o que recebemos é pela Sua bondade e misericórdia.

*Humilhai-vos, pois, debaixo da potente mão de Deus, para que a seu tempo vos exalte;*

*Lançando sobre ele toda a vossa ansiedade, porque ele tem cuidado de vós.*

**1 Pedro 5:5-7**

## RESUMO

Este trabalho, através de uma pesquisa experimental, tem como objetivo cooperar com a solução desse problema, desenvolvendo o projeto e fabricando um equipamento de baixo custo e fácil utilização. Trata-se de um *spin coater*, ou seja, uma centrífuga capaz de depositar materiais líquidos e pastosos sobre substratos durante o processo de fabricação de PCBs. O equipamento cujo funcionamento é gerenciado por um microcontrolador, utiliza uma fonte linear para alimentar um motor do tipo *Brushless*, os circuitos eletrônicos de controle e os periféricos de interface com o usuário, a velocidade do motor é controlada eletronicamente através de um sinal com largura de pulso modulada (PWM). Durante o processo de centrifugação o equipamento utiliza-se de um mandril a vácuo para fixar de forma prática o substrato a ser processado. O equipamento faz uso de materiais encontrados no lixo eletrônico, como um motor de HD, cooler, chave seletora e cabo de força, bem como de materiais novos, porém de baixo custo, como um teclado matricial. O equipamento desenvolvido possibilitou a realização de processos de centrifugação com tempo e velocidades controladas, atingindo-se velocidades da ordem de 8000 rotações por minuto, e obtendo-se como consequência a deposição de camadas poliméricas com 12 micrômetros de espessura. A viabilidade econômica do projeto pode ser facilmente demonstrada, uma vez que o equipamento desenvolvido custou menos de 2% do valor de um equipamento comercial tomado como referência.

Palavras-chaves: spin coater; centrífuga; motor Brushless; baixo custo; HD.

## **ABSTRACT**

This work, through an experimental research, aims to cooperate with the solution of this problem, developing the project and manufacturing a low cost and easy to use equipment. It is a spin coater, that is, a centrifuge capable of depositing liquid and pasty materials on substrates during the process of manufacturing PCIs. This equipment, whose operation is managed by a microcontroller, uses a linear source to power a Brushless motor, the electronic control circuitry and the user interface peripherals, the motor speed is controlled electronically through a signal with a width of pulse modulated (PWM). During the centrifugation process the equipment uses a vacuum mandrel to fix the substrate to be processed in a practical way. The equipment uses of materials found in electronic junk, such as an HD engine, cooler, selector switch and power cable, as well as low-cost materials such a matrix keyboard. The developed equipment made it possible to perform centrifugal processes with controlled time and speeds, reaching speeds of the order of 8000 spins per minute, resulting in the deposition of polymer layers with 12 micrometers of thickness. The economic viability of the project can be easily demonstrated, since the equipment developed cost less than 2% of the value of commercial equipment taken as a reference.

Keywords: spin coater; centrifuge; brushless motor; low cost; HD.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Placa condenada pela falha do processo de transferência do layout.	13
Figura 2 - Spin coater comercial.	14
Figura 3 - Prototipadora.	15
Figura 4 - Transferência térmica artesanal.	15
Figura 5 - Exemplo de sinais de modulação PWM.	19
Figura 6 - Exemplo de sinal trifásico.	20
Figura 7 - Arduino MEGA 2560.	21
Figura 8 - Esquemático do teclado matricial.	22
Figura 9 - Placa de fenolite com filme de cobre.	23
Figura 10 - Placa de fenolite com polímero fotossensível após a revelação.	24
Figura 11 - Fonte linear.	25
Figura 12 - Fonte chaveada.	25
Figura 13 - Fonte de bancada.	25
Figura 14 - Bomba de vácuo.	26
Figura 15 - O'RING	27
Figura 16 - Motor de HD.	27
Figura 17 - Cooler.	28
Figura 18 - Tacômetro óptico.	28
Figura 19 - Micrômetro digital.	29
Figura 20 - Estrutura do motor.	31
Figura 21 - Motor danificado.	32
Figura 22 - Broca Multiconstruction marca: BOSCH 3mm.	32
Figura 23 - Furadeira de coluna.	33
Figura 24 - Adaptação para instalação do tubo flexível de acoplamento à bomba de vácuo.	34
Figura 25 - Terminal de pressão de latão.	34
Figura 26 - Maçarico utilizado na soldagem dos tubos de cobre.	35
Figura 27 - Varetas de solda foscooper.	35
Figura 28 - Motor com eixo furado.	36
Figura 29 - Esquemático do circuito de controle.	37
Figura 30 - Layout do circuito de controle.	37
Figura 31 - Visualização 3D da PCI.	38
Figura 32 - Layout do circuito em .pdf (fotolito)	38
Figura 33 - Sinal pulsante.	39
Figura 34 - Trecho de código fonte na IDE padrão do Arduino.	40
Figura 35 - Configuração experimental utilizada para medir a velocidade de rotação.	42
Figura 36 - Placas utilizadas nos testes com fita reflexiva instalada	43

Figura 37 - Display LCD utilizado no projeto.	44
Figura 38 - Teclado utilizado no projeto.	44
Figura 39 - Fixação da amostra para a centrifugação	46
Figura 40 - Deposição do polímero fotossensível	46
Figura 41 - Camada uniforme de fotopolímero depositado na superfície da amostra	47
Figura 42 - Recorte das placas de fenolite.	47
Figura 43 - Placas cortadas e preparadas para o processo de centrifugação.	48
Figura 44 - Amostra com fotopolímero depositado e centrifugado.	48
Figura 45 - Placas colocadas no forno para processo de secagem e remoção de solventes.	49
Figura 46 - Amostras após a remoção parcial dos filme poliméricos.	49
Figura 47 - Arranjo experimental utilizado na medição da espessura dos filmes poliméricos.	50
Figura 48 - Caixa de papelão utilizada nos testes para a contenção das amostras.	51
Figura 49 - Projeto do gabinete do <i>SCHD</i> .	51
Figura 50 - Carcaça da fonte de Desktop adaptada para receber circuitos eletrônicos motor e conexões para acoplamento da bomba de vácuo.	52
Figura 51 - Motor após a furação.	53
Figura 52 - Bico após usinagem e solda.	53
Figura 53 - Acoplamento entre motor e sistema de vácuo.	54
Figura 54 - PCI de interface do <i>SCHD</i> .	54
Figura 55 - PCI de interface do <i>SCHD</i> como componentes montados.	55
Figura 56 - PCI da fonte de alimentação	55
Figura 57 - Diagrama de aceleração do motor.	58
Figura 58 - Gráfico das velocidades alcançadas.	60
Figura 59 - Espessura dos filmes poliméricos versus velocidade de rotação.	62
Figura 60 - PCI de interface do projeto.	63
Figura 61 - Amplificador de instrumentação fabricado com tecnologia SMD aplicada com auxílio do <i>SCHD</i> .	63
Figura 62 - Gabinete do <i>SCHD</i> após fabricação.	64

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1 Problemática	12
1.2 Justificativa	13
1.3 Hipóteses	14
1.4 Objetivos	16
1.4.1 Objetivo Geral:	16
1.4.2 Objetivos Específicos:	17
<b>2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
2.1 Trabalhos anteriores	18
2.2 Conceitos	18
2.2.1 PWM	18
2.2.2 Motor Trifásico	19
2.2.3 ESC	20
2.3 Ferramentas	21
2.3.1 Arduino MEGA 2560	21
2.3.2 Teclado Matricial	21
2.3.3 LCD	22
2.3.4 Filme de Cobre de PCBs	22
2.3.5 Photoresist (Polímero Fotossensível)	23
2.3.6 Fonte de Alimentação	24
2.3.7 Bomba de Vácuo	25
2.3.8 O'Ring	26
2.3.9 Motor de HD	27
2.3.10 Cooler	27
2.3.11 Tacômetro	28
2.3.12 Micrômetro	29
<b>3.METODOLOGIA</b>	<b>30</b>
3.1 Estrutura da caixa de fonte chaveada	30
3.2 Furação do motor	30
3.3 Acoplamento da bomba de vácuo	33
3.4 Criação do layout dos circuitos da fonte e do teclado	36
3.5 Alimentação do motor	38
3.6 Teste do motor após a conexão da bomba de vácuo	39
3.7 Programação	40
3.8 Medição da velocidade de rotação do motor	42
3.9 Interface com o usuário	43
3.9.1 Display LCD	43
3.9.2 Teclado	44
3.9.3 Entradas do usuário	45

3.10 Caracterização do processo de centrifugação (spin coating)	45
3.11 Desenvolvimento do gabinete para o equipamento <i>SCHD</i>	50
<b>4.RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>52</b>
4.1 Estrutura da caixa de fonte chaveada	52
4.2 Furação do motor	52
4.3 Acoplamento da bomba de vácuo	53
4.4 Criação do layout dos circuitos da fonte e do teclado	54
4.5 Alimentação do Motor	56
4.6 Teste do motor após a conexão da bomba de vácuo	56
4.7 Programação	56
4.8 Medição da velocidade de rotação do motor	59
4.9 Interface com o usuário	60
4.10 Caracterização do processo de centrifugação	60
4.11 - Desenvolvimento do gabinete para o equipamento <i>SCHD</i>	63
<b>5.CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>65</b>
<b>6.REFERÊNCIAS</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE 1 - PWM SERIAL</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE 2 - ACELERAÇÃO SERIAL</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE 3 - INTERFACE</b>	<b>74</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A cada dia que passa, as pesquisas avançam e novas evoluções tecnológicas surgem. Entretanto, muitas destas ideias não saem da teoria por falta de recursos e investimentos em equipamentos nas instituições em que tais pesquisas e evoluções são concebidas. Essa é uma das dificuldades enfrentadas em nosso campus que buscamos solucionar com este projeto.

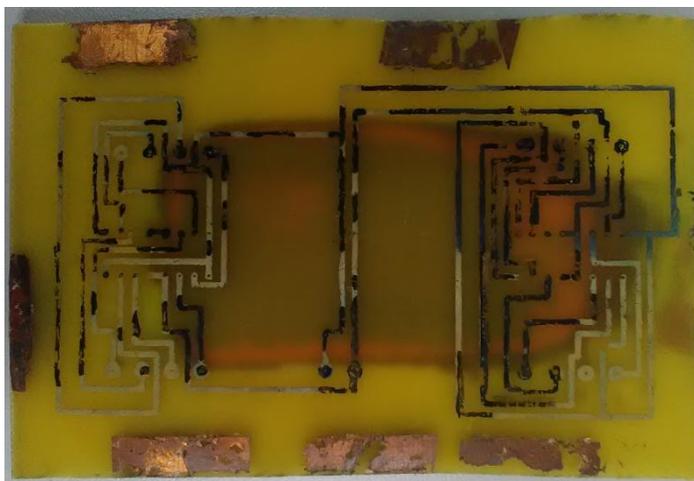
### 1.1 Problemática

Em geral os circuitos são projetados, montados e testados em laboratório utilizando-se matrizes de contatos (*protoboards*). Entretanto, com a evolução do projeto, necessita-se de uma alternativa para que sejam diminuídos os erros causados por mau-contatos gerados pelas *protoboards*. Com isso, para garantir melhor funcionalidade e precisão, os projetistas são obrigados a fabricar placas de circuito impresso.

O processo de transferência térmica de *layout* é o método frequentemente utilizado para fazer as placas de circuito impresso (PCIs) pelos alunos e pesquisadores do campus. Esse procedimento consiste em salvar o *layout* em um arquivo pdf, imprimi-lo em um papel fotográfico e, normalmente utilizando-se um ferro de passar previamente aquecido, pressionar esse papel sobre o filme de cobre do substrato por um determinado tempo, até que o *design* do circuito seja transferido completamente. Entretanto, o grande problema é que esse método é demorado, impreciso, de baixa confiabilidade, além de causar desperdício de material. Na maioria das tentativas as trilhas não são totalmente transferidas, fazendo-se necessário a realização de ajustes para completá-las com canetas permanentes antes de realizar a corrosão do filme de cobre.

Além disso, conforme mostra a Figura 1, frequentemente acontece da transferência dar-se em menos que 50% do *design*. Nestes casos o substrato é condenado pela inviabilidade de reconstrução do padrão definido pelo *layout*.

**Figura 1** - Placa condenada pela falha do processo de transferência do layout.



**FONTE:** Os Autores (2017).

## 1.2 Justificativa

A ideia da construção do *SCHD* (*Spin Coater Hard Disk*) surgiu a partir de uma pesquisa a respeito do funcionamento de um motor de *HDD* (*Hard Disk Drive*), que, por sua vez, é um motor do tipo *BrushlessDC* síncrono. Segundo o Orientador deste projeto, seria possível desenvolver um equipamento de baixo custo, funcional, originado de resíduos eletrônicos, e que auxiliasse no processo de produção de placas de circuitos impresso, sem que ficassem à mercê da sorte quando da realização do processo térmico na transferência de *layout* para o substrato. Haveria a possibilidade de fabricar PCIs nas tecnologias de montagem através de furos (THT) e de montagem em superfície (SMT).

Além do mais, o projeto em questão colabora com o meio ambiente, uma vez que os *HDs* danificados são muitas vezes destinados ao lixo. Quando reciclados, sua estrutura metálica é aproveitada, enquanto os motores passam a ser inúteis e ficam acumulados. Um exemplo disso está no Projeto de Recondicionamento de Resíduos Eletrônicos (E-Lixo), desenvolvido no IFRN ZN. O projeto *SCHD* também utiliza a carcaça da fonte de alimentação de computadores, cooler, chave seletora,

cabos *flat* e parafusos, dando assim nova utilidade a esses materiais.

Tendo isso em vista, o presente projeto propõe o desenvolvimento do equipamento *SCHD*, cujo custo é extremamente baixo do valor de referência do *Spin Coater* comercial encontrado no mercado (Figura 2), marca: MTI Corporation, modelo: VYC200spincoater, faixa de velocidade 500rpm a 6000rpm, e custo aproximado de R\$ 14.704,00. Dessa forma, é possível notar também a viabilidade econômica do projeto proposto.

