

# USO DE UM BRAÇO ROBÓTICO PARA MONTAGEM DE FILMES FINOS PELA TÉCNICA CAMADA-A-CAMADA E SUA CARACTERIZAÇÃO ÓPTICA

Palavras-Chave: INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA, FILMES FINOS, CARACTERIZAÇÃO ÓPTICA

Autores:

HENRIQUE DE SORDI, IFGW – UNICAMP

Prof. Dr. VARLEI RODRIGUES (orientador), IFGW - UNICAMP

## INTRODUÇÃO:

A aplicação de materiais na forma de filmes finos é uma técnica amplamente empregada para as mais diversas finalidades no cotidiano da pesquisa e da indústria desde o século passado. Tal forma de aplicação permite conferir propriedades únicas a um substrato através da deposição de finas camadas de um material em sua superfície, com espessura variando da ordem de micrometros a nanômetros, abrindo um novo leque de possibilidades de aplicações tecnológicas que se estende desde o ramo da óptica até a bioengenharia.

Filmes finos de polímeros, por exemplo, podem ser depositados sobre circuitos de eletrodos interdigitados (*Interdigitated electrode* ou IDE) (figura 1) em placas de vidro para formar sensores químicos (conhecidos como língua eletrônica) capazes de medir propriedades elétricas de sua superfície influenciadas pela interação do polímero com a amostra em análise. Para a fabricação desse tipo de sensor o principal método de deposição do material empregada é a técnica camada-a-camada (figura 2), na qual o substrato em questão é submerso em soluções de polycations e poliânions alternadamente, intercaladas com etapas de lavagem em água com

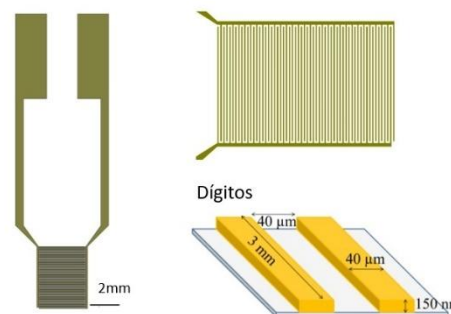


Figura 1: IDE utilizado na fabricação de sensores do tipo língua eletrônica.

pH controlado, formando assim um filme de espessura controlável com camadas unidas por forças eletrostáticas. Tal técnica conta com a vantagem de ser extremamente simples e versátil, além de possuir um custo muito baixo de aplicação, porém sua aplicação de forma manual enfrenta dificuldades práticas associadas ao longo período de tempo necessário e baixa reprodutibilidade dos resultados decorrente da intervenção humana.

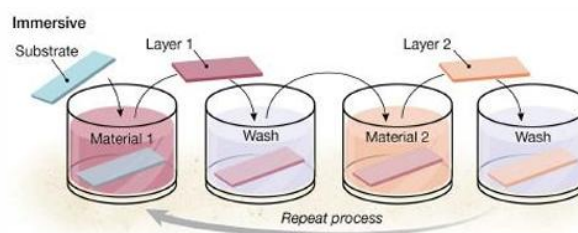


Figura 2: Ilustração do processo de fabricação de filmes finos pelo método camada-a-camada. Disponível em RICHARDSON; BJORNMALM; CARUSO, 2015.

Visando contornar as dificuldades associadas à aplicação da técnica camada-a-camada, foi proposto o desenvolvimento de um braço robótico do tipo SCARA com o viés de automatizar o procedimento. Em um primeiro período de iniciação científica, uma versão inicial do robô foi desenvolvida e neste novo período de projeto finalmente foi concluída e aplicada. Adicionalmente a estrutura do braço, um sistema de medição óptica foi desenvolvido para traçar a curva de cinética da deposição dos filmes sobre o IDE. Com a progressão do trabalho de instrumentação, uma nova versão do braço foi desenvolvida a fim de contornar alguns problemas encontrados no protótipo inicial e diversas melhorias foram implementadas ao código original.

## METODOLOGIA:

O desenvolvimento do protótipo inicial do braço (figura 3) foi embasado em um modelo *open-hardware* de DEJAN (2020), aplicando a mesma estrutura mecânica e circuito do protótipo de referência e adaptando-os às demandas específicas do projeto ao mesmo tempo em que os códigos foram desenvolvidos do início em conjunto pelo aluno e pelo orientador. As peças foram todas fabricadas em impressoras 3D com filamento do tipo PETG, visando maior resistência e durabilidade. O controle de toda a estrutura é feito através de 4 motores de passo NEMA 17 e um servo motor MG996R, todos controlados por uma placa Arduino UNO acoplada a uma CNC Shield e drivers A4988. Ainda foi necessário projetar em CAD e fazer a impressão 3D de um contrapeso para compensar erros no balanceamento do centro de massa do projeto original, um prendedor para as placas com os IDEs para que a garra pudesse manuseá-las e uma estrutura de proteção para a fonte do circuito.



