

Universidade Federal de São Carlos  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas  
Departamento de Física

André Aleixo Pedersoli

**Trabalho de Conclusão de curso**  
**Instrumentação de linha de produção de dispositivos sensores baseados**  
**em nanofitas semicondutoras**

São Carlos  
29 de março de 2023

Universidade Federal de São Carlos  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas  
Departamento de Física

**Instrumentação de linha de produção de dispositivos sensores baseados em nano-fitas  
semicondutoras**

Monografia realizada para desenvolvi-  
mento do Trabalho de Conclusão de Curso  
de Engenharia Física.

Professor Orientador: Adenilson José  
Chiquito

São Carlos  
29 de março de 2023

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Resumo</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Síntese de Amostras e Produção de Dispositivos</b>	<b>3</b>
3.1	Fotolitografia . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Instrumentação</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>6</b>
5.1	Modelo . . . . .	7
5.2	Proptotipagem . . . . .	7
5.3	Testes e Riscos . . . . .	9
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>10</b>
<b>7</b>	<b>Apêndice</b>	<b>11</b>
.1	Código Implementado . . . . .	11
.2	Circuito . . . . .	12
	<b>Referências</b>	<b>13</b>

# **1 Resumo**

Esse trabalho apresenta passos do processo de fotolitografia de dispositivos para pesquisa de suas propriedades elétricas desenvolvidos em um laboratório de pesquisa em física de semicondutores. São descritos processos de otimização e automação de um equipamento de fotossensibilização utilizado nas técnicas de fotolitografia. A automação é feita com o uso de um microcontrolador Arduino Uno e motores de passo. O projeto desenvolvido é testado visando redução de falhas por erros de operação e buscando maior segurança na síntese de dispositivos envolvendo radiação ultra violeta.

## **2 Introdução**

O NanO LaB é um dos laboratórios de pesquisa que compõem o Departamento de Física da UFS-Car. [1] Dentro de suas áreas de desenvolvimento são analisados fenômenos de transporte elétrico em nanoestruturas, tais estruturas são confeccionadas dentro do próprio laboratório a partir de materiais semicondutores montados na forma de dispositivos eletrônicos a fim de permitir o processo de análise das propriedades de interesse desses materiais.

Muitas formas podem ser utilizadas para elaborar e testar os dispositivos que possibilitem a análise dos materiais de interesse de estudo. Nesse trabalho abordaremos como parte dos processos de montagem de dispositivos puderam ser automatizadas com uso de microcontroladores facilitando seu desenvolvimento e garantindo mais reprodutibilidade e precisão no processo.

### **3 Síntese de Amostras e Produção de Dispositivos**

Dentre as técnicas de montagem de dispositivos uma das utilizadas pelo NanO LaB é fotolitografia. Essa técnica permite a fabricação de dispositivos em escala nanométrica com um ou mais nanofios de interesse.

O processo de produção de dispositivos começa com a segmentação de substratos que servirão de suporte para o crescimento de amostras ou como bases isolantes para o processo de fotolitografia e definição de dispositivos. O NanO LaB geralmente se utiliza de substratos de silício recobertos com óxido de silício ou substratos de vidro. Tais materiais em forma de lâminas são segmentados em peças retangulares de um centímetro quadrado aproximadamente.

Os substratos segmentados são submetidos a um processo sistemático de limpeza primeiramente química e depois por plasma de oxigênio. A partir desse ponto os substratos estão aptos a serem usado como base para crescimento de redes de nanofios ou atuarem como suporte para dispositivos.

Os dispositivos podem ser elaborados em várias configurações a depender do tipo de análise e das propriedades dos materiais sintetizados que se pretende estudar. Em análises cujo interesse está em parâmetros relacionados a resistividade do material os nanofios sintetizados atuam como agente resistivo entre dois contatos elétricos desejadamente ôhmicos. A produção desses contatos elétricos é indispensável para a obtenção de dados experimentais e sua montagem depende das dimensões da amostra. Dispositivos micrométricos são montados geralmente com técnicas manuais como o uso de máscaras de sombra. Dispositivos em escala nanométrica utilizam técnicas de fotolitografia onde luz ultravioleta (UV) é utilizada como fonte de energia para fazer a transferência de padrões geométricos para os substratos onde serão construídos os contatos elétricos.[2]

A fotolitografia permite alto controle sobre os processos de produção dos dispositivos no que se trata de escolha de geometrias e padrões para transferência e manipulação das estruturas nanométricas de interesse. Sua produção é geralmente automatizada mas pode envolver processos manuais potencialmente nocivos para o operador do processo.