**Figura 2** - Spin coater comercial.



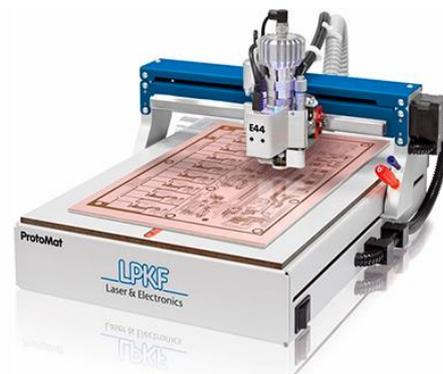
**Fonte:** Sunhayato-Korea<sup>1</sup>

### 1.3 Hipóteses

Diante do problema que foi apresentado, existem várias possíveis soluções. Uma das primeiras que vêm em mente para prototipagem de PCIs é a utilização do equipamento chamado de “prototipadora”. A máquina mostrada na Figura 3, recebe o arquivo CAD (*design* assistido por computador) correspondente ao projeto do circuito e transfere-o para o substrato onde o circuito será montado. A transferência pode ser realizada por processo de fresagem mecânica ou a laser, esculpindo-se sulcos na camada de cobre responsáveis por separar as trilhas desenhadas pelo usuário do restante da placa. Tais equipamentos têm custos de implantação e manutenção elevados.

---

<sup>1</sup> Disponível em <<http://www.sunhayato-korea.com/spin-coater-japan.htm>> Acesso em mai. 2017.

**Figura 3 - Prototipadora.****FONTE:** EDASIM<sup>2</sup>

Como já foi dito, outra solução utilizada em grande escala por estudantes e projetistas em geral é a técnica de transferência térmica mostrada na Figura 04. Após a transferência do *design* para a placa, esta é submetida ao processo de corrosão, que só acontecerá na região não protegida pelo material transferido.

Na maioria das vezes, esse processo de transferência térmica é feito de forma bastante improvisada. Por exemplo, a transferência do *design* para a placa é feita utilizando um ferro de passar roupas e, com isso não se obtém uma transferência perfeita, tendo que reajustar utilizando outros materiais e, na maioria das vezes, também não é alcançada a perfeição no momento da corrosão.

**Figura 4 - Transferência térmica artesanal.****FONTE:** Robson de Souza Martins<sup>3</sup>

Uma outra solução possível é a utilização da fotogração, onde, ao invés de fazermos uso da transferência térmica, utiliza-se um polímero fotossensível que é

<sup>2</sup> Disponível em <<http://www.edasim.com/productos/eda/prototipagem-de-pci/678-protomat-e44.html#prettyPhoto/0/>> Acesso em mai. 2017.

<sup>3</sup> Disponível em <<http://www.robsonmartins.com/eletr/transfterm/>> Acesso em mai. 2017.

espalhado sobre a placa e, quando exposto à luz ultravioleta e revelado, fixa-se apenas na região desejada da placa. Após a revelação, o processo assemelha-se à corrosão utilizada na transferência térmica.

Além de se utilizar de dispositivos de alto custo quando utilizado em meio industrial, o processo de fotogração é relativamente simples e possível de ser desenvolvido utilizando materiais de baixo custo. E é com base nessa possibilidade que o presente projeto busca trabalhar.

O *SCHD (Spin Coater Hard Disk)* busca a solução para o processo de deposição do polímero fotossensível sobre a placa utilizando materiais oriundos de um projeto que recondiciona lixo eletrônico no Campus IFRN ZN. Assim podemos facilitar esse processo de fabricação.

#### 1.4 Objetivos

Será descrito, rapidamente, os objetivos geral e específicos fundamentais para a implementação do projeto.

##### 1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver, utilizando resíduos eletrônicos, o *SCHD (Spin Coater Hard Disk)* a ser utilizado no processo de fabricação de circuitos impressos, mais especificamente na fase de deposição de materiais fotossensíveis (polímeros sensíveis à luz) sobre o filme de cobre do substrato, fazendo com que seja possível obter-se trilhas de diferentes espessuras em circuito impresso montados com componentes PTH (dispositivos de pinos através de furos) e SMD (dispositivos de montagem em superfície). Mais que isso, na geração de máscaras, que são utilizadas na aplicação da pasta de solda nos terminais dos componentes quando utiliza-se a tecnologia SMT. Conseqüentemente, substituindo o *Spin Coater* comercial por um dispositivo de baixo custo, fácil manuseio e altamente funcional.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Testar a rotação do motor;
- Montar o circuito de alimentação;
- Fabricar a placa PCI;
- Construir caixa do circuito e furação do motor;
- Acoplar a bomba de vácuo;
- Desenvolver a programação de controle;
- Ajustar o teclado matricial e display LCD;
- Testar o projeto em laboratório com o polímero fotossensível.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção constam os trabalhos que já foram feitos abordando conceitos e métodos que serão utilizados e desenvolvidos neste projeto. Trata-se de uma seção de grande importância, pois a mesma descreve ferramentas e conceitos considerados de fundamental relevância para a compreensão do trabalho.

### 2.1 Trabalhos anteriores

A principal referência para o desenvolvimento do projeto abordado foi o artigo “*Spin coater based on brushless dc motor of hard disk drivers*” (em português: Spin coater baseado em motor DC sem escovas de discos rígidos), desenvolvido por um grupo de especialistas brasileiros e publicado em um jornal científico internacional. Tal artigo descreve de uma forma bem resumida a execução de um projeto bem parecido com o que será abordado aqui, porém sem muitos detalhes. Por isso, o artigo foi utilizado apenas como base para alguns processos experimentais e da metodologia (BIANCHI et al., 2006).

Ao que se refere ao processo de deposição por centrifugação, utilizamos dois artigos, o primeiro é “*Spin Coating of Photoresists*”, desenvolvido pela MicroChemicals, uma empresa especializada na pesquisa com photoresists e técnicas aplicadas ao desenvolvimento de circuitos elétricos (MICRO CHEMICALS, 2013). E o segundo é “*Spin Coating Process Theory*”, desenvolvido na University of Louisville, e que, como o próprio título já diz, explica a teoria do processo de “spin coating” (UNIVERSITY OF LOUISVILLE, 2013).

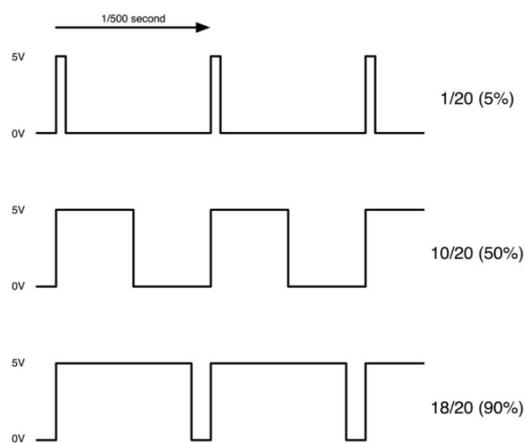
### 2.2 Conceitos

#### 2.2.1 PWM

PWM é a sigla em inglês para *Pulse Width Modulation* (Modulação por largura de pulso), que por sua vez é uma técnica utilizada para a transmissão digital de informação utilizando uma onda de frequência constante e variando a duração do pulso com a amplitude do sinal que contém a informação (SOARES NETO, 2012, p. 127). No caso deste trabalho utilizou-se 5 Volts. A fração do tempo que o sinal

modulado passa com a amplitude máxima é chamada de ciclo de trabalho. A imagem da Figura 5 mostra três exemplos de ondas que fazem uso desse tipo de modulação, todas elas utilizando a mesma amplitude e frequência, mas cada uma com um ciclo de trabalho específico (SOARES NETO, 2012, p. 127).

**Figura 5** - Exemplo de sinais de modulação PWM.



**FONTE:** Adafruit<sup>4</sup>

### 2.2.2 Motor Trifásico

Os motores elétricos são compostos, basicamente, por duas partes fundamentais nomeadas de: estator, a parte estacionária do motor, e rotor, a parte rotativa. A interação entre os campos magnéticos das duas partes do motor é responsável por fazê-lo girar (FITZGERALD, 2006, p. 174).

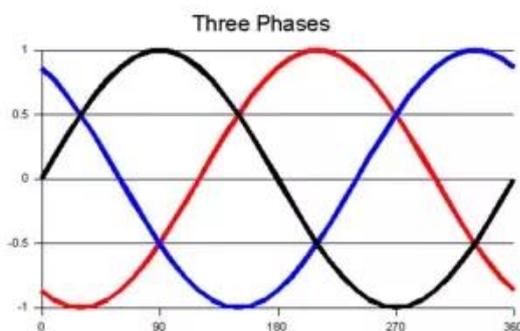
Os motores síncronos são máquinas de corrente alternada que têm a sua velocidade proporcional à frequência da corrente que flui através de sua armadura (conjunto de bobinas localizada no estator do motor). Normalmente, estas máquinas fazem uso de uma corrente DC no seu rotor responsável por gerar um campo eletromagnético e fazer com que esta parte do motor gire em sincronia com o campo eletromagnético gerado pela corrente AC da armadura (FITZGERALD, 2006, p. 239).

Segundo Fitzgerald (2006, p.593) “a geração, transmissão e utilização de potências elevadas de energia elétrica CA envolve quase que invariavelmente um tipo de sistema ou circuito chamado sistema ou circuito polifásico.” Cada fonte de tensão nesse sistema é composta, na verdade, por um grupo de tensões com

<sup>4</sup> Disponível em <<https://learn.adafruit.com/adafruit-raspberry-pi-lesson-9-controlling-a-dc-motor/pwm>> Acesso em mai. 2017.

amplitude e ângulos de fase relacionados entre si, chamadas de “fase”. Entre tais sistemas, o mais utilizado é o trifásico visto apresentar vantagens econômicas e operacionais. Uma fonte de tensão de um sistema trifásico, conforme pode ser visto na Figura 6, é tipicamente formada por três tensões iguais em módulo e deslocadas entre si por ângulos de fase de  $120^\circ$ .

**Figura 6** - Exemplo de sinal trifásico.



**FONTE:**Quora<sup>5</sup>

A aplicação desse tipo de sistema é bastante comum quando se está trabalhando com motores, visto que com ele é possível por exemplo, aplicar sobre as bobinas da máquina uma tensão maior do que a tensão apresentada por cada uma das fases (dependendo da forma como as fases são ligadas às bobinas) (INSTITUTO NEWTON C. BRAGA, 2014).

### 2.2.3 ESC

É a sigla em inglês para *ElectronicSpeedControl* (Controle Eletrônico de Velocidade), que são circuitos que, como o próprio nome já diz, têm como objetivo o controle da velocidade de motores (RC MODELS WIZ, 2014). Estes circuitos são utilizados com frequência no modelismo (principalmente no aeromodelismo) e, na grande maioria das vezes, em conjunto com os motores Brushless.

O ESC interpreta um sinal de entrada e, com base nele controla a potência e velocidade atribuída ao motor a ele conectado. O modelo de ESC utilizado neste projeto tem como entrada um sinal PWM e uma fonte de alimentação e, como saída, um sinal trifásico (RC MODELS WIZ, 2014).

---

<sup>5</sup> Disponível em <<https://www.quora.com/What-is-phase-shift-between-two-currents>> Acesso em mai. 2017.

## 2.3 Ferramentas

### 2.3.1 Arduino MEGA 2560

Trata-se de uma plataforma eletrônica de código aberto (todas as informações necessárias para reproduzi-la são disponibilizadas ao público) que tem como intuito facilitar a prototipagem rápida sem que seja necessário um conhecimento prévio profundo de eletrônica e programação (ARDUINO, 2017).

O ArduinoMega 2560 mostrado na Figura 7, por sua vez, é uma placa Arduino baseada no microcontroladorATmega2560 em conjunto com um oscilador de 16 MHz e conta com 54 pinos de entrada/saídas digitais, dos quais 15 podem ser utilizados como saídas PWM (ARDUINO, 2017).

**Figura 7** -Arduino MEGA 2560.



**FONTE:**Arduino<sup>6</sup>

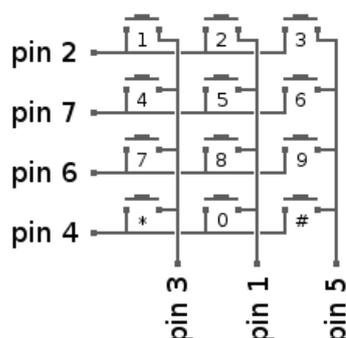
### 2.3.2 Teclado Matricial

O teclado matricial mostrado esquematicamente na Figura 8 é, na verdade, uma técnica de interface que utiliza um conjunto de botões arranjados em formato de grade com o objetivo facilitar a interface entre o usuário e o sistema, além possibilitar o uso de mais botões no sistema utilizando uma quantidade mínima de pinos no microcontrolador (LAZARIDIS, 2010).

---

<sup>6</sup> Disponível em <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3-with-1sheeld>> Acesso em mai. 2017.

**Figura 8** - Esquemático do teclado matricial.



**FONTE:** Hack your Mind, be curious<sup>7</sup>

Na Figura 8 é possível observar a disposição exata dos botões no teclado matricial utilizado neste projeto. No esquema podemos perceber a forma de funcionamento da matriz, onde o botão funciona apenas como uma chave entre o pino da linha e o pino da coluna. Quando o botão é pressionado, fecha o contato entre o pino da sua coluna com o pino da sua linha (LAZARIDIS, 2010).

### 2.3.3 LCD

*OLiquid Crystal Display*, ou em português: Visor de Cristal Líquido é um tipo de dispositivo que, como o próprio nome diz, faz uso de cristal líquido para exibir imagens. Na verdade, o material utilizado por esse display é uma combinação entre dois estados da matéria, o sólido e o líquido, apresentando características desses dois estados de acordo com a necessidade (JOHN, 2017). Na maioria dos displays utilizados em conjunto com microcontroladores, como é o nosso caso, cada pixel é constituído por uma célula que tem a sua opacidade variada de acordo com a necessidade.