Figura 3: Primeiro protótipo do braço robótico construído para o projeto.

Ao final do primeiro período de iniciação científica que antecedeu este projeto, o robô já estava pronto e operacional, porém ainda não era capaz de realizar o processo de deposição da forma pretendida, uma vez que seu controle se dava pelo acionamento de motores individualmente, fornecendo seus parâmetros de movimentação. Dessa forma, a continuação do projeto se iniciou logo com o desenvolvimento de um código em Python capaz de se comunicar com o Arduino e enviar comandos, permitindo a implementação da estrutura lógica de execução da técnica camada-a-camada que automatizasse a operação do robô. O código em questão foi implementado de forma a receber as coordenadas dos beakers contendo as soluções de polieletrólitos ou água e parâmetros de fabricação como número de bicamadas, tempo de imersão em cada becker, tempo de secagem e velocidades de subida e descida para gerar as linhas de comando enviadas ao Arduino.

O sistema de medição óptico por sua vez foi construído de forma que a placa sobre a qual as camadas são depositadas seja inserida a cada bicamada fabricada entre 2 LEDs azuis de alta intensidade, com um deles com polaridade invertida atuando como fotodiodo, sem emitir luz, o que possibilita medir a transmitância da placa através da medida de tensão em seus terminais. O circuito em questão foi dimensionado através de testes de diferentes valores de capacitância e resistência de seus componentes procurando a combinação que possibilitasse melhor leitura nos terminais do amplificador operacional e seu diagrama pode ser visto na figura 4 (a). Para executar a leitura da tensão foi utilizado um multímetro de bancada digital DMM4050 da *Tektronix* com o qual o código Python foi adaptado para se comunicar através de um cabo GPIB. A leitura é feita de forma a se obter 10

valores de tensão em sequência e extrair sua média de forma a aumentar a precisão do resultado. Os valores são todos armazenados pelo código em um arquivo CSV atrelados ao número de bicamadas sobre a placa em cada medição. Para evitar a interferência de luz externa nas medições, uma caixa de PLA preto foi projetada e impressa para que as medições sejam realizadas em seu interior (figura 4 (b)). Como padrão, foi definido que a cada etapa de medição primeiro uma medida de referência é feita sem a inserção das placas entre os LEDs ( $I_r$ ) e, em seguida, a placa é inserida entre os LEDs e uma nova medida é executada ( $I_a$ ), tomando a razão entre seus valores ao final para caracterizar a transmitância.

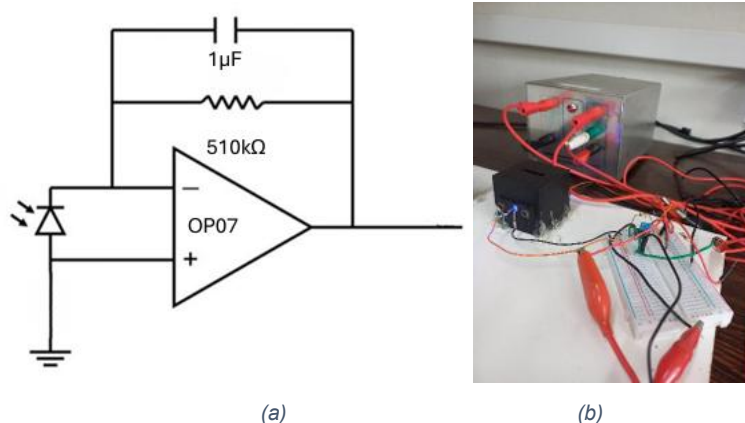


Figura 4: a) Circuito do sistema de medição de transmitância utilizado. B) Imagem do circuito utilizado e da caixa onde as medições são realizadas.

O primeiro teste da execução do método camada-a-camada foi feito usando como soluções de polieletrólitos positiva e negativa PDDA e CuTsPc, respectivamente. Assim como a água da etapa de lavagem, ambas foram preparadas a pH 8. Quanto ao substrato usado na deposição, foi usada uma placa de vidro sem IDE que precisou ser hidrofiliada para ficar negativamente carregada. Para os polímeros em questão, os parâmetros utilizados no processo podem ser encontrados na tabela 1.

<b>Velocidade de subida:</b>	10 cm/minuto
<b>Velocidade de descida:</b>	60 cm/minuto
<b>Tempo de submersão:</b>	10 minutos
<b>Tempo de secagem:</b>	2 minutos

Tabela 1: Parâmetros da deposição camada-a-camada para soluções de PDDA e CuTsPc.