#### **3.1 Fotolitografia**

As técnicas de fotolitografia se baseiam no uso de luz para produção de padrões minuciosos em superfícies cobertas com filmes finos. Tal técnica permite a produção de dispositivos elétricos em escala nanométrica.

Um componente essencial nesse processo são os filmes fotossensíveis, comercialmente chamados de fotoresistes, compostos orgânicos com a propriedade de alterar sua solubilidade de acordo com a exposição a uma fonte de luz. Assim é possível criar padrões sobre os substratos ao se expor ou não partes da superfície de um substrato e posteriormente depositar materiais condutores sobre o substrato com fotoresiste criando-se assim os padrões desejados. As seções expostas a luz terão sua solubilidade alterada e poderão ser removidas de forma seletiva com solventes específicos determinados de acordo com o material escolhido como fotoresiste.

A Figura 1 apresenta um modelo de máscara de sombra com padrões circulares de 0,5 mm de diâmetro. Esse tipo de máscara cobre parte da superfície do fotoresiste e permite que outras sejam sensibilizadas.

Tipicamente os substratos recobertos são submetidos a luz ultra-violeta (UV) para fotossensibilização

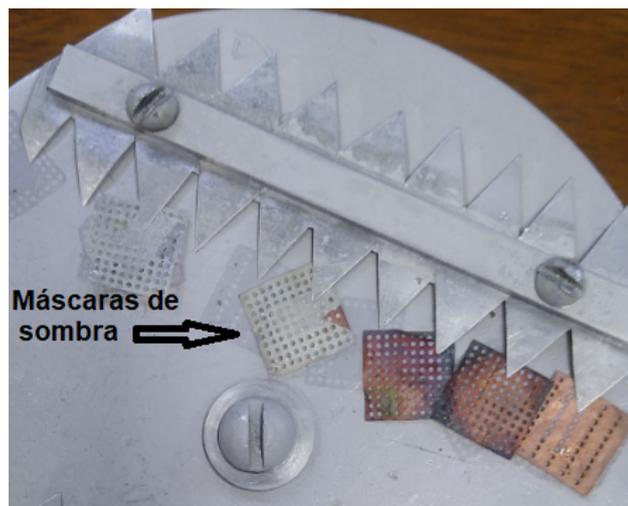


Figura 1: Máscaras de sombra feitas no NanO LaB com folhas de cobre dispostos sobre substratos antes exposição. Fonte: Obtida pelo autor.

das superfícies expostas. O tempo de de exposição e a potência da fonte luminosa dependem da espessura e do tipo do fotoresiste escolhido. Tais valores são especificados pelo fabricante e utilizados como referência nos processos de fabricação de dispositivos. [3]

Uma das formas mais práticas de se controlar a quantidade de energia luminosa incidida sobre o fotoresiste é se utilizando uma fonte estável de luz qual o filme seja sensível e que de alguma forma se controle o tempo de exposição das amostras e essa fonte. os fotoresistes usuais são sensibilizados por fontes com comprimento de onda abaixo de  $440\text{ nm}$  de forma que comumente são utilizadas lâmpadas de luz ultravioleta (UV) como fonte luminosa levando em conta também os limites de difração da luz visível.

Fontes de luz UV usadas nesses processos emitem alta intensidade de luz o que pode apresentar riscos aos operadores. Exposições prolongadas a UV de alta intensidade podem causar efeitos na pele como envelhecimento precoce e aumento da chance de câncer de pele, podem desencadear também danos permanentes a visão com a alteração de proteínas da córnea e resultar na formação de catarata. [4]

Sendo a segurança de seus operadores uma preocupação central em qualquer laboratório de pesquisa e a importância dada na precisão e repetibilidade dos processos um fator determinante na qualidades dos dados a serem coletados processos e equipamentos são constantemente revistos e otimizados.

## 4 Instrumentação

O NanO LaB conta com uma sala limpa onde os dispositivos são elaborados com a garantia de terem seus processos livres da presença de partículas contaminantes presentes no ar. Nessa sala há um equipamento de iluminação composto por uma luz UV e uma luz LED violeta responsável pela fotossensibilização do fotoresiste no processo de fotolitografia. Desse trecho em diante referências feitas a esse equipamento de iluminação se darão pelo nome genérico de 'fonte de luz'.