### 2.3.4 Filme de Cobre de PCIs

O material condutor geralmente utilizado nas placas de circuito impresso (PCIs), é o cobre como mostra-se na Figura 9. A escolha deste metal se deve à sua excelente condutividade elétrica, somente superada pela prata, além de suas características mecânicas que permitem a produção de folhas de pequena

<sup>7</sup> Disponível em: <<http://hackyourmind.org/articles/raspberry-pi-with-a-keypad-matrix>> Acesso em mai. 2017.

espessura. O processo de deposição do cobre sobre as placas isolantes inicia-se pela aplicação de uma tinta à base de grafite. Em seguida as placas são ligadas ao pólo negativo de uma fonte de corrente contínua e mergulhadas em uma solução saturada com sais de cobre, onde o polo negativo da fonte é ligado à solução. Ocorre então um processo eletroquímico chamado galvanoplastia, obtendo-se a deposição de uma fina camada de cobre metálico sobre a placa. Ao se obter a espessura de cobre desejada, a placa é retirada do processo de galvanoplastia e passada por uma calandra metálica aquecida, que fixa a camada de cobre à placa e deixa-a com uma superfície lisa e uniforme (MEHL, [20-?]).

**Figura 9** - Placa de fenolite com filme de cobre.

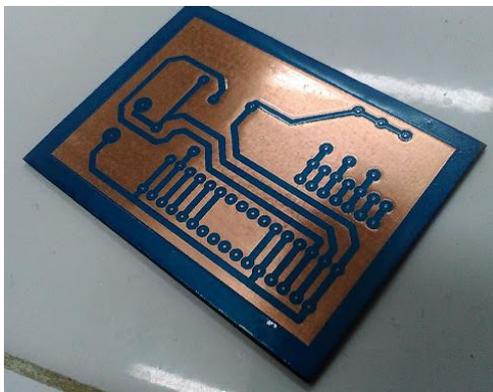


**FONTE:** Os Autores (2017).

### 2.3.5 Photoresist (Polímero Fotossensível)

Polímero fotossensível é uma resina sensível à luz, sensível principalmente à radiação com comprimento de onda situado na região ultravioleta (UV) do espectro. Essas substâncias quando submetidas à luz UV têm suas cadeias poliméricas modificadas (processo de fotolitografia) e, quando do processo de revelação comportam-se de maneira oposta das regiões não sensibilizadas. Dessa forma, como mostrado na Figura 10, o padrão das trilhas definidas no layout do circuito é transferido para a superfície do filme de cobre da PCI (DEFOREST, [20-?]).

**Figura 10** - Placa de fenolite com polímero fotossensível após a revelação.



**FONTE:** Os Autores (2017).

### 2.3.6 Fonte de Alimentação

Dispositivo responsável por fornecer energia elétrica a componentes eletrônicos de determinados circuitos, sejam de testes realizados em laboratórios ou equipamentos eletrônicos (MORIMOTO, 2017).

Existem vários tipos de fontes de alimentação. As Figuras 11, 12 e 13 representam fontes chaveadas, lineares e de bancada, respectivamente. Todas fornecem corrente contínua (DC, *DirectCurrent*), ou seja, convertem a corrente alternada (AC, *Alternatingcurrent*) fornecida pelas concessionárias de energia em corrente contínua, garantindo dessa forma o funcionamento dos circuitos e, conseqüentemente dos equipamentos (GLGSCREEN, 2016).

**Figura 11** - Fonte linear.**FONTE:** Tobia's Blog<sup>8</sup>**Figura 12** - Fonte chaveada.**FONTE:**Os Autores (2017).**Figura 13** - Fonte de bancada.**FONTE:**Os Autores (2017).

### 2.3.7 Bomba de Vácuo

A bomba de vácuo é um equipamento cuja função é remover moléculas de ar ou qualquer outro gás, deixando um vácuo parcial dentro de um determinado volume. Esses equipamentos (Figura 14) são usados em uma ampla variedade de aplicações científicas e industriais, como parte de um processo maior, ou no teste de outros produtos (HERRING, 2017).

Os princípios mais comuns entre as bombas de vácuo são o deslocamento positivo, método este que envolve fazer vácuo expandindo um parte de uma câmara, fechando-a, esgotando-a, e repetindo-se o processo. Outro processo é a transferência de impulso. Neste processo, uma câmara tem dois lados: um lado de vácuo e um de escape. No lado do vácuo, o mesmo é criado e no lado de escape as moléculas do gás são expelidas da câmara. Este método envolve o desenvolvimento de uma bomba volumétrica para que se obtenha vácuo leve na câmara. Acontecendo isso, as moléculas de gás são expelidas para as laterais da câmara. Em uma bomba de difusão, jatos de óleo ou mercúrio são lançados nestas

<sup>8</sup> Disponível em <<https://tobiasmugge.wordpress.com/projetos/fonte-linear-18v1a/>> Acesso em 29 mai 2017.

moléculas isoladas de gás para forçá-las para o fim de escape da bomba (SARAIVA, 2011).

**Figura 14** - Bomba de vácuo.



**FONTE:**Os Autores (2017).

### 2.3.8 O'Ring

Consiste em um anel de borracha ou silicone (Figura 15) que tem por finalidade vedar um espaço entre materiais, por exemplo, duas “chapas” de aço, a fim de evitar vazamento de gases ou líquidos. As partes dos materiais são pressionadas contra o o’ring espremendo-o, impedindo assim vazamentos. Esse anel é amplamente usado em procedimentos hidráulicos e pneumáticos (DIVISSICH, 2014).

Ele oferece uma série de vantagens sobre outros métodos de vedação numa grande variedade de aplicações, devido a sua simplicidade, baixo custo, facilidade de instalação e requisitos de espaço pequeno, sem estruturas de apoio (DIVISSICH, 2014).

**Figura 15 - O’RING****FONTE:** INFICON<sup>9</sup>

### 2.3.9 Motor de HD

Os motores encontrados nos HDs, representado na Figura 16, são do tipo *Brushless* (sem escovas) ou *BLDC* (*Brushless Direct Current*, sem escovas de corrente direta) que, por sua vez, são motores síncronos que, diferentes dos outros motores síncronos, não necessitam que seja aplicada uma tensão DC no seu rotor, pois para gerar o campo magnético do rotor, o BLDC faz uso de ímãs permanentes (FITZGERALD, 2006, p. 283). O seu nome se dá pela ausência das “escovas”, como são chamados os contatos responsáveis por levar o sinal DC à parte rotativa do motor. Esse tipo de motor é, de modo geral, mais silencioso e apresenta um baixo consumo de energia.

**Figura 16 - Motor de HD.****FONTE:** Os Autores (2017).

### 2.3.10 Cooler

O *Cooler* (em português, Resfriador) à base de ar mostrado na Figura 17 é o mais comum e barato sistema de resfriamento. Consiste em um ventilador que gira constantemente para remover o calor excessivo do sistema a ser resfriado. Este

---

<sup>9</sup> Disponível em <<http://products.inficon.com/en-us/Product/Detail/O-Ring>> Acesso em mai. 2017.

sistema é facilmente encontrado em fontes chaveadas, notebooks e CPUs (TECMUNDO, 2017).

**Figura 17 - Cooler.**



**FONTE:**Os Autores (2017).

### 2.3.11 Tacômetro

Equipamento utilizado para medir a velocidade de rotação da parte girante de um equipamento. O modelo mostrado na Figura 18 realiza a medição sem contato e apresenta o resultado em rotações por minuto RPM.

**Figura 18 - Tacômetro óptico.**



**FONTE:**Os Autores (2017).

O seu princípio de funcionamento, baseia-se em uma medida de repetitivos fenômenos, ou seja, oscilações, vibrações, etc.

Ele possui o circuito lógico integrado 555 na configuração monoestável. Assim o circuito é capaz de produzir pulsos na saída com duração constante, desse modo a lógica do tacômetro entende que, caso a frequência dos pulsos aumentem, a

distância entre os pulsos diminuam e se a distância aumentar a frequência diminui.

Dessa forma, fica claro que conforme a velocidade aumenta, a frequência aumenta proporcionalmente (SABER, ELÉTRICA, 2017).

### 2.3.12 Micrômetro

É um instrumento capaz de aferir dimensões lineares de um objeto, por exemplo, espessura, largura, diâmetro, altura etc. com grau de precisão da ordem de micrômetros. Suas características construtivas são semelhantes para todos os modelos, modificando-se apenas os formatos que variam de acordo com a finalidade de utilização. Pode ser encontrado em diversas capacidades e modelos. Geralmente, a divisão de escala dos micrômetros pode ser de 0,01 ou 0,001mm, podendo ser digitais ou não (TRESNA, [20-?]). O micrômetro digital utilizado no projeto é mostrado na Figura 19.

**Figura 19** - Micrômetro digital.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Tendo por base o do nosso trabalho e o vasto número de conteúdo encontrado na Internet, deve-se admitir que fez-se uso de vários artigos disponibilizados online em sites confiáveis, que, embora criticado por muitos como fonte de conteúdo acadêmico, foram muito úteis para o desenvolvimento do projeto.

### 3. METODOLOGIA

Os recursos tecnológicos utilizados no projeto foram: ArduinoMega 2560, ESC, Motor de HD, Bomba de Vácuo, O'ring, Carcaça de Fonte Chaveada, Cooler, Display LCD, Teclado Matricial, uma Fonte Linear e um Gabinete Externo.

O presente projeto foi desenvolvido em várias etapas que serão descritas a seguir.

#### 3.1 Estrutura da caixa de fonte chaveada

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa relativa ao funcionamento do motor a ser utilizado, assim como dos componentes eletrônicos usados para construir os circuitos de controle e da fonte de alimentação. Feitas as pesquisas, passamos ao projeto, montagem em protoboards e repetidos testes dos circuitos.

Uma vez testado os circuitos, surgiu a necessidade de colocar estes em uma caixa para que o mesmo fosse protegido contra quedas e curto-circuitos. A caixa também deveria facilitar as conexões, por exemplo, do cabo de força, cooler e aterramento.

Sugerido o uso de uma carcaça de fonte de desktop ou nobreak, optamos pela carcaça de fonte de desktop. Definida a estrutura, algumas adequações foram tomadas para que os componentes fossem instalados de forma organizada. A principal modificação foi na parte superior da carcaça, onde um furo com diâmetro de maneira que o motor pudesse ser fixado e ficasse com o rotor para fora da caixa foi criado. Além disso, uma base de plástico foi instalada, forrando o fundo da caixa e isolando a PCI da estrutura metálica, evitando curto-circuitos.

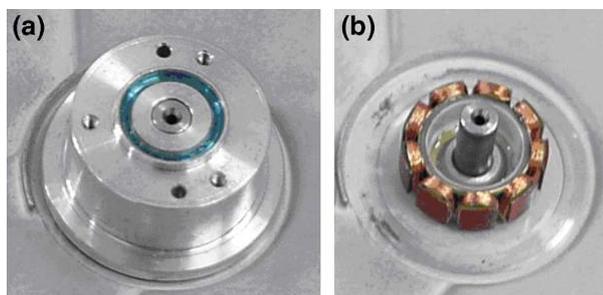
#### 3.2 Furação do motor

Para reduzir os custos do projeto, buscamos obter os materiais de menor custo e de melhor desempenho possível, assim chegamos até os motores encontrados nos HDs (*Hard Disks*, Discos Rígidos), por serem de fácil acesso e desenvolverem velocidades bastante elevadas.

Com o objetivo de construir um mandril pneumático, foram feitas adaptações no motor de HD para permitir a conexão de uma bomba de vácuo. O mandril deveria fixar o substrato que seria rotacionado juntamente com o rotor do motor. A imagem

da Figura 20 apresenta as estruturas externa (a) e interna (b) do motor.

**Figura 20** - Estrutura do motor.



**FONTE:** BIANCHI et al., 2006, p.34.

Com o intuito de fazer a furação da melhor forma possível, fizemos variados testes. Por exemplo, brocas de diferentes diâmetros para diferentes materiais foram testadas, foram utilizadas furadeiras de mão e de bancada, os furos foram feitos utilizando e não utilizando fluido para resfriamento, etc.

Primeiramente, tentou-se realizar a furação utilizando uma broca de aço rápido com 3mm de diâmetro e uma furadeira de mão de alta rotação. Procedimento executado sem que o motor tenha sido desmontado. Chegou-se à conclusão de que seria impossível realizar essa furação, pois o material do eixo do motor tinha dureza maior que a do aço rápido que constitui a broca.

Em um segundo momento, a tentativa de furação foi realizada também com o motor montado e utilizando uma furadeira de alta rotação, porém utilizando uma broca de vídea afiada marca: Bosch, modelo: multiconstruction com 4 mm de diâmetro. Desta vez o furo foi realizado, entretanto como mostrado na Figura 21, o motor foi danificado em razão do diâmetro da broca utilizada e da dificuldade encontrada para manter o furo concêntrico.

**Figura 21** - Motor danificado.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Finalmente, outra metodologia de furação foi adotada e o furo foi realizado com sucesso. Havia sido constatado que seria possível realizar a furação utilizando uma broca de vídea afiada de diâmetro adequado e garantindo sua centralização em relação ao eixo. Uma broca de 3 mm de diâmetro mostrada na Figura 22 foi utilizada.

**Figura 22** - Broca Multiconstruction marca: BOSCH 3mm.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Para garantir a centralização do furo foi utilizada a furadeira de coluna de velocidade variável mostrada na Figura 23, cuja velocidade foi ajustada em seu

menor valor. Para evitar o aquecimento excessivo da peça e eventual desmagnetização dos ímãs permanentes, foi utilizado óleo lubrificante como fluido refrigerante.