Após a primeira validação do funcionamento do braço foi tomada a decisão de se construir um novo protótipo de braço robótico para contornar problemas mecânicos intrínsecos ao projeto usado no primeiro modelo. Para este caso, um novo modelo *open-hardware* foi utilizado como base, dessa vez de JJROBOTS (s.d.). As peças foram todas impressas em ABS e a eletrônica utilizada foi a do protótipo anterior, porém com um motor de passo a menos e 2 servos motores TZT SG90 no lugar do MG996R. Para que alterações mínimas fossem feitas na eletrônica e programação do modelo anterior, as peças do modelo de referência foram alteradas para incorporar o sistema de sensores de fim de curso na determinação das coordenadas do movimento do braço, o que era feito por um sensor sônico no original.

Novas peças precisaram ser impressas para organizar e proteger a eletrônica, além de novos prendedores para as placas. Além disso, uma tábua de corte milimetrada foi utilizada para criar um sistema de coordenadas de rápida visualização para os beckers. Os códigos Python e Arduino foram adaptados para as novas dimensões do robô e uma interface gráfica para controle foi programada. Por fim, um suporte para múltiplas placas foi impresso

e alterações foram feitas nos códigos para permitir realizar o processo de forma automática múltiplas vezes em sequência.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Para o teste do primeiro modelo, 20 bicamadas foram fabricadas em um tempo de 512 minutos. A deposição de uma bicamada completa foi filmada em *time lapse* e pode ser vista em <https://drive.google.com/file/d/11xUpJPUx3nCUgpbDYs2uuJ2x46ocyNp/view?usp=sharing>. Os resultados do teste podem ser vistos na figura 5.

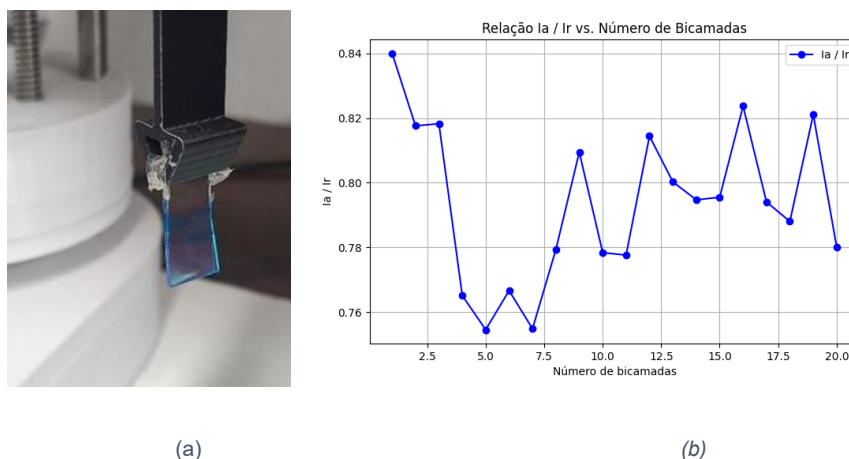


Figura 5: a) Placa de vidro após o processo de deposição; b) Gráfico de transmitância do processo de deposição.

A conclusão do processo sem imprevistos provou a capacidade do robô de ser empregado em atividades rotineiras de laboratório para fabricação de dispositivos, porém o gráfico de transmitância apresentou resultados imprevistos. É esperado que para a curva de cinética de deposição de um filme a intensidade luminosa diminua conforme o número de camadas aumenta e, conseqüentemente a razão das tensões, comportamento este que só foi observado até a quinta bicamada, a partir de onde a razão das medidas parece assumir valores aleatórios, o que indica alta ruído no sistema. Medidas contínuas de tensão foram feitas no sistema sem executar o processo de fabricação e no escuro e mesmo assim muito ruído foi observado. Como forma de conter o ruído, um novo sistema de medição está sendo projetado, transferindo a eletrônica para uma estrutura mais bem isolada.

Por fim, com a conclusão da segunda versão do robô, testes mostraram seu funcionamento adequado, equivalente ao do modelo anterior, porém ainda não houve uma execução completa do método camada-a-camada. Sua estrutura e a interface de controle podem ser vistas nas figuras 6 e 7, respectivamente. A nova estrutura mecânica demonstrou-se mais adequada às finalidades do braço uma vez que é muito mais compacta. Além disso, sua garra tem formato e tamanho mais compatíveis com a manipulação das placas e a estrutura de 3 eixos que sustenta o robô associada ao posicionamento dos motores na parte de trás da plataforma de movimentação vertical conferiram maior estabilidade aos movimentos e um balanço adequado do centro de massa, não exigindo o uso de contrapeso para a compensação. A adição da interface gráfica também possibilitou maior