A fonte de luz de é composta por dois sistemas paralelos de iluminação, sendo um deles uma lâmpada UV de alta potência com obturador eletromecânico e temporizador para o obturador composto por um circuito RC, o outro sistema é uma lâmpada LED violeta ( $405\text{ nm}$ ) com um temporizador composto por

um circuito RC que atua em um relê entre a fonte do LED e a rede elétrica. O temporizador define o tempo que as amostras serão irradiadas e cessa irradiação quando esse tempo acaba, interrompendo o processo de fotossensibilização do fotoresiste e permitindo que o operador manipule as amostras sem se expor a fonte luminosa.

A Figura 2 apresenta a estrutura da fonte de luz e seus componentes: A) Lâmpada e invólucro da lâmpada UV com sistema de resfriamento na parte superior; B) Sistema de obturador com lente colimadora e peças móveis; C) Fonte de alimentação, temporizador e controlador da lâmpada LED; D) Lâmpada LED violeta com sistema de resfriamento integrado; E) Controlador e temporizador do obturador da lâmpada UV; F) Base de fixação de substratos adaptável para diferentes geometrias. Tanto a lâmpada UV quanto a lâmpada LED estão fixas num eixo vertical giratório possibilitando que sejam movidas sobre o suporte (F) e trocadas entre si com base na necessidade.

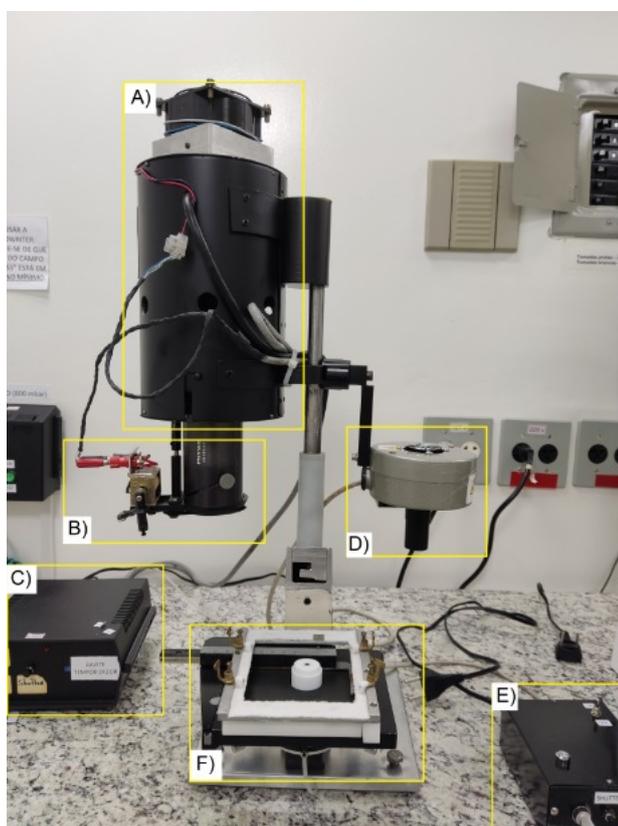


Figura 2: Fonte de luz e seus componentes; A) Lâmpada e envólucro da lâmpada UV; B) Obturador e lente colimadora da Lâmpada UV; C) Alimentação e controle da lâmpada de LED; D) Invólucro e lâmpada de LED violeta; E) Alimentação e controle do obturador da lâmpada UV; F) Base de fixação de amostras. Fonte: Obtida pelo autor.

Circuitos RC podem ser utilizados como temporizadores em função do tempo de carregamento do capacitor dentro do circuito. Tal tempo pode ser determinado ao se dimensionar o circuito e pode ser alterado com o uso de um potenciômetro no lugar do resistor permitindo que um mesmo circuito possa ser configurado para vários tempos de operação. Temporizadores RC são sistemas simples, robustos, totalmente analógicos e com baixíssima chance de falha desde que seus componentes estejam em bom estado, entretanto um sistema assim apresenta alguns inconvenientes no que se diz do controle sobre o tempo desejado a ser programado. Um temporizador variável se mostra interessante com a possibi-

lidade permitir o uso de materiais fotoresistivos que exijam diferentes tempos de exposição. Assim um sistema programável poderia ser alterado para se adequar a novas necessidades, entretanto a regularidade do tempo se daria sempre de forma indireta dependendo do monitoramento do valor da resistência no potenciômetro por meio de outro aparelho. O que dificulta a configuração de um novo valor de tempo e diminui sua precisão.