**Figura 23** - Furadeira de coluna.



**FONTE:**Os Autores (2017).

### 3.3 Acoplamento da bomba de vácuo

Conforme mostrado na Figura 24, um furo com aproximadamente 8 mm de diâmetro foi executado na lateral da estrutura metálica de tal forma que permitisse a passagem de um tubo de cobre de 1/4 (um quarto) de polegada utilizado para conectar o furo realizado no motor com a bomba de vácuo. Concretizado o furo, a preocupação passou a ser focada em dimensionar o tamanho do tubo e fazer o respectivo corte. Porcas e arruelas foram aplicadas para assegurar a fixação do tubo de cobre na caixa metálica.

**Figura 24** - Adaptação para instalação do tubo flexível de acoplamento à bomba de vácuo.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Uma etapa crucial do acoplamento da bomba de vácuo foi a conexão da tubulação ao bloco do motor, foi necessário desenvolver uma espécie de “bico” a ser acoplado ao motor.

A conexão (bico) foi construída utilizando-se o terminal de pressão de latão mostrado na Figura 25. Primeiramente os excessos do terminal foram recortados, e posteriormente, o mesmo foi instalado em uma furadeira de coluna que foi manuseada como um torno. Prendendo o terminal na furadeira e rotacionando-a, a peça foi aos poucos sendo usinada e moldada com uma lima até que atingisse o formato desejado. Um furo concêntrico de 2 mm de diâmetro foi realizado no parafuso de fixação.

**Figura 25** - Terminal de pressão de latão.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Um tubo de cobre foi soldado na peça usinada para que fosse possível a conexão com o tubo de cobre acoplado a caixa metálica. A soldagem das peças de

cobre foi realizada usando-se um maçarico e varetas de solda foscooper mostrados nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

**Figura 26** - Maçarico utilizado na soldagem dos tubos de cobre.



**FONTE:**Os Autores (2017).

**Figura 27** - Varetas de solda foscooper.



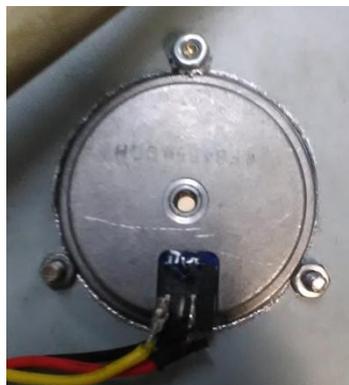
**FONTE:** Congefrio<sup>10</sup>

Utilizando-se de uma prensa hidráulica, a conexão construída foi acoplada por pressão ao bloco do motor (Figura 28). Posteriormente, utilizando-se um tubo flexível o conector foi acoplado ao tubo de cobre fixado na caixa metálica.

---

<sup>10</sup> Disponível em <<http://congefrio.com.br/vareta-de-solda-foscooper.html>> Acesso em 24 maio 2017.

**Figura 28** - Motor com eixo furado.



**FONTE:** Os Autores (2017).

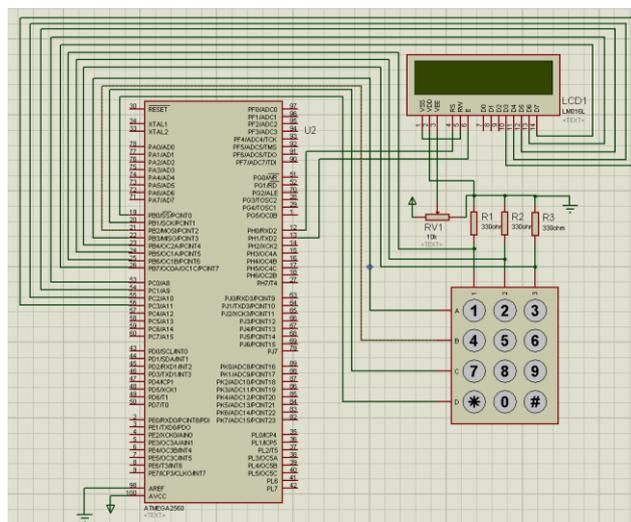
### 3.4 Criação do layout dos circuitos da fonte e do teclado

Para projetar uma placa de circuito impresso com trilhas e ilhas de qualidade, deve-se usar uma ferramenta adequada para gerar um arquivo PCI que, posteriormente, utilizando algum método de transferência, será transportado para a superfície do filme de cobre da placa de circuito impresso.

Conforme já exposto, este projeto consiste de dois circuitos. O circuito de potência (a fonte de alimentação) e o circuito de controle que envolve o arduino e os componentes da interface (teclado matricial e display LCD). Vários *Softwares* são utilizados quando o objetivo é criar o layout de circuitos eletrônicos. O programa Proteus foi utilizado para simular e gerar o layout dos circuitos das PCIs desenvolvidas.

Primeiramente, os esquemas dos circuitos foram desenvolvidos e simulados no módulo ISIS do Proteus. Posteriormente, os circuitos foram exportados para o módulo ARES onde foram gerados os respectivos *layouts*. A Figura 29 ilustra o esquemático de um dos circuitos desenvolvidos.

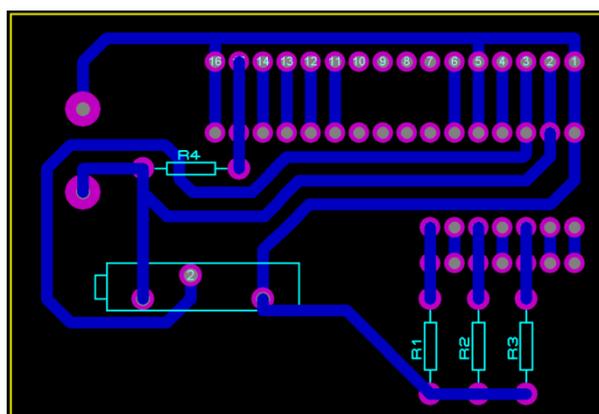
Figura 29 - Esquemático do circuito de controle.



FONTE: Os Autores (2017).

O módulo ARES permite que as trilhas e ilhas sejam dimensionadas de acordo com a necessidade do projeto, isto significa a possibilidade de escolha do tamanho das ilhas, seu formato, a espessura das trilhas e ainda se serão do tipo *Top Copper* ou *Bottom Copper*. A imagem da Figura 30 mostra o layout do circuito após os ajustes das trilhas e ilhas.

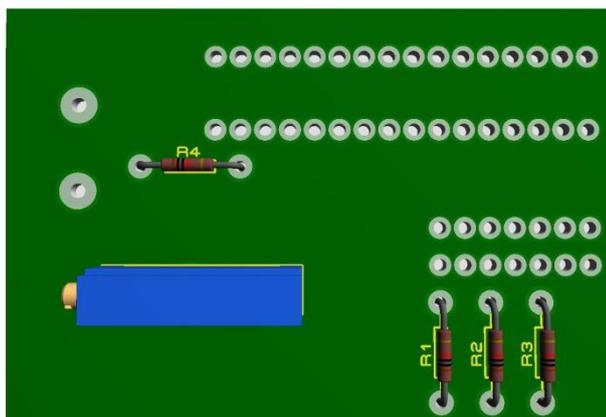
Figura 30 - Layout do circuito de controle.



Fonte: Os Autores (2017).

Realizado todos os ajustes, a opção “visualização 3D” mostrada na Figura 31 pode ser acionada, permitindo observar o aspecto que a placa terá quando fabricada.

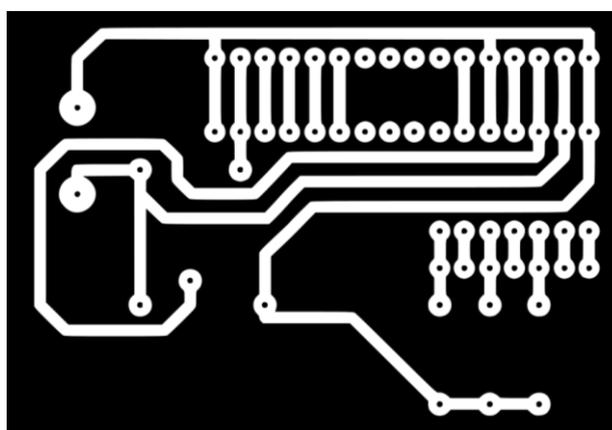
**Figura 31** - Visualização 3D da PCI.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Por fim, como pode ser visto na Figura 32, o arquivo gerado é exportado para formato .pdf e impresso para a produção de um fotolito. O fotolito foi utilizado quando da transferência do padrão do circuito (layout) para o polímero fotossensível depositado sobre o filme de cobre da placa.

**Figura 32** - Layout do circuito em .pdf (fotolito)



**FONTE:**Os Autores (2017).

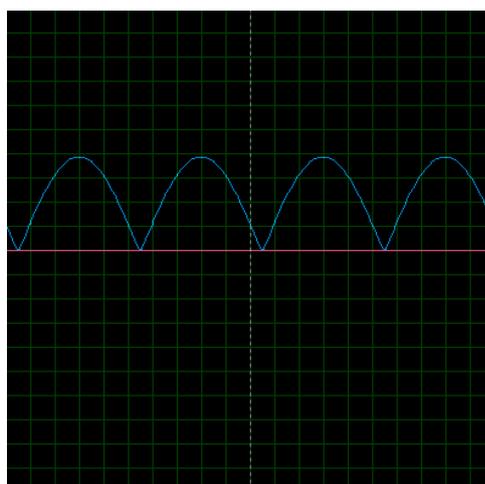
### 3.5 Alimentação do motor

A alimentação do motor deu-se através de uma fonte de tensão linear projetada e construída em três etapas: circuito de retificador, filtro capacitivo e regulador de tensão.

Como a finalidade transformar a tensão alternada da rede de distribuição (220 V) em uma tensão alternada de menor amplitude foi utilizado um dispositivo de potência denominado transformador abaixador de características: entrada de 220V ou 110V; duas saída de 12V; corrente de 1A.

Realizada a redução da tensão, uma ponte retificadora composta por 4 diodos de silício 1N4007 foi adicionada ao circuito com objetivo de converter a tensão alternada em contínua. Ao passar pela retificação, a tensão alternada torna-se contínua pulsante conforme ilustrado na Figura 33.

**Figura 33** - Sinal pulsante.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Com o intuito de transformar o sinal pulsante em constante, um filtro capacitivo foi adicionado ao circuito. O filtro foi montado utilizando capacitores de 01000 $\mu$ F 5V; 100 $\mu$  25V; 100nF 25v; e 100pF.

Dois reguladores de tensão foram utilizados, o LM7812 (regulador de 12 volts) e o LM317 (Regulador variável). O primeiro é utilizado para a alimentação elétrica do cooler usado para resfriamento, e também do Arduino. A utilização do segundo regulador deve-se a necessidade de aumentar a tensão fornecida ao ESC, mantendo-a em um valor em torno de 16V, isso porque o motor não consegue vencer a inércia quando o ESC é alimentado com apenas 12V. O aumento foi obtido por meio de ajustes de uma resistência variável conectada ao regulador.

### 3.6 Teste do motor após a conexão da bomba de vácuo

Realizada a conexão do motor à bomba de vácuo, foram feitos testes de funcionamento para verificar a integridade do sistema pneumático.

O motor foi operado sem o acionamento da bomba de vácuo; posteriormente com a mesma acionada, mas com o motor sem carga; por fim com carga conectada a vácuo no motor. Em variadas velocidades foram testadas cada situação.

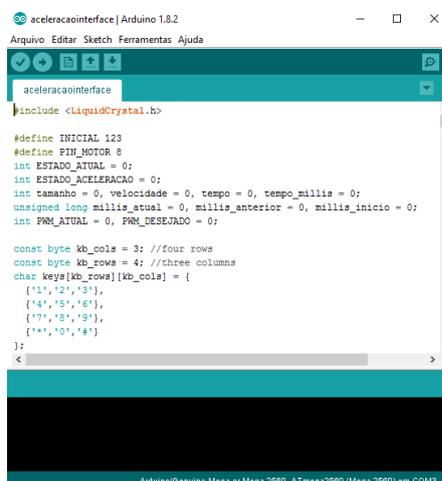
### 3.7 Programação

Para desenvolver o software do equipamento foi utilizado a linguagem de programação dedicada do Arduino. O código é baseado em Wiring, um framework de código aberto voltado para programação de microcontroladores (Wiring, 2017).

Mesmo utilizando uma lógica simples, que poderia ser facilmente implementada em outras linguagens, optou-se o Arduino pela facilidade na prototipagem do projeto, pelo fácil acesso às placas do Arduino e pela facilidade de acesso a bibliotecas, caso fossem necessárias. No protótipo final do programa, foi utilizado apenas uma biblioteca: a LiquidCrystal, que auxiliou no trabalho com o display LCD.

Como pode ser visto na Figura 34, o ambiente de desenvolvimento utilizado foi o Arduino Software IDE (*IntegratedDevelopmentEnvironment*, em português: Ambiente de Desenvolvimento Integrado) de desenvolvimento padrão para a plataforma Arduino, escrito em java e baseado em Processing (Processing, 2017).

**Figura 34** - Trecho de código fonte na IDE padrão do Arduino.



```
aceleracaointerface | Arduino 1.8.2
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
aceleracaointerface
#include <LiquidCrystal.h>

#define INICIAL 123
#define PIN_MOTOR 8
int ESTADO_ATUAL = 0;
int ESTADO_ACCELERACAO = 0;
int tamanho = 0, velocidade = 0, tempo = 0, tempo_millis = 0;
unsigned long millis_atual = 0, millis_anterior = 0, millis_inicio = 0;
int PWM_ATUAL = 0, PWM_DESEJADO = 0;

const byte kb_cols = 3; //four rows
const byte kb_rows = 4; //three columns
char keys[kb_rows][kb_cols] = {
  {'1', '2', '3'},
  {'4', '5', '6'},
  {'7', '8', '9'},
  {'*', '0', '#' }
};
<
```

**FONTE:**Os Autores (2017).

A utilização da plataforma Arduino facilitou em muito o desenvolvimento do projeto. Ela traz uma gama de ferramentas de software e de hardware que auxilia no processo de projeto e prototipagem do sistema. Além do uso da linguagem padrão do Arduino, também foi utilizada a sua organização padrão que é constituída de um método implementado logo no início da execução do programa (chamado de “*setup*”) e a execução infinita e sequencial (o método “*loop*”) até que o programa seja interrompido.