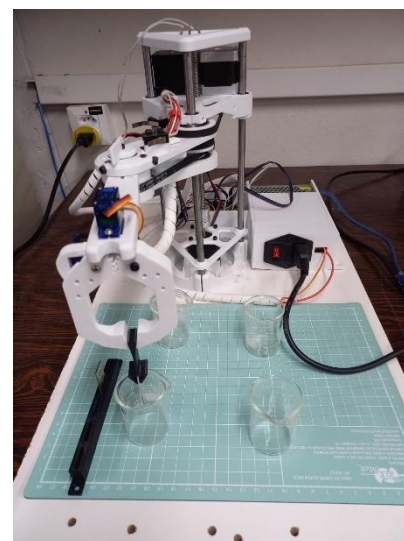


Figura 6: Modelo final do braço robótico.

facilidade no controle e acompanhamento do processo para eventuais usuários do braço robótico.

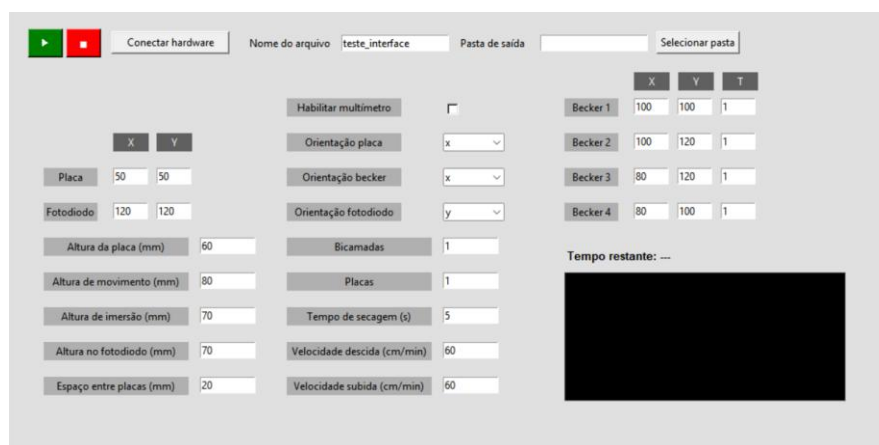


Figura 7: Interface gráfica de controle do braço robótico.

## CONCLUSÕES:

Diante da importância do método camada-a-camada na fabricação de dispositivos, como no caso da língua eletrônica, e das dificuldades práticas encontradas em sua execução, automatizar o processo se mostra uma solução eficaz para facilitar ainda mais sua aplicação e aumentar a eficiência e reprodutibilidade dos resultados. Dessa forma, a construção de um braço robótico do tipo SCARA possibilitou atender com eficácia demandas específicas deste método e se mostrou pronta para ser empregada em atividades rotineiras de pesquisa.

Com o primeiro modelo construído já foi atingido um funcionamento adequado e uma estrutura lógica de código de controle pode ser consolidada. A elaboração de um segundo protótipo permitiu ainda melhorias na estrutura mecânica e eletrônica que poderiam afetar a qualidade dos resultados, além da adição de uma interface gráfica e uma tábua milimetrada como referência do sistema de coordenadas que colaboraram para tornar seu uso mais intuitivo. A construção de um sistema de medição de transmitância para a elaboração da curva de cinética se mostrou também um recurso eficiente para o acompanhamento da qualidade dos resultados, porém ainda enfrenta problemas com ruído externo que serão corrigidos com um melhor isolamento de sua eletrônica. Como etapa final do projeto, a execução do método camada-a-camada deverá ser realizada novamente para ajuste de parâmetros e consolidação de uma versão do braço robótico pronta para uso em laboratório.

Por fim, é importante ressaltar o valor do processo de aprendizado envolvido, que permitiu a prática com áreas fundamentais da instrumentação científica como projeto mecânico, eletrônica e programação, além de uma melhor compreensão do método camada-a-camada e sua aplicação na fabricação de dispositivos.

---

## BIBLIOGRAFIA

DEJAN. **SCARA Robot | How to Build Your Own Arduino Based Robot.** *How to Mechatronics*, 2020. Disponível em: <https://howtomechatronics.com/projects/scara-robot-how-to-build-your-own-arduino-based-robot/>. Acesso em: 16 mar. 2025.

RICHARDSON, J. J.; BJORNMALM, M.; CARUSO. **Technology-driven Layer-by-Layer assembly of nanofilms.** *Science* (New York, N.Y.) 348, aaa2491 (2015).

JJROBOTS. **Pybot: Python + 3D Printed Robotic Arm.** *Instructables*, s.d. Disponível em: <https://www.instructables.com/Pybot-Python-3D-Printed-Robotic-Arm/>. Acesso em: 4 ago. 2025.