O ajuste dos temporizadores da fonte de luz se dava através de alterações nos potenciômetros seguidas por processos de tomada de tempo e correções de valor até se atingir o tempo desejado.

A luz LED violeta do fonte permitia uma montagem de um sistema com relés controlados pelo sistema temporizador RC dado sua baixa demanda de corrente e a capacidade do circuito de alimentação do LED ser chaveado sem estresse ao equipamento. Assim, a luz LED era operada pelo disparo do temporizador que acionava o relê ligando a lâmpada, passado o tempo determinado o relê era desarmado e a lâmpada era desligada voltando a posição de espera para mais um disparo.

A lâmpada UV por outro lado utiliza uma fonte própria de alta tensão ligada a rede elétrica, essa fonte e sua lâmpada não podem ser chaveadas como a lâmpada LED, demandando um tempo entre sua inicialização e seu desempenho máximo e o mesmo vale o no seu processo de desligamento que exige um tempo para resfriamento da lâmpada e descarregamento da fonte.

O sistema da lâmpada UV utilizava então um obturador eletromecânico controlado pelo temporizador RC. O obturador era composto por um anteparo com orifício circular centralizado colocado na frente da lâmpada UV, uma lente colimadora fixada nesse orifício e duas abas móveis em semicírculo que cobrem a lente por meio da atuação de um braço solenoide. Assim a luz UV funcionava estando sempre ligada mas com seu feixe obstruído pelo sistema obturador. Disparado o temporizador o braço solenoide abria as abas móveis que ficavam estáticas no tempo determinado até serem fechadas novamente pela mola de retorno do braço quando este era desligado. O sistema eletromecânico demandava uma alimentação própria além do sistema RC e suas partes móveis necessitavam de manutenção periódica com lubrificação das peças e alinhamento.

A lâmpada UV ficando sempre ligada no processo exige que o funcionamento do obturador seja a prova de falhas a fim de não expor o operador e/ou amostras a radiação enquanto as amostras são manuseadas. A manutenção necessária para manter esse sistema de obturação funcionando corretamente e com segurança estava se mostrando inconveniente ainda mais estando inserido no ambiente de sala limpa onde a contaminação por lubrificantes se mostraria um risco na produção de dispositivos.

A fim de garantir então que o controle de tempo de exposição fosse facilitado e mais preciso e que a obturação do feixe de luz UV fosse mais seguro e demandasse menos de manutenção, o projeto da fonte de luz seria alterado a fim de suprir as necessidades levantadas.

## **5 Desenvolvimento**

Os requisitos que o projeto deveria atingir seriam; alteração da estrutura da fonte de luz fazendo que o controle e determinação do tempo de exposição fosse simplificado e houvesse maior precisão em sua seleção; e que fosse desenvolvida uma solução que garanta funcionamento contínuo de baixa manutenção de um obturador que não tenha permita a passagem de luz UV quando fechado.

## 5.1 Modelo

A substituição do circuito RC como temporizador se mostra como uma opção interessante visando uma maior facilidade de configurar o tempo. Com a popularização dos microcontroladores em projetos de automação decorrente de sua redução de custo faz com que seu uso se mostre vantajoso e prático por conta de sua popularização e volume de referências.

Antes da escolha do microcontrolador foi enumerado uma lista de requisitos que este deveria ter para implementação do projeto. O microcontrolador deveria ser capaz de suportar uma interface de vídeo onde os dados de tempo determinado e tempo atual de operação pudessem ser consultados durante o uso, deveria ser capaz também de alimentar e controlar dois atuadores elétricos com precisão para uso na elaboração dos obturadores, permitir uma interface de entrada de dados para determinação do tempo e um acionador para início do ciclo de funcionamento.

A escolha do microcontrolador baseado nos requisitos foi de um Arduino Uno modelo Rev3. O Arduino Uno é uma placa microcontroladora baseada num processador ATmega328P com 20 pinos de comunicação. O uso do modelo Arduino Uno apresenta vantagens pelo grande volume de documentação disponível, pelo grande número de portas de acesso e pelo preço acessível.

## 5.2 Prototipagem

Antes da compra dos componentes e do microcontrolador foi desenvolvido um modelo virtual para desenvolvimento do código e validação da abordagem do projeto. A plataforma digital gratuita Tinkercad [5] foi utilizada para desenvolvimento das simulações do software desenvolvido com o hardware de interesse. O Apêndice 2 reúne o circuito elétrico desenvolvido na plataforma.