Outra contribuição bastante positiva desta plataforma para o projeto foi a implementação nativa de funções como a responsável por controlar a saída PWM nas portas do microcontrolador. Além do fácil acesso às bibliotecas, como a que foi utilizada para exibir as informações no display LCD, existem as funções de interação com o circuito do display já prontas, o que levou a economia de horas de trabalho.

Como foi explicado anteriormente, o ESC que utilizamos no presente projeto controla a velocidade do motor trifásico de acordo com o PWM injetado na sua entrada. Como um dos objetivos é o controle da velocidade do motor, a interação entre o sinal de entrada do ESC e a velocidade desenvolvida pelo motor foi uma das etapas que exigiu maior atenção quando do desenvolvimento.

O Arduino conta com um controle de PWM que varia o ciclo de trabalho utilizando valores inteiros entre 0 e 255, onde 0 equivale ao ciclo de trabalho de 0% e 255 a um ciclo de trabalho de 100%.

Para que fazer o teste e levantar os melhores valores para o processo, um código bem simples foi desenvolvido e gravado no Arduino. Esse código apenas lê um valor pela entrada serial do microcontrolador e escreve-o no pino PWM ao qual o contato de entrada do ESC estava conectado (Código disponível no Apêndice 1).

Com o avanço dos testes, foi criado um segundo código. Esse agora, assim como o anterior, lê um valor na porta serial, mas, ao invés de gravar o valor lido diretamente no pino de saída, executa um processo de aceleração até alcançar o valor de PWM informado pelo usuário e aguarda pelo tempo em segundos que também é informado pelo usuário (Código disponível no Apêndice 2).

O Arduino não tem suporte nativo ao uso de múltiplas funções, assim, sempre que é chamada a função “delay” (e suas derivadas), que é responsável por fazer o sistema aguardar por um tempo definido na programação, a execução é interrompida até que se passe aquele tempo definido. Isso é uma dificuldade para vários projetos que, assim como este, precisa trabalhar com mais de uma função ao mesmo tempo, como, por exemplo, aguardar o tempo definido pelo usuário mas também verificar se usuário está pressionando alguma tecla.

Para resolver esse problema, foi utilizada uma técnica estudada na disciplina Controladores Lógicos Programáveis (CLP). Estes controladores geralmente fazem uso de estados, que são variáveis responsáveis por controlar o funcionamento do sistema e dizer em qual parte da execução o programa se encontra.

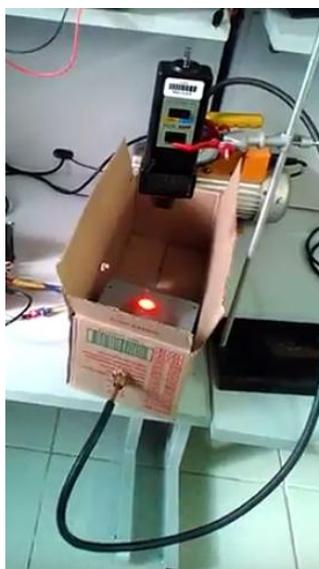
Para trabalhar com temporizadores sem que a execução do programa fosse

interrompida, e principalmente com funções simultâneas, foi implementada a lógica de estado. Foi definida uma variável global onde é armazenado o valor do estado atual, e sempre que o método “loop” é executado verifica-se o estado atual, o tempo de execução atual, e compara-se com outras informações, desta forma o sistema sempre sabe qual “atitude” deve ser tomada.

### 3.8 Medição da velocidade de rotação do motor

Conforme demonstrado na configuração experimental da Figura 35, a velocidade de centrifugação foi medida utilizando-se um tacômetro digital operando no modo óptico. Um feixe de laser vermelho incide sobre a superfície da amostra que está sendo submetida ao processo de centrifugação, sendo refletida por uma fita reflexiva instalada conforme ilustrado na Figura 36 a luz é detectada pelo próprio tacômetro. O equipamento de medição por sua vez determina a velocidade de rotação e apresenta em um display.

**Figura 35** - Configuração experimental utilizada para medir a velocidade de rotação.



**FONTE:**Os Autores (2017).

**Figura 36** - Placas utilizadas nos testes com fita reflexiva instalada



**FONTE:**Os Autores (2017).

Para garantir a repetibilidade do procedimento e evitar eventuais erros de medida, o tacômetro foi mantido fixo utilizando-se um suporte obtido no laboratório de química do IFRN Campus Zona Norte. Mantendo-se sempre a mesma distância entre a amostra e o detector, o ciclo de trabalho do PWM foi gradualmente variado medindo-se as respectivas velocidades de rotação obtidas.

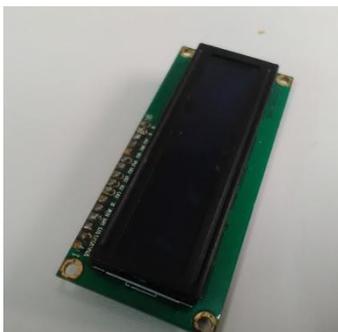
Os dados coletados foram tratados e plotados utilizando-se uma ferramenta de software denominada OriginPro.

### 3.9 Interface com o usuário

#### 3.9.1 Display LCD

Para visualizar os parâmetros de programação e de operação, foi utilizado o display LCD da Figura 37 que contém um circuito integrado Hitachi HD44780. Para facilitar a interação do programa com o display, fez-se uso de uma biblioteca disponibilizada no site da própria plataforma Arduino de nome LiquidCrystal. A biblioteca fornece as funções responsáveis, por exemplo, por posicionar o cursor e imprimir valores no display.

**Figura 37** - Display LCD utilizado no projeto.



**FONTE:**Os Autores (2017).

### 3.9.2 Teclado

A interface de entrada utilizada foi a matriz de botões da Figura 38. Para identificar as teclas que estão sendo pressionadas no momento desejado, foi utilizado uma lógica de loop, onde foram alimentados os pinos das colunas da matriz (no nosso caso os pinos 1, 3 e 5) e foram observados os pinos das linhas que estão recebendo tal alimentação. Verificada a coluna que está sendo alimentada naquele momento e a linha que está recebendo esse sinal, foram identificadas quais teclas estão sendo pressionadas.

**Figura 38** - Teclado utilizado no projeto.



**FONTE:**Os Autores (2017).

### 3.9.3 Entradas do usuário

Tratando-se do processo de utilização do equipamento *SCHD*, são solicitadas ao usuário duas informações: o tempo que a amostra será submetida ao processo de centrifugação; e a velocidade máxima de rotação em *rpm*. Tais informações são fornecidas usando-se o teclado matricial.

As informações inseridas pelo usuário são números. Portanto, foi desenvolvido um método que verifica as teclas pressionadas pelo usuário, identifica a qual número aquela tecla corresponde e acrescenta o caractere correspondente àquele número a uma variável do tipo *string*(variável que armazena texto). Caso a tecla pressionada pelo usuário não seja correspondente a um número mas sim à cerquilha (#), o sistema entende isso como um “ok” do usuário, converte a variável onde estavam sendo armazenados os caracteres em um valor inteiro e retorna esse valor. Se a tecla pressionada não for um número nem a cerquilha mas sim o asterisco (\*), isso é computado pelo sistema como um “apagar” e o último caractere que havia sido inserido na variável de retorno é retirado.

Além do método que lê um número digitado pelo usuário no teclado, foram desenvolvidas duas outras funções: a primeira verifica apenas se o usuário está pressionando alguma tecla e retorna essa informação (verdadeira ou falsa); a segunda é responsável por verificar se o usuário está pressionando uma das “teclas de função”, ou seja, a cerquilha ou o asterisco. Essas duas funções são utilizadas em estados específicos do sistema, por exemplo: a aceleração do motor será cancelada caso o usuário pressione uma das teclas de função.

### 3.10 Caracterização do processo de centrifugação (*spin coating*)

Foram realizados testes da principal aplicação do *SCHD*. Trata-se da aplicação/espalhamento de polímeros fotossensíveis (fotoresiste) sobre substratos. Para a realização do processo são adotados os seguintes passos: inicialmente a bomba de vácuo é acionada; o substrato é posicionado sobre o mandril pneumático; deposita-se o polímero na superfície do substrato e; centrifuga-se a amostra na velocidade e pelo tempo pré definidos pelo usuário.

Acionando o vácuo o sistema torna-se apto a fixar o substrato a ser rotacionado. A fixação ocorre por processo pneumático. Conforme ilustrado na

Figura 39, no instante em que a amostra é posicionada sobre o O'ring cria-se um vácuo na região do mandril, e por sucção o substrato a ser centrifugado é mantido aprisionado.

**Figura 39** - Fixação da amostra para a centrifugação



**FONTE:**Os Autores (2017).

Como ilustrado na Figura 40, efetivada a fixação do substrato realiza-se a deposição do polímero sobre a superfície da amostra.

**Figura 40** - Deposição do polímero fotossensível

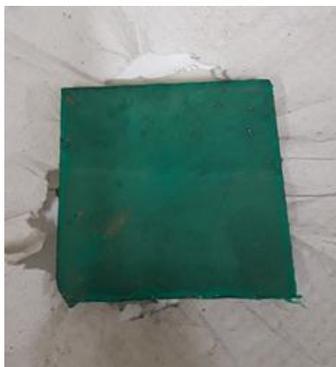


**FONTE:**Os Autores (2017).

Tendo sido informado pelo usuário o tamanho da amostra, o tempo e a velocidade de rotação, inicia-se o processo de centrifugação. Durante esta etapa, pela ação da força centrífuga o ftopolímero é espalhado sobre a superfície do

substrato. Após a centrifugação e aplicação de uma camada uniforme de polímero como mostrado na Figura 41, o vácuo é interrompido e o substrato é removido.

**Figura 41** - Camada uniforme de fotopolímero depositado na superfície da amostra



**FONTE:**Os Autores (2017).

As características do processo de *spin coating* foram levantadas utilizando-se 07 (sete) amostras de fenolite recobertas com filme fino de cobre, recortadas conforme mostrado na Figura 42 com as dimensões de 5 cm por 5 cm.

**Figura 42** - Recorte das placas de fenolite.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Para remover óxidos, impurezas e arestas decorrentes do processo de corte, as amostras foram lixadas inicialmente utilizando lixa de granulação 600 e posteriormente lixa de granulação 1200. Em seguida as amostras foram lavadas com detergente neutro, enxaguadas e secas obtendo-se o resultado da Figura 43.

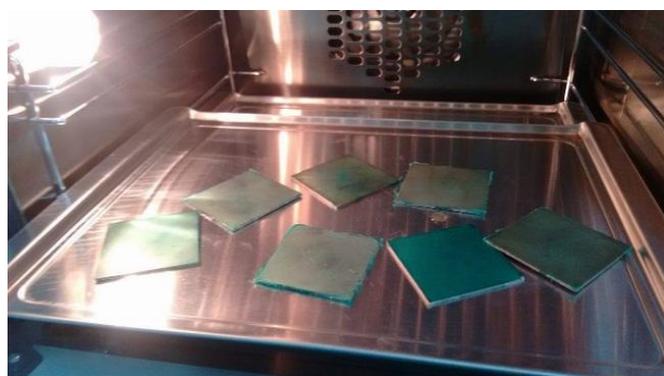
**Figura 43** - Placas cortadas e preparadas para o processo de centrifugação.



**FONTE:** Os Autores (2017).

Utilizando-se as amostras devidamente identificadas, foram realizados diferentes processos de centrifugação. A deposição do polímero fotossensível foi realizada nas velocidades de rotação de 1000 rpm, 2500 rpm, 3500 rpm, 5300 rpm, 6000 rpm, 7000 rpm e 8000 rpm. Na Figura 44 é possível observar as amostras com o filme de ftopolímero depositado.

**Figura 44** - Amostra com ftopolímero depositado e centrifugado.



**FONTE:**Os Autores (2017).

As amostras contendo o polímero centrifugado são mantidas em um

recipiente fechado para evitar sua exposição aos raios luminosos do ambiente.

Conforme mostrado na Figura 45, finalizada a etapa de centrifugação as amostras são submetidas a um processo de secagem e remoção de solventes em um forno marca: Unox, modelo: XF 003, na temperatura de 80°C, e por um tempo de 20 minutos.

**Figura 45** - Placas colocadas no forno para processo de secagem e remoção de solventes.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Para medir a espessura, uma parte do filme depositado foi retirado criando-se um degrau entre o substrato e o próprio polímero. A remoção do filme polimérico foi realizada pela imersão das amostras em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH). A Figura 46 mostra os substratos após a remoção parcial do filme polimérico.

**Figura 46** - Amostras após a remoção parcial dos filmes poliméricos.



**FONTE:**Os Autores (2017).

A espessura dos filmes poliméricos foi obtida utilizando-se um micrômetro marca: DIGIMESS, modelo: 110.284. Foram medidas as regiões com e sem o filme

polimérico, cujos valores foram posteriormente subtraídos para definir a espessuras dos filmes depositados. A Figura 47 mostra o arranjo experimental utilizados quando da medição das espessuras.

**Figura 47** - Arranjo experimental utilizado na medição da espessura dos filmes poliméricos.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Os dados coletados foram tratados e plotados utilizando-se uma ferramenta de software denominada OriginPro.

### 3.11 Desenvolvimento do gabinete para o equipamento *SCHD*

Considerando que durante o processo de centrifugação um substrato é rotacionado em alta velocidade e ainda, que o mandril pneumático não garante a fixação da amostra para todas as circunstâncias, foi necessário adotar procedimentos de segurança para os operadores/desenvolvedores do *SCHD*.

Conforme mostrado na Figura 48, inicialmente foi utilizada uma caixa de papelão para garantir a contenção da amostra em uma eventual falha do sistema de aprisionamento por vácuo.