O projeto inicial foi expandido de forma que fosse possível o controle de dois obturadores no total, um para cada lâmpada do fonte. O projeto virtual do hardware foi desenvolvido na plataforma do Tinkercad assim como seu primeiro modelo de código. O Arduino compreende comandos escritos em C e C++ através de uma interface gratuita oferecida pelos desenvolvedores. A Figura 5 apresenta o modelo virtual da montagem do sistema na plataforma Tinkercad. Os componentes mostrados são; A) Módulo de sete segmentos com 4 dígitos; B) LED de luz piloto para indicativo de funcionamento do Arduino; C) Botão de início de disparo; D) Motores de passo para ação nos obturadores; E) Chave H para seleção de motor atuante; F) Potenciômetro usado para seleção do tempo.

Os componentes testados de forma virtual foram comprados e implementados inicialmente em uma placa de prototipagem (protoboard). Na placa os componentes foram testados de forma física e o código teve e ser adaptado para as bibliotecas disponíveis para o módulo de sete segmentos. O código elaborado está apresentado no Apêndice .1. O código foi desenvolvido de forma que há dois estados de funcionamento: um estado em espera, onde os obturadores mantêm os feixes interrompidos, a luz piloto de operação emite luz de forma contínua e o tempo de exposição configurado é mostrado no display de sete segmentos e pode ser alterado pelo potenciômetro sendo atualizado automaticamente no display; e o estado em operação, esse modo ocorre depois do acionamento do botão de disparo, o motor selecionado pela chave H move o obturador da frente da lâmpada selecionada, o display mostra o tempo configurado se reduzindo até chegar a zero em uma contagem regressiva, e a luz piloto de operação pisca em intervalos de um segundo, com a contagem chegando em zero o motor retorna à sua posição inicial e o sistema retorna ao estado de espera.

As conexões foram soldadas e isoladas e uma caixa para montagem foi preparada. Os módulos

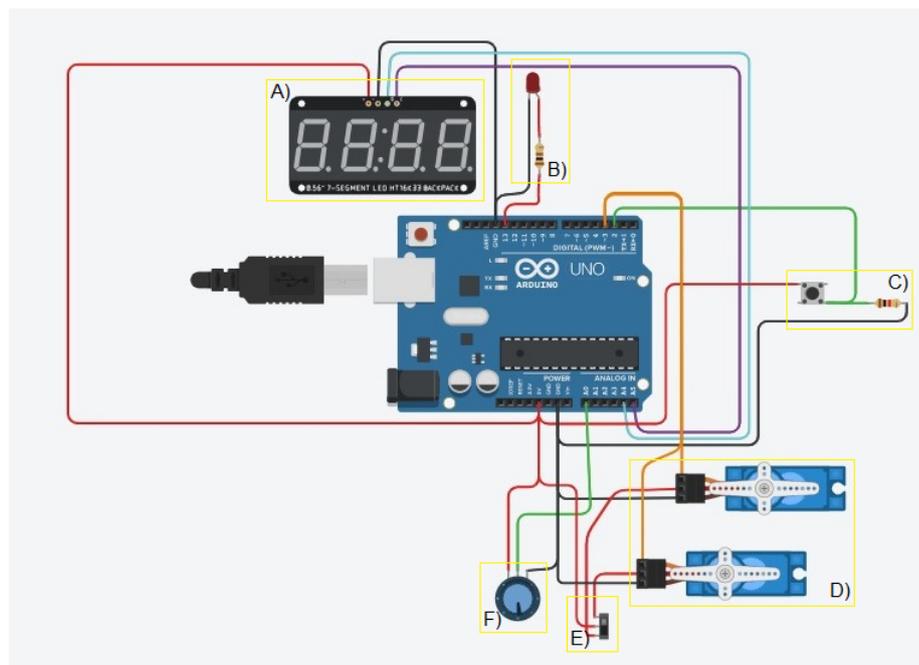


Figura 3: Modelo virtual do circuito montado contando com: A) módulo de sete segmentos, B) LED para luz piloto, C) Botão de disparo, D) Motores de passo, E) Chave H seletora, F) Potenciômetro. Fonte: Obtida pelo autor

e botões que deveriam ficar visíveis foram medidos e uma tampa foi desenhada nas ferramentas de modelagem tridimensional da plataforma Tinkercad. Uma caixa de alumínio foi comprada e com base no desenho feito na modelagem tridimensional os espaços para os componentes foram fresados. O processo de fresagem foi feito na Oficina Mecânica do Departamento de Física da UfSCar com auxílio dos técnicos presentes. A caixa vazada foi lixada, pintada e isolada eletricamente por dentro.

O circuito todo foi transferido e montado dentro da caixa. Uma fonte de nove volts DC foi adquirida e instalada no interior da caixa juntamente com Arduino. Essa fonte seria responsável por alimentar a placa energeticamente já que os motores, display de sete segmentos e lâmpadas indicativas serão alimentadas diretamente pelo Arduino. A Figura 4 apresenta, do lado direito, a montagem do circuito na protoboard e, do lado esquerdo, a caixa montada com o sistema instalado com os seguintes componentes visíveis: A) Display de sete segmentos para indicação do tempo setado e tempo atual; B) Luz piloto de operação indicando o estado em espera com luz contínua e mostrando estado de operação com luz piscando de forma intermitente; C) Chave H para seleção do motor que deverá abrir, assim permitindo a escolha da lâmpada que será aberta; D) Chave liga e desliga com luz piloto da fonte de alimentação. E) Botão de disparo que altera os modos de operação; F) Potenciômetro para regulagem do tempo.

A atuação dos obturadores ficou definida com a movimentação dos motores de passo que obstruíam os feixes de luz, os motores de passo seriam fixados próximos as saídas de luz de cada lâmpada. O material desses obturadores deveria não refletir a luz incidida e não somente interromper a incidência da luz na amostra mas não permitir que o feixe se espalhe além do obturador quando este estiver na posição de fechado. Dois discos de alumínio foram recortados de uma placa com dois milímetros de espessura, lixados e pintados de preto fosco e fixados nos braços móveis dos motores de passo.

A caixa com o microcontrolador foi instalada ao lado da fonte de luz e os motores e seus fios de controle foram passados a fim de permitir que os obturadores ficassem posicionados próximos as saídas

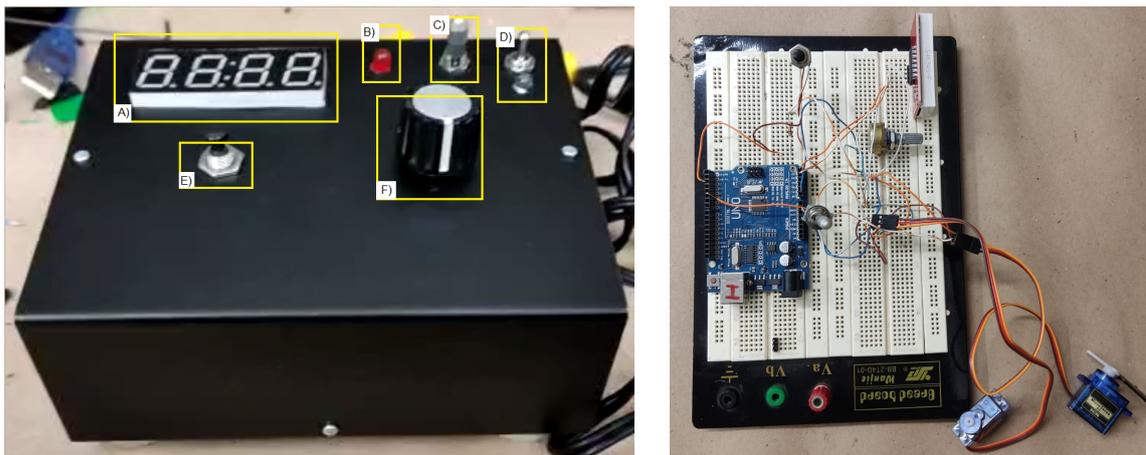


Figura 4: Na esquerda: A caixa montada com os componente aparentes listados: A) Display de 7 segmentos; B) Luz piloto de operação; C) Chave para seleção de motores; D) Chave liga e desliga; E) Botão disparador; F) Potenciômetro para seleção de tempo. Fonte: Obtida pelo autor

das luzes.

### 5.3 Testes e Riscos

O equipamento depois de montado foi testado em diversos aspectos. Primeiramente a montagem do obturador da lâmpada UV foi revisado quanto a sua capacidade de interromper o feixe luminoso e não permitir que luz UV fosse refletida pelo ambiente. Placas de material branco em um ambiente escuro foram posicionadas próximas ao feixe e com o objetivo de identificar possíveis reflexões ou pontos de vazamento. A Figura apresenta na esquerda a disposição final do equipamento montado novamente na sala limpa e a direita o posicionamento dos obturadores na fonte.