**Figura 48** - Caixa de papelão utilizada nos testes para a contenção das amostras.

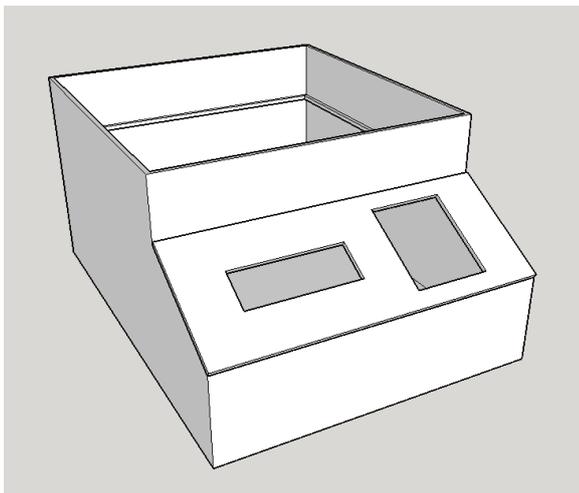


**FONTE:**Os Autores (2017).

Para melhorar o aspecto visual do equipamento, bem como para a instalação dos circuitos eletrônicos e periféricos, foi desenvolvido um gabinete para o *SCHD*.

Utilizando a ferramenta SketchUp da Trimble, foi desenvolvido o projeto do gabinete mostrado na Figura 49.

**Figura 49** - Projeto do gabinete do *SCHD*.



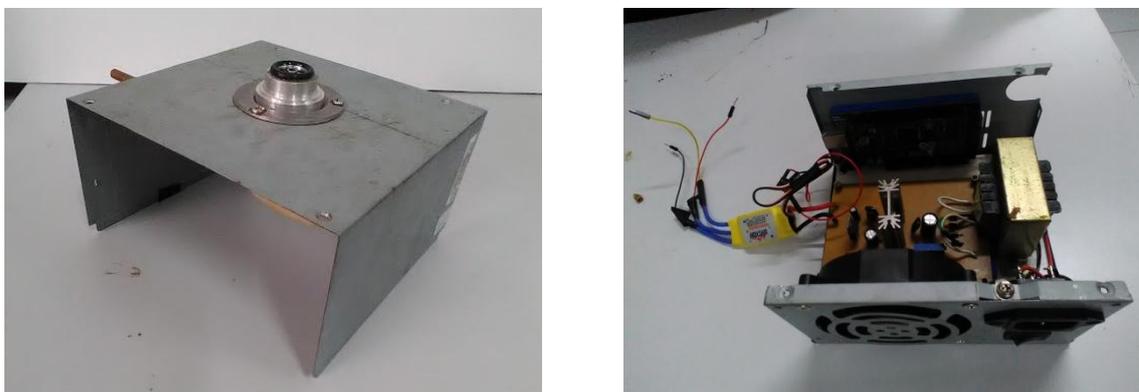
**FONTE:**Os Autores (2017).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Estrutura da caixa de fonte chaveada

A organização e segurança dos circuitos, assim como o baixo custo do equipamento foi garantida pelo uso de componentes reciclados como cooler, chave seletora, cabo de força e da carcaça da fonte de *Desktop* devidamente adaptada conforme mostrado na Figura 50.

**Figura 50** - Carcaça da fonte de Desktop adaptada para receber circuitos eletrônicos motor e conexões para acoplamento da bomba de vácuo.



**FONTE:** Os Autores (2017).

### 4.2 Furação do motor

A furação realizada no motor foi de extrema importância para o desenvolvimento do projeto, uma vez que a fixação pneumática do substrato não seria possível caso essa etapa não fosse realizada. O eixo após a furação funcionou perfeitamente assim como as características magnéticas foram mantidas e, dessa forma, o desempenho de funcionamento não foi prejudicado. A Figura 51 mostra o resultado da furação.

**Figura 51** - Motor após a furação.



**FONTE:**Os Autores (2017).

#### 4.3 Acoplamento da bomba de vácuo

O resultado de todo o procedimento de usinagem e solda do bico descrito na metodologia pode ser observado na Figura 52. Esta peça mostrou-se eficiente suportando o vácuo aplicado quando da realização dos processos de centrifugação.

**Figura 52** - Bico após usinagem e solda.



**FONTE:**Os Autores (2017).

Como pode ser observado na Figura 53, a conexão fabricada permitiu o acoplamento entre o motor e a tubulação do sistema de vácuo. Como consequência, a fixação pneumática do substrato a ser centrifugado foi obtida.

**Figura 53** - Acoplamento entre motor e sistema de vácuo.

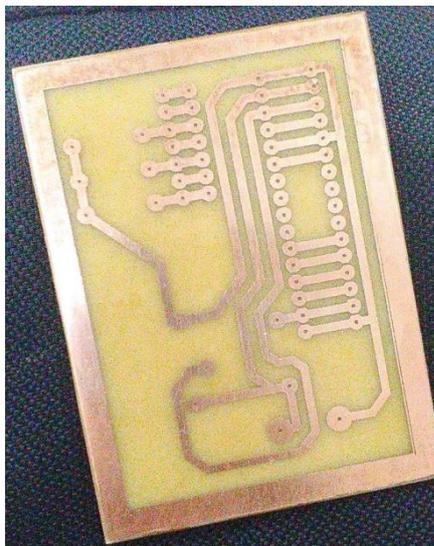


**FONTE:**Os Autores (2017).

#### 4.4 Criação do layout dos circuitos da fonte e do teclado

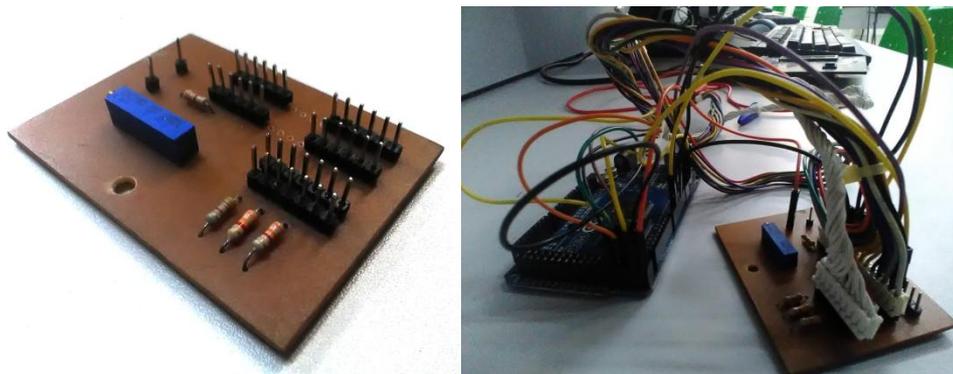
A transferência dos layouts projetados para o substrato ocorreu de forma satisfatória. A imagem da Figura 54 apresenta a PCI da interface do SCDH após a transferência (por meio do processo de fotogração) e corrosão do cobre. Posteriormente, na Figura 55 mostra-se o circuito-interface completamente montada.

**Figura 54** - PCI de interface do *SCHD*.



**FONTE:** Os Autores (2017).

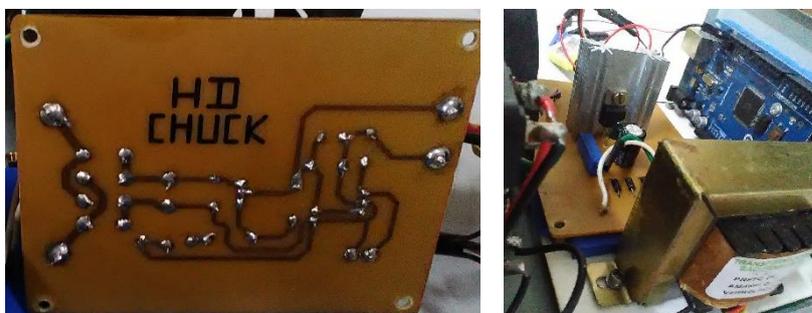
**Figura 55** - PCI de interface do *SCHD* como componentes montados.



**FONTE:** Os Autores (2017).

Além da interface, é possível observar o resultado final da placa de circuito impresso da fonte de alimentação mostrado na Figura 56. O layout dessa PCI, por sua vez, foi transferido através do processo térmico, o que impôs dificuldade, ou seja, diferentemente da placa da interface em que utilizamos o processo de fotogração, a transferência do layout da PCI da fonte exigiu a realização de várias tentativas para que fosse alcançada uma transferência satisfatória.

**Figura 56** - PCI da fonte de alimentação



**FONTE:** Os Autores (2017).

Independentemente do método de transferência utilizado, os dois circuitos após a montagem não apresentaram erros prejudiciais ao funcionamento. Ao contrário, mostraram-se ser eficazes. Além do mais, nenhum erro de layout foi identificado.

#### 4.5 Alimentação do Motor

O circuito de alimentação projetado atendeu às especificações de projeto. Os diferentes circuitos do *SCHD* foram convenientemente alimentados pelo suprimento adequados dos níveis de tensão e correntes necessários.

Além da alimentação do motor e componentes periféricos, a fonte propiciou o funcionamento do Arduino sem que esteja conectado ao computador através do cabo USB. Dessa forma, o equipamento tornou-se autônomo, necessitando ser conectado apenas a rede elétrica para que possa funcionar conforme esperado.

Conforme mostrado na Figura 50 (item 4.1), os circuitos foram organizados em uma caixa metálica obtida a partir da reciclagem de lixo eletrônico.

#### 4.6 Teste do motor após a conexão da bomba de vácuo

Os testes inicialmente apresentaram um grande problema. Quando da partida do motor com o substrato acoplado, em razão da falta de ajustes na aceleração, o motor não conseguia vencer a inércia para iniciar o movimento de rotação. Entretanto, após vários ajustes realizados no código da programação, a rampa de aceleração foi aperfeiçoada, solucionando definitivamente o problema detectado.

#### 4.7 Programação

O processo de aceleração da placa foi a maior dificuldade enfrentada durante todo o desenvolvimento do projeto, gerar o sinal trifásico para o motor usando o arduino não foi uma tarefa fácil. A execução do projeto foi iniciada utilizando o ESC, mas a experiência inicial não foi muito motivadora, chegando-se até a tentar produzir o sinal trifásico diretamente no Arduino, entretanto os testes não tiveram bons resultados e foi necessário voltar ao estudo do ESC.

A primeira percepção obtida nos testes foi que não se podia iniciar a execução do programa já enviando um valor alto para o ESC, deveria ser desenvolva uma lógica de aceleração do motor para que ele pudesse vencer a inércia e continuar a aceleração até chegar a velocidade desejada. A lógica desenvolvida define um ciclo de trabalho inicial de 48% (pois percebeu-se que era pouco depois dos 48% que o motor começava a girar) aumentando gradualmente em pequenos passos até que o motor atinja a velocidade definida pelo usuário.

A lógica inicialmente desenvolvida enquanto eram feitos os testes, fez com que se percebesse, com o auxílio do osciloscópio, que o valor do ciclo de trabalho enviado para o ESC não correspondia fielmente ao valor definido na programação, por motivo já descrito: o Arduino só aceita valores inteiros entre 0 e 255, ele não aceita valores decimais, como 0,4 ou 159,6.

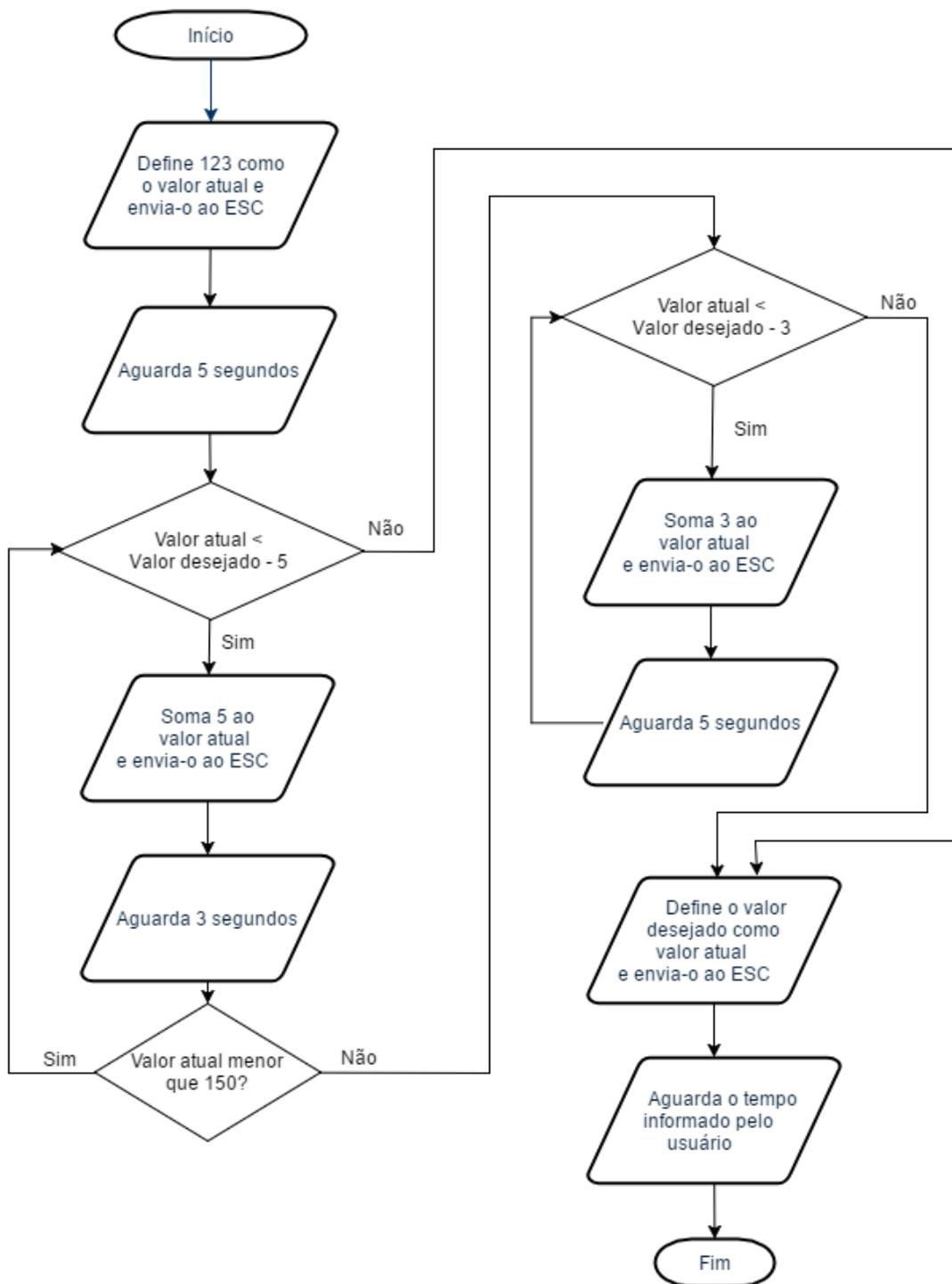
Ao perceber isso, modificou-se a programação e ao invés de estipular valores percentuais e os converter para o valor inteiro aceito pelo Arduino, passou-se a trabalhar diretamente com os valores inteiros.