Figura 5: Detalhe do posicionamento final dos equipamentos na sala limpa. Fonte: Obtida pelo autor

O sistema foi verificado em situações de queda de energia enquanto o ciclo opera de forma ativa (com o obturador aberto), em situações de queda de energia o sistema permanecerá estático, os obturadores não se moverão de volta para as posições de início a final do tempo determinado podendo comprometer o processo de fotolitografia da amostra. Esse caso somente é válido em situações em a lâmpada UV não desligue. Assim o tanto a fonte da lâmpada UV quanto a fonte do microcontrolador foram colocados na

mesma linha de fornecimento de energia de forma que uma queda generalizada desligaria ambos.

Também foi testado casos de operação indevida do equipamento, na primeira situação a chave que seleciona o motor de atuação foi alterada no meio da operação (estando os obturadores abertos), nesse caso o motor não retorna sua posição e o motor ativo não se move pela ausência de um novo comando para isso. Para reduzir o risco de um acionamento acidental a chave seletora (chave H) foi escolhida com uma trava manual que precisa ser puxada para cima para ser alterada, na segunda situação foi testada a recorrência do uso do botão de disparo, foram apertadas várias vezes o botão de disparo de operação, a primeira aciona o obturador e este fica estático ignorando as seguintes até o retorno para a posição inicial.

O sistema se mostra robusto a problemas corriqueiros de uso mas não é a prova de falhas completas. O histórico de faltas de energia no laboratório e a disponibilidade de um no-break reduzem muito a possibilidade de um acidente envolvendo o fornecimento de energia elétrica. Acidentes por acionamento acidental podem ser mitigados com a capacitação do operador e a identificação dos botões.

## **6 Conclusões**

O projeto da fonte de luz foi alterado e atingiu os objetivos propostos no início do do projeto. Foi possível desenvolver um equipamento robusto, com segurança de processo e que atendesse os objetivos e limitações propostas. Todos os procedimentos foram desenvolvidos dentro do laboratório com seus recursos próprios indicando a possibilidade de expandir a aplicação dessa solução a outros problemas que sejam identificados.

O uso do Arduino como microcontrolador para automação de processos e equipamentos dentro do ambiente laboratorial se mostrou uma opção viável, barata e confiável de se automatizar processos ou equipamentos. Foram levantadas dentro do laboratório a possibilidade de outros projetos a serem desenvolvidos com a mesma base de equipamentos.