Após vários testes utilizando o código do apêndice 1, e observando o comportamento do motor, foram traçados os valores padrões a serem utilizados na programação do processo de aceleração.

Na tentativa de deixar o dispositivo o mais autônomo possível, chegou-se até a implementar um sensor de corrente com o intuito de identificar o início da rotação do motor, mas percebeu-se que o valor de PWM enviado pelo Arduino para o ESC no momento do início da rotação do motor era sempre o mesmo. Além disso, a variação na corrente consumida pelo motor não era tão intensa para que fosse possível detectá-la eletronicamente de uma forma simples.

Após vencer a inércia, percebeu-se que não era possível executar um processo de aceleração muito acentuada, pois o motor parava de rodar. Para resolver este problema, a programação e o funcionamento do ESC foram estudados, obtendo-se a lógica exibida no diagrama da Figura 57. A lógica desenvolvida foi implementada no código utilizado na aceleração, mostrado no apêndice 2. A utilização da lógica de estados facilitou bastante a implementação dessa lógica no código final do projeto.

Figura 57 - Diagrama de aceleração do motor.



FONTE:Os Autores (2017).

#### 4.8 Medição da velocidade de rotação do motor

Um dos motivos para afirmar o sucesso do projeto, são as velocidades alcançadas com o *SCHD* durante os testes realizados utilizando-se uma placa de fenolite quadrada com 5 cm de lado. A Tabela 01 mostra os valores utilizados na saída PWM do Arduino, o Ciclo de trabalho (*DutyCycle*) do sinal de saída, e a velocidade de rotação final alcançada pela placa.

**Tabela 01** - Mapeamento PWM/Ciclo de trabalho versus velocidade de rotação do motor.

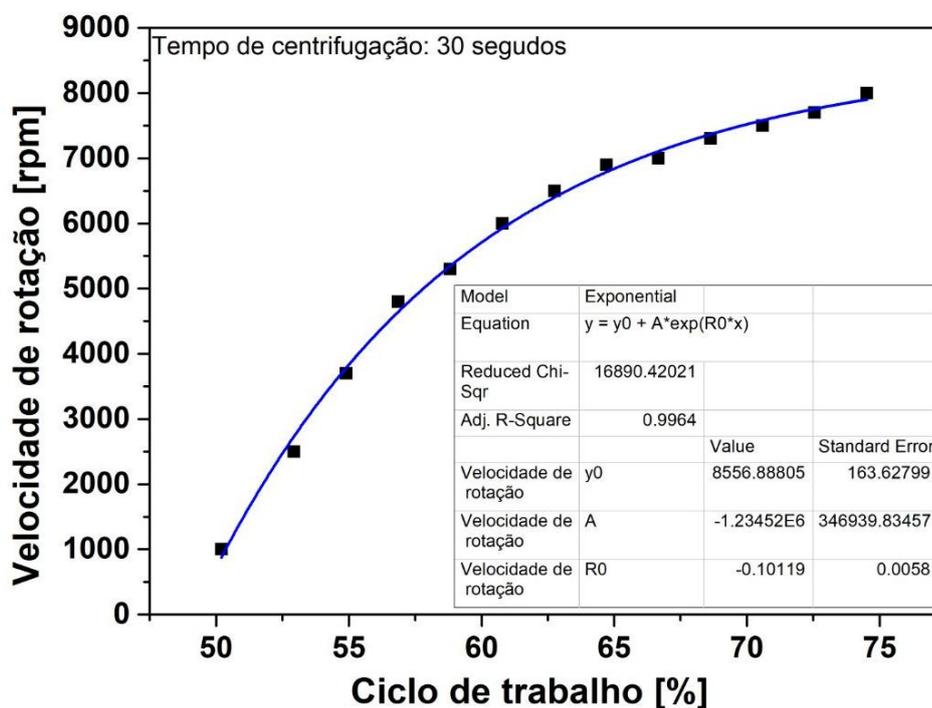
<b>PWM</b>	<b>Ciclo de trabalho</b>	<b>Velocidade (RPM)</b>
<b>128</b>	50,20%	1000
<b>135</b>	52,94%	2500
<b>140</b>	54,90%	3700
<b>145</b>	56,86%	4800
<b>150</b>	58,82%	5300
<b>155</b>	60,78%	6000
<b>160</b>	62,75%	6500
<b>165</b>	64,71%	6900
<b>170</b>	66,67%	7000
<b>175</b>	68,63%	7300
<b>180</b>	70,59%	7500
<b>185</b>	72,55%	7700
<b>190</b>	74,51%	8000

**FONTE:**Os Autores (2017).

Ainda que os valores medidos sejam satisfatórios, um problema a ser resolvido no protótipo é o controle real da velocidade. Os valores mostrados na Tabela 01 são as médias das medidas que conseguimos obter nas medições, não pode-se garantir que as placas estarão sendo submetidas exatamente a essas velocidades no momento da execução do programa, sabe-se porém, que os valores serão bem próximos dos estabelecidos.

No gráfico da Figura 58 são exibidas as velocidades alcançadas de acordo com o ciclo de trabalho do sinal de PWM aplicado na entrada do ESC.

Figura 58 - Gráfico das velocidades alcançadas.



FONTE: Os Autores (2017).

#### 4.9 Interface com o usuário

A implementação do display foi facilitada pelo uso de um shield de LCD bem comum para o Arduino, bem como pela aplicação da biblioteca LiquidCrystal. Entretanto, a execução das entradas através do teclado matricial exigiu maior trabalho, o sistema desenvolvido identificava o “re-pressionamento” do botão enquanto o usuário estava apenas mantendo a tecla pressionada. Porém, depois que foi montado o circuito final com melhores contatos, esse problema foi definitivamente resolvido (Código disponível no Apêndice 3).

#### 4.10 Caracterização do processo de centrifugação

Os resultados dos experimentos realizados para a caracterização do processo de centrifugação desenvolvido foram satisfatórios e atenderam as expectativas do projeto. A Tabela 02 apresenta as espessuras dos filmes poliméricos obtidas para diferentes velocidades de centrifugação.

**Tabela 02** - Espessura dos filmes de polímero versus velocidade da centrifugação.

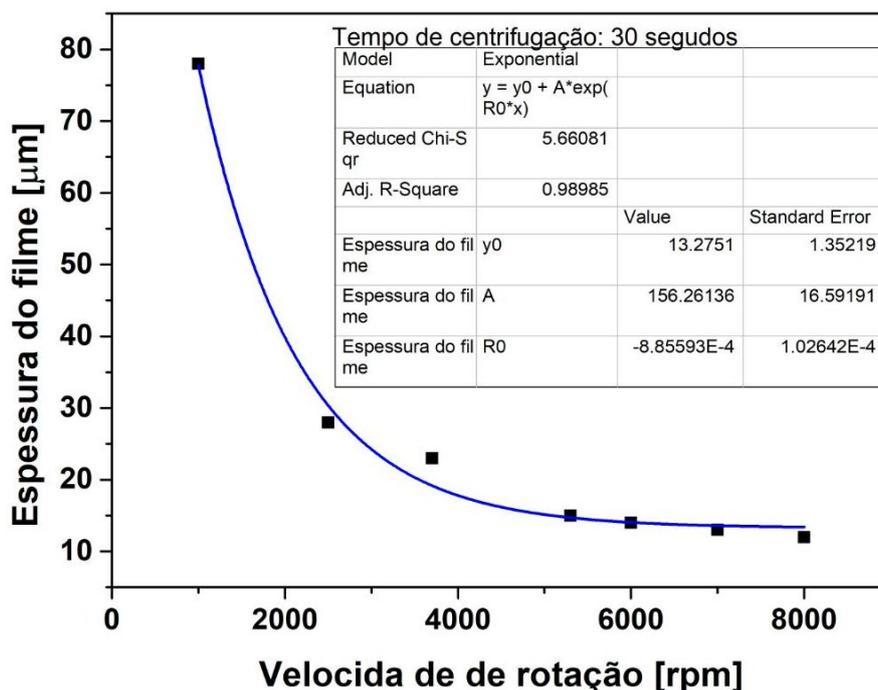
Velocidade (RPM)	Espessura ( $\mu\text{m}$ )
1000	78
2500	28
3700	23
5300	15
6000	14
7000	13
8000	12

**FONTE:**Os Autores (2017).

Pode-se notar dos valores apresentados na Tabela 02 que a espessura do filme depositado é inversamente proporcional à velocidade de rotação. Tal comportamento deve-se a força centrífuga, quanto maior a velocidade maior será a força, e por consequência, maior será o espalhamento, resultando em espessuras menores.

No gráfico da Figura 59 são exibidas as espessuras dos filmes poliméricos obtidas para diferentes velocidades de rotação. É possível notar uma tendência de saturação na redução das espessuras do filme, a análise o gráfico mostra que quando o motor atinge a velocidade de 5300 rpm, o que corresponde a espessura de 15  $\mu\text{m}$ , a redução de espessura torna-se desprezível, mesmo aumentando-se significativamente a velocidade. O ponto de saturação está relacionado com a viscosidade do polímero. Consequentemente, todo polímero tem seu próprio ponto de saturação, ou seja, quando é submetido a uma velocidade determinada ele atinge esse ponto e a partir dele, por mais que aumente a força centrífuga, a espessura do filme tende manter-se constante.

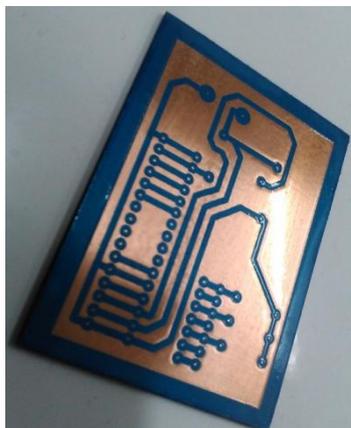
Figura 59 - Espessura dos filmes poliméricos versus velocidade de rotação.



FONTE: Os Autores (2017).

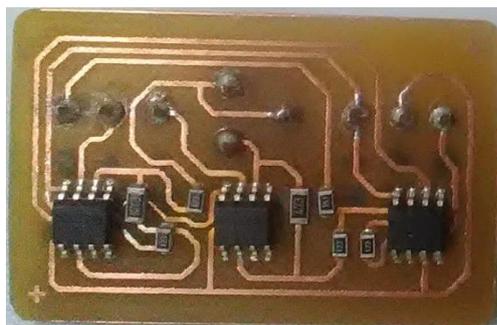
Durante a etapa de caracterização do processo de centrifugação o *SCHD* foi utilizado para auxiliar na fabricação de algumas PCIs. A Figura 60 mostra uma das PCIs fabricadas, trata-se da placa de interface do próprio *SCHD*. O equipamento também foi utilizado na produção de placas em tecnologia SMT desenvolvidas por integrantes do projeto MINIMIZE desenvolvido no IFRN Campus Zona Norte, cujo resultado final pode ser visto na Figura 61.

**Figura 60** - PCI de interface do projeto *SCHD*.



**FONTE:**Os Autores (2017).

**Figura 61** - Amplificador de instrumentação fabricado com tecnologia SMT fabricada com auxílio do *SCHD*.



**FONTE:**Os Autores (2017).

#### 4.11 - Desenvolvimento do gabinete para o equipamento *SCHD*

Um protótipo do gabinete do *SCHD* foi fabricado com base no projeto desenvolvido. A Figura 62 mostra o protótipo fabricado que permite a segurança dos usuários e a visualização do processo, bem como, o necessário acondicionamento do motor, dos circuitos eletrônicos, e dos periféricos de interface com os operadores.

**Figura 62** - Equipamento *SCHD* completamente montado e condicionado em gabinete de madeira e acrílico.



**FONTE:**Os Autores (2017).

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Analisando o funcionamento do protótipo final, pode-se afirmar que foi atingido o objetivo proposto para o projeto, ou seja, foi desenvolvido um equipamento de baixo custo, utilizando-se de recursos encontrados em resíduos eletrônicos, e que apresenta desempenho capaz de auxiliar nas atividades de fabricação de placas de circuito impresso quando da prototipagem de sistemas eletrônicos.

Tomando por base os preços dos componentes eletrônicos, dos materiais utilizados e dos serviços contratados, o custo do projeto final ficou em torno de R\$ 250,00. Um *Spin Coater* comercial, cujo modelo e características foram mencionados na introdução, custa aproximadamente R\$ 14.704,00, sem taxas e impostos. Ou seja, fazendo um simples cálculo de porcentagem, pode-se chegar à conclusão que o *SCHD* custou menos de 2% do valor do equipamento comercial, representando uma economia de R\$ 14.454,00, demonstrando portanto a viabilidade econômica do projeto desenvolvido.

Entretanto, deve-se afirmar que foram enfrentados problemas considerados complexos que precisarão ser superados. O mandril pneumático desenvolvido para a fixação dos substratos, por exemplo, foi uma das grandes dificuldades enfrentadas, desde a perfuração do eixo do motor com seu pequeno diâmetro à acoplagem da bomba de vácuo, esse foi um grande desafio enfrentado, mas que, pode ser vencido obtendo-se uma estrutura bem construída e muito funcional, capaz de manter fixas placas de fenolite quadradas com 9 cm de lado submetidas a velocidades de rotação de até 8000 rpm.