## 7 Apêndice

### .1 Código Implementado

```
#include <Adafruit_LEDBackpack.h>
#include <Servo.h>

Adafruit_7segment disp = Adafruit_7segment();
Servo myservo;

int val; //leitura analógica do A0 (potenciômetro)
long pint; //map do valor val, com val sendo entre 1 e 1000 e pint sendo de 0 a 100
const int bot = 2; //pino de entrada do push button
int bote; //leitura de entrada do push buton (bot)
long dela;

void setup()

{
  myservo.attach(3);
  pinMode(bot,INPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);

  disp.begin(0x70);
  disp.println("NANO");
  disp.writeDisplay();
  delay(2000);
  disp.clear();
  disp.writeDisplay();
  disp.println(" LAB");
  disp.writeDisplay();
  delay(3000);
}

void loop(){

  val = analogRead(A0); // reads the value between 0 and 102
  pint = map(val, 0, 1023, 0, 99); // scale it to value between 0 and 180
  disp.print(pint)
  disp.writeDisplay();

  // sets the servo position according to the scaled value
```

```

bote= digitalRead(bot);
dela = 100 * pint;
delay(2);

if (bote == HIGH)
{

myservo.write(500);

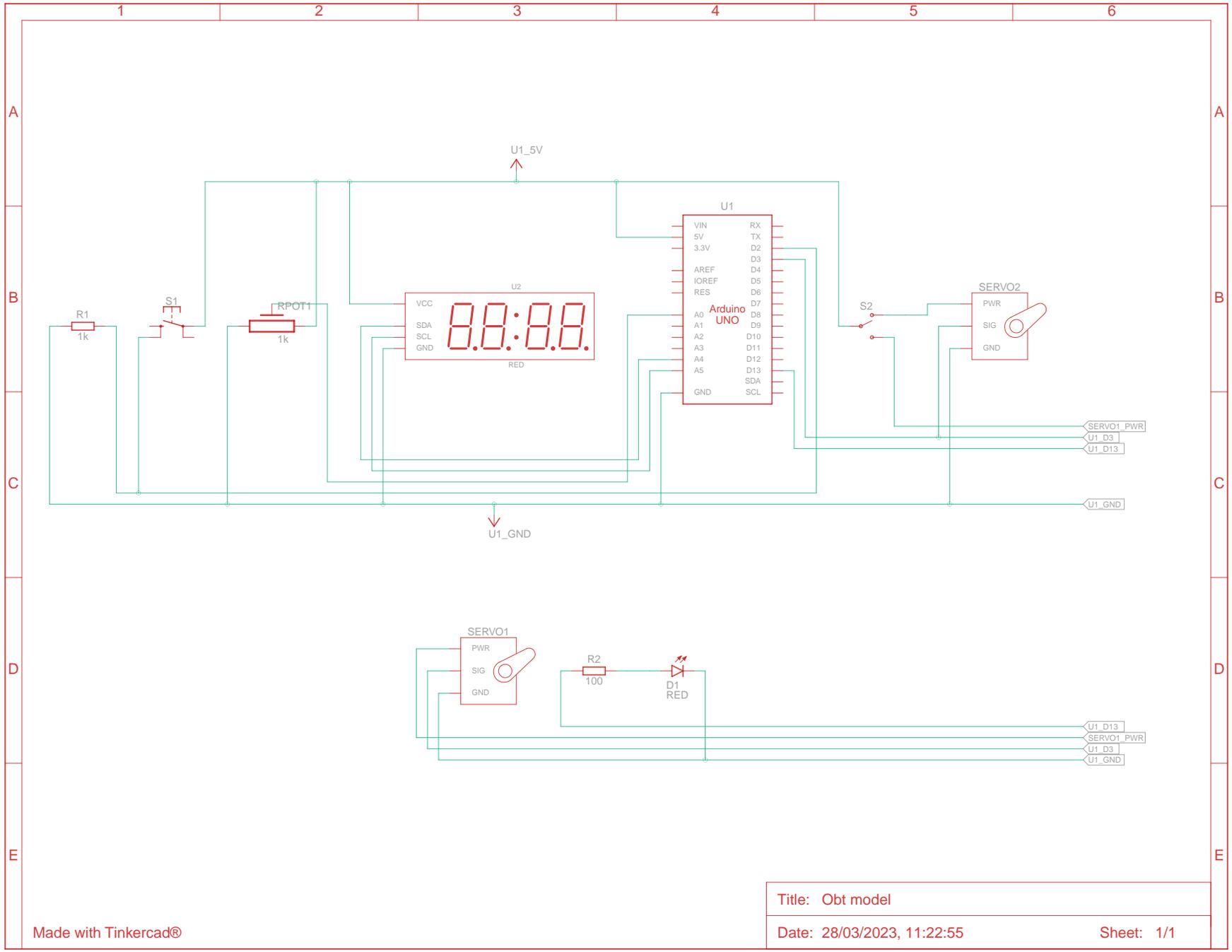
do {
  disp.print(dela/100);
  disp.writeDisplay();
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(500);
  digitalWrite(13, HIGH);
  delay(500);
  dela= dela - 100;

} while ( dela > -10 );

myservo.write(90);
digitalWrite(13, LOW);
disp.println("done");
disp.writeDisplay();
delay(2000);
}
}

```

## **.2 Circuito**



## Referências

- [1] Nano lab. <http://www.nanolab.ufscar.br/index.html>, 2023. Último acesso em: 2023.
- [2] Menezes Ivani Costa. Transporte eletrônico em nanofios de  $\text{SnO}_2$  dopado com Sb: transição metal-isolante induzida pela dopagem e fotocondutividade persistente. 2021.
- [3] Positive thin resists for wet etching. [https://www.microchemicals.com/products/photoresists/az\\_1505.html](https://www.microchemicals.com/products/photoresists/az_1505.html), 2023. Último acesso em: 2023.
- [4] Ultraviolet light safety in the laboratory. <https://www.11nq.com/Ro56w>, 2023. Último acesso em: 2023.
- [5] Tinkercad circuits. <https://www.tinkercad.com/>, 2023. Último acesso em: 2023.