Outro grande problema enfrentado foi o desenvolvimento da lógica de programação e do código fonte. Porém, a utilização de determinadas técnicas permitiu que esses problemas fossem contornados de uma forma relativamente simples e rápida, alcançando-se excelentes resultados. Dentre as técnicas utilizadas, é possível citar como exemplo a lógica de estados que permitiu o uso de temporizadores sem a necessidade de interrupção do programa, bem como a execução de funções simultâneas. A utilização da plataforma Arduino não só pelas suas vantagens referentes ao software, mas também pela sua estrutura física projetada para o propósito da prototipagem, foi um fator que facilitou muito o desenvolvimento final do equipamento.

A caracterização do processo de centrifugação realizada com o *SCHD* demonstrou ser possível a deposição de filmes muito finos, obteve-se filme com 12 micrômetros de espessura para o polímero utilizado. As espessuras dos filmes poliméricos são de suma relevância para a aplicação proposta para o equipamento projetado, visto que de acordo com a espessura do filme, torna-se possível criar trilhas mais ou menos largas. Assim, os resultados obtidos no que diz respeito às espessuras alcançadas nos testes foram extremamente satisfatórios, pois permitem a fabricação de trilhas com dimensões submilimétricas, garantindo consequentemente a redução das dimensões dos sistemas eletrônicos produzidos com o auxílio do equipamento.

Além de auxiliar na fabricação de placas de circuito impresso, o *SCHD* também poderá ser utilizado no futuro para a realização de etapas de fabricação de componentes eletrônicos como transistores, diodos, células fotovoltaicas e sensores diversos, podendo ainda ser útil para a construção de microcanais fluídicos aplicados em processos biológicos, químicos e também medicinais.

Ao fim da montagem do protótipo atual, observou-se que o controle da velocidade de rotação não está sendo feito com total exatidão, visto que estão sendo utilizados valores aproximados mapeados anteriormente para serem enviados ao circuito que controla o motor. Portanto, propõe-se como trabalho futuro a implementação de um controle absoluto da velocidade, adicionando ao sistema um sensor que permita monitorar a velocidade de rotação do motor (como um sensor de efeito *hall*, por exemplo) e assim executar o controle da velocidade em tempo de execução.

Outra possibilidade de trabalho futuro visando melhorar o equipamento desenvolvido, consiste da construção de um gabinete com chapa de teflon, cuja a principal virtude é ser um material com o mais baixo coeficiente de atrito conhecido e praticamente inerte, ou seja, que não reage com outras substâncias químicas exceto em situações muito especiais. A utilização do teflon permitirá o desenvolvimento de um gabinete inerte às substâncias utilizadas na centrifugação, além de proporcionar uma estrutura mais leve e aperfeiçoada no quesito *design*.

Outra modificação que também se pretende aplicar ao sistema é a melhoria na UX (*User Experience*, experiência do usuário), que deve-se admitir ainda não ser a melhor possível. A implementação de modificações simples, como aplicação de cores em botões específicos, como os utilizados como “ok” e “apagar” já serão

capazes de melhorar bastante a interação do usuário com o sistema desenvolvido.

Por reconhecer a versatilidade do projeto, percebe-se a sua possível aplicação em outros processos que também apresentam etapas que fazem uso da centrifugação. Por isso, pretende-se posteriormente produzir um disco metálico a ser adaptado ao motor, possibilitando a fixação de amostras contidas em tubos Eppendorf® para serem centrifugadas. Dentre outros procedimentos bioquímicos que podem ser desenvolvidos utilizando a técnica da centrifugação, essa adaptação do *SCHD* possibilitará, por exemplo, a separação dos elementos figurados do sangue e o plasma sanguíneo, em que as células são depositadas no tubo, podendo o plasma ser separado (através da centrifugação) e analisado.

Outra atividade a ser desenvolvida futuramente com o auxílio do *SCHD* é a centrifugação de outros materiais, como por exemplo, o grafite e outros polímeros de viscosidades diferentes, além da utilização de outros substratos como o vidro e o alumínio. Esta atividade permitirá o estudo de filmes obtidos para diferentes materiais e sob diferentes condições de centrifugação.

## 6. REFERÊNCIAS

ARDUINO. **Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>>. Acesso em: 18 maio 2017.

ARDUINO. **Introduction**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 18 maio 2017.

BIANCHI, R.F. et al. Spin coater based on brushless dc motor of hard disk drivers. **Progress In Organic Coatings**. [S. l.], p. 33-36. 01 set. 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944006001068>>. Acesso em: 23 maio 2017.

BRAGA, Newton. **Como funcionam os componentes indutivos**. Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/5438-mec122> > Acesso em: 04 de junho 2017.

Deforest, W.S., Photoresist. McGraw Hill, 1975 page(s) 1 and 47

DIVISSICH, Joe. **How an O'ring works**. Disponível em: <<http://www.applerrubber.com/hot-topics-for-engineers/how-an-o-ring-works/>> Acesso em: 06 de junho 2017.

ELGScreen. **Fonte linear e chaveada**. Disponível em: <<http://blog.elgscreen.com/fonte-linear-e-chaveada/> >. Acesso em: 04 de junho 2017.

FITZGERALD, A.E; KINGSLEY JR., CHARLES; UMANS, STEPHEN. **Máquinas elétricas**. 6 ed. Tradução: Antólio Laschuk. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.

HERRING, Dan. **An Introduction to Vacuum Pumps**. Disponível em: <<https://vacaero.com/information-resources/vacuum-pump-technology-education-and-training/1039-an-introduction-to-vacuum-pumps.html>>. Acesso em: 11 maio 2017.

John. **Working of LCD (Liquid Crystal Display) with diagram and principle**. Disponível em: <<http://www.circuitstoday.com/liquid-crystal-displays-lcd-working>>. Acesso em: 10 maio 2017.

LAZARIDIS, Giorgos. **How a Key Matrix Work**. Disponível em: <[http://pcbheaven.com/wikipages/How\\_Key\\_Matrices\\_Works/](http://pcbheaven.com/wikipages/How_Key_Matrices_Works/)>. Acesso em: 10 maio 2017.

LAZARIDIS, Giorgos. **How Brushless Motors Work (BLDC Motors)**. Disponível em: <[http://pcbheaven.com/wikipages/How\\_Brushless\\_Motors\\_Work/](http://pcbheaven.com/wikipages/How_Brushless_Motors_Work/)>. Acesso em: 11 maio 2017.

MHEL, Ewaldo. **CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**. Disponível em: <[http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI\\_Conceitos\\_fundamentais.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf)>

Acesso em: 04 de junho 2017.

MICRO CHEMICALS. **Spin Coating of Photoresist**. Disponível em: <[http://www.microchemicals.com/technical\\_information/spin\\_coating\\_photoresist](http://www.microchemicals.com/technical_information/spin_coating_photoresist)>

Acesso em: 08 de junho 2017.

MicroChemicals. **Spin Coating of Photoresists**. Disponível em: <[http://www.microchemicals.com/technical\\_information/spin\\_coating\\_photoresist.pdf](http://www.microchemicals.com/technical_information/spin_coating_photoresist.pdf)>. Acesso em: 10 maio 2017.

MORIMOTO, Carlos. **Fonte de alimentação**. Disponível em: <<http://www.hardware.com.br/termos/fonte-de-alimentacao>> Acesso em: 04 de junho 2017.

Processing. **Processing.org**. Disponível em: <<https://processing.org/>>. Acesso em: 10 maio 2017.

RC MODELS WIZ. **ElectronicSpeedControllers (ESC)**. 2014. Disponível em: <<http://www.rcmodels.biz.co.uk/rc-guides/electric-rc-models-guide/electronic-speed-controllers-esc/>>. Acesso em: 18 maio 2017.

Saber Elétrica. **Princípio de Funcionamento do Tacômetro e sua Utilidade**. Disponível em: <<https://www.sabereletrica.com.br/para-que-serve-tacometro/>>. Acesso em: 10 maio 2017.

SARAIVA, Flávio. **Bombas a vácuo e seus princípios de funcionamento**. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/3772-bombas-a-vacuio-e-seus-principios-de-funcionamento/>>. Acesso em: 11 maio 2017.

SOARES NETO, VICENTE. **Telecomunicações: Sistemas de Modulação: uma visão sistêmica**. 3 ed. São Paulo: Érica, 2012. 324 p.

TECMUNDO. **O que é o cooler**. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/cooler/825-o-que-e-o-cooler-.htm>> Acesso em: 06 de junho 2017.

TRESNA. **How to Use and Read Digital Micrometers Correctly**. Disponível em:

TRUDU, Giacomo. **Raspberry Pi with a keypad matrix**. Disponível em: <<http://hackyourmind.org/articles/raspberry-pi-with-a-keypad-matrix>>. Acesso em: 10 maio 2017.

UniversityOf Louisville. **SPIN COATING THEORY**. Disponível em: <<https://louisville.edu/micronano/files/documents/standard-operating-procedures/SpinCoatingInfo.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2017.

UNIVERSITY OF LOUISVILLE. **SPIN COATING THEORY**. Disponível em: <<https://louisville.edu/micronano/files/documents/standard-operating-procedures/SpinCoatingInfo>> Acesso em: 8 de junho 2017.

VORKOETTER, Stefan. **An Electronic Speed Control Primer**. 1997. Disponível em: <<http://www.stefanv.com/electronics/escprimer.html>>. Acesso em: 18 maio 2017.

Wiring. **Wiring:** Wiring Framework. Disponível em:  
<<https://github.com/WiringProject/Wiring>>. Acesso em: 10 maio 2017.

**APÊNDICE 1 - PWM SERIAL**

```
int motor = 8;
void setup(){
  pinMode(motor, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop(){
  Serial.println("... Informe um valor ...");
  while (Serial.available()==0){}
  intval = Serial.parseInt();
  analogWrite(motor, val);
  Serial.print("Valor Escrito: ");
  Serial.println(val);
}
```

## APÊNDICE 2 - ACELERAÇÃO SERIAL

```

int motor = 8;
int lido = 0;
int tempo = 0, vlr_final = 0;
int atual = 0;

void setup(){
  pinMode(motor, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("... Iniciando Motor ...");
  analogWrite(motor, 0);
  delay(3000);
  analogWrite(motor, 115);
  delay(5000);
}

void loop(){
  atual = 0;
  analogWrite(motor, atual);
  Serial.println("... Iniciado Rotina ...");
  Serial.print("Informe o valor final:");
  while (Serial.available() != 0) {}
  vlr_final = Serial.parseInt();
  Serial.println(vlr_final);

  Serial.print("Informe o tempo de rotacao (seg):");
  while (Serial.available() != 0) {}
  tempo = Serial.parseInt();
  Serial.println(tempo);

  if (vlr_final > 123) {
    atual = 123;
    analogWrite(motor, atual);
    delay(5000);
    for (int i = 128; i < vlr_final; i += 5) {
      atual = i;
      analogWrite(motor, atual);
      Serial.print("Acelerando... ");
      Serial.println(atual);
      delay(3000);
      if (atual > 145 && atual+2 < vlr_final) {
        delay(2000);
        i -= 2;
      }
    }
    atual = vlr_final;
    analogWrite(motor, atual);
    Serial.print("Chegou ao valor final: ");
    Serial.println(atual);
    Serial.print("Aguardando ");
    Serial.print(tempo);
    Serial.println(" segundos...");
    unsigned long millis_final = millis() + (1000 * tempo);
    while (millis() < millis_final && Serial.available() != 0) {}
    atual = 0;
    analogWrite(motor, atual);
    if (Serial.available() != 0)
      lido = Serial.parseInt();
    Serial.println("Fim da execucao!");
  } else {

```

```
Serial.println("Valor invalido!");  
}  
}
```

### APÊNDICE 3 - INTERFACE

```

#include <LiquidCrystal.h>

const byte kb_rows = 4;
const byte kb_cols = 4;
char keys[kb_rows][kb_cols] = {
  {'1','2','3', 'A'},
  {'4','5','6', 'B'},
  {'7','8','9', 'C'},
  {'*','0','#', 'D'}
};
bytekb_rowPins[kb_rows] = {22,23,24,25};
bytekb_colPins[kb_cols] = {26,27,28,29};

LiquidCrystallcd(12, 11, 2,3,4,5);

void setup() {
  lcd.begin(16, 2);
  Serial.begin(9600);
  for(inti = 0; i<kb_rows; i++) {
    pinMode(kb_rowPins[i], INPUT);
    if(i<kb_cols) {
      pinMode(kb_colPins[i], OUTPUT);
      digitalWrite(kb_colPins[i], LOW);
    }
  }
}

void loop() {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Insira um valor:");
  Serial.print("Insira um valor: ");
  int lido = lerTeclado();
  Serial.print("Valor lido do teclado: ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(lido);
  Serial.println(lido);
  delay(2000);
}

intlerTeclado() {
  lcd.setCursor(0,1);
  booleancontinue_while = true;
  String ret = "";
  do {
    for(inti = 0; i<kb_cols; i++) {
      digitalWrite(kb_colPins[i], HIGH);
    }
    for(int j = 0; j <kb_rows; j++) {
      if(digitalRead(kb_rowPins[j]) == HIGH) {
        charch = keys[i][j];
        if ((i< 3 && j < 3) || (i == 3 && j == 1)) {
          ret += keys[i][j];
          Serial.write(ch);
          lcd.print(ch);
        } else if (ch == '#') {
          continue_while = false;
        } else if (ch == '*') {
          ret = ret.substring(0, ret.length() - 1);
          lcd.setCursor(0,1);
        }
      }
    }
  } while (continue_while);
}

```

```
lcd.print("                ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(ret);
    }
while(digitalRead(kb_rowPins[j]) == HIGH){
    }
}
digitalWrite(kb_colPins[i], LOW);
} while (continue_while);
Serial.println();
Serial.print("Valor: ");
Serial.println(ret);
return ret.toInt();
}
```